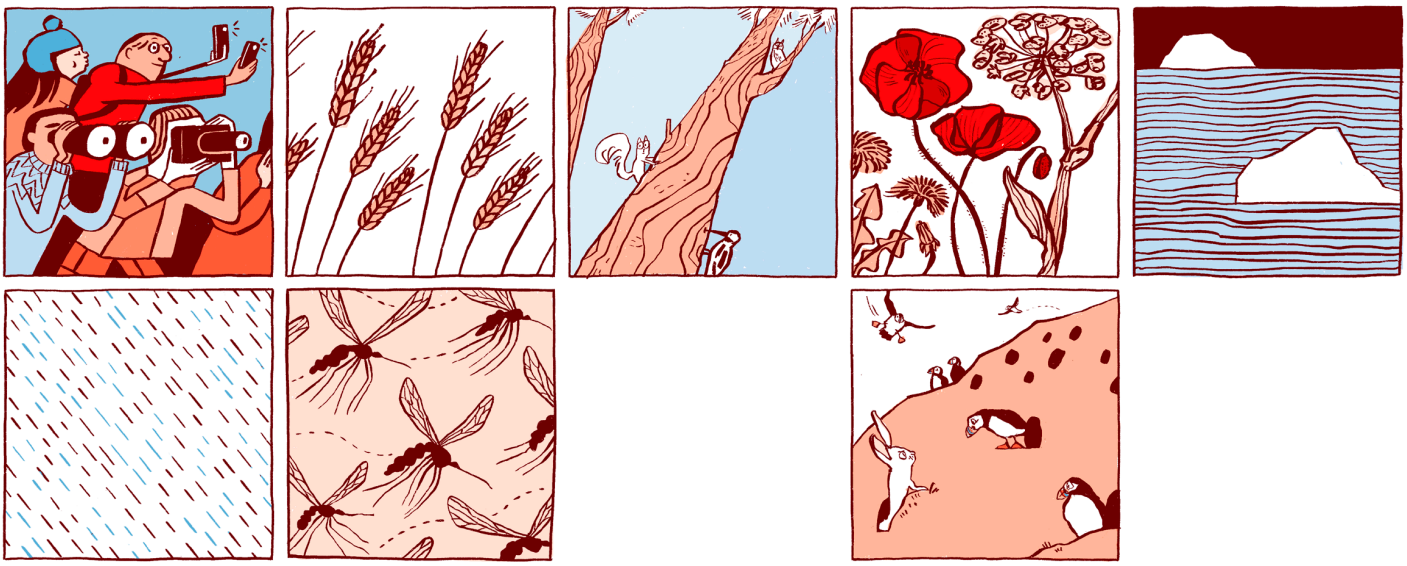
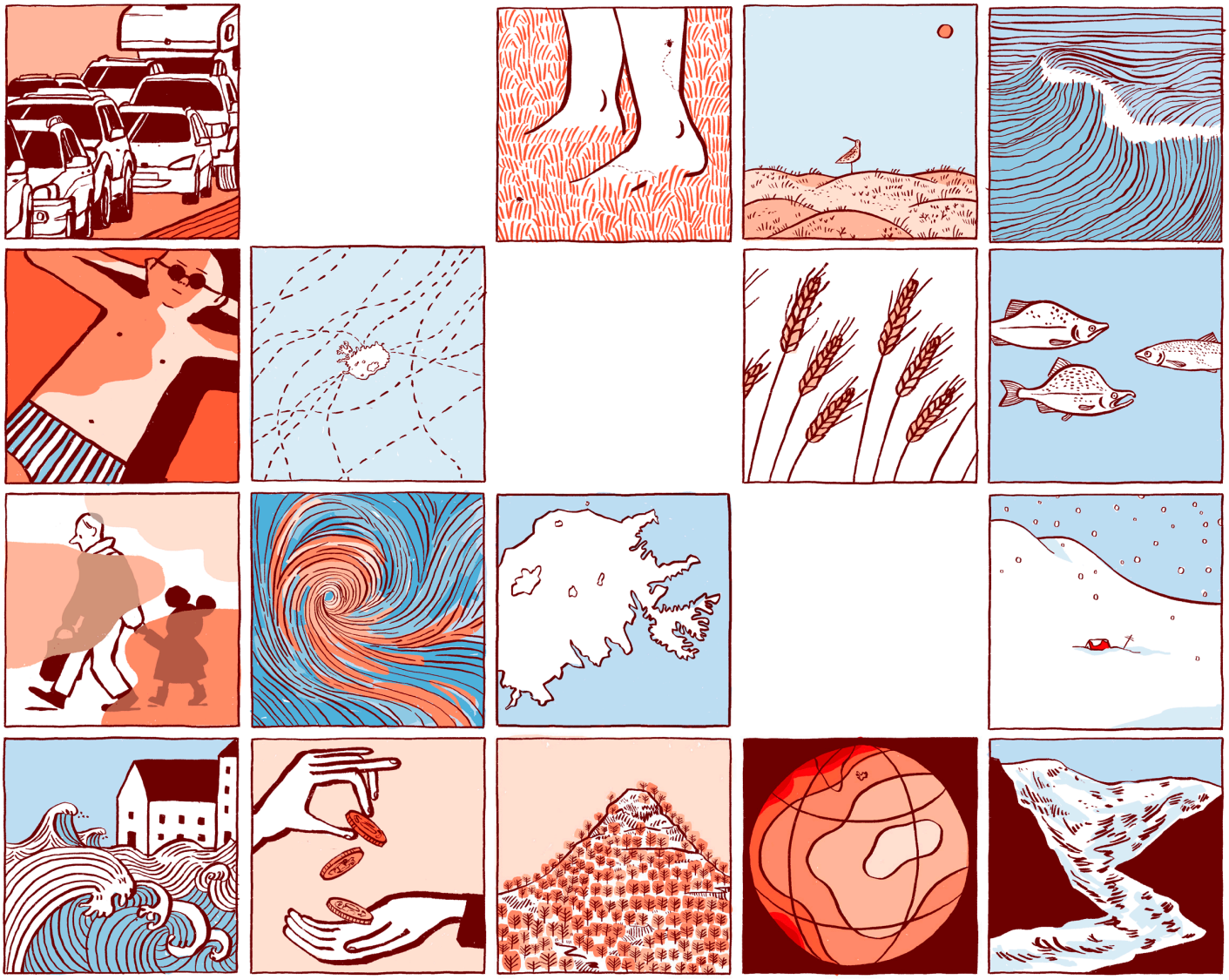


Umfang og afleiðingar hnattrænna loftslagsbreytinga á Íslandi:

Fjórða samantektarskýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar



Í þessari skýrslu er þýtt efni frá SPM-WG1, SPM-WG2, SPM-WG3 og SPM-SYR í skýrslum 6. matshrings IPCC. Þessar þýðingar eru ekki á vegum IPCC, heldur frá Veðurstofu Íslands. Þær miða að því að endurspegla sem best upprunalegt orðalag. Sem undirstofnun Sameinuðu þjóðanna birtir IPCC skýrslur sínar á sex opinberum tungumálum Sameinuðu þjóðanna (arabísku, kínversku, ensku, frönsku, rússnesku og spænsku). Hægt er að nálgast útgáfur af skýrslum IPCC á þessum málum á vefslóðinni www.ipcc.ch. Fyrir frekari upplýsingar er bent á skrifstofu IPCC (Heimilisfang: 7bis Avenue de la Paix, C.P. 2300, 1211 Geneva 2, Switzerland; e-mail: ipcc-sec@wmo.int).
The translations of material in SPM-WG1, SPM-WG2, SPM-WG3 and SPM-SYR from the AR6 assessment cyle reports are not an IPCC translation. It has been provided by the Icelandic Meteorological Office with the aim of reflecting in the most accurate way the language used in the original text. As a body of the United Nations, the IPCC publishes its reports in the six official UN languages (Arabic, Chinese, English, French, Russian), Spanish). Versions in these languages are available for download at www.ipcc.ch. For further information, please contact the IPCC Secretariat (Address: 7bis Avenue de la Paix, C.P. 2300, 1211 Geneva 2, Switzerland; e-mail: ipcc-sec@wmo.int).

Tileinkun:
Þegar skýrsla vísindanefndar var langt komin varð hörmulegt flugslys þar sem létust vísindamennirnir Fríða Jóhannesdóttir og Skarphéðinn G. Þórisson, ásamt flugmanninum Kristjáni Orra Magnússyni. Fríða og Skarphéðinn voru að sinna vöktun á hreindýrastofninum á vegum Náttúrustofu Austurlands. Byggt er á rannsóknum þeirra í þessari skýrslu, auk þess sem Skarphéðinn hafði lesið hluta af efni skýrslunnar yfir. Þessi skýrsla er tileinkuð minningu þeirra.

Guðrún Pálsdóttir las próförk og samræmdi málfar.
Rán Flygenring myndskreytti skýrsluna.
Hönnun og umbrot: Anna Hulda Ólafsdóttir.
Prentun: Svansprent.

Hvernig vitna á í skýrsluna:
Halldór Björnsson, Anna Hulda Ólafsdóttir, Bjarni Diðrik Sigurðsson, Borgný Katrínardóttir, Brynhildur Davíðsdóttir, Gígja Gunnarsdóttir, Guðfinna Th. Aðalgeirsdóttir, Guðjón Már Sigurðsson, Helga Ögmundardóttir, Hildur Pétursdóttir, Hlynur Bárðarson, Starri Heiðmarsson og Theódóra Matthíasdóttir. (2023). Umfang og afleiðingar hnattrænna loftslagsbreytinga á Íslandi. Fjórða samantektarskýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar. Veðurstofa Íslands.

ISBN 978-9935-9414-2-8 (Bók) - ISBN 978-9935-9414-3-5 (vefútgáfa)

Um skýrsluna

Þessi skýrsla er skrifuð af vísindanefnd um loftslagsbreytingar sem umhverfis- og auðlindaráðherra skipaði þann 3. maí 2021. Nefndinni var ætlað að vinna að gerð vísindaskýrslu um áhrif loftslagsbreytinga á náttúrfar og samfélag á Íslandi. Tekið var fram að skýrslan skyldi taka mið af skýrslum Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC) og byggja á víðtæku samráði við íslenskt vísindasamfélag. Á þeim grunni skyldi nefndin setja fram nýjustu og bestu upplýsingar um áhrif loftslagsbreytinga á Íslandi. Við útgáfu skýrslunnar var skipan nefndarinnar eftirfarandi:

Halldór Björnsson, Veðurstofu Íslands, formaður,
Bjarni Diðrik Sigurðsson, Landbúnaðarháskóla Íslands,
Borgný Katrínardóttir, Náttúrufræðistofnun Íslands,
Brynhildur Davíðsdóttir, Háskóla Íslands,
Gígja Gunnarsdóttir, Embætti landlæknis,
Guðfinna Th. Aðalgeirsdóttir, Háskóla Íslands,
Guðjón Már Sigurðsson, Hafrannsóknastofnun,
Helga Ögmundardóttir, Háskóla Íslands,
Hildur Pétursdóttir, Hafrannsóknastofnun,
Hlynur Bárðarson, Hafrannsóknastofnun,
Starri Heiðmarsson, Náttúrustofu Norðurlands vestra.

Ritari nefndarinnar var *Anna Hulda Ólafsdóttir, Veðurstofu Íslands* og henni til aðstoðar var *Theódóra Matthíasdóttir, Veðurstofu Íslands.*

Árið 2022 stóð nefndin fyrir 11 málstofum um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra. Þangað var boðið þeim vísindamönnum sem hafa fengist við loftslagsrannsóknir hér á landi, sem og fulltrúum helstu stofnana og fyrirtækja sem efninu tengjast. Alls voru þátttakendur rúmlega 240 og þar af fluttu rúmlega 100 erindi. Eftirfarandi aðilar fluttu erindi á þessum málstofum, lögðu nefndinni til efni eða lásu hluta af drögum hennar yfir:

Ágúst Gunnar Gylfason, Áslaug Geirsdóttir, Aldís Erna Pálsdóttir, Alejandro Salazar Villegas, Allyson Macdonald, Alma D. Möller, Andri Gunnarsson, Andréa Giorgio Raphael Massad, Angel Ruiz Angulo, Anna Guðrún Þórhallsdóttir, Anna Karlsdóttir, Anton Örn Karlsson, Ari Trausti Guðmundsson, Arnfríður Guðmundsdóttir, Arnór Snorrason, Ásgrímur Ásgrímsson, , Ásta Karen Helgadóttir, Auður Alfa Ólafsdóttir, Berglind Pétursdóttir, Björn Björnsson, Bolli Pálmason, Borgþór Magnússon, Brynhildur Bjarnadóttir, Brynja Hrafnkelsdóttir, Catherine Chambers, Daði Már Kristófersson, Dóra Guðrún Guðmundsdóttir, Edda Sif Aradóttir, Egill Maron Þorbergsson, Eiríkur Bergmann, Erla Sturludóttir, Erpur Hansen, Ester Rut Unnsteinsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Finnur Ricart Andrason, Finnur Ingimarsson, Freydís Vigfúsdóttir, Frida Lager, Gísli Már Gíslason, Gísli Víkingsson, Guðjón Bragason, Guðmundur J. Óskarsson, Guðmundur Valsson, Guðmundur Þórðarson , Guðni Guðbergsson, Guðni Þorvaldsson, Guðrún Aspelund, Guðrún Gísladóttir, Guðrún Nína Petersen, Guðrún Pálsdóttir, Gunnar Guðmundsson, Gunnar Jakobsson, Halldór Þorgeirsson, Hlöðver Stefán Þorgeirsson, Hlökk Theodórsdóttir, Hólmfríður Þorgeirsdóttir, Hrafnhildur Hannesdóttir, Hrafnkell Proppé, Hrannar Smári Hilmarsson, Hrönn Egilsdóttir, Hrund Ólöf Andradóttir, Hulda Stefánsdóttir, Inga Svala Jónsdóttir, Ingibjörg Jónsdóttir, Jón S. Ólafsson, Jóhann Þórsson, Jóhanna Eyrún Torfadóttir, Jóhannes Sturlaugsson, Johannes Welling, Jón Guðmundsson, Jón Kristinn Helgason, Jón Trausti Kárason, Jónas Páll Jónasson, Kjartan Bollason, Kjartan H. Njálsson, Kristín Björg Ólafsdóttir, Kristinn Schram, Lára Jóhannsdóttir, Magni Pálsson, Magnús Jóhannsson, Magnús Örn Agnesar Sigurðsson , María Ingibjörg Kristjánsdóttur, María J. Gunnarsdóttir, Matthew

Roberts, Matthias Kokorsch , Matthías S. Alfreðsson, Ólafur Arnalds, Ólafur K. Nielsen, Ólafur Ögmundarson, Ólafur Páll Jónsson, Páll Valdimar Kolka Jónsson, Pavla Dagsson Waldhauserová, Pawel Wasowicz, Rafn Jónsson, Ragnhildur Finnbjörnsdóttir, Ragnhildur Friðriksdóttir, Rán Flygenring, Rannveig Ólafsdóttir, Reynir Smári Atlason, Sara Öldudóttir, Sigríður Haralds Elínardóttir, Sigríður Jakobínudóttir, Sigríður Jakobínudóttur, Sigríður Þorgeirsdóttir, Sigrún Karlsdóttir, Sigrún Ólafsdóttir, Sigurður Jóhannsson, Sigurður Reynir Gíslason, Sigurður S. Snorrason, Sigurður Sigurðarsson, Sindri Gíslason, Skarphéðinn G. Þórisson, Skúli Skúlason, Snjólaug Árnadóttir, Snorri Sigurðsson, Sóllilja Bjarnadóttir, Sólveig Anna Bóasdóttir, Stefán Már Stefánsson, Steingrímur Jónsson, Steinunn H. Ólafsdóttir, Sveinbjörn Kristjánsson, Sveinn Agnarsson, Teresa Silva, Tinna Þórarinsdóttir, Tómas Jóhannesson, Trausti Jónsson, Viðar Jensson, Þorgerður J. Einarsdóttir, Þórhallur Ingi Halldórsson, Þóroddur Sveinsson, Þórólfur Guðnason, Þorsteinn Hermansson, Þorsteinn Jóhannsson, Þorsteinn Sæmundsson, Þorsteinn Þorsteinsson.

Vísindanefnd þakkar öllum þeim aðilum sem komu á einhvern hátt að gerð skýrslunnar. Án þeirra framlags hefði skýrslan ekki orðið til. Einnig þakkar nefndin Hauki Haukssyni og Pálu Hallgrímsdóttur og forstjóra Veðurstofu Íslands Árna Snorrasyni, fyrir stuðning við verkefnið.

Áður hafa komið út þrjár skýrslur um loftslagsbreytingar og afleiðingar þeirra fyrir íslenska náttúru og samfélag. Árið 2000 kom út skýrslan *Veðurfarsbreytingar og afleiðingar þeirra*, árið 2008 kom út skýrslan *Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi* og árið 2018 kom út skýrslan *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi.*

Í þessari skýrslu er lögð ríkari áhersla á samfélagsleg áhrif en í fyrri skýrslum og fjallað um loftslagsbreytingar í samhengi við menningu, listir og gildismat, siðfræði og menntun. Að auki er fjallað um lýðheilsu, heilbrigðiskerfi og samfélag í sérstökum kafla, sem er breyting frá fyrri skýrslum. Þessi munur á efnistökum ræðst að nokkru af skipunarbréfi ráðherra, en ekki síður af því að þekkingu á þessum þáttum hefur fleygt fram frá útkomu síðustu skýrslu. Þrátt fyrir að þekking málefninu hafi aukist á undanförnum árum skortir þó enn tilfinnanlega upp á rannsóknir á flestum þáttum sem snúa að áhrifum loftslagsbreytinga á Íslandi.



Ávarp umhverfis-, orku- og loftslagsráðherra

Loftslagsbreytingar af mannavöldum eru ein stærsta áskorun sem mannkynið stendur frammi fyrir. Ísland hefur, eins og flestar þjóðir heims, skuldbundið sig til þess að verna loftslagið og draga úr losun gróðurhúsalofttegunda samkvæmt Rammasamningi Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar frá 1992 og bókunum við hann, síðast Parísarsamningnum frá 2015. Á þeim vettvangi hafa íslensk stjórnvöld talað fyrir því að þjóðir heims fylgi eftir viðleitni til að takmarka hækkun hitastigs við 1,5 °C.

Þessi markmið og þau verkefni sem þeim fylgja eru risa stór. Milliríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC) segir ótvírætt að losun gróðurhúsalofttegunda af mannavöldum valdi þeim breytingum sem sjást nú á loftslaginu en þrátt fyrir það hefur losun gróðurhúsalofttegunda aukist á síðustu áratugum. Við eigum því mikið verk fyrir höndum.

Áhrifa loftslagsbreytinga gætir mismikið á jörðinni og eins og Vísindanefnd um loftslagsbreytingar hefur rakið í fyrri skýrslum er áhrifa þeirra þegar farið að gæta á Íslandi. Umtalsverð áhrif sjást í náttúru landsins. Sýnilegastar eru breytingar á jöklum, auk breytinga á vatnafari, lífríki á landi og aðstæðum í sjó, en súrnun sjávar er hraðari og meiri á norðurslóðum en annars staðar á hnettinum.

Þessi skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar er sú fjórða í röðinni og hafa skýrslurnar vaxið að umfangi eftir því sem þekkingu á loftslagsmálum og áhrifum þeirra á samfélagið vindur fram. Margvísleg áhrif loftslagsbreytinga á hinar fjölmörgu hliðar samfélagsins verða sífellt ljósari, og í skýrslunni er fjallað meira um samfélagsleg áhrif en áður. Við þurfum að verða betri í því að skilja áhrif loftslagsbreytinga á samfélagið okkar og gæta sanngirni í þeim umskiptum sem þurfa að eiga sér stað til að ná tökum á útblæstri gróðurhúsalofttegunda.

Niðurstöðurnar skýrslunnar eru ekki óvæntar. Haldi hlýnun áfram má gera ráð fyrir miklum breytingum á umhverfi okkar, útbreiðslu tegunda og lífríki bæði á landi og í hafi. Að auki er líklegt að loftslagsbreytingar hafi víðtæk áhrif á samfélagið, atvinnuvegi, innviði og efnahag. Áhrifin eru mismikil, en hafa í för með sér verulegar áskoranir. Í viðbrögðum við loftslagsbreytingum geta þó leynst tækifæri og nýsköpun í atvinnu- og iðnaðarþróun sem þegar má merkja í íslensku atvinnulífi.

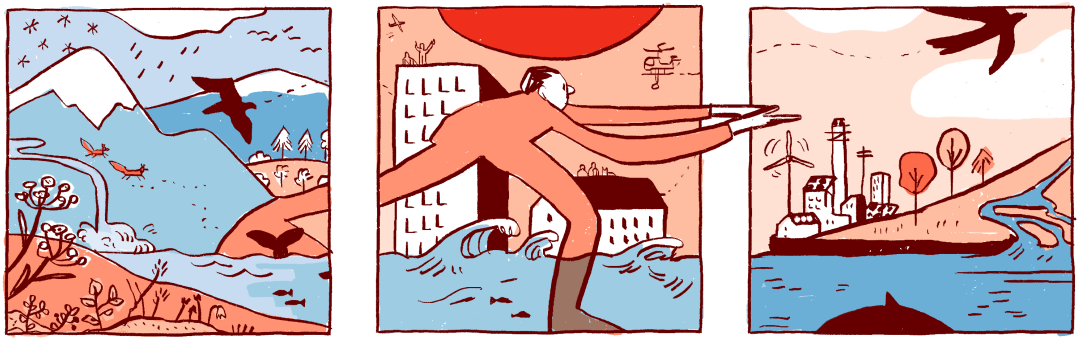
Við viljum byggja upp Ísland sem er loftslagsþolið. Aðgerðir til aðlögunar samfélagsins að þeim breytingum eru óumflýjanlegar og þar skiptir samstarf stjórnsýslustiga máli. Sveitarfélögin eru mikilvægur hlekkur í aðlögun að þeim tilteknu breytingum sem verða í hverju samfélagi fyrir sig. Eldgos, skriðuföll og jarðhræringar eru hluti af tilveru okkar hér á Íslandi og hafa verið alla tíð. Við verðum ávallt að líta til langs tíma í okkar áætlunum. Við verðum að tryggja aðgengi að góðum og skiljanlegum upplýsingum um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi fyrir alla sérstaklega þá sem skipuleggja innviði og byggð í landinu. Jafnframt verðum við að byggja aðlögunar- og mótvægisaðgerðir á bestu fáanlegu upplýsingum. Þessi skýrsla er því mikilvægur grundvöllur þeirrar vinnu undir aðlögunaráætlun að loftslagsbreytingum.

Skýrslan sem nú er komin út er viðamikil og eykur enn á þekkingu málaflokksins. Stjórnvöld munu nýta hana til áframhaldandi verka í þágu loftslagsmála og aðlögunar samfélagsins að breyttum heimi. Höfundum eru færðar bestu þakkir fyrir vel unnin störf.

Guðlaugur Þór Þórðarson, umhverfis-, orku- og loftslagsráðherra



Ágrip



Efnisyfirlit ágrips

A Meginatriði og ályktanir 8
Ágripsgrein : Ályktanir nefndar 8
A.1 Samantekt staðreynda 8
A.2 Ályktanir nefndar 8
B Þróun loftslags 11
Ágripsgrein : Þróun loftslags á Íslandi á næstu áratugum 11
C Áhrif loftslagsbreytinga 13
Ágripsgrein : Náttúrufar 13
Ágripsgrein : Lífríki á landi 16
Ágripsgrein : Ástand sjávar og lífríki í sjó 19
Ágripsgrein : Samfélag, menning og félagslegir innviðir 22
Ágripsgrein : Lýðheilsa, heilbrigðiskerfið og samfélagið 25
Ágripsgrein : Atvinnuvegir 27
Ágripsgrein : Byggðir innviðir 30
Ágripsgrein : Áhætta, náttúruvá og áhættustýring 33
D Aðlögun að loftslagsbreytingum 35
Ágripsgrein : Aðlögun 35

A Meginatriði og ályktanir

A.1 Samantekt staðreynda

Loftslagsbreytingar hafa haft umtalsverð áhrif á náttúru Íslands, s.s. afkomu jökla, vatnafar, lífríki á landi og aðstæður í sjó. Veðurfar og náttúruaðstæður á landinu og í hafinu umhverfis það verða í lok aldarinnar án fordæma frá upphafi byggðar á Íslandi. Súrnun sjávar og hlýnun munu breyta umhverfisaðstæðum og útbreiðslusvæðum tegunda í hafi.

Umtalsverð áhrif loftslagsbreytinga á atvinnuvegi, byggða innviði og efnahag skapa verulegar áskoranir, jafnvel í geirum þar sem viðbrögð við hlýnun geta haft jákvæð áhrif í för með sér. Sjávarstöðubreytingar og aukin náttúruvá geta aukið samfélagslegt tjón og áhrif loftslagsbreytinga erlendis skapað umtalsverða kerfisáhættu hérlendis, t.d. með áhrifum á aðfangakeðjur, fæðuöryggi og lýðheilsu. Loftslagsbreytingar eru stærsta heilsufarsógn sem mannkynið stendur frammi fyrir.

Loftslagsvandinn er efnahagsmál sem mun hafa áhrif á verðlag, fjármálastöðugleika og öryggi fjármálakerfisins. Aðlögun að og viðbrögð við loftslagsbreytingum hafa í för með sér áskoranir sem krefjast umbyltingar í neyslu, iðnaði og tækni. Áhrif loftslagsbreytinga ná meðal annars til félagslegra innviða, menningar, sjálfsmyndar þjóðar og vekja upp siðferðilegar spurningar gagnvart öðrum þjóðum, komandi kynslóðum og vistkerfum.

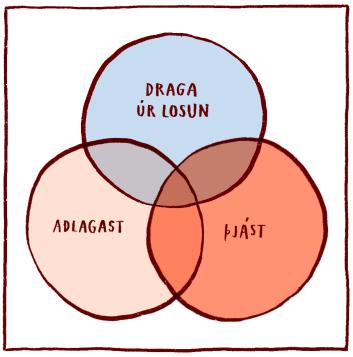
A.2 Ályktanir nefndar

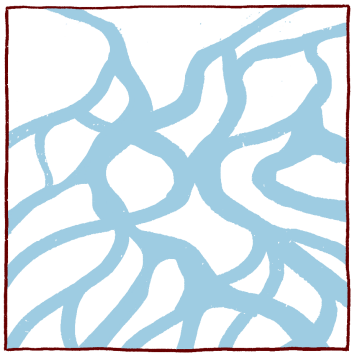
- Mikilvægt er að draga sem mest úr losun gróðurhúsalofttegunda og aðlagast þeim breytingum sem óumflýjanlegar eru.
- Ábendingar úr fyrri skýrslum vísindanefndar, um að áhrif loftslagsbreytinga á Íslandi verði ekki umflúin, hafa komið fram.
- Regluleg vöktun og greining á náttúrufari, lífríki og samfélagi er forsenda þess að hægt sé að fylgjast með þeim umbreytingum sem loftslagsbreytingar hafa í för með sér. Mikilvægt er að fjármögnun og önnur nauðsynleg aðföng séu tryggð. Samstarf ólíkra vísindahópa og opið aðgengi að gögnum er lykilatriði svo niðurstöður nýtist sem víðast.
- Fjármögnun loftslagsaðgerða, þar með talið aðlögunar, þarf að vera trygg. Mikilvægt er að hvatar séu til staðar fyrir aðlögun og samdrátt í nettólosun gróðurhúsalofttegunda. Mismunandi form fjármögnunar þurfa að vera til staðar og samkeppnissjóðir henta ekki fyrir allar tegundir aðgerða.
- Mikilvægt er að mótvægis- og aðlögunaraðgerðir auki ekki misskiptingu í samfélaginu. Sé þess ekki gætt eykst hætta á að það dragi úr áhrifum aðgerða, þær missi marks og skapi aðrar samfélagslegar áskoranir.
- Áhrif loftslagsbreytinga á ástand og súrnun sjávar munu á næstu áratugum valda breytingum og álagi á vistkerfi sjávar. Mikilvægt er að öðru álagi, t.d. vegna ofnýtingar, rasks búsvæða og mengunar, sé haldið í lágmarki. Skilvirk fiskveiðistjórnun verður eingöngu tryggð með samfelldum rannsóknum og vöktun.
- Áhrif loftslagsbreytinga á náttúrufar á landi eru auðsæ og víðfeðm og mælingar benda til að áhrifin aukist stöðugt. Rannsóknir þurfa að fylgja eftir þessum hröðu breytingum sem kallar á aukið samstarf ólíkra hópa hvað varðar mælingar, vöktun, greiningar og hermilíkön.
- Skipuleggja þarf alla ræktun vel, t.d. í nýjum frístundabyggðum, landbúnaði og skógrækt. Við mat á nýjum svæðum þarf að taka tillit til nágrannasvæða þeirra, dreifingar aðfluttra tegunda og áhrifa á líffræðilega fjölbreytni.

- Sjávarstöðubreytingar verða mikil áskorun fyrir strandsamfélög og mikilvægt að takast á við þær svo draga megi úr tjóni í framtíðinni. Brýnt er að vanda til skipulagsákvarðana því þær munu hafa áhrif löngu eftir að sjávarstaða hækkar verulega.
- Aukin náttúruvá, svo sem vegna aftakaúrkomu, hvassviðra, hættu á flóðum í ám og úr jaðarlónum, skriðufalla, sjávarflóða, tíðari eldgosa og gróðurelda, kallar á að áhættustýring sé í stöðugri endurskoðun og taki tillit til sviðsmynda.
- Áhættumat og áhættustýring er nauðsynlegur hluti af aðlögun að loftslagsbreytingum. Greina þarf loftslagsáhættu fyrir alla geira og samfélagshópa svo grípa megi til viðeigandi aðgerða til að draga úr henni. Þar gegna stjórnvöld, auk fjármála- og vátryggingageirans, lykilhlutverki.
- Áhættustýring og aðlögun geta dregið úr því tjóni sem atvinnuvegir verða fyrir og í sumum tilvikum geta aðgerðir skilað ábata, svo sem innan landbúnaðarins og orkugeirans. Langtímastefnumörkun um uppbyggingu innviða og markviss auðlindastýring er nauðsynleg í þessu samhengi.
- Þekkingu á kerfislægum áhættum tengdum loftslagsbreytingum er mjög ábótavant. Þetta á m.a. við hvað varðar áhrif loftslagsbreytinga í öðrum löndum og afleiðingar þess fyrir íslenskt samfélag. Útbúa þarf og innleiða viðbragðsáætlanir til þess að bregðast við slíkum áhættum til langs tíma.
- Afar mikilvægt er að skilja áhrif loftslagsbreytinga á samfélag og menningu, ekki síst til að tryggja réttlæti, styðja við lýðræði og loftslagsaðgerðir. Mikill skortur er á rannsóknum á þessu sviði og því er brýnt að þær verði efldar.
- Skilningur á áhrifum loftslagsbreytinga á efnahag og atvinnuvegi og á afleiddum samfélagslegum áhrifum er forsenda loftslagsaðgerða. Brýnt er að stórauka rannsóknir á samfélagslegum og hagrænum áhrifum loftslagsbreytinga og viðbrögðum við þeim.
- Loftslagsbreytingar eru þegar farnar að hafa áhrif á ýmsa byggða innviði, svo sem innviði samgangna, vatnsveitna, fráveitu, orkuöflunar og -dreifingar. Minni vatnsveitur, og þau samfélög sem nýta þær, eru berskjaldaðri fyrir áhrifum. Meta þarf áhrif á eftirspurn, áhættu og forgangsraða aðgerðum.
- Nauðsynlegt er að auka þekkingu á áhrifum loftslagsbreytinga á lýðheilsu, heilbrigðiskerfi og samfélag í víðasta skilningi. Samhliða vaxandi þekkingu á þessu sviði á alþjóðavísu og stöðu áhrifaþátta heilbrigðis á Íslandi hafa skapast betri forsendur til að auka þekkingu hvað þetta varðar. Í þessu samhengi þarf m.a. að horfa til mannfjöldaþróunar, þar með talið loftslagsflóttafólks, og annarra lýðfræði- og samfélagslegra breytinga.
- Sveitarfélög á Íslandi eru, enn sem komið er, ekki nægilega vel í stakk búin til þess að takast á við áskoranir sem felast í loftslagsbreytingum. Nauðsynlegt er að þau hafi fjármagn, gögn og verkfæri til þess að sinna sínum skyldum. Aukin samvinna ríkis og sveitarfélaga er þar lykilatriði.
- Tryggja þarf undirstöður loftslagsþolins skipulags með skýrum markmiðum, leiðbeiningum, hvatningu og stuðningi við skipulagsyfirvöld í héraði. Mikilvægt er að tekið sé meira tillit til aukinnar náttúruvár við skipulagsgerð.

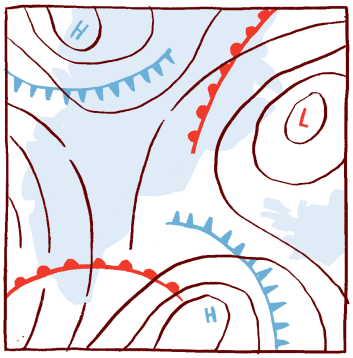
Þessi skýrsla staðfestir, svo ekki verður um villst, að loftslagsbreytingar eru byrjaðar að breyta náttúrufari og lífsskilyrðum fólks á Íslandi með vaxandi áskorunum fyrir efnahag, samfélag og náttúru. Til að tryggja að þær áskoranir verði ekki meiri en við er ráðið þarf umbyltingu í lífsháttum og umgengni við náttúruna. Þar gegna stjórnvöld, atvinnulíf og stefnumótendur lykilhlutverki. Draga þarf úr losun eins hratt og unnt er og aðlaga samfélagið þannig að það ráði við álagið. Loftslagsvá er viðfangsefni samfélagsins alls og forðast þarf andvaraleysi gagnvart áhættunni.

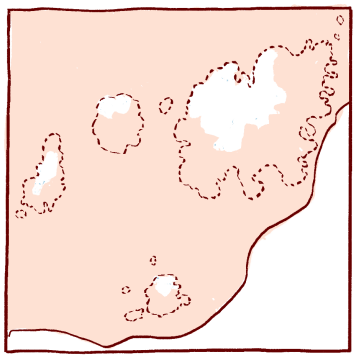






B Þróun loftslags



Áherslupunktar

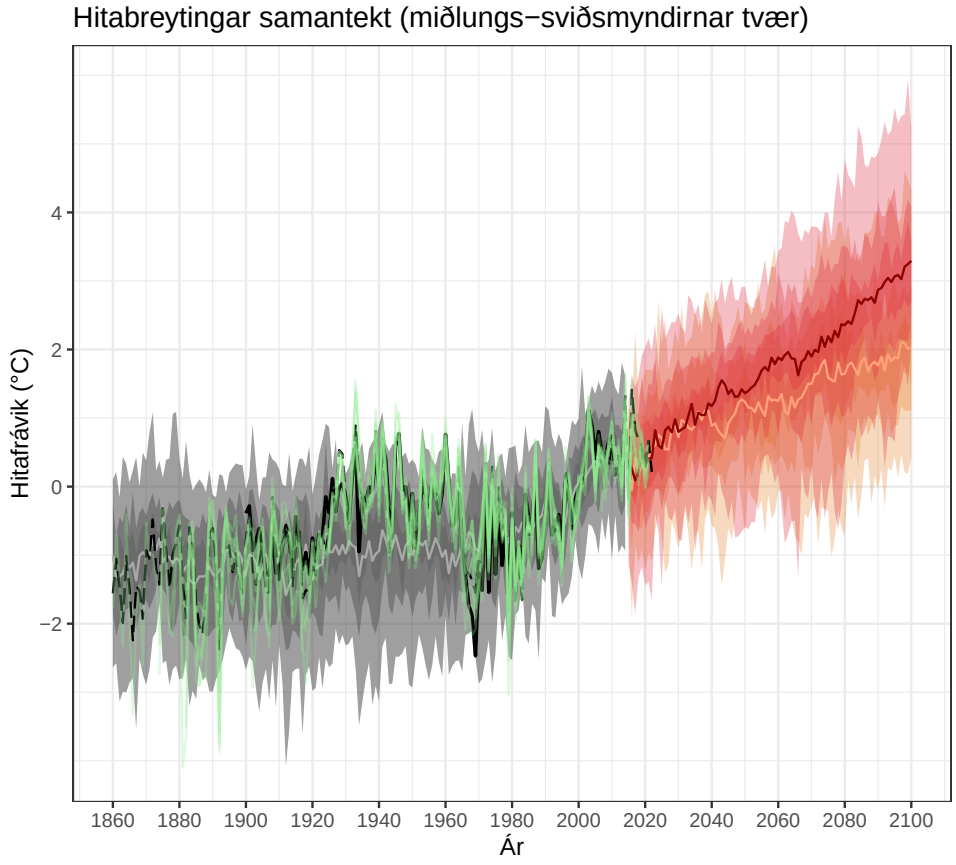
- Það stefnir í að veðurfar á Íslandi í lok aldarinnar verði gjörólíkt því sem verið hefur frá landnámi. Hugsanlega án fordæma síðan síðasta jökulskeiði lauk, fyrir um tíu þúsund árum.
- Loftslagslíkön ná að herma þá hlýnun sem varð á Íslandi og nærliggjandi svæðum á síðustu áratugum eingöngu ef reiknað er með sögulegri aukningu gróðurhúsalofttegunda.
- Fram að miðbiki aldarinnar hlýnar á bilinu 1,0 til 1,7 °C [-1,1 til 2,6] frá meðaltali áranna 1986 til 2015 samkvæmt loftslagslíkönum og lítill munur er á hlýnun milli ólíkra sviðsmynda um losun gróðurhúsalofttegunda.
- Í lok aldarinnar dregur sundur milli sviðsmynda, í þeirri heitustu er hlýnunin 3,5 °C [2,3 til 5,4] en 1,0 °C [-1,0 til 4,1] í þeirri köldustu. Í sviðsmyndum sem liggja á milli þeirra heitustu og köldustu er hlýnunin í lok aldarinnar 2,0 til 2,8 °C [0,0 til 5,4].
- Niðurstöður líkanreikninga benda til þess að hlýnun verði meiri norðan við landið en sunnan við það. Í mörgum líkönum gætir tímabundinnar, staðbundinnar kólnunar.
- Líkanreikningar sýna að ársúrkoma gæti aukist um rúmlega 1% fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Aftakaúrkoma gæti aukist um 5 til 15%, sem er aukning um 4 til 15 mm á sólarhring frá núverandi úrkomu fyrir flest svæði.

Verði ekki dregið úr losun gróðurhúsalofttegunda verður veðurfar á Íslandi í lok aldarinnar gjörólíkt því sem verið hefur frá landnámi og hugsanlega án fordæma síðan síðasta jökulskeiði lauk, fyrir um tíu þúsund árum. Loftslagslíkön ná að herma þá hlýnun sem varð á Íslandi og nærliggjandi svæðum á síðustu áratugum sé reiknað með sögulegri aukningu gróðurhúsalofttegunda. Í útreikningum þar sem styrk gróðurhúsalofttegunda er haldið föstum herma líkönin ekki þá hlýnun sem orðið hefur á síðustu áratugum.

Útreiknuð hlýnun á lofthita fram að miðbiki aldarinnar er í mismunandi sviðsmyndum á bilinu 1,0 til 1,7 °C [-1,1 til 2,6] frá meðaltali áranna 1986 til 2015. Fram að miðbiki aldarinnar er ekki mikill munur á hlýnuninni fyrir ólíkar sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda.

Á síðari hluta aldarinnar dregur sundur með ólíkum sviðsmyndum og í heitustu sviðsmyndinni er hlýnun á Íslandi og nærliggjandi svæðum í lok aldarinnar 3,5 °C [2,3 til 5,4] en 1,0 °C [-1,0 til 4,1] í þeirri köldustu. Af þeim fjórum losunarsviðsmyndum sem voru skoðaðar munu sú heitasta og sú kaldasta tæplega raungerast. Í sviðsmyndum sem liggja á milli þeirra heitustu og köldustu

er hlýnunin í lok aldarinnar 2,0 til 2,8 °C [0,0 til 5,4], sjá mynd 1.

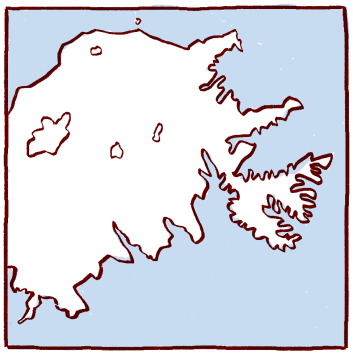
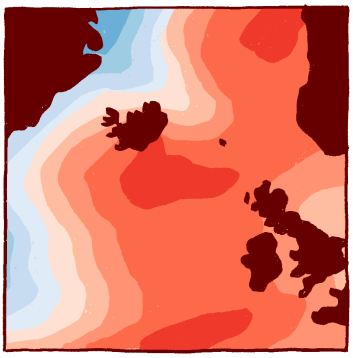


Mynd 1: Samantekt hitabreytinga í Íslandsreitnum. Sögulegar keyrslur, og hitagögn. auk miðlungssviðsmynda um hlýnun. Sjá nánar kafla þrjú.

Líkönum ber illa saman um úrkomubreytingar til loka aldarinnar en útlit er fyrir að úrkoma aukist um rúmlega 1% fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Niðurstöður benda þó til þess að aukningin verði meiri á haustmánuðum en minnst síðla vetrar. Ákefð úrkomu eykst og aftakaúrkoma gæti aukist um 5 til 15%. Það er aukning um 4 til 15 mm á sólarhring frá núverandi úrkomu fyrir flest svæði en meira fyrir þá staði þar sem aftök eru mest. Í heitari sviðsmyndum styttist endurkomutími núverandi 100 ára úrkomuatburðar niður í 12 til 17 ár.

Niðurstöður líkanreikninga benda til þess að hlýnun verði meiri norðan við landið en sunnan við það. Jafnvel þó að hlýni á öldinni í öllum sviðsmyndum og flestum líkönum gætir tímabundinnar staðbundinnar kólnunar í mörgum þeirra. Slík kólnun er algengari suður af landinu og gætir skemur í heitari sviðsmyndum. Í 85 til 95% líkana gætir hennar skemur en 20 ár.

C Áhrif loftslagsbreytinga

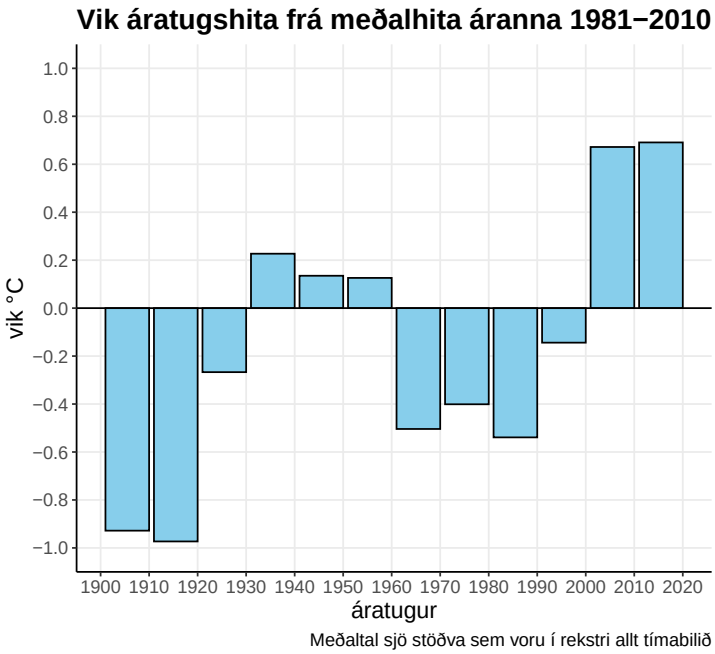

Náttúrufar

Áherslupunktar

- Frá hámarki sumarhlýinda á landinu, eftir að síðasta jökulskeiði lauk, fór að kólna fyrir um 6–8 þúsund árum. Kaldast var við lok 19. aldar.
- Verulega hefur hlýnað frá upphafi 20. aldar og er hlýnunin um 1,0 °C á öld, miðað við tímabilið 1900 til 2020, meiri að vetri (1,4 °C/100 ár) og minni að sumri (0,7 °C/100 ár). Úrkoma hefur aukist og aftakaúrkoma hefur valdið bæði flóðum og skriðuföllum.
- Norður-Atlantshaf hefur hlýnað verulega á síðustu áratugum en talsverðar sveiflur eru í sjávarhita umhverfis landið. Á fyrsta áratug þessarar aldar varð markverð kólnun suðvestur af landinu en hennar gætir ekki lengur.
- Jöklar á Íslandi hafa minnkað um 19% að flatarmáli frá þeim tíma sem þeir náðu mestri útbreiðslu í lok 19. aldar. Nokkrir jöklar hafa horfið og vegna hörfunar jökla stækka jaðarlón og ný myndast.
- Útreikningar, byggðir á sviðsmyndum um loftslagsbreytingar, benda til þess að haldi Parísarsamningurinn muni rýrnun jökla á Íslandi samt verða um 40–50%. Rýrnun jökla verður meiri takist ekki að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda í samræmi við Parísarsamningsins.
- Sjávarstöðubreytingar við Ísland munu ráðast af landhæðarbreytingum, hlýnun hafsins og massatapi ísbreiðanna á Suðurskautslandinu og Grænlandi. Mikil óvissa er um þróun ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu, sérstaklega eftir aldamótin 2100.
- Til aldamóta gæti afstæð sjávarstaða hækkað um allt að 1,2 m, þar sem landsig er hvað mest. Á svæðum, þar sem landris er mest, getur afstæð sjávarstaða fallið um 1,5 m.
- Mikil óvissa ríkir um þróun hnattrænnar sjávarstöðu og sjávarstöðu í kringum Ísland eftir 2100. Ítrustu mörk verstu sviðsmyndar sýna margra metra hækkun árið 2150, en miðgildi hækkunar er á bilinu 1–2 m hér við land og víða undir einum metra.

- Sjávarstöðubreytingar munu halda áfram öldum saman jafnvel þó að náist að minnka losun gróðurhúsalofttegunda. Skipulagsákvarðanir sem teknar eru nú á dögum munu hafa áhrif á byggð og innviði í nokkur hundruð ár.

Gögn um fornveðurfar á Íslandi falla í megindráttum að veðurfarssögu á norðurhveli. Frá því síðasta jökulskeiði lauk, fyrir um tíu þúsund árum, voru mestu sumarhlýindin á tímabilinu fyrir 6–8 þúsund árum. Síðan skiptust á óregluleg hlýrri og kaldari tímabil en í heildina kólnaði og kaldast varð í lok 19. aldar. Veðurmælingar sýna að verulega hefur hlýnað frá upphafi 20. aldar og er hlýnunin um 1,0 °C á öld miðað við tímabilið 1900 til 2020, meiri að vetri (1,4 °C/100 ár) og minni að sumri (0,7 °C/100 ár). Hlýnunin var ekki órofa, hlýskeið var um miðbik aldarinnar, kuldakast náði hámarki í lok 8. áratugarins og um miðbik þess 10. fór að hlýna ákaft sjá mynd 2.



Mynd 2: Þróun meðalhita á Íslandi frá aldamótunum 1900. Myndin byggir á meðaltölum hvers áratugar og sýnd eru vik frá meðaltali áranna 1981–2010. Myndin sýnir gögn frá sjö stöðvum víðsvegar um landið. Sjá nánar kafla tvö.

Síðustu ár hefur hægt á þessari hlýnun en miðað við síðustu öld er hlýtt á landinu. Meðalhiti áratuga á 21. öld er rúmlega 0,4 °C hærri en þegar hlýjast var á síðustu öld. Þá hafa óvenjuhlý sumur slegið hitamet á nokkrum veðurstöðvum. Sem dæmi má nefna að sumarið 2021 var það hlýjasta frá upphafi mælinga á Akureyri, Egilsstöðum, Dalatanga og Grímsstöðum á Fjöllum. Eins hafa óvenjulegar sveiflur í hita einkennt mánaðarmeðaltöl síðustu ár. Til dæmis var nóvember 2022 óvenjuhlýr en desember sama ár sá kaldasti á landinu síðan 1973, sums staðar sá kaldasti í 100 ár eða meira. Sambærilegar sveiflur í hitastigi hafa þó orðið á kuldaskeiðum.

Úrkoma á Íslandi hefur aukist eftir aldamótin og er meðalársúrkoma á landinu um 5–10% meiri en fyrir þau. Þó aukning sé í hámarksúrkomu hvers árs eru þau gögn mjög sveiflukennd og leitnin er ekki marktæk. Á síðustu árum hafa orðið nokkur skyndiflóð vegna úrhellisrigningar í brattlendi við byggð. Auk þess hafa orðið alvarleg flóð og skriðuföll vegna óvenju mikillar úrkomu sem hefur varað nokkra daga. Þannig var uppsöfnuð úrkoma á Seyðisfirði, dagana 14.–18. desember 2020, samtals 569,9 mm, sem er það mesta sem mælst hefur hér á landi. Óvenju hlýtt var þessa daga og því féll þessi úrkoma sem rigning. Afleiðingarnar voru mestu skriðuföll í sögu Seyðisfjarðarbyggðar.

Flóð ráðast m.a. af úrkomuákefð, uppsöfnun úrkomu, hlutfalli snævar í úrkomu, leysingu og snjósöfnun. Hlýnun hefur áhrif á ýmsar tímasetningar, t.d. upphaf leysinga og vorflóða og aukin úrkoma og hlýindi að vetri geta aukið tíðni flóða yfir haust og vetrarmánuði, en fækkað þeim að vori og að sumarlagi. Útreikningar byggðir á niðurstöðum loftslagslíkana benda til þess að stærð og tíðni flóða geti aukist á næstu áratugum. Þá eykur þiðnun sífrera hættu á skriðuföllum.

Norður-Atlantshaf hefur hlýnað verulega á síðustu áratugum, en talsverðar sveiflur eru í sjávarhita umhverfis landið. Markverð kólnun, sem varð á hafsvæði suðvestur af landinu á öðrum

áratug þessarar aldar, er nú ekki sýnileg lengur. Veltihringrás Atlantshafsins (AMOC) hefur verið frekar stöðug síðustu ár en vísindalegar niðurstöður um langtíma stöðugleika hennar eru ekki samhljóma. Rannsóknir hafa bent til að styrkur veltihringrásarinnar muni dragast saman á öldinni en ólíklegt hefur verið talið að hún stöðvist. Nýjar rannsóknir hafa þó dregið úr vissu þess mats. Minnki styrkur veltihringrásarinnar mikið mun það hafa kælandi áhrif á hafsvæðinu umhverfis Ísland, en það er nú um 2–3 °C hlýrra en yfirborð sjávar á sömu breiddargráðu í Kyrrahafinu.



Mynd 3: Skaftafellsjökull og Svínafellsjökull 1920–1925 (ljósm. Ólafur Magnússon) og 2012 (ljósm. Aron Reynisson), jöklarnir slitnuðu hvor frá öðrum í kringum 1940. Við hörfun jökla hafa árfarvegir tekið miklum breytingum eins og rætt er í kafla tvö.

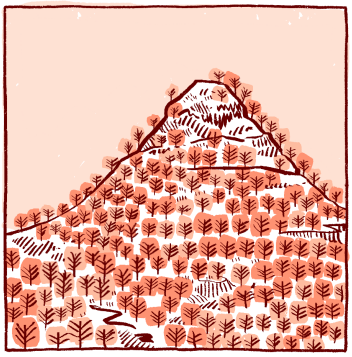
Jöklar á Íslandi hafa minnkað um 19% að flatarmáli frá þeim tíma sem þeir náðu mestri útbreiðslu undir lok 19. aldar. Heldur hefur hægt á rýrnun þeirra eftir 2010. Nokkrir jöklar hafa horfið alveg og vegna hörfunar jökla stækka jaðarlón og ný myndast. Framtíð jökla landsins er mjög háð þróun loftslags og sjávarhita umhverfis landið. Útreikningar byggðir á sviðsmyndum um loftslagsbreytingar benda til þess að haldi Parísarsamningurinn muni rýrnun þeirra samt verða um 40–50%. Rýrnun jökla verður meiri takist ekki að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda í samræmi við Parísarsamninginn.

Sjávarstöðubreytingar við Ísland munu ráðast af hlýnun hafsins og rýrnun ísbreiðanna á Suðurskautslandinu og Grænlandi, auk landhæðarbreytinga á Íslandi. Breytingar á þyngdarsviði jarðar valda því að massatap Grænlandsjökuls hækkar ekki sjávarstöðu við Ísland, en massatap ísbreiðunnar á Suðurskautinu gerir það. Þar er mikil óvissa um þróun massataps, sérstaklega eftir aldamótin 2100. Landhæðarbreytingar eru verulegar, útbreitt landris er um miðbik landsins og við suðausturströndina vegna rýrnunar íslenskra jökla en landsig við suðvestan- og vestanvert landið.

Mat á sjávarstöðubreytingum til aldamóta sýnir að afstæð sjávarstaða gæti hækkað um allt að 1,2 m þar sem landsig er hvað mest. Á þeim svæðum við suðausturströndina, þar sem landris er umtalsvert, getur afstæð sjávarstaða fallið um 1,5 metra. Mikil óvissa ríkir um þróun hnattrænnar sjávarstöðu og sjávarstöðu í kringum Ísland eftir 2100. Ítrustu mörk verstu sviðsmyndar sýna margra metra hækkun árið 2150, en miðgildi hækkunar er á bilinu 1–2 m hér við land og víða undir einum metra.

Sjávarstöðubreytingar munu halda áfram öldum saman jafnvel þó að náist að minnka losun gróðurhúsalofttegunda. Skipulagsákvarðanir sem teknar eru nú á dögum munu hafa áhrif á byggð og innviði í nokkur hundruð ár. Þess vegna þarf að taka tillit til komandi sjávarstöðubreytinga á þessari öld, og þeirri næstu, við skipulagsákvarðanir.

Lífríki á landi


Áherslupunktar

- Fyrirsjáanlegar loftslagsbreytingar auka þörf á vöktun og rannsóknum á ýmsum þáttum náttúrufars. Vísindanefnd ítrekar fyrri ábendingar um að mikilvægt sé að skipuleg viðbrögð við loftslagsvá byggi á haldbærum rannsóknum og þekkingaröflun. Mikilvægt er að skipuleggja og fjármagna vöktun á lykilþáttum íslenskrar náttúru.
- Mikilvægt er að hugað sé vel að skipulagi allrar ræktunar, t.d. í frístundabyggðum, landbúnaði og skógrækt, og tekið sé tillit til nágrannasvæða, líffræðilegrar fjölbreytni og möguleika á dreifingu aðfluttra tegunda.
- Þekking á kolefnisforða íslensks jarðvegs er brotakennd og þarf átak til að bæta þekkingargrunninn. Það er sérstaklega mikilvægt til að hægt sé að leggja mat á gildi mótvægisaðgerða sem fela í sér breytta landnotkun.
- Mikil þörf er á að laga hermilíkön að íslenskri jarðrækt til að hægt verði að skoða sameiginleg áhrif hitafars og úrkomu betur.
- Samstarf ólíkra vísinda- og rannsóknarhópa er mjög mikilvægt fyrir rannsóknir á náttúrufari á Íslandi og breytingar á því. Opin gagnastefna skiptir miklu máli sem hvati til slíks samstarfs og leið til betri nýtingar starfskrafta og fjármuna. Auk þess dregur slíkt úr hættu á gloppum í þekkingu á náttúrufarsbreytingum.

Náttúra landsins

Ábendingar úr fyrri skýrslum vísindanefndar, um að áhrif loftslagsbreytinga á íslenska náttúru verði ekki umflúin, hafa komið fram. Áhrif loftslagsbreytinga á náttúrufar á Íslandi eru auðsæ og víðfeðm og mælingar benda til að áhrifin aukist stöðugt.

Loftslagsbreytingar hafa haft talsverð áhrif á útbreiðslu tegunda. Hlýnandi loftslag hefur til dæmis átt þátt í að gera innfluttum skordýrategundum kleift að ná hér fótfestu (sjá myndir 4 og 6) og leitt til breytinga á útbreiðslu innlendra tegunda.

Hlýnun mun valda hraðari breytingum á gróðurfari landsins eftir miðja öldina, bæði á innlendum og aðfluttum tegundum til landbúnaðar, garðræktar og skógræktar. Allt bendir til að hlýnunin muni auðvelda fleiri aðfluttum tegundum að dreifast út fyrir ræktunarsvæði sín og nánast er öruggt að einhverjar þeirra reynist ágengar í íslenskri náttúru. Þróun í annarri landnýtingu, svo sem beit búsmala, mun einnig hafa mikil áhrif á þessa þróun.

Horfur eru á að skilyrði fyrir vaðfugla fari versnandi víða hérlendis á komandi áratugum. Þar koma meðal annars við sögu gróðurbreytingar vegna hlýnandi loftslags ásamt áformum um

stóraukna ræktun, skóga og orkuplantna, sem mótvægisaðgerð gegn loftslagsbreytingum. Slíkt getur falið í sér umfangsmikið búsvæðatap fyrir vaðfugla. Aukin endurheimt votlendis gæti þó komið vaðfuglum til góða.



Mynd 4: Birkiþéla er blaðvespu-tegund sem fannst hér fyrst árið 2016 og hefur breiðst hratt út um landið. (Ljósm. Brynja Hrafnkelsdóttir, birt með leyfi).

Skammtímaveðuröfgar geta í sumum tilfellum verið meiri áhrifavaldar en meðalbreytingar til lengri tíma litið. Dæmi um slíkt á Íslandi eru neikvæð áhrif veðuröfga á viðkomu rjúpu og fálka.

Mikil fjölgun í stofni tófu á undanförnum áratugum hefur verið tengd við hlýnandi loftslag. Á síðastliðnum árum hafa komið fram vísbendingar um minnkandi viðkomu hjá tegundinni á ákveðnum svæðum, sem mögulega má rekja til loftslagsdrifinna breytinga á fæðustofnum hennar.

Víða erlendis hefur átt sér stað fækkun í hreindýrastofnum og er hún talin tengjast loftslagsbreytingum. Slíkra neikvæðra áhrifa gætir ekki hjá íslenska hreindýrastofninum, enn sem komið er, en lítill erfðabreytileiki gerir stofninn viðkvæman fyrir umhverfisbreytingum.

Fjórar stórar rannsóknir, þar sem hitabreytingum í náttúrulegum kerfum er stýrt, gefa til kynna að áhrif hlýnunar á lífríki mismunandi gróðurlenda og straumvatns geti orðið veruleg ef hlýnun heldur áfram auk þess sem áhrif úrkomubreytinga geta reynst umtalsverð.

Ferskvatnsvistkerfi

Stofnstærð bleikju dregst saman í flestum landshlutum á sama tíma og stofnar urriða eru í uppsveiflu og laxastofnar haldast nokkuð stöðugir. Samskonar þróun í stofnstærð þessara þriggja tegunda er að finna í Norður-Noregi. Hlýnun er talin vera mikilvægur áhrifaþáttur þar sem bleikja er kuldakær tegund og lifir við lægra kjörhitastig en hinar tvær tegundirnar.

Ársmeðalhiti Þingvallavatns hefur hækkað um 0,15 °C á áratug. Langtímavöktun og rannsóknir hafa sýnt breytingar í stofnstærð og lífeðlisfræði bleikjuafbrigða í kjölfar hlýnunar vatnsins. Stofnstærð murtu hefur hrunið og vaxtarhraði ungviðis allra fjögurra afbrigða hefur tekið breytingum. Á sama tíma hefur stofnstærð urriða vaxið meðan magn sviflægra þörunga og krabbadýra hefur minnkað.



Mynd 5: Hnúðlax (Oncorhynchus gorbuscha) er nýr landnemi í íslenskum ám. Hans varð fyrst vart árið 1960 en hefur fjölgað undanfarin ár.

Vísbendingar eru um að hlýnun sjávar eigi þátt í fjölgun hnúðlax (sjá mynd 5 í Norður-Atlantshafi. Hér á landi hefur verið töluverð aukning í veiði á hnúðlaxi og enn meiri í Noregi, þar sem tegundin er farin að valda verulegum vandræðum.

Smittíðni nýrnasýkingar (PKD) í laxfiskum hefur aukist á undanförnum árum, bæði í vötnum á láglendi og á hálendi, og eru dæmi um allt að 97% smittíðni í sumum vötnum. Sýkingin getur valdið afföllum en nær sér ekki á strik nema að vatnshiti hafi náð 12-15 °C í 1-3 mánuði. Hækkun vatnshita í kjölfar hlýnunar getur því haft töluverð neikvæð áhrif á afkomu laxfiska.

Landnotkun og ræktun

Losun gróðurhúsalofttegunda vegna landnotkunar er hlutfallslega mikil af heildarlosun og því mikilvægt að tölur um kolefnisbúskap vistkerfa séu vel undirbyggðar með vönduðum rannsóknum og

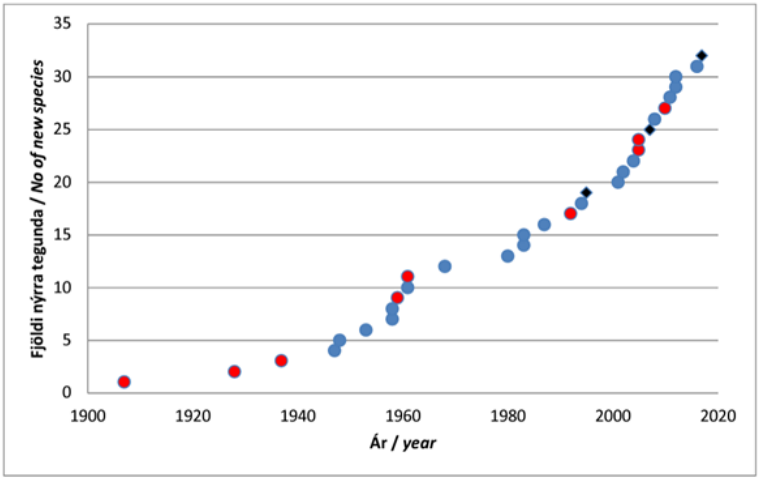
vöktun. Frekari rannsóknir skortir um losun frá landi og vegna breytinga á landnotkun. Þekking á kolefnisforða íslensks jarðvegs er brotakennd og þarf átak til að bæta þekkingargrunninn.

Ekki hefur farið fram almenn úttekt á núverandi og væntanlegum áhrifum loftslagsbreytinga á landbúnað, garðyrkju, skógrækt og landgræðslu síðan snemma á þessari öld. Né heldur fjallað skipulega um aðlögun að komandi loftslagsbreytingum innan þessara geira, nema þá helst fyrir skógrækt og kornrækt.

Ýmsar umhverfisaðstæður landbúnaðar munu breytast verulega á komandi áratugum. Til að skilja betur hvernig þær munu eiga sér stað er mikilvægt að hermilíkön séu löguð að íslenskum aðstæðum og fyrir mismunandi búgreinar.

Jafnvel þó að úrkoma kunni að aukast með hlýnun eykst útgufun einnig og meiri úrkomu þarf til að viðhalda sama rakastigi í jarðvegi og áður. Haldi aukning úrkomu ekki í við útgufun geta áhrif á ræktun orðið neikvæð. Skortur er á skipulegum rannsóknum þar sem skoðuð eru sameiginleg áhrif úrkomu og hitafars.

Jafnvel þó að markmið Parísarsamningsins, um að halda hnattrænni hlýnun innan 2 °C, náist munu ræktarskilyrði hér verða gjörbreytt í lok aldarinnar frá því sem nú er. Síðustu ár var hitafar slíkt að rækta mátti korn til skepnufóðurs á helmingi láglendis. Raungerist hlýrri sviðsmyndir verður hægt að rækta það til manneldis á nær öllu ræktarlandi.



Mynd 6: Ný meindýr á trjám og runnum á Íslandi frá 1900. Rauð tákn eru tegundir sem valda miklu tjóni. Blá tákn eru tegundir sem valda töluverðu eða litlu tjóni. Svört tákn eru tegundir sem hafa numið land en tekist hefur að útrýma. Byggt á grein Guðmundar Halldórssonar o.fl. (2019).

Nautgriparækt (og mjólkurframleiðsla) er loftslagsháð búgrein þar sem hún byggir á hágæða fóðurframleiðslu. Sauðfjárrækt og hrossarækt eru ekki eins næmar fyrir loftslagsbreytingum.

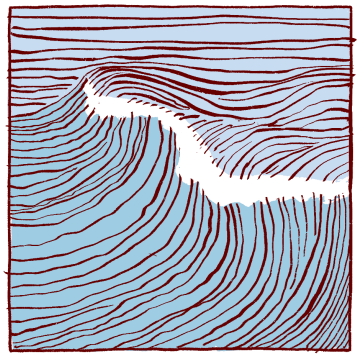
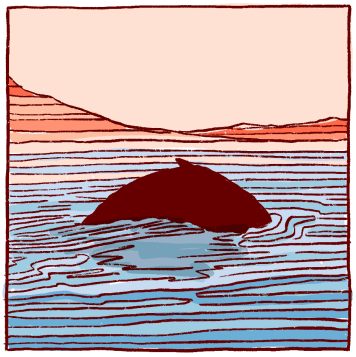
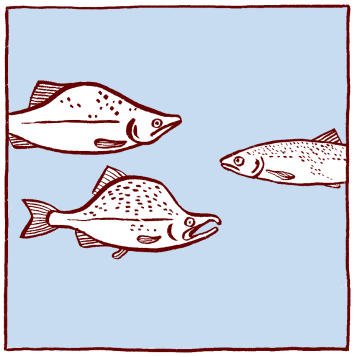
Kolefnishringrásin og mótvægisaðgerðir tengdar landi

Í skýrslunni er yfirlit yfir kolefnishringrás lands og samfélags uppfært með nýjustu vísindalegu þekkingu. Árið 2021 var bein losun manna á CO_2, sem er mikilvægasta gróðurhúsalofttegundin, um 3,5 milljónir tonna og hafði aukist um 4,5% frá 2015. Enn stefnir því í öfuga átt hvað varðar beina losun CO_2 frá samfélaginu, sem er talsvert áhyggjuefni.

Ný greining á kolefnisforða vistkerfa alls landsins sýnir að náttúruskógar, skógræktarsvæði, tún og akrar, sem aðeins þekja tæplega 4% landsins, bera um 50% af ofanjarðarlífmassa þess. Annað vel gróið land, mýrlendi, graslendi og mólendi, þekja samtals um 32% landsins og bera 39% af ofanjarðarlífmassanum.

Nýir hvatar, sem stjórnvöld hafa komið á eftir 2020 til að hvetja einkageirann til þátttöku í verkefnum sem snúa að mótvægisaðgerðum gegn loftslagsbreytingum, eru smátt og smátt að auka þunga þeirra. Árleg metin kolefnisbinding (og samdráttur losunar vegna endurheimtar votlendis) hefur aukist um 33% frá 2015.

Ástand sjávar og lífríki í sjó

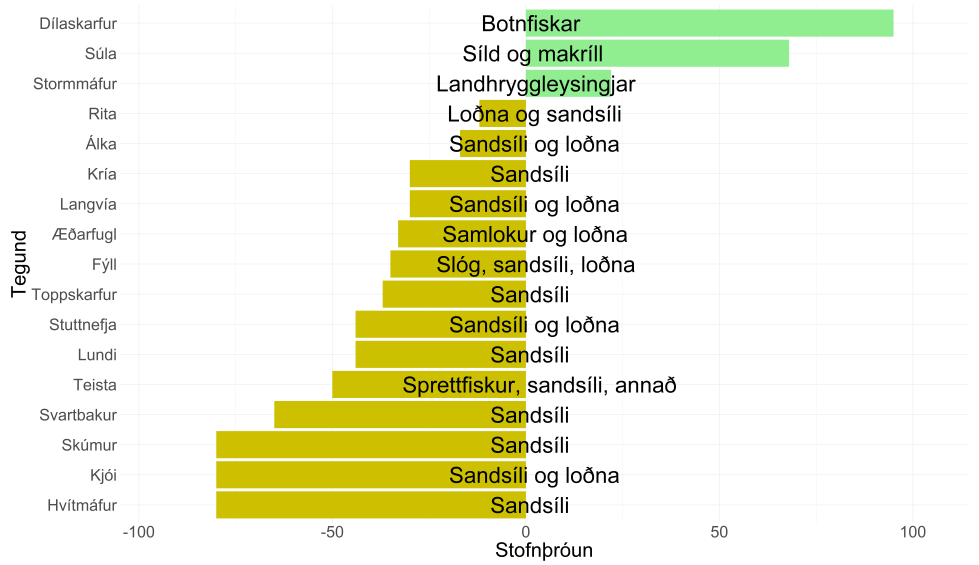
Áherslupunktar

- Regluleg vöktun og greining á umhverfi og lífríki sjávar er ákaflega mikilvæg. Hún er grundvöllur upplýstrar ákvarðanatöku í umgengni við sjávarauðlindina og mikilvæg til að skilja breytingar sem verða í vistkerfum. Loftslagsbreytingar auka mikilvægi vöktunar og greiningar því þær geta haft hraðar og stundum víðtækar breytingar í för með sér.
- Frá 1995 hefur hlýr og selturíkur Atlantssjór verið ráðandi fyrir norðan land. Talið er að á hafsvæðinu umhverfis landið verði áframhaldandi hlýindaskeið, eins og tvo síðustu áratugi.
- Hækkandi sjávarhiti hefur áhrif á útbreiðslusvæði margra lífvera sjávar. Sumar hlýsjávartegundir hafa aukið útbreiðslu sína en útbreiðsla kaldsjávartegunda dregist saman. Sviðsmyndareikningar benda til þess að framhald verði á þessari þróun, að minnsta kosti hvað varðar fisktegundir. Tilfærsla hefur orðið í útbreiðslu margra tegunda hvala við landið samhliða aukningu í stofnstærð. Hrun í selastofnum má rekja til mikils veiðiálags.
- Nýliðun margra hlýsjávartegunda hefur minnkað mikið á undanförnum árum. Þessa neikvæðu þróun má meðal annars rekja til breyttra umhverfisskilyrða í hafinu síðastliðin 20 ár.
- Stofnar sjófugla hafa víða minnkað mikið vegna umhverfisbreytinga í hafi sem hafa haft áhrif á mikilvægar fæðutegundir, svo sem sandsíli og loðnu.
- Vegna aðstæðna í hafinu við Ísland hefur súrnun sjávar orðið hraðari hér við land en að jafnaði í heimshöfunum. Útreikningar sýna að einungis ef styrkur gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpnum lækkar tekst að snúa súrnun sjávar við. Almennt eru áhrif súrnunar á lífverur neikvæð.
- Það umbreytingaskeið sem fer í hönd á næstu áratugum mun valda álagi á vistkerfi sjávar. Mikilvægt er að öðru álagi, t.d. vegna ofnýtingar, rasks búsvæða og mengunar, sé haldið í lágmarki á sama tíma. Skilvirk fiskveiðistjórnun, byggð á víðtækri og samfelldri vöktun, verður því sífellt mikilvægari.

Erfitt er að greina áhrif hnattrænnar hlýnunar á breytingar á ástandi sjávar (hita og seltu) við Ísland. Þær breytingar sem orðið hafa á hita og seltu á hafsvæðinu umhverfis Ísland síðan 1995 fara ekki út fyrir mörk náttúrlegs breytileika. Frá 1995 til 2020 hefur hlýr og selturíkur Atlantssjór verið ráðandi fyrir norðan land. Talið er að á hafsvæðinu kringum landið verði áframhaldandi hlýindaskeið, eins og tvo síðustu áratugi.

Vegna aðstæðna í hafinu við Ísland hefur súrnun sjávar (lækkun á pH-gildi) orðið hraðari hér við land en að jafnaði í heimshöfunum og er súrnunin um 0,14 pH-einingar frá iðnbyltingu. Útreikningar sýna að aðeins er hægt að snúa súrnun sjávar við ef styrkur gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpnum lækkar. Almennt eru áhrif súrnunar á lífverur neikvæð. Kalkmyndandi lífríki er viðkvæmt auk þess sem súrnun sjávar getur haft áhrif á aðrar lífverur, eins og t.d. fiska.

Aukning hefur orðið á magni svifþörunga, bæði á Íslandsmiðum og á stóru svæði suður af Íslandi. Ekki hefur mælst viðvarandi lækkun á magni dýrasvifs á Íslandsmiðum, eins og á stóru svæði í Norður-Atlantshafi, en talsverðar sveiflur eru þó milli ára. Meðalmagn plöntu- og dýrasvifs að vorlagi á Norðurmiðum er meira í hlýrri en kaldari árum. Fyrir norðan land hafa orðið breytingar á magni og útbreiðslu mikilvægra dýrasvifstegunda með hækkandi hitastigi sjávar. Þar hefur hlutur rauðátu aukist en kaldsjávartegundarinnar pólátu minnkað.



Mynd 7: Tengsl stofnþróunar og meginætis tegunda sjófugla við Ísland með jákvæða stofnþróun (grænt) og neikvæða stofnþróun (gult). Byggt á grein Freydísar Vigfúsdóttur (2021).

Hækkandi hitastig á íslenska landgrunninu hefur leitt til breytinga á útbreiðslu margra fisktegunda. Tegundir, til dæmis ýsa, sem hafa verið við nyrðri mörk útbreiðslu sinnar á Íslandsmiðum og fundist að mestu í hlýja sjónum sunnan og vestan við landið, hafa stækkað útbreiðslusvæði sitt til norðausturs. Á sama tíma hafa stofnstærðir kaldsjávartegunda, svo sem hlýra, loðnu og hrognkelsis, minnkað og útbreiðslusvæði færst til.

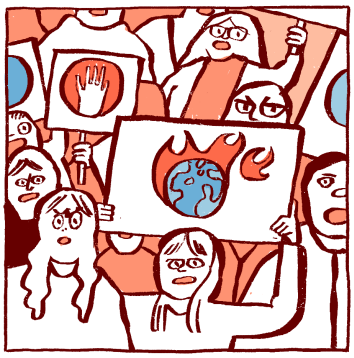
Frá árinu 2006 hefur fæðuslóð makríls breiðst út frá Noregshafi á Íslandsmið. Á sama tíma hefur sumarfæðuslóð loðnu færst í vestur frá Íslandshafi, upp að landgrunnskantinum við Austur-Grænland.

Nýliðun margra hlýsjávartegunda, svo sem humars, blálöngu og skötusels, hefur minnkað mikið á undanförnum árum. Þessa neikvæðu þróun má meðal annars rekja til breyttra umhverfisskilyrða í hafinu síðastliðin 20 ár. Um er að ræða tegundir sem halda sig aðallega í hlýjum sjó við suður- og vesturströndina.

Tilfærsla hefur orðið í útbreiðslu margra tegunda hvala við landið samhliða aukningu í stofnstærð. Hrefna finnst nú aðallega lengra frá landi fyrir norðan land, en í minna mæli á landgrunninu. Stofnstærð flestra tegunda skíðishvala hefur aukist undanfarin 20 til 30 ár vegna

umhverfisbreytinga og minnkandi veiðiálags. Hrun í selastofnum má rekja til mikils veiðiálags. Stofnar helstu sjófugla við landið hafa farið minnkandi á síðustu árum. Í sumum tilfellum má rekja það með óbeinum hætti til umhverfisbreytinga í hafinu við landið. Þannig hafa breytingar í stofnum fæðutegunda, eins og sandsílis og loðnu, leitt til lélegrar afkomu sjófugla.

Samfélag, menning og félagslegir innviðir


Áherslupunktar

- Skilningur á samfélags- og menningarlegum víddum loftslagsbreytinga er afar mikilvægur, ekki síst til að tryggja réttlæti, styðja við lýðræði og loftslagsaðgerðir. Enn sem komið er eru rannsóknir sem fjalla um menningar- og samfélagslegar víddir loftslagsbreytinga fágætar á Íslandi og því brýnt að slíkar rannsóknir verði efldar.
- Stofnanatraust er forsenda stuðnings almennings við aðgerðir í loftslagsmálum. Mikilvægt er að stofnanastrúktúr og stjórnsýsla loftslagsmála séu vel skipulögð og skilvirk og uppfylli þannig slíkt traust.
- Beina þarf athygli að réttlæti tengdu bæði aðlögun og umskiptum. Rannsóknir á réttlætisvídd loftslagsmála vantar, sem og beinar aðgerðir.
- Afleiðingar loftslagsbreytinga og viðbragða gegn þeim munu hafa áhrif á menningu, listir, menntun og gildismat. Menntun og skapandi greinar geta stuðlað að nauðsynlegum breytingum á gildismati og hegðun fólks í átt að aukinni sjálfbærni.
- Loftslagsbreytingar og viðbrögð við þeim hafa þegar haft umtalsverð áhrif á lög, reglur og dómsmál víða um heim, meðal annars hafréttarmál. Ráðast þarf í að meta stöðu grunnlínupunkta til að tryggja stærð efnahagslögsögunnar til framtíðar.

Viðhorf Íslendinga til loftslagsbreytinga hefur tekið miklum breytingum á síðustu árum. Mikill meirihluti landsmanna (86%) telur að loftslagsbreytingar eigi sér stað og að þær séu vandamál. Meirihluti (60%) telur að þeir beri ábyrgð á að draga úr loftslagsbreytingum og að aðgerðir muni skapa komandi kynslóðum betra líf (81%). Færri telja að framfærslukostnaður muni aukast (28%) og að orkuverð muni hækka (35%). Munur er á svörum eftir aldri, kyni og menntun. Loftslagsmálin eru því ofarlega í hugum fólks sem umhverfisvandamál sem þarf að takast á við.

Almenningur er hlynntari notkun ívilnana (69%) en hækkun skatta á jarðefnaeldsneyti (43%) sem loftslagsaðgerð. Um 70% vilja tryggja réttlát umskipti. Stofnanatraust er mikilvægt til að tryggja stuðning almennings við loftslagsaðgerðir. Því er mikilvægt að stofnanastrúktúr og stjórnsýsla loftslagsmála séu vel skipulögð og skilvirk. Þannig er unnt að viðhalda trausti og stuðningi almennings við aðgerðir í loftslagsmálum.

Miðlun upplýsinga um loftslagsmál er mikilvæg, en falsfréttir, upplýsingaóreiða og samsæriskenningar geta haft áhrif á viðhorf til vísindalegrar þekkingar og aðgerða í loftslagsmálum. Stjórnvöld þurfa að bregðast við slíku en standa á sama tíma vörð um lýðræðislega umræðu.

Siðferðislegar áskoranir í loftslagsmálum eru af ýmsum toga en hverfast meðal annars um

margs konar réttlæti og óréttlæti. Efnameira fólk, bæði innanlands og á alþjóðavísu, losar meira en þeir sem minna hafa á milli handanna. Afleiðingar loftslagsbreytinga bitna auk þess meira á þeim sem fátækari eru. Félagslegar og efnahagslegar aðstæður, sem og ójöfnuður, hefur áhrif á aðlögunargetu. Ljóst er að loftslagsbreytingar munu auka áþján og að þær munu hafa dauðsföll í för með sér. Siðferðisleg ábyrgð þeirra sem mest losa er því veruleg. Losun fyrri og núverandi kynslóða mun bitna á kynslóðum framtíðarinnar. Áhersla á kynslóðatengt réttlæti hefur leitt ungt fólk til þess að stofna samtök sem berjast gegn loftslagsvá. Eru samtökin afar gagnrýnin á hugtakið loftslagsbreytingar og telja það ekki ná að lýsa þeim hörmungum sem ganga yfir heimsbyggðina vegna þeirra. Vilja þau frekar nota hugtakið loftslagshamfarir.

Loftslagsbreytingar velta einnig upp spurningum um stöðu mannsins í náttúrunni og þeim djúpu gildismats- og viðhorfsbreytingum sem þurfa að eiga sér stað til að vinna á loftslagsvánni. Ljóst er að gildismat, viðhorf og sambúð fólks við náttúruna þarf að breytast til þess að hægt sé að bregðast við loftslagsvandanum.

Samofin menningu tiltekins hóps eða samfélags er kjarni hennar – hin sameiginlega sjálfsmynd. Hún er ávallt í endurskoðun og endursköpun, oft mótsagnakennd og alltaf í samhengi og samspili við aðra þætti, eins og landið sem hópurinn býr í og söguna og umheiminn sem mótuðu hana. Segja má að svo róttækar breytingar, sem loftslagsbreytingar hafa í för með sér, séu og muni verða ákveðin ógn við bæði sjálfsmynd og menningu þjóðarinnar. Til að mæta óljósri framtíð þarf að gera öllum kleift að vera með í endurskoðun og endursköpun sjálfsmyndar, menningar og samfélags á sem réttlátastan hátt.

Réttlát umskipti fela í sér að byrðum og ávinningi af viðbrögðum við loftslagsbreytingum sé dreift með sanngjörnum hætti á milli hópa þjóðfélagsins. Þetta felur meðal annars í sér að þeir sem missa atvinnu fái ný tækifæri, að mótun aðgerða sé lýðræðisleg og að þátttaka og réttindi allra hópa samfélagsins séu tryggð. Einnig þarf að tryggja að mótvægisaðgerðir bitni ekki meira á þeim efnaminni eða minnihlutahópum. Birtingarmyndir óréttlátra umskipta á Íslandi og aðgerðir gegn þeim hafa lítið verið rannsakaðar. Þó má færa rök fyrir því að aðgerðir sem miða að því að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda í samgöngum hafi haft mismunandi áhrif á ólíka þjóðfélagshópa.



Mynd 8: Mótmæli á COP26. (Ljósm. Anna Hulda Ólafsdóttir, birt með leyfi).

Samband kyns og loftslagsbreytinga er einnig þáttur sem þarf að skoða vel þegar gripið er til aðgerða gegn loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra. Þannig eru afleiðingar loftslagsbreytinga oft alvarlegri fyrir konur en karla þar sem þær standa oft hallari fæti í samfélaginu; félagslega og efnahagslega.

Samfélagslegir innviðir, svo sem mennta-, menningar- og trúarstofnanir, auk heilbrigðisstofnana, skipta miklu máli þegar kemur að áhrifum loftslagsbreytinga og viðbrögðum við þeim. Menntun er ekki síst mikilvæg til að stuðla að breytingum á gildismati og hegðun fólks í átt til sjálfbærari framtíðar. Menntastofnanir gegna því mikilvægu hlutverki, í viðbrögðum samfélagsins við loftslagsbreytingum, í vinnu sinni með nýjum kynslóðum sem þurfa að takast á við og aðlagast breyttum heimi.

Trúarbrögð, leiðtogar þeirra og stofnanir, t.d. kirkjan, eru mikilvægt afl í félags- og menningarlífi margra, hérlendis og erlendis. Þau hafa, og munu í auknum mæli, sinna sínu hlutverki við að fá fylgjendur sína til að breyta rétt gagnvart náttúrunni og vekja von hjá almenningi í baráttunni við þá vá sem felst í loftslagsbreytingum. Guðfræðingar víða um heim hafa kallað eftir endurskoðun á kristinni guðfræði í ljósi loftslagsvandans. Trú- og lífsskoðunarfélög hér á

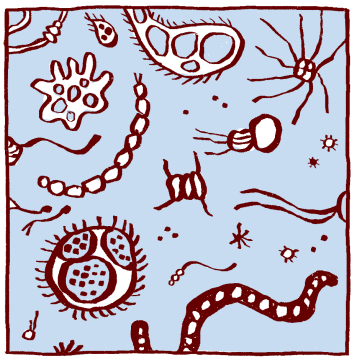
landi og erlendis hafa ályktað um loftslagsvána þar sem lögð er áhersla á vitundarvakningu og aðgerðir.

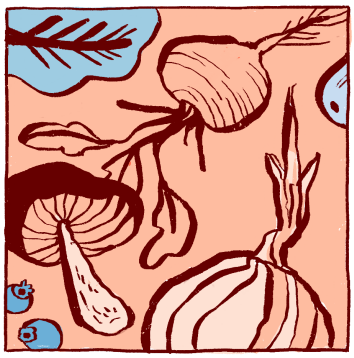
Listafólk, hönnuðir og arkitektar sinna rannsóknum á sambandi manneskju og umhverfis. Er framlag þeirra afar mikilvægt til að varpa ljósi á afleiðingar loftslagsbreytinga og aðgerða gegn þeim, enda eru aðferðir þeirra og nálgun á viðfangsefnið skapandi, spennandi og aðgengileg almenningi.

Loftslagsbreytingar og viðbrögð við þeim hafa þegar haft umtalsverð áhrif á lög, reglur og dómsmál víða um heim. Hérlendar reglur hafa þróast frá því að vera brotakenndar í að vera heilsteyptari og markvissari og eru evrópskar reglugerðir á sviði loftslagsréttar burðarásinn í íslenskum loftslagsrétti. Fjöldi dómsmála tengd loftslagsrétti hefur verið höfðaður erlendis og hérlendis. Í Landsrétti féll m.a. úrskurður um meðferð losunarheimilda WOW air.

Afleiðingar loftslagsbreytinga, svo sem hækkun yfirborðs sjávar, getur haft áhrif á hafrétt. Hærra sjávarborð og landrof getur breytt tilkalli ríkja til hafsvæða, fiskimiða og haft áhrif á efnahagslögsögu. Nokkrir grunnlínupunktar, sem marka íslensk hafsvæði, geta verið í hættu. Mikilvægt er að hafa betra eftirlit með grunnlínupunktum sem marka íslensk hafsvæði og ráðast í viðeigandi aðgerðir til að koma í veg fyrir breytingar á mörkun hafsvæða.

Lýðheilsa, heilbrigðiskerfið og samfélagið





Áherslupunktar

- Samkvæmt Alþjóðaheilbrigðisstofnuninni eru loftslagsbreytingar stærsta heilsufarsógnin sem mannkynið stendur frammi fyrir.
- Auka þarf þekkingu á áhrifum loftslagsbreytinga á lýðheilsu og breytta sjúkdómabyrði í íslensku samhengi fyrir mismunandi loftslagssviðsmyndir.
- Efla þarf heilbrigðisviðbúnað og mönnun til að auka áfallaþol heilbrigðiskerfisins.
- Tryggja þarf aðgengi allra að fyrsta stigs heilbrigðisþjónustu, þar með talið geðheilbrigðisþjónustu. Fjárfesting í lýðheilsu getur skilað ábata og minnkað veikleika gagnvart loftslagstengdri áhættu.
- Auk heilbrigðiskerfisins getur fjárfesting í öðrum kerfum skilað sameiginlegum ábata og minnkað veikleika gagnvart loftslagstengdri áhættu. Borgarkerfi og önnur þéttbýliskerfi eru því sérstaklega mikilvægur vettvangur fyrir loftslagsþolna þróun.
- Samfélög, þar sem ójöfnuður er mikill, hafa minni viðnámsþrótt gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga. Viðkvæmir og jaðarsettir hópar standa alla jafna hallari fæti gagnvart heilsufarsógnum vegna loftslagsbreytinga, sem leiðir til frekari ójöfnuðar.

Andleg, líkamleg og félagsleg heilsa og líðan fólks ræðst af flóknu samspili einstaklinga við sitt nánasta umhverfi og aðstæður, þar með talið náttúrlegt umhverfi (sjá mynd 9). Samkvæmt Alþjóðaheilbrigðisstofnuninni eru loftslagsbreytingar stærsta heilsufarsógnin sem mannkynið stendur frammi fyrir. Á heimsvísu valda loftslagsbreytingar m.a. aukningu í algengi smitbærra og ósmitbærra sjúkdóma, ótímabærra dauðsfalla og vannæringar.

Víðtækar rannsóknir staðfesta að loftslagsbreytingar ógna heilsu fólks og vistkerfum um allan heim. Þær hafa neikvæð áhrif á andlega heilsu og líðan með beinum og óbeinum hætti og eru í vaxandi mæli ástæða þvingaðra fólksflutninga, tilfærslu fólks og átaka. Ljóst er að samfélög víða um heim standa misjafnlega að vígi og skilyrði fyrir loftslagsþolna þróun eru ólík á milli hópa, innan og á milli landa.

Lykilfarvegur fyrir loftslagsþolna þróun í heilbrigðiskerfinu er að tryggja aðgengi allra að fyrsta stigs heilbrigðisþjónustu, þar með talið geðheilbrigðisþjónustu. Fjárfesting í lýðheilsu getur skilað ábata og minnkað veikleika einstaklinga og samfélaga gagnvart loftslagstengdri áhættu. Heilsuefling og forvarnir gegna lykilhlutverki til að viðhalda og bæta heilsu og líðan fólks á öllum æviskeiðum.

Auk heilbrigðiskerfisins getur fjárfesting í öðrum kerfum skilað sameiginlegum ábata og



Áhrifaþættir heilbrigðis og vellíðanar, Dahlgren og Whitehead (1991), aðlöguð útgáfa Embættis landlæknis 2019 (3.0).

Mynd 9: Áhrifaþættir heilsu og vellíðanar og heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna. Aðlöguð útgáfa embættis landlæknis af regnbogamódeli Dahlgren og Whitehead út frá íslenskum aðstæðum.

minnkað veikleika gagnvart loftslagstengdri áhættu. Má þar sem dæmi nefna ýmsa innviði, almenningssamgöngur, húsnæði, hreina orku, vatn og hreinlæti, aðgengi að hollum mat, félagsþjónustu og ýmsa þætti sem hafa áhrif á félagstengsl og þátttöku í samfélaginu. Borgarkerfi og önnur þéttbýliskerfi eru því sérstaklega mikilvægur vettvangur fyrir loftslagsþolna þróun.

Samfélög, þar sem ójöfnuður er mikill, hafa minni viðnámsþrótt gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga, s.s. flóðum, hita og þurrki. Rannsóknir sýna að viðkvæmir og jaðarsettir hópar standa alla jafna hallari fæti gagnvart heilsufarsógnum vegna loftslagsbreytinga, t.d. útbreiðslu sjúkdóma, sem leiðir til frekari ójöfnuðar. Ójöfnuður í heilsu og aðgengi að heilbrigðisþjónustu er staðreynd á Íslandi, líkt og annars staðar í heiminum.

Tilkynningum um skógarmítla, sem geta borið með sér smitsjúkdóma, hefur fjölgað á Íslandi og tímaspursmál hvenær smit berst í fólk hér á landi. Moskítóflugur eru annað dæmi um smitferjur sem hafa til þessa ekki náð að nema land á Íslandi.

Með aukinni framleiðni gróðurs á landinu eykst styrkur frjókorna í lofti sem hefur m.a. þau áhrif að ofnæmistilfelli geta versnað og ný bæst við.

Á Íslandi liggur þegar fyrir töluverð þekking á áhrifum náttúruhamfara á einstaklinga og samfélög. Samkvæmt nýlegri rannsókn fundu um 20% fullorðinna fyrir miklum umhverfiskvíða og var hlutfallið hæst hjá aldurshópnum 30 ára og yngri. Nauðsynlegt er að auka þekkingu á áhrifum loftslagsbreytinga á lýðheilsu í víðasta skilningi í íslensku samhengi fyrir mismunandi loftslagssviðsmyndir. Hér er átt við ýmsa áhrifaþætti sem eru vel þekktir hornsteinar lýðheilsu, breytta sjúkdómabyrði og líðan.

Efla þarf heilbrigðisviðbúnað og mönnun til að auka áfallaþol heilbrigðiskerfisins. Meðal annars þarf að horfa til kjarnainnviða um allt land og einnig til minni byggða sem standa hallari fæti gagnvart skyndilegum áföllum, m.a. vegna náttúruvár.

Atvinnuvegir





Áherslupunktar

- Loftslagsbreytingar, afleiðingar og viðbrögð við þeim gera loftslagsmál að einu stærsta efnahagsmáli samtímans. Aðlögunar er þörf.
- Þekking á áhrifum loftslagsbreytinga á samfélög og atvinnulíf er forsenda viðbragða en rannsóknir skortir á Íslandi. Brýnt er að rannsóknir á samfélags- og efnahagslegum áhrifum loftslagsbreytinga og aðgerðum við þeim verði stórauknar.
- Ræktunarmöguleikar nytjaplanta munu aukast en sveiflur í veðurfari, sníkjudýr, þurrkar og gróðureldar auka áhættu. Íslenskur landbúnaður og fæðuöryggi eru berskjölduð fyrir röskunum aðfangakeðja erlendis. Greina þarf þessa áhættu og grípa til viðeigandi aðgerða.
- Hækkandi sjávarhiti við landið hefur þegar leitt til breytinga á útbreiðslu og stofnstærð nytjategunda og munu slíkar breytingar halda áfram. Súrnun sjávar hefur neikvæð áhrif, einkum á kalkmyndandi lífverur og nytjar þeirra. Rannsóknum á samspili hlýnunar og súrnunar sjávar er ábótavant sem og rannsóknum á áhrifum loftslagsbreytinga á fiskeldi.
- Áhrif loftslagsbreytinga á ferðaþjónustu ráðast af breytingum á náttúrulegu umhverfi, landslagi, náttúruvá og breytingum á eftirspurn. Breytingar eru þegar sýnilegar og aðlögun ferðaþjónustu er hafin.
- Fjármála- og vátryggingastarfsemi getur orðið fyrir áhrifum af loftslagsbreytingum, haft áhrif á hvernig veðurtengdri áhættu er stýrt og hvernig bætt er fyrir afleiðingar alvarlegra veðuratburða og loftslagstengdra náttúruhamfara.
- Loftslagsáhætta er vaxandi og mun hafa áhrif á verðlag, fjármálastöðugleika og öryggi fjármálakerfisins. Loftslagsáhætta almennrar bankastarfsemi felur í sér aukna fjárhagslega óvissu, áhættu og aukinn kostnað tengdum fjárfestingum og útlánum.
- Loftslagstengd tjón hafa áhrif á rekstur vátryggingafélaga þar sem slíkir atburðir valda persónu- og eignatjóni. Búist er við að tíðni og umfang tjóna muni aukast og endurkomutími atburða styttast.

Loftslagsbreytingar, afleiðingar og viðbrögð við þeim gera loftslagsmál að einu stærsta efnahagsmáli samtímans. Áhrif á atvinnuvegi geta verið bæði bein og óbein, svo sem í gegnum aðfangakeðjur, og haft samfélags- og efnahagslegar afleiðingar. Aðlögunaraðgerðir geta mildað

áhrifin og auðveldað að nýta á jákvæðan hátt þær umbreytingar sem felast í viðbrögðum við loftslagsbreytingum.

Loftslagsbreytingar munu hafa áhrif á ræktun nytjaplantna á Íslandi. Ræktunaröryggi mun aukast og nýjar plöntur teknar til ræktunar í landbúnaði, garðyrkju og skógrækt. Vegna breyttra ræktunarskilyrða mun jarðrækt á fæðu-, fóður-, viðar- og orkuplöntum aukast. Sveiflur í veðurfari, sníkjudýr, þurrkar og gróðurreldar geta þó aukið áhættu.

Röskun í aðfangakeðjum getur haft umtalsverð óbein áhrif á hefðbundið dýrahald, sem er að hluta háð innfluttu kjarnfóðri, svo sem í nautgripa-, svína og kjúklingarækt. Loftslagsbreytingar munu hafa lítil bein áhrif á hefðbundið dýrahald.

Stefna stjórnvalda í loftslagsmálum og aðgerðir þeirra til að draga úr losun, og samsvarandi breytingar á neysluhegðan almennings, geta haft áhrif á afkomu þeirra greina landbúnaðarins sem í dag eru ábyrgar fyrir mikilli losun gróðurhúsalofttegunda. Fæðuöryggi hérlendis er undir bæði beinum og óbeinum áhrifum loftslagsbreytinga.

Umtalsverð verðmæti eru falin í veiðihlunnindum tengdum laxi, bleikju og urriða. Undanfarin ár hafa stofnar bleikju verið á undanhaldi en stofnar urriða að styrkjast meðan laxastofnar hafa haldist nokkuð jafnir. Sú þróun hefur mælst í stofnum á nær öllu landinu og á sér einnig stað á sama tíma í norðanverðum Noregi. Samhliða þróun á svo stóru svæði hefur meðal annars verið tengd við hnattrænnar loftslagsbreytingar, s.s. bein og óbein áhrif hækkunar á vatnshita. Ef þessi þróun heldur áfram gæti þurft að draga úr veiðisókn í hnignandi stofna.

Hækkandi sjávarhiti og súrnun sjávar hafa áhrif á sjávarútveg. Hækkun á hitastigi sjávar veldur breytingum á útbreiðslu og stofnstærð nytjategunda. Slíkar breytingar geta haft áhrif á heildarafla og aflasamsetningu og orsakað auknar deilur milli þjóðríkja vegna deilistofna. Veðurfarsbreytingar geta haft áhrif á aðstæður til sjósóknar og á markaði.

Hækkandi sjávarhiti á íslenska landgrunninu hefur þegar leitt til breytinga á útbreiðslu margra botnfisktegunda við landið, svo sem ýsu, þorsks og skötusels, og munu slíkar breytingar halda áfram. Nytjategundir, sem hafa verið við nyrðri mörk útbreiðslu sinnar á Íslandsmiðum, hafa nú þegar og munu áfram stækka útbreiðslusvæði sitt til norðausturs. Á sama tíma gætu stofnstærðir og útbreiðsla kaldsjávartegunda t.d. hlýra, hrognkelsa og loðnu, minnkað. Þessar breytingar geta haft áhrif á tilhögun og afkomu veiða. Samspil tegunda og nýtingar í vistkerfi sjávar er afar flókið og nauðsynlegt að þróa og nota fjölstofna vistkerfislíkön við mat á áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg.

Súrnun sjávar, sem er örari á íslensku hafsvæði en víða annars staðar, hefur víðtæk neikvæð áhrif, einkum á kalkmyndandi lífverur. Slíkar lífverur eru mikilvægar í vistkerfi og fæðuvef sjávar og jafnframt nýttar sem matvæli eða til iðnaðarframleiðslu, s.s. skelfiskur og kalkþörungar. Súrnun sjávar mun hafa neikvæð áhrif á nýtingu þeirra. Rannsóknum á samspili hlýnunar og súrnunar sjávar er ábótavant, en þær fáu rannsóknir sem gerðar hafa verið sýna að í heildina virðast áhrif hlýnunar á sjávarútveg vega þyngra en áhrif súrnunar sjávar.

Frekari rannsókna er þörf á efnahags- og samfélagslegum áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg, svo sem á afkomu, atvinnu, byggðaþróun og viðnámsþrótt samfélaga. Gæta þarf sérstaklega að sjávarbyggðum vegna áhrifa á sjávartengdar nytjar, veðurtengdra áhrifa á sjósókn og aukinnar hættu af náttúruvá.

Áhrif loftslagsbreytinga á fiskeldi geta t.d. verið staðbundnar breytingar á vaxtarhraða eldistegunda, nýir sjúkdómar og sníkjudýr, breytt afkastageta svæða, áhrif á bæði aðfanga- og virðiskeðju, einkum þegar kemur að fóðurframleiðslu, og áhrif veðuröfga á innviði. Rannsóknum er ábótavant á áhrifum loftslagsbreytinga á fiskeldi á Íslandi.

Áhrif loftslagsbreytinga á ferðaþjónustu helgast af breytingum á náttúrulegu umhverfi, landslagi, náttúruvá og breytingum á eftirspurn. Breytingarnar eru þegar sýnilegar, svo sem í Kerlingarfjöllum, og marktæk fylgni er milli breytinga á sjávarhita og sýnileika hvalategunda á Skjálfandaflóa. Loftslagsbreytingar geta haft neikvæð áhrif á öryggi ferðamanna, t.d. í samhengi aukinnar náttúruvár.



Mynd 10: Siglt á Heinabergslóni. (Ljósm. Iceguide, birt með leyfi).

Eftirspurn eftir ferðalögum til norðlægra landa gæti aukist, a.m.k. til skamms tíma, og þá sérstaklega ásókn til þeirra áfangastaða sem eru viðkvæmir fyrir áhrifum loftslagsbreytinga, svo sem jökla eða jökullóna (sjá mynd 8.2). Mögulegt er að loftslagsbreytingar auki eftirspurn eftir ferðaþjónustu á Íslandi, a.m.k. í náinni framtíð. Þó geta aðgerðir í loftslagsmálum og neikvæð viðhorf til langra ferðalaga, sem leiða til mikillar losunar gróðurhúsalofttegunda, dregið úr eftirspurn. Ferðaþjónustan getur spyrnt við fótum með vist- og loftslagsvænni uppbyggingu. Íslensk ferðaþjónusta hefur hafið aðlögunaraðgerðir vegna loftslagsbreytinga og aukinnar eftirspurnar eftir vistvænni ferðaþjónustu. Aðlögun í jökultengdri ferðaþjónustu er ýmist venjubundin eða sem viðbragð við sýnilegri áhættu eða tækifærum.

Vátrygginga- og fjármálastarfsemi getur orðið fyrir áhrifum af loftslagsbreytingum, haft áhrif á hvernig veðurtengdri áhættu er stýrt og hvernig bætt er fyrir afleiðingar alvarlegra veðuratburða og loftslagstengdra náttúruhamfara.

Loftslagstengd veðurfarstjón hafa áhrif á rekstur vátryggingafélaga, þar með talið Náttúruhamfaratrygginga Íslands, þar sem slíkir atburðir valda persónu- og eignatjóni. Búist er við að tíðni og umfang tjóna muni aukast og endurkomutími atburða styttast. Loftslagstengdir atburðir annars staðar í heiminum geta einnig haft áhrif á rekstur vátryggingafélaga innanlands vegna endurtryggingasamninga við erlend vátryggingafélög.

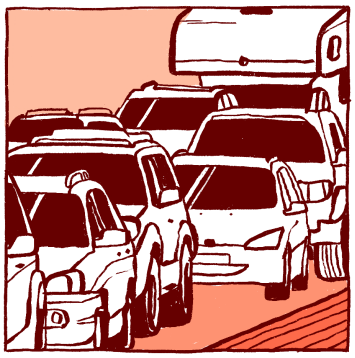
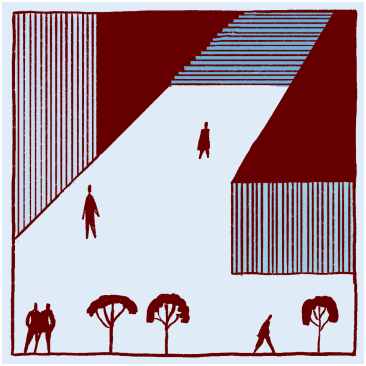
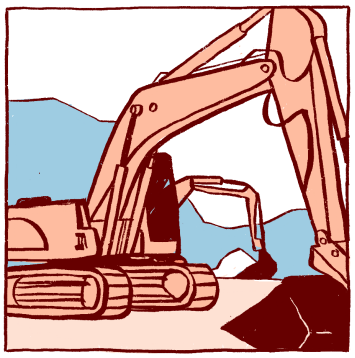
Áhrif loftslagsbreytinga á vátrygginga- og fjármálastarfsemi skiptist í raunlæga áhættu, svo sem vegna tjóns á eignum, og umbreytingaráhættu vegna aðgerða til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda eða vegna aðlögunaraðgerða. Vátrygginga- og fjármálastarfsemi þarf í auknum mæli að upplýsa um umhverfis- og loftslagsáhættu sem tengist rekstri hennar, til að mynda hvernig loftslagsáhætta er skilgreind, hvernig hún er metin og hvernig henni er stýrt.

Loftslagsbreytingar tengjast umboði og hlutverki Seðlabanka Íslands, s.s. í samhengi fjármálastöðugleika, fjármálaeftirlits og peningaeftirlits. Loftslagsáhætta er vaxandi og mun hafa áhrif á verðlag, fjármálastöðugleika og öryggi fjármálakerfisins. Greiningar og haglíkön þurfa að taka tillit til loftslagsáhættu, meta þarf áhrif á gæði eignasafna fjármálafyrirtækja og þróa þarf álagspróf. Fjármálaeftirlit þarf að tryggja að upplýsingagjöf sé í samræmi við Evrópureglur og taka þarf tillit til loftslagsáhættu við framkvæmd peningastefnu.

Loftslagsáhætta almennrar bankastarfsemi felur í sér aukna fjárhagslega óvissu, áhættu og aukinn kostnað tengdum fjárfestingum eða útlánum. Greiningargeta banka á þessum áhrifum er þó fremur skammt á veg komin. Innlendir bankar eru aðilar að reglum um ábyrgar fjárfestingar og reglum um ábyrga bankastarfsemi. Græn skuldabréf eru dæmi um vöru sem hvetja til fjárfestinga í loftslagsvænum verkefnum og hafa íslensk fjármálafyrirtæki, sveitarfélög og önnur fyrirtæki gefið út slík skuldabréf.

Viðbrögð við loftslagsbreytingum munu leiða til atvinnu- og iðnþróunar sem oft byggir á nýsköpun og eru nú þegar nokkur dæmi þess á Íslandi. Viðbrögðin kalla einnig á nýsköpun hjá fjármálafyrirtækjum.

Byggðir innviðir

Áherslupunktar

- Loftslagsbreytingar eru þegar farnar að hafa áhrif á ýmsa byggða innviði.
- Áhrif á forða, vatnsöflun og dreifikerfi vatnsveitna geta aukið hættu á örveru- eða seltumengun vatnsbóla og breytt grunnvatnsstöðu. Minni vatnsveitur, og þau samfélög sem nýta þær, eru berskjaldaðri fyrir áhrifum.
- Úrkomubreytingar, auknar sveiflur í veðurfari, fjölgun hlákudaga og hækkandi grunnvatns- og sjávarstaða hafa áhrif á virkni fráveitukerfa. Áhrifin eru meiri á blönduð fráveitukerfi. Blágrænar ofanvatnslausnir geta dregið úr áhrifum.
- Áhrif á umhverfi orkuframleiðslu eru veruleg en mismunandi eftir auðlindum. Rýrnun jökla mun hafa veruleg áhrif á vatnsaflsframleiðslu. Möguleikar aukast á ræktun orkuplantna. Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á rekstraröryggi vindorkuvera og raforkukerfa.
- Greina þarf breytingar á eftirspurn eftir vatni, hita og rafmagni í samhengi loftslagsbreytinga og viðbragða við þeim.
- Áhrif á vegasamgöngur fela í sér aukna viðhaldsþörf og styttri líftíma slitlags. Stöðugleiki undirlags getur minnkað og óstöðugleiki jarðlaga valdið tjóni. Flóðahætta eykst fyrir innviði allra gerða samgangna. Uppfært mat á sjávarstöðubreytingum sýnir að óvissan um mögulegar breytingar hefur aukist.
- Hafís hefur dregist saman en getur enn truflað siglingar. Borgarísjakar gætu orðið meira vandamál ef íshellur á Grænlandi brotna upp. Öryggismál, vöktun og alþjóðleg samvinna er mikilvæg, ekki síst fyrir nýjar siglingaleiðir.

Loftslagsbreytingar eru þegar farnar að hafa áhrif á ýmsa innviði á Íslandi sem hefur kallað á viðbrögð stofnana og fyrirtækja.

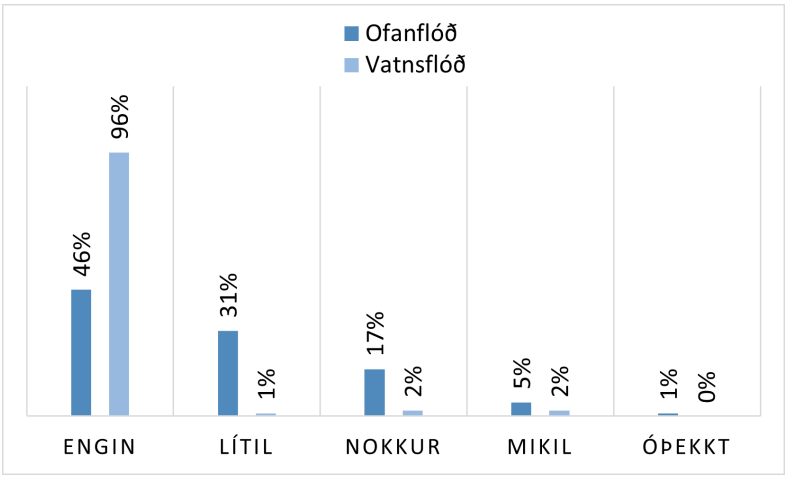
Áhrif loftslagsbreytinga, s.s. þurrkar, aukin úrkomuákefð, umhleypingar, flóð og hækkuð sjávarstaða, geta haft áhrif á forða, vatnsöflun og dreifikerfi vatnsveitna og þar með á neysluvatn. Meðal áhrifa eru hætta á örveru- eða seltumengun vatnsbóla og breytt grunnvatnsstaða (sjá mynd 11). Minni vatnsveitur eru berskjaldaðri fyrir áhrifum. Rannsóknum á áhrifum loftslagsbreytinga á eftirspurn eftir ferskvatni er ábótavant.

Úrkomubreytingar, auknar sveiflur í veðurfari, fjölgun hlákudaga og hækkandi grunnvatns- og sjávarstaða hefur áhrif á virkni fráveitukerfa. Um samverkan þátta er einnig að ræða, svo sem þegar hærri sjávarstaða og aukin úrkomuákefð auka líkur á bakflæði í lögnum. Fyrir blönduð

fráveitukerfi geta áhrifin verið verri en í aðgreindum kerfum, þar sem ofanvatn og skólp er ekki í sömu lögnum. Blágrænar ofanvatnslausnir hafa reynst mikilvægar til að draga úr flóðahættu samfara aftakarigningu.

Flóðaatburðir hér á landi vegna rigningar sem fellur á frosna jörð eða á snjó eru vaxandi vandamál fyrir fráveitukerfi með tilheyrandi flóðahættu.

Rýrnun jökla vegna loftslagsbreytinga hefur mikil áhrif á vatnsaflsframleiðslu á Íslandi. Sú aukning, sem þegar hefur átt sér stað, hefur verið nýtt í núverandi kerfi vatnsaflsvirkjana og miðlana þeirra, m.a. með stækkun Búrfellsvirkjunar. Þróun áframhaldandi aukningar er óviss en nýting hennar er háð uppbyggingu í samræmi við þróun auðlindarinnar.



Mynd 11: Hlutfall (%) vatnsbóla á Norðausturlandi í áhættu vegna flóða eða skriðufalla (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019)

Þurrkar, breytingar á úrkomudreifingu og hlutfalli rigningar og snævar í úrkomu innan ársins munu hafa áhrif á rekstur miðlana og vatnsaflsframleiðslu. Breytingar á hvassviðratíðni geta haft áhrif á rekstraröryggi vindorkuvera, en sumarhlýnun getur aukið möguleika á ræktun plantna sem nýta má til orkuframleiðslu.

Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á rekstraröryggi raforkukerfis, t.d. með tilfærslu þeirra svæða þar sem ísingar gætir helst, vegna hvassviðra, ofanflóða og annarrar loftslagstengdrar náttúruvár.

Hlýnun getur dregið úr eftirspurn eftir orku til húshitunar en þrátt fyrir minnkun í meðalnotkun geta sveiflur í veðurfari aukið tímabundna álagstoppa. Mikilvægt er að greina áhrif fólksfjölgunar og loftslagsbreytinga á allar hita- og vatnsveitur landsins.

Loftslagsbreytingar geta aukið eftirspurn eftir raforku til kælimiðla og orkuskipti munu hafa áhrif á eftirspurn eftir raforku.

Ólíkar forsendur um umfang orkuskipta gera það að verkum að mismunandi sviðsmyndir um orkuþörf vegna orkuskipta ná frá engri þörf á viðbótarraforku til ríflega tvöföldunar á raforkuframleiðslu. Mikilvægt er að umskipti í orkuframleiðslu byggi á vandaðri ákvarðanatöku og miði að því að ná víðtækri samfélagssátt.

Loftslagsbreytingar hafa áhrif á vegasamgöngur, m.a. vegna hlýnunar, hitabylgna, þurrka og tíðari hitasveiflna um frostmark. Áhrifin eru m.a. blæðingar í yfirborði vega, skemmdir á burðarlagi og styttri líftími slitlags. Þær geta einnig dregið úr þörf á snjómokstri en á svæðum, þar sem hitasveiflur um frostmark aukast, verður viðhaldsþörf slitlags meiri. Þá getur breytt grunnvatnsstaða haft áhrif á burðarþol og aukinn vindur valdið tjóni á slitlagi.

Sjávarstöðubreytingar hafa áhrif á rof og flóðahættu á vegum á strandsvæðum en á fjallvegum gæti minna frost í jörðu haft áhrif á stöðugleika undirlags. Aukin skriðuföll og óstöðugleiki jarðlaga getur einnig valdið tjóni á öllum innviðum samgangna.

Áhrif á innviði flugs eru sambærileg áhrifum á innviði vegasamgangna. Flóðahætta er til staðar á flugvöllum um allt land. Áhrif á flugsamgöngur geta einnig birst í breyttum flugleiðum, ferðatíma og eldsneytisnotkun, auk áhrifa á flugtaksþyngd og lengd flugbrauta.

Helstu áhættuþættir sem tengjast innviðum samgangna á sjó eru flóðahætta og skemmdir vegna hækkunar sjávarstöðu og aukinnar tíðni illviðra með áhlaðanda (sjá mynd 12). Sam-



Mynd 12: Flóð í höfninni á Patreksfirði. (Ljósm. Smári Gestsson, birt með leyfi).

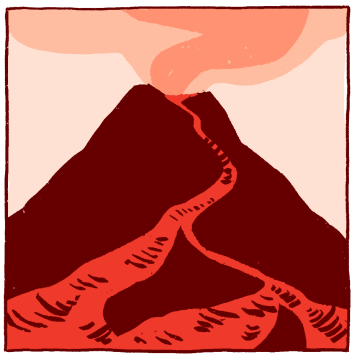
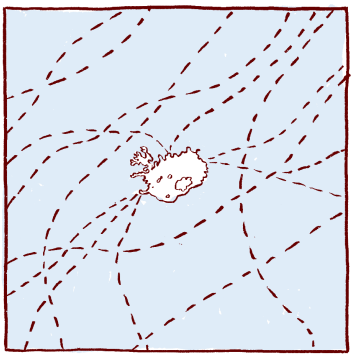
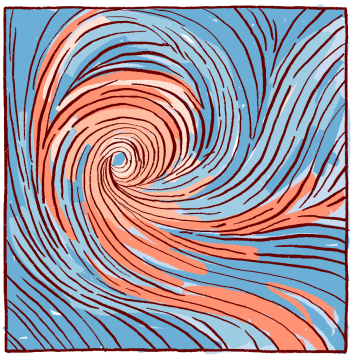
legðaráhrif áhættuþátta geta ýkt vænt áhrif. Hærri sjávarstaða kann að kalla á aukna viðhaldsþörf og frekari uppbyggingu sjóvarna. Uppfært mat á sjávarstöðubreytingum sýnir að óvissa um væntar breytingar hefur aukist.

Hafís á siglingaleiðum nærri Íslandi hefur dregist saman á undanförnum áratugum en getur þó truflað siglingar hluta ársins. Borgarísjaka frá Grænlandi mun áfram reka á siglingaleiðir og gætu mögulega orðið meira vandamál ef íshellur á Grænlandi brotna upp.

Öryggismál og vöktun tengd hafís, borgarís og lagnaðarís er mikilvæg. Alþjóðleg samvinna um eftirlit, vöktun og miðlun hafísupplýsinga hefur reynst árangursrík og mikilvægt að henni sé haldið áfram.

Verði hnattræn hlýnun á bilinu 1.5–2.0 °C er líklegt að sumarhafís hverfi að mestu af Íshafinu sum ár, en hlýni meira en 3 °C muni það gerast flest ár. Dragist hafís verulega saman opnast nýjar siglingaleiðir um Íshafið. Greining á ábata Íslands af opnun siglingaleiða um Íshafið bendir ekki til þess að staðsetning landsins veiti okkur samkeppnisforskot nema í tilviki svokallaðrar miðleiðar.

Áhætta, náttúruvá og áhættustýring

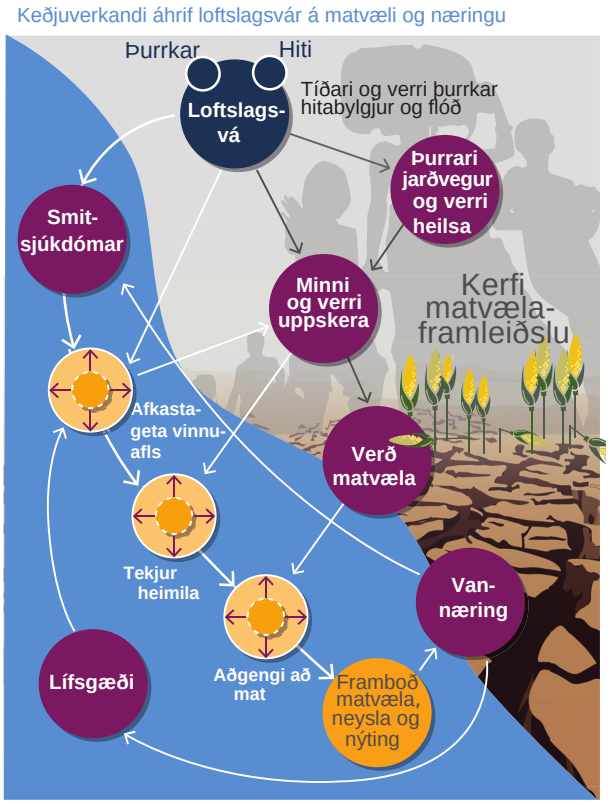
Áherslupunktar

- Íslenskt samfélag kann að vera berskjaldað gagnvart flókinni og kerfislægri áhættu vegna afleiðinga loftslagsbreytinga. Slíkar áhættur eru m.a. til staðar í matvæla- og fjármálakerfum og í aðfangakeðjum. Þá getur loftslagsáhætta utan Íslands aukið komu flóttamanna til landsins.
- Ónógar rannsóknir hafa farið fram á þessum áhættum hér á landi og mikilvægar upplýsingar vantar.
- Þörf er á átaki til að greina kerfislæga áhættu vegna áfalla utan landssteinanna á íslenskt samfélag. Áhættan er illa þekkt, en í ljósi tjónnæmis og varnarleysis samfélagsins kann hún þó að vera mikil.
- Loftslagsbreytingar auka náttúruvá, t.d. vegna aftakaúrkomu, hvassviðra, hættu á flóðum í ám og úr jaðarlónum, skriðufalla, sjávarflóða, tíðari eldgosa og gróðurelda.
- Áhættustýringu þarf að beita til að draga úr líkum þess að alvarleg tjón verði. Mikilvægt er að tekið sé meira tillit til aukinnar náttúruvár við skipulagsgerð.

Íslenskt þjóðfélag kann að verða fyrir afleiðingum loftslagsbreytinga erlendis, sem m.a. getur birst í komu loftslagsflóttafólks. Yfirleitt eru margar ástæður fyrir því að fólk leggur á flótta. Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á ástæður til flótta í samspili við aðra ógn, svo sem stríð, pólitísk átök og efnahagsþrengingar.

Áhættum, sem tengjast loftslagsbreytingum, er hægt að skipta í beina, flókna, afleidda og kerfislæga áhættu. Íslenskt samfélag kann að vera berskjaldað gagnvart flókinni og kerfislægri áhættu vegna afleiðinga loftslagsbreytinga. Slíkar áhættur eru m.a. til staðar í matvæla- og fjármálakerfum og í aðfangakeðjum (sjá mynd 13). Ónógar rannsóknir hafa farið fram á þessum áhættum hér á landi og mikilvægar upplýsingar og greiningar á þeim skortir. Þörf er á átaki til þess að greina kerfislæga áhættu vegna áfalla erlendis á íslenskt samfélag. Þessi áhætta er illa þekkt en gæti orðið mikil í ljósi tjónnæmis og varnarleysis þjóðfélagsins. Aukin náttúruvá telst til beinnar áhættu vegna loftslagsbreytinga. Hún getur tengst atburðum eins og aftakaúrkomu, flóðum í ám, skriðuföllum, sjávarflóðum og gróður- og skógareldum.

Hnattræn hlýnun kann að draga úr tíðni fyrirstöðuhæða yfir Grænlandi að vetri, sem gæti aukið tíðni lægðagangs til Íslands. Vegna samdráttar í hafísþekju mun vindstyrkur yfir hafi aukast norðan og vestan við landið.



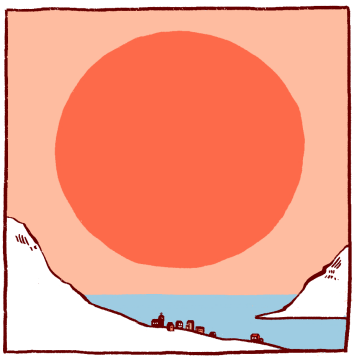
Mynd 13: Samverkandi, flókin áhætta sem gengur þvert á landamæri hefur áhrif á vistkerfi og samfélög. Sjá kafla um áhættur, náttúruvá og áskoranir þvert á landamæri

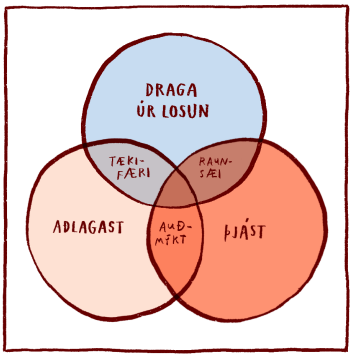
Jaðarlón myndast við hörfandi jökla og hættan á berghruni í jaðarlón verður nýr áhættuþáttur. Bráðnun sífrera og rýrnun jökla getur tímabundið gert hlíðar óstöðugar. Rannsóknir á þessari vá á síðustu árum sýna að tíðni skriðufalla hefur aukist þótt ekki verði öll skriðuföll hér á landi rakin til loftslagsbreytinga.

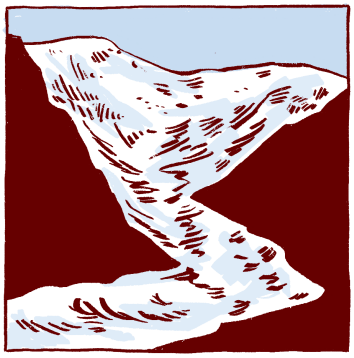
Gróðurfarsbreytingar, aukin tíðni þurrka og minnkandi beit hafa í för með sér aukna hættu af gróður- og skógareldum. Einungis virðist tímaspursmál hvenær útbreiddur gróðureldur veldur alvarlegu tjóni í byggð. Lagt hefur verið mat á útbreiðslu verstu flóða við núverandi aðstæður og fyrir ólíkar sviðsmyndir um loftslagsbreytingar og rýrnun jökla. Tíðni og ákefð sjávarflóða mun aukast með hækkandi sjávarstöðu. Fargléttingu vegna rýrnunar jökla eykur kvikumyndun í jarðskorpunni sem kann að leiða til stærri og/eða tíðari eldgosa.

Íslenskt þjóðfélag býr yfir mikilli þekkingu og reynslu við að bregðast við náttúruvá. Mikilvægt er að áhættustýringu verði beitt með skipulögðu áhættumati og viðbrögðum til að draga úr líkum þess að alvarleg tjón verði. Horfa þarf til aukinnar náttúruvár við skipulagsgerð.

D Aðlögun að loftslagsbreytingum







Áherslupunktar

- Til þess að auka skilning og þekkingu stefnumótenda og framkvæmdaaðila á afleiðingum loftlagsbreytinga til framtíðar þarf að veita auknu fjármagni til rannsókna á afleiðingunum á íslenska náttúru, samfélag og atvinnuvegi.
- Svo unnt sé að miðla niðurstöðum rannsókna á áhrifum loftslagsbreytinga til viðeigandi aðila er mikilvægt að byggja upp gagnagrunn og vefsjá með myndrænni framsetningu á mismunandi loftslagssviðsmyndum fyrir Ísland og mögulegum áhrifum á einstaka geira.
- Skilgreina þarf viðeigandi vísa til þess að meta áhrif loftslagsbreytinga sem ganga þvert á landamæri og hvaða áhættur þau fela í sér fyrir Ísland. Þannig er unnt að skilja yfirvofandi vá og móta aðgerðir til þess að draga úr neikvæðum afleiðingum fyrir íslenskt samfélag.
- Koma þarf á laggirnar fjárhagslegum hvötum og fjármögnunarleiðum til þess að flýta fyrir nauðsynlegum aðlögunaraðgerðum.

Þegar samfélög standa frammi fyrir loftslagsvá geta viðbrögðin verið af þrennum toga: Að þjást, draga úr losun eða aðlagast afleiðingunum. Aðlögun að loftslagsbreytingum er staðbundin aðgerð sem felst í því að undirbúa samfélög, fólk, kerfi og náttúru undir áhrif loftslagsbreytinga, lágmarka skaðlegar afleiðingar þeirra og nýta möguleg tækifæri. Aðlögun er lykilþáttur í því að tryggja langtímaviðbrögð við loftlagsbreytingum með það að markmiði að vernda fólk, lífsviðurværi og vistkerfi.

Áhrifa loftslagsbreytinga er þegar farið að gæta á Íslandi og ljóst að þau verða áskorun til framtíðar. Samfélagið stendur frammi fyrir mögulegum afleiðingum, svo sem fyrir efnahag, innviði, atvinnugreinar, öryggi og lýðheilsu.

Fyrsta stefna íslenskra stjórnvalda um aðlögun að loftslagsbreytingum, *Í ljósi loftslagsvár*, var birt í september 2021. Síðan hefur verið unnið að undirbúningi aðlögunar á Íslandi og stýrihópur skilaði tillögu að landsáætlun um aðlögun að loftslagsbreytingum í september 2023. Landsáætlun um aðlögun á að skilgreina ábyrgðaraðila aðlögunaraðgerða. Innleiðing slíkrar áætlunar mun gegna lykilhlutverki í að gera aðlögun að loftslagsbreytingum markvissari.

Í lögum um loftslagsmál er fjallað um aðlögun. Þó er íslenskur lagagrunnur varðandi aðlögun að loftslagsbreytingum almennt veikur og tekur lögbundið umboð ríkis og sveitarfélaga hvað varðar loftslagsmál nánast eingöngu til mótvægisaðgerða. Sveitarfélögum ber sem stendur ekki lagaleg skylda til þess að huga að aðlögun að loftslagsbreytingum.

Samþætta þarf vinnu á sviði aðlögunar og mótvægisaðgerða og tryggja samlegð til þess að

koma í veg fyrir að þær vinni hvor á móti annarri. Skipulag og umhverfismat eru lykilstjórntæki til að vinna farsællega að aðlögun byggða og samfélags. Tryggja þarf undirstöður loftslagsþolins skipulags með skýrum markmiðum, leiðbeiningum, hvatningu og stuðningi við skipulagsyfirvöld í héraði.

Fjárhagslega hvata og fjármögnunaraðgerðir vantar til þess að hraða aðlögunaraðgerðum. Mikilvægt er að skilgreina hvar ábyrgðin liggur og gæta þarf jafnræðis þegar kemur að kvöðum á mismunandi aðila, svo sem almenning, sveitarfélög eða fyrirtæki.

Það er hlutverk stjórnvalda að tryggja að hægt sé að byggja ákvarðanir varðandi aðlögun á áreiðanlegum gögnum og rannsóknum. Slíkt krefst aukins fjármagns til rannsókna og vöktunar á áhrifum loftslagsbreytinga á íslenska náttúru og samfélag.

Miðlun upplýsinga til að brúa bil á milli vísindafólks, stefnumótenda og almennings varðandi áhrif og afleiðingar loftslagsbreytinga er lykilatriði. Vefsjár, eins og Loftslagsatlas, með myndrænni framsetningu á loftslagssviðsmyndum fyrir Ísland er öflugt verkfæri til að auka skilning á áhrifum loftslagsbreytinga.



Mynd 14: Aðlögun að loftslagsbreytingum er viðamikið verkefni og snertir flesta geira og hópa samfélagsins.

Áhættumat og áhættustýring er mikilvægur hluti af aðlögun og greina þarf loftslagsáhættu fyrir alla geira og samfélagshópa. Greina þarf betur áhrif loftslagsbreytinga þvert á landamæri á efnahag og samfélag á Íslandi. Þannig er hægt að meta hversu berskjaldað Ísland er gagnvart slíkum áhættum og skilgreina mælikvarða fyrir viðbragðsáætlanir og langtímastefnur.

Þrátt fyrir að aðlögunaraðgerðir taki almennt mið af umhverfi og aðstæðum á hverjum stað er hægt að læra af reynslu annarra. Það er því mikilvægt að efla samvinnu innanlands og á alþjóðlegum vettvangi.

Loftslagsbreytingar hafa þegar haft áhrif á náttúrufar og lífsskilyrði á Íslandi. Til þess að mæta þeim áskorunum sem afleiðingum loftslagsbreytinga fylgir er aðlögunar þörf. Afleiðingarnar fara vaxandi og því mikilvægt að aðlögun sé í brennidepli hjá ríki og sveitarfélögum.

Efnisyfirlit

Ágrip . . . 7
A Meginatriði og ályktanir . . . 8
Ágripsgrein : Ályktanir nefndar . . . 8
A.1 Samantekt staðreynda . . . 8
A.2 Ályktanir nefndar . . . 8
B Þróun loftslags . . . 11
Ágripsgrein : Þróun loftslags á Íslandi á næstu áratugum . . . 11
C Áhrif loftslagsbreytinga . . . 13
Ágripsgrein : Náttúrufar . . . 13
Ágripsgrein : Lífríki á landi . . . 16
Ágripsgrein : Ástand sjávar og lífríki í sjó . . . 19
Ágripsgrein : Samfélag, menning og félagslegir innviðir . . . 22
Ágripsgrein : Lýðheilsa, heilbrigðiskerfið og samfélagið . . . 25
Ágripsgrein : Atvinnuvegir . . . 27
Ágripsgrein : Byggðir innviðir . . . 30
Ágripsgrein : Áhætta, náttúruvá og áhættustýring . . . 33
D Aðlögun að loftslagsbreytingum . . . 35
Ágripsgrein : Aðlögun . . . 35

1 Hnattrænar loftslagsbreytingar 1
1.1 Hnattrænar loftslagsbreytingar . . . 3
1.1.1 Staðan í lok síðasta áratugar . . . 3
1.1.2 Þróun hita, súrnun hafsins, minnkandi hafís og hækkandi sjávarstaða . . . 5
1.1.3 Afleiðingar og varanleiki loftslagsbreytinga . . . 9
1.1.4 Samband hlýnunar og uppsafnaðrar losunar . . . 9
1.1.5 Þróun losunar síðustu áratugi og leiðir til að draga úr henni . . . 12
1.1.6 Mótvægisaðgerðir og aðlögun að loftslagsbreytingum . . . 15
1.1.7 Afleiðingar þess að aðhafast ekkert . . . 17
Heimildir . . . 18

2 Veðurfar, vatnafar, jöklar og sjávarstaða 21
2.1 Veðurfar . . . 25
2.1.1 Þróun veðurfars á nútíma . . . 25
2.1.2 Hitaþróun á Íslandi á tíma samfelldra mælinga . . . 27
2.1.3 Þróun úrkomu . . . 29
2.2 Vatnafar . . . 34
2.2.1 Afrennsli og flóð . . . 34
2.2.2 Breytingar á snjóhulu . . . 37
2.2.3 Breytingar á afrennsli vegna hops jökla . . . 38
2.3 Ástand sjávar . . . 40

2.4 Jöklar . . . 44
2.4.1 Ástand og breytingar frá lokum litlu ísaldar . . . 44
2.4.2 Líklegar breytingar íslenskra jökla á komandi öld . . . 49
2.5 Sjávarstöðubreytingar . . . 54
2.5.1 Orsakir sjávarstöðubreytinga . . . 54
2.5.2 Sviðsmyndir um eiginlegar sjávarstöðubreytingar . . . 56
2.5.3 Landhæðarbreytingar . . . 59
2.5.4 Afstæðar sjávarstöðubreytingar kringum Ísland . . . 62
Heimildir . . . 66

3 Líklegar loftslagsbreytingar á Íslandi á öldinni 73
3.1 Losunarsviðsmyndir, reikniverkefni og líkön . . . 76
Sérgrein 3A: CMIP6 og SSP sviðsmyndir . . . 76
3.2 Líklegar hita- og úrkomubreytingar við Ísland . . . 79
3.2.1 Niðurstöður loftslagslíkana fyrir tímabilið 1860 til 2015 . . . 79
3.2.2 Niðurstöður loftslagslíkana fyrir 21. öldina . . . 80
3.2.3 Hámarksúrkoma . . . 81
3.2.4 Breytingar á árstíðasveiflu . . . 86
3.3 Loftslagsbreytingar og náttúrulegur breytileiki . . . 88
3.3.1 Valda aukin gróðurhúsaáhrif hitabreytingum á Íslandi? . . . 88
3.3.2 Náttúrulegur breytileiki og sviðsmyndir um loftslagsbreytingar . . . 89
3.4 Samanburður á niðurstöðum þriggja síðustu skýrslna . . . 92
3.5 Sviðsmyndir og óvissa . . . 94
3.6 Langtímasamhengi líklegra hitabreytinga . . . 95
Heimildir . . . 97

4 Lífríki lands og landnýting 101
4.1 Breytingar á lífríki . . . 105
4.1.1 Gróðurfar . . . 105
4.1.2 Dýralíf . . . 106
4.1.3 Framandi ágengar tegundir . . . 114
4.1.4 Stýrðar loftslagsrannsóknir á náttúrulegum landvistkerfum . . . 115
Sérgrein 4A: Náttúruleg vistkerfi og mótvægisaðgerðir . . . 117
4.2 Ræktun á landi . . . 118
4.2.1 Hefðbundinn landbúnaður . . . 118
Sérgrein 4B: Ræktunarskilyrði í dag og í framtíðinni . . . 121
4.2.2 Garðyrkja . . . 123
4.2.3 Viðbrögð landbúnaðar og garðyrkju við loftslagsbreytingum . . . 123
4.2.4 Skógrækt og landgræðsla . . . 124
4.3 Kolefnishringrás Íslands og mótvægisaðgerðir tengdar landi . . . 128
4.3.1 Kolefnishringrás Íslands . . . 128
4.3.2 Mótvægisaðgerðir tengdar landi . . . 130
4.3.3 Ný þekking á kolefnisforða ofanjarðar . . . 131
4.4 Áhrif loftslagsbreytinga í ferskvatni . . . 132
4.4.1 Vöktun og rannsóknir á lífríki ferskvatns . . . 132
4.4.2 Líffræðilegur fjölbreytileiki - Bleiklax í Norður-Atlantshafi . . . 135
4.4.3 Hlýnun Þingvallavatns - samspil bleikju og urriða . . . 137
4.4.4 Áframhaldandi þróun í stofnstærð laxfiska . . . 142
4.4.5 Nýrnasýking (PKD) – áhyggjuefni hlýnunar . . . 144
Heimildir . . . 145

5 Ástand og lífríki sjávar **163**
5.1 Inngangur . . . 166
5.2 Umhverfisbreytingar . . . 166
5.2.1 Hitastig, selta . . . 166
5.2.2 Súrnun sjávar og líffræðilegar afleiðingar . . . 170
5.3 Lífríki sjávar . . . 172
5.3.1 Plöntu- og dýrasvif . . . 172
5.3.2 Breytingar á útbreiðslu fisktegunda við landið . . . 174
5.3.3 Einstaka tegundir . . . 175
5.3.4 Botnfiskar . . . 175
5.3.5 Uppsjávarfiskar . . . 177
5.3.6 Sjávarhryggleysingjar . . . 179
5.3.7 Sjávarspendýr . . . 180
5.3.8 Sjófuglar . . . 183
Heimildir . . . 184

6 Samfélag, menning og félagslegir innviðir **189**
6.1 Inngangur . . . 192
6.2 Viðhorf Íslendinga . . . 193
6.2.1 Viðhorf Íslendinga til loftslagsbreytinga . . . 193
6.2.2 Viðhorf Íslendinga til aðgerða í loftslagsmálum . . . 194
6.3 Loftslagsbreytingar: upplýsingaóreiða, samsæriskenningar og falsfréttir . . . 195
6.4 Loftslagsbreytingar og siðfræði . . . 197
6.4.1 Losun bitnar á þeim sem lítið losa . . . 197
6.4.2 Losun í nútíma og dauðsföll í framtíðinni . . . 198
6.4.3 Loftslagsbreytingar og umhverfissiðfræði . . . 199
Sérgrein 6A: Umhverfisviðhorf og siðfræði . . . 200
6.4.4 Siðfræðileg álitamál og umskipti . . . 201
6.5 Réttlát umskipti og aðlögun . . . 201
6.5.1 Birtingarmyndir réttlátra umskipta og aðlögunar á Íslandi . . . 202
6.5.2 Áhrif loftslagsbreytinga á konur og aðstæður þeirra . . . 203
6.6 Samfélagslegir innviðir . . . 204
6.6.1 Menntun og menntastofnanir . . . 204
6.6.2 Trúarbrögð og guðfræði . . . 205
6.6.3 Listir, menning og ímynd þjóðar . . . 208
6.6.4 Lagalegar hliðar loftslagsvandans . . . 209
Heimildir . . . 213

7 Lýðheilsa, heilbrigðiskerfið og samfélag **223**
7.1 Inngangur . . . 226
7.1.1 Helstu hugtök og forsendur . . . 226
7.2 Staðan og horfur á heimsvísu samkvæmt AR6 . . . 227
7.3 Staða og horfur í Evrópu samkvæmt AR6 . . . 229
7.3.1 Dauðsföll, veikindi og slys vegna hita og öfga í veðri . . . 230
7.3.2 Loftgæði . . . 230
7.3.3 Smitsjúkdómar . . . 230
7.3.4 Ofnæmi og frjókorn . . . 230
7.3.5 Vinnutengd heilsa og framleiðni . . . 231
7.3.6 Gæði matvæla og fæðuöryggi . . . 231
7.3.7 Andleg heilsa og líðan . . . 231
7.3.8 Fólksflutningar og tilfærsla fólks . . . 231
7.4 Loftslagsbreytingar og lýðheilsa í íslensku samhengi . . . 231

7.4.1 Mannfjöldaspár og fólksflutningar . . . 232
7.4.2 Heilsa, vellíðan og samfélag . . . 233
7.4.3 Heilbrigðiskerfið . . . 239
Heimildir . . . 241

8 Atvinnuvegir 245
8.1 Inngangur . . . 249
8.2 Landbúnaður . . . 249
8.3 Veiðihlunnindi göngufiska . . . 250
8.4 Sjávarútvegur . . . 251
8.4.1 Veiðar . . . 251
8.4.2 Fiskeldi . . . 254
8.4.3 Áhrif loftslagsbreytinga á sjávarbyggðir og samfélög . . . 255
Sérgrein 8A: Viðnámsþróttur samfélaga . . . 256
8.5 Ferðaþjónusta . . . 257
8.6 Vátrygginga- og fjármálastarfsemi . . . 259
8.6.1 Loftslagsbreytingar og hlutverk seðlabanka . . . 260
8.6.2 Loftslagsbreytingar og hlutverk banka og lífeyrissjóða . . . 261
8.6.3 Loftslagsbreytingar og tryggingafélög . . . 263
8.7 Áhrif loftslagsbreytinga og umbreyting atvinnulífsins . . . 266
Heimildir . . . 267

9 Byggðir innviðir 273
9.1 Inngangur . . . 276
9.2 Innviðir vatnsmiðlunar . . . 276
9.2.1 Forði, vatnsöflun og dreifikerfi . . . 276
9.2.2 Ástand og tegundir vatnsbóla . . . 279
9.2.3 Fráveita . . . 280
9.3 Orkukerfi . . . 283
9.3.1 Framleiðsla . . . 283
9.3.2 Eftirspurn . . . 288
9.3.3 Miðlun orku . . . 290
9.4 Samgöngur . . . 293
9.4.1 Vegasamgöngur . . . 293
9.4.2 Flugvellir og flug . . . 295
9.4.3 Samgöngur á sjó . . . 296
Heimildir . . . 302

10 Áhættur, náttúruvá og áskoranir þvert á landamæri 307
10.1 Inngangur . . . 310
10.2 Áhætta – helstu hugtök . . . 310
10.2.1 Tegund áhættu . . . 312
10.3 Flókin og kerfislæg áhætta í íslensku samhengi . . . 313
10.3.1 Áhrif loftlagsbreytinga á samsetningu þjóða . . . 316
10.3.2 Áhrif loftslagsbreytinga á alþjóðleg viðskipti og völuflutninga . . . 317
10.3.3 Áhrif loftslagsbreytinga á fæðukerfi . . . 317
10.3.4 Samantekt um flókna og kerfislæga áhættu í íslensku samhengi . . . 318
10.4 Náttúruvá – bein áhætta . . . 319
10.4.1 Einstakir áhættuþættir . . . 319
10.4.2 Aftakaveður . . . 320
10.4.3 Flóð í ám . . . 321
10.4.4 Sjávarflóð . . . 322

10.4.5 Ofanflóð . . . 325
10.4.6 Gróðureldar . . . 326
10.4.7 Eldgos . . . 326
10.5 Stýring áhættu vegna loftslagsbreytinga . . . 327
10.5.1 Viðbrögð við kerfislægri áhættu . . . 327
10.5.2 Áhættustýringar og náttúruvá . . . 329
10.5.3 Viðbrögð við beinni áhættu . . . 329
10.5.4 Almenn atriði varðandi áhættustýringu . . . 330
Heimildir . . . 333

11 Aðlögun að loftslagsbreytingum 339
11.1 Inngangur . . . 342
11.2 Hvað er aðlögun? . . . 342
11.3 Aðlögun í alþjóðlegu samhengi . . . 345
11.4 Aðlögun í norrænu samhengi . . . 347
11.5 Staða aðlögunar á Íslandi . . . 347
11.5.1 Loftslagsþjónusta og starfsemi tengd aðlögun . . . 350
11.5.2 Samráðsvettvangur um þekkingarsköpun vegna áhrifa loftslagsbreytinga . 350
11.6 Skipulag í þágu aðlögunar . . . 351
11.6.1 Skipulagsmál og sveitarfélög . . . 352
11.7 Viðbrögð við loftslagsvá: Dæmi um aðlögunaraðgerðir . . . 354
11.7.1 Fjármálastarfsemi og tryggingar . . . 354
11.7.2 Ferðaþjónusta . . . 356
11.7.3 Sjávarútvegur . . . 358
11.7.4 Vatns- og fráveitur . . . 360
11.7.5 Samgöngur . . . 360
11.8 Niðurlag . . . 361
Heimildir . . . 362

A Viðauki: Yfirlit yfir niðurstöður 6. mathrings (AR6) 365
Sérgrein AA: Kvarðað orðalag . . . 365
A AR6: Skýrslur frá 6. úttekt IPCC . . . 366
A.1 AR6-WG1 (2021): Veðurfar og loftslagskerfið . . . 366
A.2 AR6-WG2 (2022): Áhrif á félags-, efnahags- og náttúruleg kerfi . . . 375
A.3 AR6-WG3 (2022): Losun gróðurhúsalofttegunda og mótvægisaðgerðir . . . 379
A.4 AR6-SYR (2023): Samantektarskýrsla . . . 382
Heimildir . . . 392

B Viðauki: SR – sérskýrslur IPCC 2018–2019 395
B SR1.5, SRCCL og SROCC . . . 395
B.1 SR1.5 (2018): Leiðir að 1,5 °C markinu . . . 395
B.2 SRCCL (2019): Landnotkun og loftslagsbreytingar af mannavöldum . . . 396
B.3 SROCC (2019): Áhrif loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið . . . 400
Heimildir . . . 414

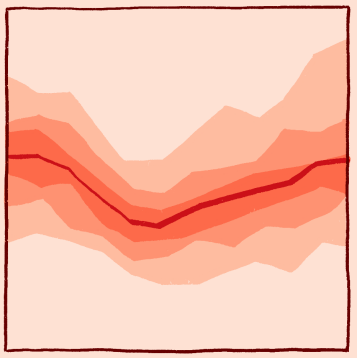
C Viðauki: Sviðsmyndir um losun, félagslega og hagræna þróun 415
C Losunarsviðsmyndir . . . 415
C.1 Fimm brautir þróunar . . . 416
Heimildir . . . 419

D Viðauki: Skammstafanir og orðskýringar 421

KAFLI

1 HNATTRÆNAR LOFTSLAGSBREYTINGAR





Það er yfir vafa hafið að athafnir manna hafa valdið hlýnun í lofti, í hafi og á landi. Víðtækar og hraðar breytingar hafa átt sér stað í lofthjúpnum, hafinu, freðhvolfinu og lífhvolfinu. Umfang og hraði nýlegra breytinga á loftslagskerfinu eru fordæmalausar, hvort sem litið er til síðustu áratuga, árhundruða eða árþúsunda.

Efnisyfirlit kafla

1.1 Hnattrænar loftslagsbreytingar 3
1.1.1 Staðan í lok síðasta áratugar 3
1.1.2 Þróun hita, súrnun hafsins, minnkandi hafís og hækkandi sjávarstaða 5
1.1.3 Afleiðingar og varanleiki loftslagsbreytinga 9
1.1.4 Samband hlýnunar og uppsafnaðrar losunar 9
1.1.5 Þróun losunar síðustu áratugi og leiðir til að draga úr henni 12
1.1.6 Mótvægisaðgerðir og aðlögun að loftslagsbreytingum 15
1.1.7 Afleiðingar þess að aðhafast ekkert 17

Staðhæfingar á titilsíðu kaflans koma fram í samantekt á fyrsta hluta skýrslu Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC) frá árinu 2021 (IPCC, 2021, ágripsetning A.1). Birting skýrslunnar markaði upphaf útgáfu á niðurstöðum 6. matshrings (skammstafað AR6) IPCC, en nefndin gefur á nokkurra ára fresti út matsskýrslur þar sem staða vísindalegrar þekkingar á loftslagsbreytingum er metin og dregin saman. Að venju var verkinu skipt niður á þrjá vinnuhópa og mat sá fyrsti orsakir og umfang loftslagsbreytinga (WG1, IPCC, 2021). Annar hópurinn fjallaði um afleiðingar þeirra fyrir náttúru og samfélög og til hvaða úrræða megi grípa til þess að aðlagast breytingunum (WG2, IPCC, 2022). Þriðji hópurinn lagði mat á hvernig hægt er að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda (WG3, IPCC, 2022). Loks gaf IPCC út samantektarskýrslu 6. matshringsins þar sem dregnar eru saman niðurstöður allra skýrslanna þriggja (SYR, IPCC, 2023). Í samantektarskýrslunni er einnig byggt á þremur sérskýrslum sem IPCC gaf út á árunum 2018 og 2019. Fyrst skýrslu um leiðir til að takmarka hlýnun við 1.5 °C (SR1.5, IPCC, 2018), næst um landnotkun og loftslagsbreytingar af mannavöldum (SRCCL, IPCC, 2019a) og loks um áhrif loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið (SROCC, IPCC, 2019b).

Ofangreindar skýrslur komu allar út eftir að síðasta skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar kom út árið 2018. Í þessum kafla er stutt yfirlit um helstu niðurstöður þessara skýrslna. Í skýrslum IPCC er notað *kvarðað* orðalag til að gefa til kynna vissu og líkindi. Samantekt skýrslna IPCC með kvörðuðu orðalagi má finna í viðaukum A, B og C en í þessum kafla er það ekki notað. Í kaflanum er fyrst farið yfir hnattræna stöðu loftlsagsbreytinga, líklega þróun haldi losun gróðurhúsalofttegunda áfram, samband losunar, hlýnunar og varanleika hennar, aðlögun og mótvægisaðgerðir.

1.1 Hnattrænar loftslagsbreytingar

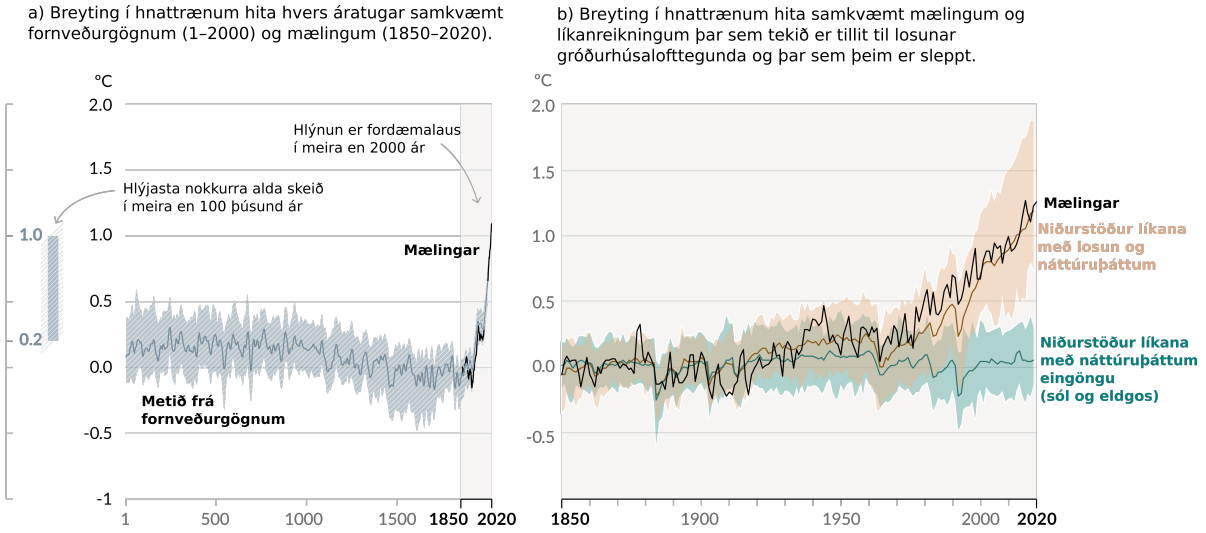
1.1.1 Staðan í lok síðasta áratugar

Athafnir mannkyns, þá sérstaklega losun gróðurhúsalofttegunda, hafa óumdeilanlega leitt til stigvaxandi hlýnunar á síðustu áratugum og þess að meðalhiti áratugsins 2011–2020 var 1.1 °C hærri en meðalhitinn 1850–1900. Losun gróðurhúsalofttegunda er drifin af ósjálfbærri orkunotkun, landnotkun, lífs-, neyslu- og framleiðsluháttum. Hnattræn losun hefur aukist á síðustu áratugum en þjóðir, þjóðfélagshópar og einstaklingar losa mismikið.

Síðustu fjóra áratugi hefur hver áratugur verið hlýrri en allir fyrri áratugir síðan samfelldar mælingar hófust (um 1850). Meðalhiti jarðar fyrstu tvo áratugi þessarar aldar var tæplega 1 °C hærri en meðaltal áranna 1850–1900, eða 0,99 [með óvissubili 0,84 til 1,10] °C. Ef einungis síðasti áratugur er skoðaður er hlýnunin meiri eða 1,09 [0,95 til 1,20] °C að meðaltali (sjá mynd 1.1). Til samanburðar má benda á að í Parísarsamningnum skuldbinda aðildarþjóðir Sameinuðu þjóðanna sig til þess að halda hlýnun á heimsvísu vel undir 2 °C og fylgja eftir viðleitni til að takmarka hlýnun við 1.5 °C frá iðnvæðingu.

Mynd 1.1a sýnir vel hversu óvenjulega heitt er orðið. Í dag er heitara en á hlýindaskeiði snemma á nútíma (tímabilið eftir lok síðasta jökulskeiðs), en þá var inngeislun sólar að sumarlagi þannig að um skeið var mjög hlýtt á meginlöndum á norðurhveli (sjá umfjöllun í grein 2.1.1). Fara þarf aftur til síðasta hlýskeiðs, fyrir meira en 100 þúsund árum, til að finna álíka hita og nú er. Það er yfir vafa hafið að hlýnun síðustu áratuga er vegna aukningar gróðurhúsalofttegunda og mynd 1.1b rökstyður það. Myndin sýnir þróun breytinga í hnattrænum meðalhita (svört lína) og niðurstöður hermireikninga loftslagslíkana. Brún lína og skyggt svæði sýna niðurstöður hermireikninga þar sem geislunarálag þróast í samræmi við raunverulega þróun vegna náttúrulegra þátta, s.s. breytinga í inngeislun sólar, rykmengunar og eldgosa, auk losunar gróðurhúsalofttegunda. Í heildina ná líkön að herma þá hlýnun jarðar sem átti sér stað. Blágræn lína og skyggt svæði sýna niðurstöður hermireikninga ef aukningu gróðurhúsalofttegunda er sleppt. Í því tilviki nær ekkert líkan að herma þá hlýnun sem raunverulega átti sér stað. Mynd 1.1b sýnir því á skýran hátt að náttúrulegur breytileiki í geislunarálagi getur engan veginn

Breytingar á hnattrænum meðalhita miðað við 1850 til 1900



Mynd 1.1: a) Breytingar á hnattrænum meðalhita metnar með fornveðurfarsgögnum (heildregin grá lína) og reiknaðar út frá mælingum (svört lína, 1850–2020). Báðar línur eru reiknaðar sem frávik frá meðalhita 1850–1900. Skyggða gráa svæðið sýnir óvissumat. Lóðrétta súlan vinstra megin sýnir mat á meðalhita fyrir um 6500 árum, en það var hlýjasta nokkurra alda skeið á síðustu 100 þúsund árum. Breytingar, eins og hlýskeið og kuldaskeið, stafa af hægfara breytingum á afstöðu sólar og jarðar.
b) Breytingar á hnattrænum ársmeðalhita síðustu 170 árin (svört lína), sem frávik frá meðalhita 1850–1900, bornar saman við niðurstöður loftslagslíkana í CMIP6 verkefninu. Á myndinni eru bornir saman hermireikningar þar sem geislunarálag þróast í samræmi við aukin gróðurhúsaáhrif og náttúrulega þætti (brúnt svæði) og þar sem auknum gróðurhúsaáhrifum er sleppt (blágrænt). Heildregnar brúnar og blágrænar línur sýna meðaltal og skyggðu svæðin sýna spönn á niðurstöðum líkana. (Mynd SPM.1 í IPCC, 2021).

útskýrt þá hlýnun sem varð á síðustu áratugum.

Víðtækar og hraðar breytingar eru að verða á lofthjúpi jarðar, hafi, freðhvolfi og lífríki. Þessar breytingar eru fordæmalausar þegar litið er til síðustu alda og árþúsunda. Loftslagsbreytingar af mannavöldum hafa nú þegar áhrif á veður- og loftslagsöfgar víða á jörðinni sem hefur í för með sér neikvæðar afleiðingar og tjón fyrir bæði fólk og náttúru. Illa settir hópar, sem minnst hafa lagt til losunar gróðurhúsalofttegunda, eru meðal þeirra sem neikvæðar afleiðingar bitna verst á.

1.1.2 Þróun hita, súrnun hafsins, minnkandi hafís og hækkandi sjávarstaða

Mynd 1.2 sýnir hvernig fjórir lykilþættir loftslagskerfisins þróast við mismikla losun gróðurhúsalofttegunda. Í hverri mynd sýnir svarta línan söguleg gögn, en lituðu línurnar og skyggð svæði niðurstöður loftslagslíkana fyrir ólíkar sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Sviðsmyndir um mögulega þróun losunar og samfélaga eru notaðar þegar mat er lagt á loftslagsbreytingar í framtíðinni. Nánar má lesa um sviðsmyndir fyrir losun gróðurhúsalofttegunda auk samfélagslegrar og hagrænnar þróunar í viðauka C. Mynd 1.2a) sýnir hnattræna meðalhlýnun í ólíkum losunarsviðsmyndum. Næstu áratugi er hlýnun álíka mikil í öllum sviðsmyndum, en um miðbik aldarinnar skilur á milli og hlýnunin er hraðari í þeim sviðsmyndum þar sem mest er losað (SSP5-8.5 og SSP3-7.0). Í kafla 3 er fjallað um hvað þessar sviðsmyndir þýða fyrir þróun loftslags á Íslandi. Mynd 1.2b) sýnir niðurstöður fyrir útbreiðslu hafísþekju á norðurslóðum í september. Samdráttur hafísþekju síðustu áratugi hefur verið umtalsverður og í öllum sviðsmyndum heldur hann áfram. Í þeim sviðsmyndum þar sem minnst er losað (SSP1-1.9 og SSP1-2.6) fer hafísþekjan þó að jafnaði ekki undir eina milljón ferkílómetra að sumarlagi, en þau mörk eru oft notuð til að auðkenna íslaus skilyrði. Stærð skyggðra svæða á mynd 1.2b) sýnir að óvissumörk um framreikning hafísútbreiðslu eru stór. Nánar er fjallað um áhrif minni hafísútbreiðslu og siglingaleiðir í grein 9.4.3.2. Mynd 1.2c) sýnir niðurstöður fyrir súrnun sjávar. Súrnun sjávar heldur áfram nema í sviðsmyndum SSP1-1.9 og SSP1-2.6, en í þeim er gert ráð fyrir að föngun og förgun koldíoxíðs sé beitt í slíkum mæli að hnattræn losun verði neikvæð og því dragi úr styrk CO_2 í lofthjúpnum. Áhrif súrnunar geta orðið umtalsverð, eins og rætt er í grein 5.2.2. Loks sýna myndir 1.2d) og 1.2e) hnattræna sjávarstöðuhækkun til 2100 og 2300. Sjávarstöðuhækkun er reiknuð fyrir sömu sviðsmyndir og aðrir þættir auk þess sem bætt hefur verið við sviðsmynd þar sem skoðuð eru áhrif ferla sem lítil vissa er um hvernig þróast. Þessir ferlar tengjast ísbreiðum Suðurskautslandsins og Grænlands og geta haft mikil áhrif á hnattræna sjávarstöðu, sérstaklega til lengri tíma. Nánar er rætt um þessa ferla og þýðingu þeirra fyrir Íslandstrendur í grein 2.5.

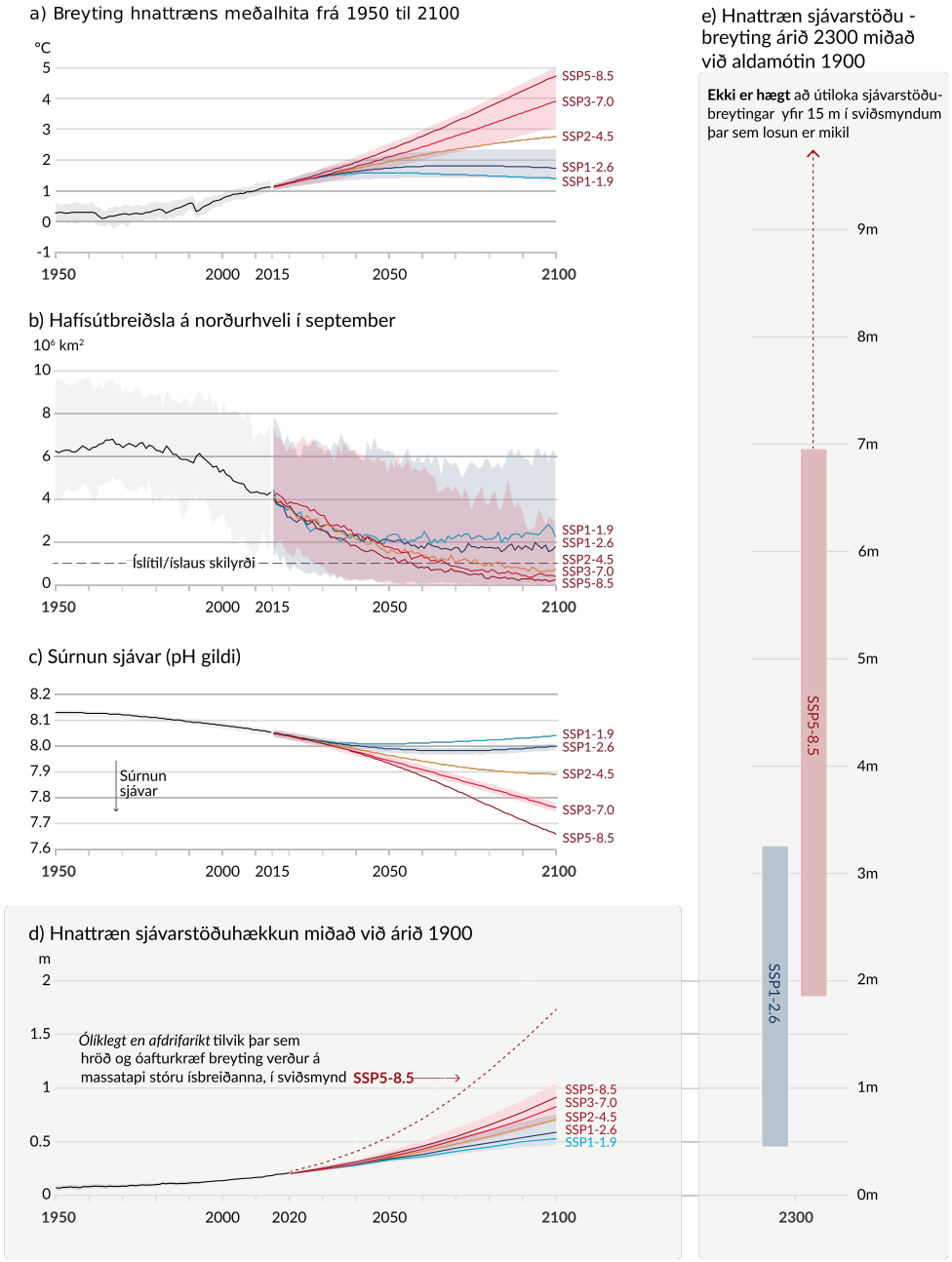
Ef hnattræn hlýnun nær 1.5, 2, 3 eða 4 °C koma áhrifin mismunandi fram á ólíkum svæðum. Það hlýnar meira yfir meginlöndum en hafsvæðum og meira á norðurslóðum en sunnar á hnettinum. Á sumum svæðum verður rakara, á öðrum aukast þurrkar. Mynd 1.3 sýnir svæðisbundnar breytingar á nokkrum þáttum loftslags við ofangreind stig hnattrænnar hlýnunar.

Nú þegar hafa athafnir manna haft veruleg áhrif á veðurlag víða í heiminum, s.s. aukna úrkomu og breytingar á úrkomumynstri. Þá eru þurrkar og hitabylgjur algengari og heitari á flestum landsvæðum. Auk þess hafa hitabeltislægðir breyst, fleiri geta þróast yfir í öfluga fellibyli og ákafari úrkoma fylgir þeim. Áhrif manna hafa gert ýmsa aftakaatburði algengari, s.s. flóð, gróður- og skógarelda. Svæðisbundnar öfgar verða útbreiddari og auðsærri með hlýnun. Eins og sjá má á mynd 1.3 valda svæðisbundin áhrif loftslagsbreytinga því að sum svæði verða rakari meðan önnur verða þurrari.

Mynd 1.4 sýnir dæmi um möguleg áhrif loftslagsbreytinga á náttúru og manngerð kerfi. Þau geta verið aukin hætta á útdauða tegunda, heilsufarsáhrif auk áhrifa á fæðuframleiðslu. Aukin hlýnun gerir áhrif vegna loftslagsbreytinga og þá áhættu sem þeim fylgir sífellt flóknari og illviðráðanlegri. Fari hlýnun jarðar yfir 1.5 °C í nálægri framtíð (2021-2040) mun náttúruvá aukast, ásamt margskonar áhættu fyrir vistkerfi og fólk. Hnattræn hlýnun umfram það mun veikja vistkerfi og grafa undan fæðuframleiðslu á landi og í hafi.

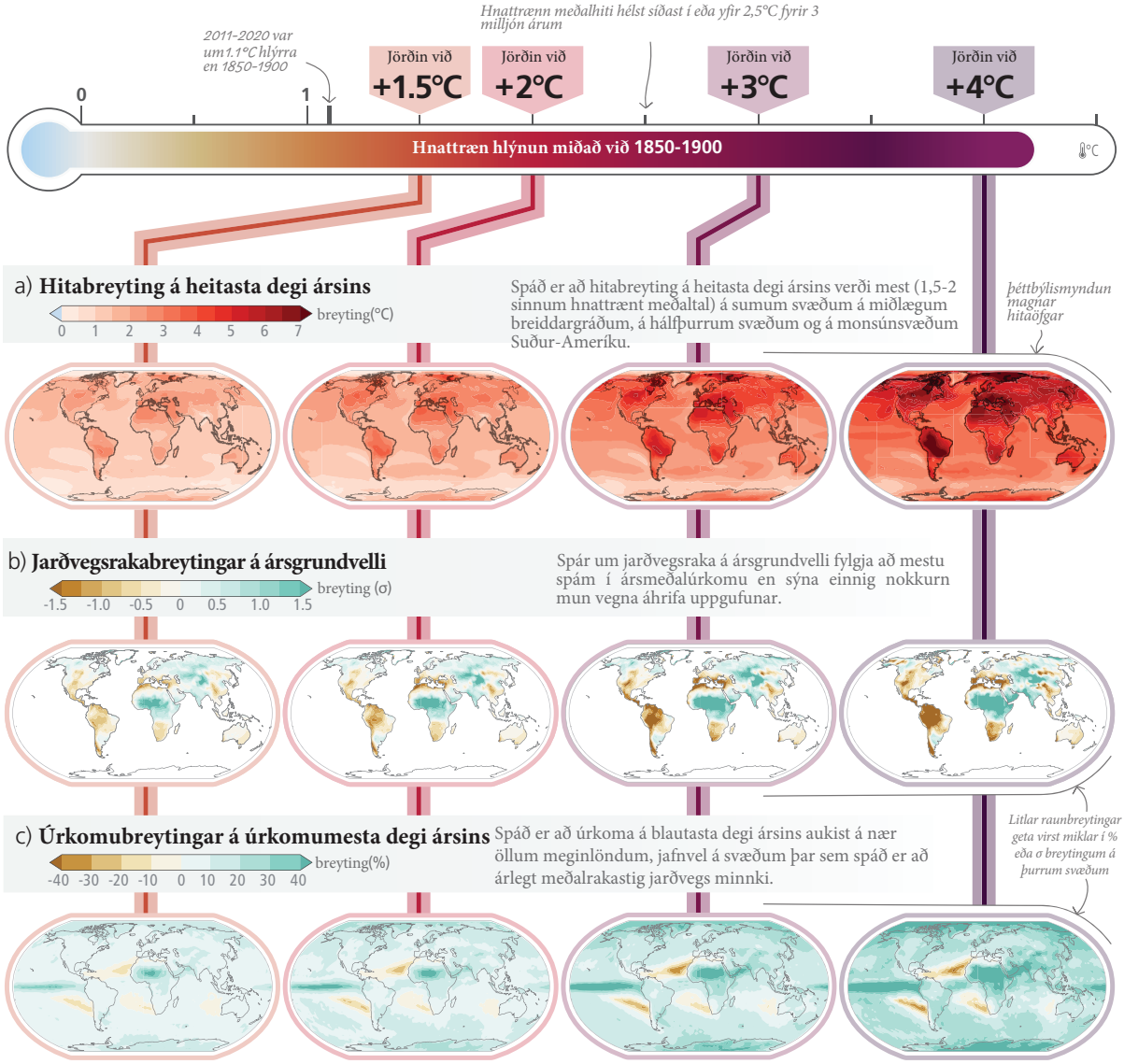
Áhrif loftslagsbreytinga á framleiðslu og aðgang að matvælum minnkar næringu og fæðuöryggi, sérstaklega á viðkvæmum svæðum. Óumflýjanleg hækkun sjávarstöðu mun valda keðjuverkandi og samverkandi áhrifum með eyðileggingu á vistkerfum við strendur, seltu í grunnvatni, flóðum og tjóni á innviðum. Það hefur í för með sér keðjuverkandi neikvæð áhrif á lífsviðurværi, heilsu, velferð, fæðu- og vatnsframboð í nálægri og fjarlægri framtíð.

Athafnir mannkyns hafa áhrif á alla þætti loftslagskerfisins en viðbrögðin taka áratugi eða jafnvel aldir



Mynd 1.2: a) Hnattræn hlýnun frá 1950 til 2100. Svört lína sýnir söguleg gögn fyrir hnattrænan meðalhita 1950–2020 og litaðar línur og skyggð svæði sýna hlýnun og spönn líkana samkvæmt ólíkum sviðsmyndum. Myndir b), c) og d) sýna sambærilegar mælingar og niðurstöður líkana fyrir fimm sviðsmyndir (sjá viðauka C) fyrir samdrátt hafíspekju í september, súrnun sjávar og sjávarstöðuhækkun. Mynd e) sýnir sjávarstöðuhækkun árið 2300 samkvæmt heitustu og köldustu sviðsmynd (IPCC, 2021, mynd SPM.8).

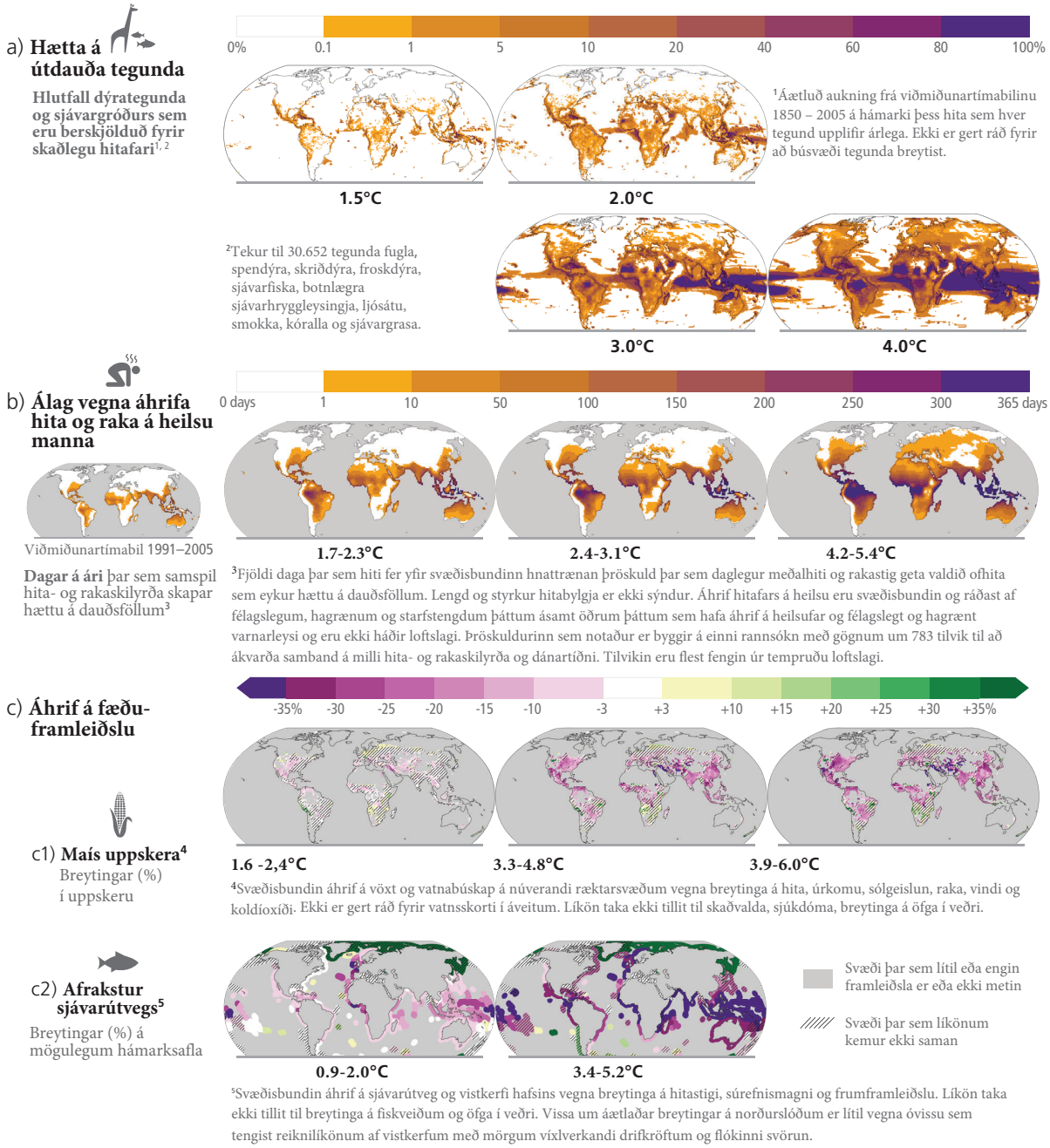
Svæðisbundnar breytingar á bæði meðalloftslagi og öfgum verða útbreiddari og stigmagnast með aukinni hlýnun



Mynd 1.3: Svæðisbundinn breytileiki á meðalloftslagi og öfgum verður útbreiddari og auðsærri fyrir hvert brot úr gráðu sem hlýnar. Svæðisbundnar breytingar á a) hita á heitasta degi ársins, b) raka í jarðvegi og c) mestu úrkomu leiða til ólíkrar þróunar mismunandi svæða. Sums staðar verður þurrara, annars staðar rakara (IPCC, 2023, mynd SPM.2).

Alvarleg áhrif loftslagsbreytinga á náttúruleg og manngerð kerfi aukast og svæðisbundinn munur magnast

Dæmi um áhrif án frekari aðlögunar



Mynd 1.4: Loftslagsbreytingar hafa áhrif á náttúruleg og manngerð kerfi. Aðlögun getur dregið úr tjóninu en ekki komið alfarið í veg fyrir það. a) Hætta á útdauða tegunda, b) hætta vegna heilsufarsáhrifa hita og raka og c) áhrif á fæðuframleiðslu (IPCC, 2023, mynd SPM.3).

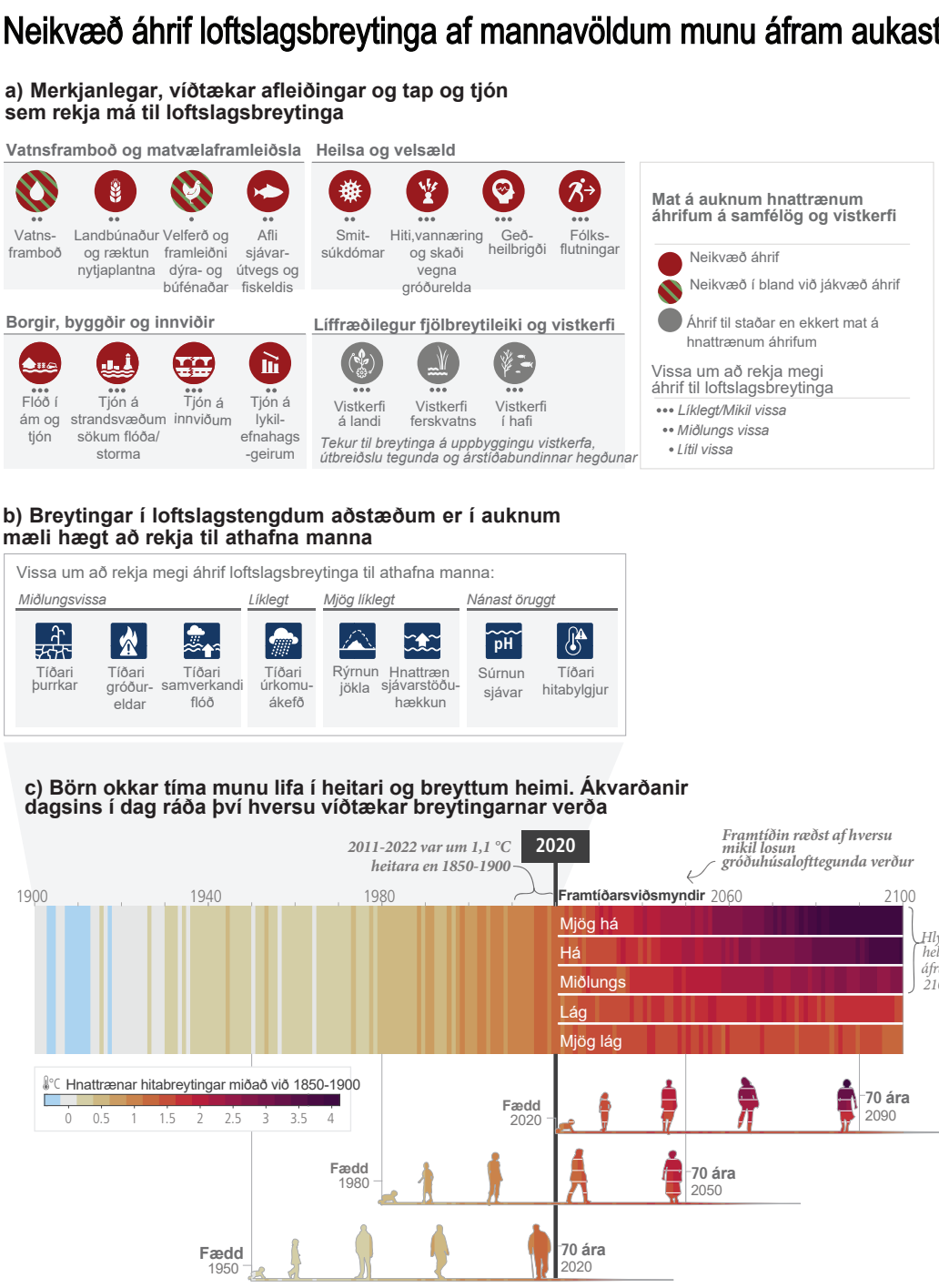
1.1.3 Afleiðingar og varanleiki loftslagsbreytinga

Afleiðingar loftslagsbreytinga stigmagnast með hlýnun og sumar þeirra ganga ekki til baka ef kólnar. Sú kynslóð sem fæðist nú á dögum mun upplifa heitari og breyttan heim. Þær ákvarðanir sem teknar eru núna varðandi losun gróðurhúsalofttegunda hafa áhrif á það hversu breyttur hann verður. (IPCC, 2023, SYR, myndir SPM.1 og SPM.2)

Mynd 1.5 sýnir dæmi um áhrif loftslagsbreytinga á vatnsframboð, matvælaframleiðslu, heilsu og velsæld, innviði og vistkerfi á landi, í ferskvatni og hafi. Með mismikilli vissu má rekja breytingar í loftslagstengdum aðstæðum til athafna manna, t.d. hvað varðar þurrka, gróðurelda, flóð, úrkomuákefð, rýrnun jökla, hækkun sjávarstöðu, súrnun sjávar og tíðari hitabylgjur. Samband hlýnunar og magns gróðurhúsalofttegunda í andrúmslofti er skýrt, hlýnun eykst með aukinni losun gróðurhúsalofttegunda. Með aukinni hlýnun aukast hnattrænar og svæðisbundnar breytingar á mörgum loftslagstengdum aðstæðum einnig. Þetta kann að hafa mjög skaðlegar afleiðingar, t.d. verða hitabylgjur og aftakaúrkoma algengari, sem leiðir til aukinnar áhættu fyrir samfélög og vistkerfi. Mynd 1.5c) sýnir hvernig hlýnunin magnast í þeim sviðsmyndum þar sem mest er losað, með vaxandi áhættu fyrir komandi kynslóðir.

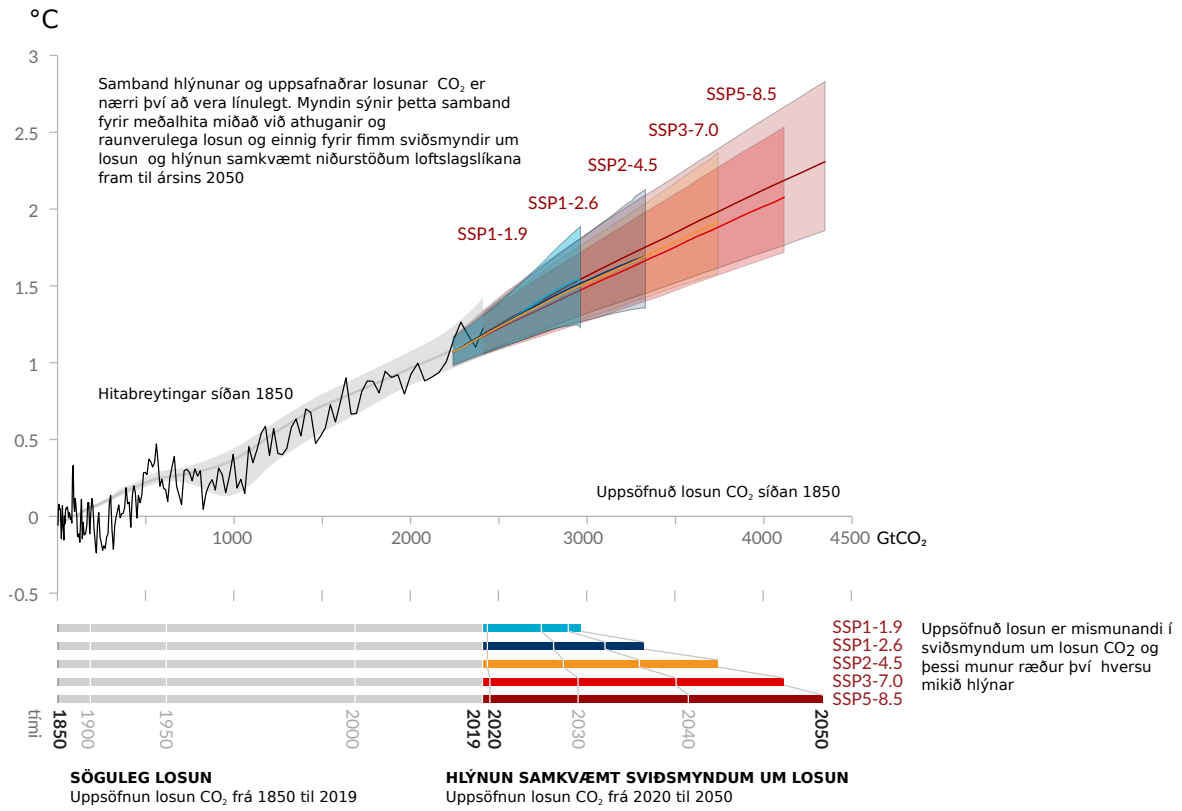
1.1.4 Samband hlýnunar og uppsafnaðrar losunar

Sterkt samband er á milli hnattrænnar hlýnunar og uppsafnaðrar losunar koldíoxíðs, eins og sjá má á mynd 1.6. Efri myndin sýnir bæði mælda hlýnun (miðað við meðaltal 1850–1900) og uppsafnaða losun (svarta línan). Lituðu línurnar sýna hlýnun sem fall af uppsafnaðri losun fyrir mismunandi losunarsviðsmyndir (sjá viðauka C). Myndin sýnir að samband hlýnunar og uppsafnaðrar losunar er nærri því að vera línulegt, sem setur sterkar skorður á það hversu mikið má losa ef halda á hlýnun innan tiltekinna marka. Hver þúsund gígatonn af CO_2 sem eru losuð leiða til 0.45 [0.27 – 0.63] °C hlýnunar. Ef takmarka á hnattræna hlýnun frá iðnbyltingu við 1.5 °C mætti ekki losa meira en 500 [300 – 900] $GtCO_2$ til viðbótar við það sem búið var að losa árið 2020 og ekki meira en 1350 [900 – 2300] $GtCO_2$ ef takmarka á hlýnun við 2 °C. Til samanburðar var hnattræn losun vegna bruna jarðefnaeldsneytis um 37,5 $GtCO_2$ árið 2022. Þannig að með óbreyttri losun næst 1.5 °C markið á 13 [8 – 24] árum og 2 °C markið á 36 [24 –61] árum. Uppsöfnuð losun er mismikil í ólíkum sviðsmyndum og neðri hluti myndar 1.6 sýnir hversu hröð losun og hlýnun verður á næstu áratugum í mismunandi losunarsviðsmyndum.



Mynd 1.5: a) Loftslagsbreytingar hafa nú þegar haft víðtæk áhrif á manngerð kerfi og leitt til breytinga á vistkerfum á landi, í ferskvatni og hafi. b) Breytingar í loftslagstengdum aðstæðum er í auknum mæli hægt að rekja til athafna manna, eins og valdir loftslagsvísar sýna. c) Breytingar á meðalyfirborðshita jarðar á tímabilunum 1900-2020 og 2021–2100 fyrir fimm framtíðarsviðsmyndir (í samanburði við 1850–1900), samhliða líftíma þriggja kynslóða (fædd 1950, 1980 og 2020) (IPCC, 2023, mynd SPM.1)

.



Mynd 1.6: ***Efri mynd.*** *Samband hnattrænnar hlýnunar (miðað við meðaltal 1850–1900) og uppsafnaðrar losunar CO_2 (svört lína). Lituðu svæðin og línurnar sýna fimm sviðsmyndir um losun CO_2 og hlýnun á tímabilinu 2020–2050.* ***Neðri mynd.*** *Uppsöfnuð losun CO_2 frá 1850–2019 (gráar línur) og losun hverrar sviðsmyndar á tímabilinu 2020–2050. Lárétti ásinn á myndinni er magn CO_2 losunar og fellur að lárétta ás efri myndarinnar. Tímasetningar hafa verið merktar inn á ásinn sem sýnir hversu hratt losun CO_2 hefur aukist. (IPCC, 2021, mynd SPM.10).*

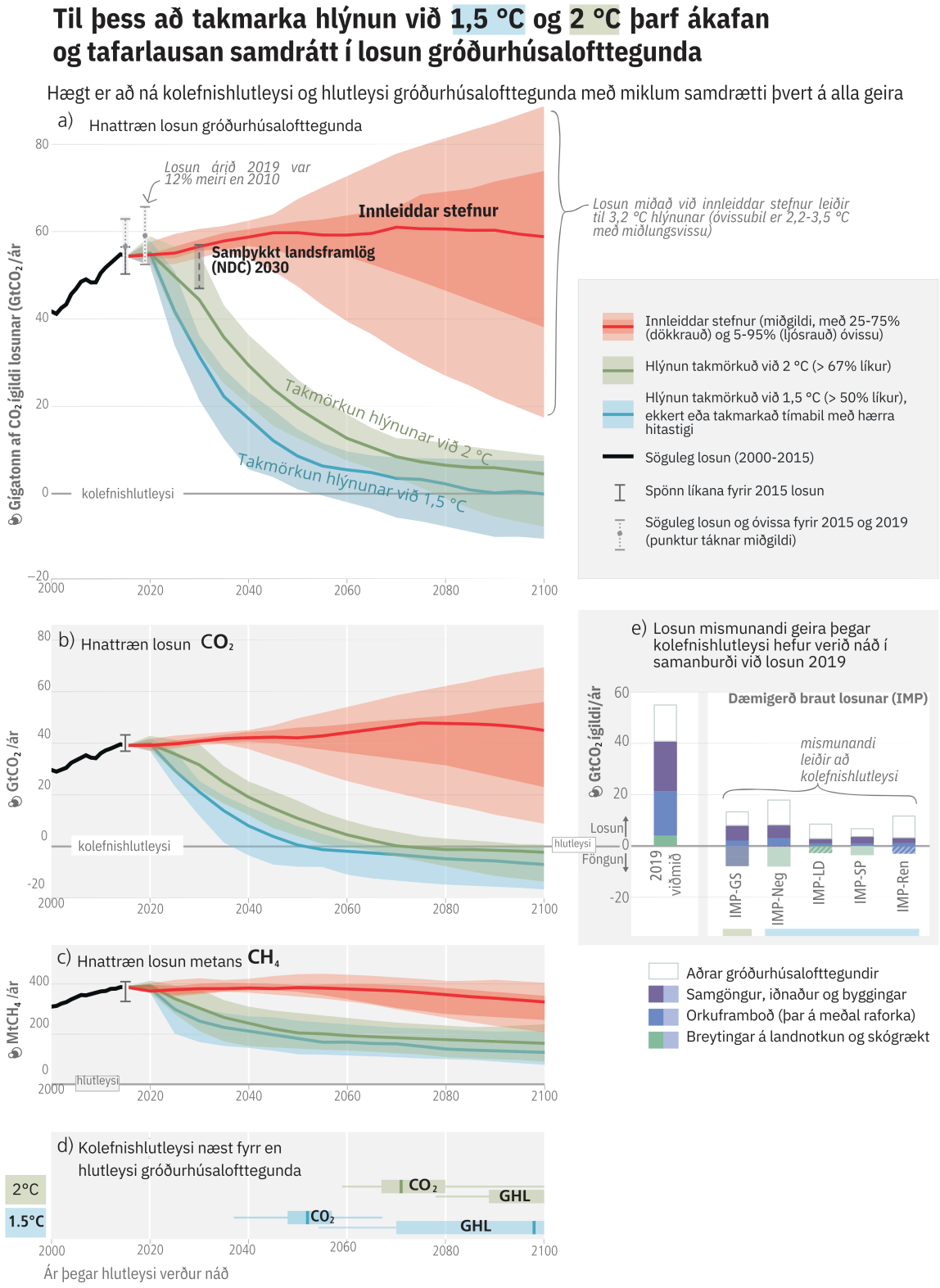
1.1.5 Þróun losunar síðustu áratugi og leiðir til að draga úr henni

Mynd 1.7 sýnir hnattræna losun gróðurhúsalofttegunda frá aldamótum og mögulegar brautir losunar til loka aldarinnar. Losun hefur aukist frá aldamótum en hægt hefur á aukningunni síðustu ár, að hluta til vegna aðgerða stjórnvalda. Hlutfall losunar frá þéttbýli hefur farið vaxandi. Nýtni losunar CO_2 hefur batnað, þ.e. losun sem hlutfall orkunotkunar eða vergrar landsframleiðslu hefur minnkað. Í heildina hefur losun þó aukist því vaxandi umsvif í heimshagkerfinu, þ.e. í iðnaði, orkuöflun, samgöngum, byggingum, landbúnaði og breyttri landnotkun hafa losað umfram bætta nýtni.

Myndin sýnir samantekt á því hvert hnattræn losun stefnir að gefnum mismunandi forsendum um efnahagsþróun og samdrátt. Flest ríki heims eru aðilar að Parísarsamningnum og þeim ber að senda inn áætlaðan samdrátt á næstu áratugum, svokölluð samþykkt landsframlög (*e. Nationally Determined Contribution, NDC*). Ef framlög allra aðildaþjóða sáttmálans til ársins 2030 eru lögð saman er ljóst að þau duga ekki til að ná markmiðum Parísarsamningsins; að halda hlýnun jarðar innan 2 °C frá iðnbyltingu. Hvað þá að þau samrýmist leiðum til að takmarka hlýnun við 1.5 °C. Ef aðgerðir til að draga úr losun verða ekki hertar eru líkur á að hlýnun verði á bilinu 2.4–3.5 °C árið 2100. Mynd 1.7 sýnir að losun, sem samsvarar takmörkun hlýnunar við 1.5 °C eða 2 °C, fellur engan veginn að núverandi samþykktum landsframlögum.

Miðað við þær stefnur, sem þegar hafa verið innleiddar, nær hnattræn losun gróðurhúsalofttegunda hámarki um miðja öldina og dregst ekki hratt saman eftir það. Ef fylgja á markmiðum Parísarsamningsins þarf hámarki að vera náð um 2025. Ef takmarka á hlýnun við 1.5 °C þarf 43% samdrátt í losun CO_2 fyrir 2030 en 27% samdrátt ef takmarka á hlýnun við 2 °C. Hvað markmið Parísarsamningsins varðar er niðurstaðan því einföld:

> **Til að takmarka hlýnun við 1.5 °C, eða auka líkur á að það takist að takmarka hlýnun við 2 °C, þarf ákafan og tafarlausan samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda alls staðar og í öllum geirum samfélagsins.** (IPCC,2023, SYR, SPM.5)



Mynd 1.7: Sjá myndatexta á næstu síðu

Texti með mynd 1.7 a) Hnattræn losun gróðurhúsalofttegunda frá aldamótum (svört lína) og sviðsmyndir um losun til loka aldarinnar. Rauðskyggt svæði sýnir innleiddar stefnur og rauð lína sýnir miðgildi þeirra. Grænskyggt svæði sýnir þá losun sem fellur að markmiði Parísarsamningsins um að hlýnun fari ekki yfir 2 °C og bláskyggt sýnir losunarsviðsmyndir þar sem hlýnun fer ekki yfir 1.5 °C. Til að þessi markmið náist þarf hnattræn losun að ná hámarki á árabilinu 2020–2025 og hraður og mikill samdráttur í losun gróðurhúsalofttegunda að fylgja næstu tvo áratugi á eftir. Ef aðgerðir stjórnvalda verða ekki hertar, umfram þær sem hafa verið innleiddar árið 2020, er útlit fyrir að losun gróðurhúsalofttegunda haldi áfram að aukast eftir 2025. Það mun leiða til þess að hlýnun verði 3.2 [2.2 – 3.5] °C árið 2100. b) og c) Hnattræn losun koldíoxíðs og metans ásamt sömu sviðsmyndum og litum eins og á mynd a). Á myndum a), b) og c) sýnir lárétt lína hlutleysi. d) Tímasetning kolefnishlutleysis og hlutleysi gróðurhúsalofttegunda fyrir 1.5 °C og 2 °C takmörkin. e) Losun mismunandi geira þegar kolefnishlutleysi hefur verið náð. (Byggt á mynd SPM.5 í IPCC, 2023)

Það er ákaflega metnaðarfullt markmið að stefna að samdrætti í losun sem takmarkar hlýnun við 1.5 °C. Sambærilegar aðferðir þarf til að takmarka losun um 1.5 °C og 2 °C, en mynd 1.7 sýnir að ef stefna á að fyrra markinu þarf samdráttur að vera hraðari og meiri. Í skýrslum IPCC eru nefnd eftirfarandi atriði sem skipta máli til að draga hratt úr losun:

- Umbreyta orkukerfum þar sem dregið er úr notkun jarðefnaeldsneytis með orkuskiptum, ríkari áherslu á rafvæðingu og rafeldsneyti og aukinni skilvirkni orkunotkunar og samdrætti í eftirspurn.
- Draga úr losun frá iðnaði með bættri skilvirkni í notkun efna og orku, aukinni hringrásarhugsun, rafvæðingu og notkun lágkolefnis-orku og -frameiðsluferla.
- Draga úr losun vegna bygginga með notkun loftslagsvænna byggingarefna og samdrætti í notkun efna og orku á öllum stigum lífsferlis bygginga.
- Draga úr losun frá samgöngum með breyttum venjum, rafvæðingu samgangna á landi og notkun græns rafeldsneytis, svo sem vetnis og afleiða þess auk tilbúins eldsneytis og lífeldsneytis í þungaflutningum á landi og samgöngum á sjó og í lofti. Rafvæðing styttri samgangna á sjó og í lofti er möguleg, en rafvæðing hafna og flugvalla er mikilvæg.
- Draga úr losun frá landbúnaði og landnotkun með samdrætti í framleiðslu, ásamt breytingum á neysluhegðun, minni sóun matvæla, skógrækt og endurheimt vistkerfa.
- Föngun og förgun koldíoxíðs. Auk þess að fanga kodíoxíð frá iðnaði og farga því verður að fjarlægja koldíoxíð úr andrúmsloftinu ef takast á að ná kolefnishlutleysi á heimsvísu. Kolefnishlutleysi lýsir ástandi þar sem jafnvægi hefur náðst milli losunar og bindingar af mannavöldum og nettólosun er því núll. Magn þess koldíoxíðs sem þarf að fjarlægja fer þó eftir því hversu vel gengur að draga úr losun.

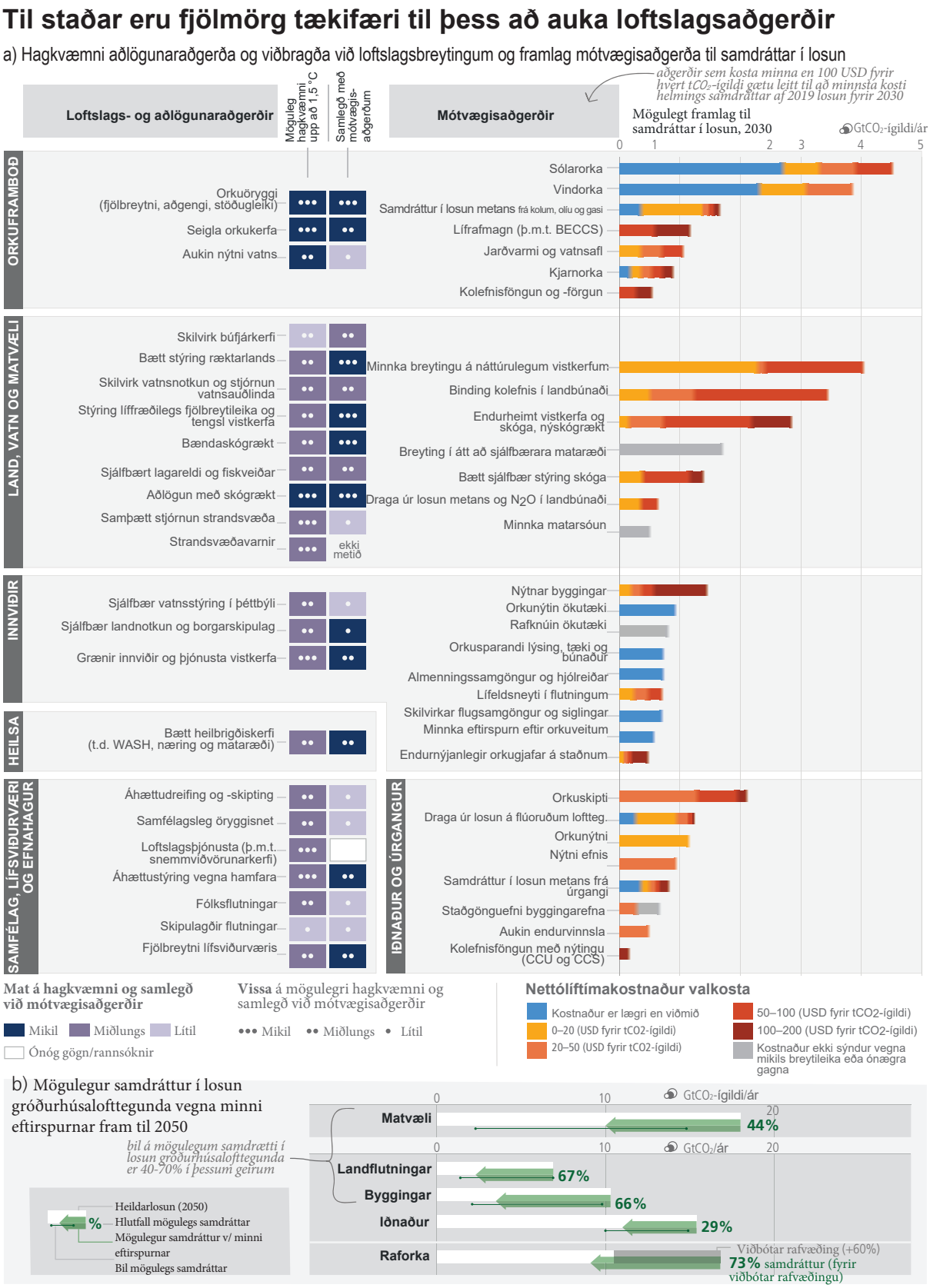
Aðgerðir, eins og þær sem lýst er hér að ofan, þ.e. til að draga úr losun eða fanga og farga koldíoxíði eru einu nafni kallaðar *mótvægisaðgerðir*. Slíkar aðgerðir eru önnur meginstoð aðgerða gegn loftslagsbreytingum, hin stoðin eru aðgerðir til *aðlögunar* vegna afleiðinga loftslagsbreytinga.

1.1.6 Mótvægisaðgerðir og aðlögun að loftslagsbreytingum

Hægt er að ná umtalsverðum samdrætti með tækni sem nú þegar er til, ásamt kerfisbreytingum og breytingum í neysluhegðun, en áframhaldandi tækniþróun er mikilvæg. Sem dæmi um kerfisbreytingar má nefna rafvæðingu samgangna á landi, notkun líf-, raf- og tilbúins eldsneytis í þungaflutningum á sjó og í lofti, rafvæðingu iðnaðar og aukinnar notkunar lágkolefnisorku, efnaferla sem lítið losa við iðnað, auk föngunar og förgunar koldíoxíðs. (Byggt á IPCC, 2023, SYR grein C.3)

Nauðsynlegt er að hraða mótvægisaðgerðum til að draga úr losun og auka bindingu kolefnis og styðja við markmið um sjálfbæra þróun. Margar mótvægisaðgerðir tengjast vel Heimsmarkmiðum Sameinuðu þjóðanna. Í öllum geirum og á öllum svæðum er það fjármagn sem veitt er til mótvægisaðgerða ekki nægilegt til að ná markmiðum um samdrátt í losun og aukna kolefnisbindingu en breiðast er bilið í þróunarlöndum. Alþjóðasamstarf um lausnir og aðgerðir er nauðsynlegt til að metnaðarfull markmið um að takmarka hlýnun náist.

Samlegðaráhrif geta einnig verið á milli mótvægisaðgerða og aðgerða til aðlögunar að loftslagsbreytingum þannig að sumar aðgerðir skila bæði árangri fyrir aðlögun og samdrátt í losun. Dæmi um þetta eru sér í lagi aðgerðir sem tengjast byggðu umhverfi og landnotkun, t.d þar sem styrking náttúrulegra vistkerfa getur bætt loftslagsþol og haft bindingu kolefnis í för með sér. Mynd 1.8 sýnir hvaða tækifæri eru til staðar fyrir ólíka geira auk þess sem þar eru listaðar upp ýmsar tegundir aðgerða. Myndin varpar ljósi á samlegð milli aðlögunaraðgerða og mótvægisaðgerða. Ef myndin er skoðuð sést að af 21 aðgerð, þar sem samlegð er metin, er hún miðlungs eða mikil. Myndin sýnir einnig metinn kostnað aðgerða og mögulegt framlag þeirra til losunar. Lengd láréttu súlanna sýnir metinn samdrátt en liturinn sýnir kostnað. Augljóst er að vind- og sólarorka koma vel út á meðan aðrir kostir, eins og þeir sem byggja á föngun og förgun (CCS) eða föngun og nýtingu (CCU) á koldíoxíði, eru kostnaðarsamir miðað við þann samdrátt í losun sem þeim fylgir.



Mynd 1.8: sjá myndatexta á næstu síðu

Texti með mynd 1.8 Til staðar eru fjölmörg tækifæri til þess að auka loftslagsaðgerðir. Liður (a) sýnir hagkvæmni aðlögunaraðgerða og viðbragða við loftslagsbreytingum og framlag mótvægisaðgerða til samdráttar í losun í náinni framtíð. Vinstra megin eru loftslags- og aðlögunaraðgerðir metnar út frá hagkvæmni og samlegðar við mótvægisaðgerðir á næstu áratugum, miðað við allt að 1.5 °C hlýnun. Hægra megin má sjá valdar mótvægisaðgerðir ásamt framlagi til samdráttar í losun (lengd súlunnar) og áætluðum kostnaði (litur súlunnar) miðað við núverandi viðmiðunarsviðsmyndir fyrir árið 2019. Liður (b) sýnir mögulegan samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda (GHL) vegna minni eftirspurnar fram til 2050. Samdrátturinn er metinn út frá um það bil 500 rannsóknum víðsvegar að. Hvíta línan sýnir geirabundna meðallosun árið 2050, skv. sviðsmyndum sem eru í samræmi við loforð ríkisstjórna árið 2020 um losun til ársins 2050. Hlutfallstalan sýnir mögulegan samdrátt og græna örin sýnir þátt minni eftirspurnar. Bil mögulegs samdráttar er sýnt með línu á milli punktanna sem sýna mesta og minnsta samdrátt sem greint er frá í heimildum. Neðsta línan sýnir hvernig heildareftirspurn eftir raforku getur minnkað með samdrætti í öðrum geirum. Dökkgráa línan sýnir losun vegna aukinnar raforkueftirspurnar í tengslum við aukna rafvæðingu í öðrum geirum. Hægt er að komast hjá þessari auknu losun með aðgerðum á sviði innviða og félags- og menningarlegra þátta sem hafa áhrif á raforkunotkun í iðnaði, landflutningum og byggingum (græna örin). (Byggt á mynd SPM.7 í IPCC, 2023).

1.1.7 Afleiðingar þess að aðhafast ekkert

Í skýrslu annars vinnuhóps IPCC er listi með algengum spurningum og svörum við þeim (WG2-FAQ, 2022). Þriðja spurning þess lista fjallar um hvaða áhrif loftslagsbreytingar muni hafa á líf núverandi æsku verði ekki gripið til mótvægisaðgerða. Ljóst er að án mótvægisaðgerða fara afleiðingarnar út fyrir þau mörk sem aðlögun ræður við. Í öllum skýrslum AR6 kemur auk þess fram að loftslagsbreytingar hafa þegar veruleg hnattræn áhrif, bæði á náttúru og manngerð kerfi. Á næstu áratugum munu þau aukast með víðtækum áhrifum á mannlíf, m.a. á fæðu- og vatnsframboð, innviði og efnahagslíf, heilsu- og velsæld.

Í svarinu við spurningunni kemur fram að þau sem eru 10 ára eða yngri árið 2020 gætu lifað í heimi þar sem aftakaatburðir eru nær fjórfalt algengari ef hlýnar um 1.5 °C og fimmfalt algengari ef hlýnar um 3 °C. Einstaklingi sem er 55 ára árið 2020 mun líklega ekki endast ævin til þess að upplifa slíka aukningu í aftakaatburðum. Við núverandi aðstæður þarf um 30% mannkyns að glíma við hitaálag sem getur verið banvænt og ef hlýnar um meira en 4 °C eykst þetta hlutfall í 48–76% í lok þessarar aldar. Margir einstaklingar munu þurfa að flytja af lágsvæðum, sem eykur samkeppni um land með hættu á átökum. Loftslagbreytingar munu hafa áhrif á gæði og framboð vatns, með afleiðingum fyrir hreinlæti, matvælaframleiðslu og vistkerfi, bæði vegna flóða og þurrka. Hlýni um 2 °C má búast við að 800 til 3000 milljónir manns þurfi að glíma við viðvarandi vatnsskort og hlýni um 4 °C verður fjöldinn um fjórir milljarðar. Núverandi og komandi kynslóðir munu einnig þurfa að glíma við kerfislægar áhættur í framleiðslukeðjum og dreifingu matvæla. Með aukinni hlýnun verður erfiðara að rækta, framleiða, flytja, dreifa, kaupa og geyma mat, sem mun bitna verst á fátækustu hópunum. Fjöldi þeirra sem munu þurfa að þola hungur í framtíðinni fer m.a. eftir árangri aðlögunar og mótvægisaðgerða. Það veldur áhyggjum að þessi mögulegu áhrif muni ekki einungis draga úr tækifærum til sjálfbærrar þróunar, heldur auka fátækt og misrétti og valda fólksflutningum vegna loftslagsbreytinga.

Upptalningin að ofan er einungis brot af svari við því hvað getur gerst ef ekkert er aðhafst til að draga úr losun. Góðu fréttirnar eru þær að draga má verulega úr öllum þessum áhættuþáttum ef gripið er til tafarlausra aðgerða til að draga úr losun og takmarka hlýnun, auk þess að styrkja aðgerðir til aðlögunar. Ungt fólk, ásamt ýmsum félagasamtökum, hafa aukið almenningsvitund um loftslagsbreytingar og lífshættulegar afleiðingar þeirra. Hér að framan kemur fram að margar mótvægisaðgerðir eru til staðar og sumum þeirra fylgja veruleg samlegðaráhrif við aðlögun. Til að tryggja framtíð okkar og komandi kynslóða þarf að taka tillit til loftslagsáhættu við alla ákvarðanatöku og skipulag. Þekkingin og tæknin eru þegar til staðar. Ákvörðunin er okkar.

Heimildir

IPCC (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor og T. Waterfield. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 616. URL: https://doi.org/10.1017/9781009157940.

— (2019a). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi og J. Malley. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 896. URL: https://doi.org/10.1017/9781009157988.

— (2019b). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama og N.M. Weyer. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 755. URL: https://doi.org/10.1017/9781009157964.

— (2021). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, 3-32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.

— (2023). *Summary for Policymakers*. Gefið út af Hoesung Lee, Katherine Calvin, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter Thorne, Christopher Trisos, José Romero, Paulina Aldunce, Ko Barrett, Gabriel Blanco, William W. L. Cheung, Sarah L. Connors, Fatima Denton, Aïda Diongue-Niang, David Dodman, Matthias Garschagen, Oliver Geden, Bronwyn Hayward, Christopher Jones, Frank Jotzo, Thelma Krug, Rodel Lasco, June-Yi Lee, Valérie Masson-Delmotte, Malte Meinshausen, Katja Mintenbeck, Abdalah Mokssit, Friederike E. L. Otto, Minal Pathak, Anna Pirani, Elvira Poloczanska, Hans-Otto Pörtner, Aromar Revi, Debra C. Roberts, Joyashree Roy, Alex C. Ruane, Jim Skea, Priyadarshi R. Shukla, Raphael Slade, Aimée Slangen, Youba Sokona, Anna A. Sörensson, Melinda Tignor, Detlef van Vuuren, Yi-Ming Wei, Harald Winkler, Panmao Zhai og Zinta Zommers. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press.

IPCC Working Group I (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896.

IPCC Working Group II (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem

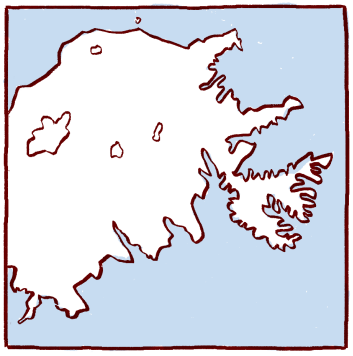
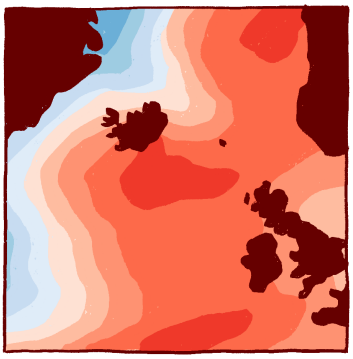
og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3056. DOI: 10.1017/9781009325844.

IPCC Working Group III (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz og J. Malley. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.

WG2 (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Frequently Asked Questions*. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/faqs/IPCC_AR6_WGII_FAQ-Brochure.pdf.

KAFLI

2 VEÐURFAR, VATNAFAR, JÖKLAR OG SJÁVARSTAÐA


Efnisyfirlit kafla

2.1 Veðurfar . . . 25
2.1.1 Þróun veðurfars á nútíma . . . 25
2.1.2 Hitaþróun á Íslandi á tíma samfelldra mælinga . . . 27
2.1.3 Þróun úrkomu . . . 29
2.2 Vatnafar . . . 34
2.2.1 Afrennsli og flóð . . . 34
2.2.2 Breytingar á snjóhulu . . . 37
2.2.3 Breytingar á afrennsli vegna hops jökla . . . 38
2.3 Ástand sjávar . . . 40
2.4 Jöklar . . . 44
2.4.1 Ástand og breytingar frá lokum litlu ísaldar . . . 44
2.4.2 Líklegar breytingar íslenskra jökla á komandi öld . . . 49
2.5 Sjávarstöðubreytingar . . . 54
2.5.1 Orsakir sjávarstöðubreytinga . . . 54
2.5.2 Sviðsmyndir um eiginlegar sjávarstöðubreytingar . . . 56
2.5.3 Landhæðarbreytingar . . . 59
2.5.4 Afstæðar sjávarstöðubreytingar kringum Ísland . . . 62

Samantekt

1. Sú saga fornveðurfars, sem meta má með gögnum frá Íslandi, fellur í megindráttum að veðurfarssögu norðurhvelsins utan hitabeltisins.

2. Á Íslandi voru skilyrði hlýjust snemma á nútíma. Síðan skiptust á óregluleg, hlýrri og kaldari tímabil en í heildina kólnaði og kaldast varð í lok 19. aldar.

3. Frá lokum 19. aldar hefur hlýnað verulega (fyrir árshita um 1,0 °C á öld að jafnaði), meira að vetri (um 1,4 °C á öld) en sumri (um 0,7 °C á öld).

4. Þó hægt hafi á hraða hlýnunar frá útkomu síðustu skýrslu vísindanefndar er enn óvenjuhlýtt á landinu og meðaltal síðustu áratuga er nokkuð yfir meðaltali allra annarra áratuga síðan mælingar hófust. Óvenjulega hlý sumur hafa slegið hitamet á nokkrum veðurstöðvum.

5. Úrkoma jókst á síðustu áratugum og síðustu ár hefur ársúrkoma verið um 5–10% meiri en á tímabilinu 1971–2000.

6. Hlutfall snævar í úrkomu minnkaði á síðustu áratugum, meira á láglendi en hálendi.

7. Snjóhula fór minnkandi samfara hlýnun í lok síðustu aldar en tók að aukast á ný eftir aldamótin. Umtalsverður munur er á þróun snjóhulu milli landshluta og haustmánaða og vormánaða.

8. Mesta aftakaúrkoma á sólarhring er 50–190 mm á veðurstöðvum. Samkvæmt reikningum, byggðum á endurgreiningu, er hún 70–110 mm víða á láglendi, en 140–180 mm austan- og suðaustanlands og á hálendinu, en fer yfir 500 mm á jöklum.

9. Breytingar á tíðni flóða ráðast m.a. af úrkomubreytingum, breytingum á leysingu jökla, breytingum á snjósöfnun og hlutfalli snævar í úrkomu.

10. Aukin úrkoma og hlýindi að vetri geta aukið tíðni flóða á haust-og vetrarmánuðum, en að sama skapi fækkað þeim að vor- og sumarlagi.

11. Framreikningar með sviðsmyndum benda til þess að stærð flóða aukist. Flóð af þeirri stærð, sem nú er fágæt, verða tíðari.

12. Nota má breytingar í tíðni minni flóða (amaflóða og flóða sem hafa endurkomutíma innan 20 ára) til að leggja mat á breytingar í tíðni stærri og sjaldgæfari flóða.

13. Verulega hefur hlýnað í Norður-Atlantshafi á síðustu áratugum. Þó eru umtalsverðar sveiflur í sjávarhita umhverfis Ísland.

14. Á öðrum áratug þessarar aldar kólnaði á hafsvæðinu suðvestur af landinu og suður af Grænlandi. Á síðustu árum hefur hlýnað aftur á því svæði.

15. Veltihringrás Atlantshafsins (AMOC) hefur verið frekar stöðug síðustu ár en vísindalegar niðurstöður um langtíma stöðugleika hennar eru ekki samhljóða. Flest loftslagslíkön sýna að styrkur hringrásarinnar dregst saman með hlýnun og þegar síðasta skýrsla kom út var hrun hringrásarinnar á þessari öld metið sem mjög ólíklegt. Nýjar rannsóknir hafa dregið úr vissu þess mats.

16. Hafið umhverfis Ísland er 2–4 °C hlýrra en önnur hafsvæði á sömu breiddargráðu og hluti þeirrar umframhlýnunar eru áhrif veltihringrásarinnar.

17. Jöklar á Íslandi hafa haldið áfram að rýrna þó heldur hafi hægt á rýrnun eftir 2010, samanborið við tímabilið 1995–2010. Frá hámarksútbreiðslu, undir lok 19. aldar, hafa þeir rýrnað um 2300 km^2 sem samsvarar 19% af hámarksflatarmálinu.

18. Heildarmassatap jöklanna á tímabilinu 1890–2019 var 540 ± 130 Gt, eða sem svarar 16 ± 4% af heildarmassa árið 1890. Það samsvarar 1.50 ± 0.36 mm sjávarstöðuhækkun að meðaltali yfir öll heimshöfin.

19. Nokkrir jöklar hafa horfið alveg.

20. Vegna hörfunar jökla eru jaðarlón fyrir framan að stækka og ný að myndast.

21. Vetrarafkoma jöklanna hefur verið of lítil og sumarleysing of mikil til að jafnvægi í stærð þeirra haldist.

22. Framtíð jökla landsins er mjög háð þróun loftslags og sjávarhita umhverfis landið. Þeir munu halda áfram að rýrna, en niðurstöður líkanreikninga sýna að núverandi massi þeirra mun minnka um 40–50% ef Parísarsamningurinn er haldið. Ef ekki tekst að ná tökum á losun gróðurhúsalofttegunda er hugsanlegt að rýrnunin verði mun meiri.

23. Sjávarstöðubreytingar við Ísland munu ráðast af landhæðarbreytingum, hlýnun hafsins og massatapi ísbreiðanna á Suðurskautslandinu og Grænlandi.

24. Mælingar sýna útbreitt landris við miðbik landsins og suðausturströnd þess. Landsig mælist á suðvesturhluta landsins. Annars staðar við ströndina gætir landriss eða landsigs í minna mæli.

25. Breytingar á þyngdarsviði jarðar valda því að massatap Grænlandsjökuls hækkar ekki sjávarstöðu við Ísland, en massatap ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu gerir það.

26. Mikil óvissa er um þróun sumra ferla sem geta valdið hröðu massatapi ísbreiðanna á Suðurskautslandinu og á Grænlandi, sérstaklega eftir aldamótin 2100. Óvissumörk á mati sjávarstöðuhækkunar hér við land árið 2150 eru því stór. Vegna þessa getur sjávarstöðuhækkun, í versta tilfelli, numið mörgum metrum. Miðgildi hækkunar er lægra og víða rúmlega metri eða minna.

27. Mat á sjávarstöðubreytingum til aldamóta sýnir að við suðausturströndina, þar sem land rís hraðast, er líklegt að afstæð sjávarstaða geti fallið um ∼1,5 m en hækkað um allt að 1,2 m þar sem landsig er hvað mest. Annars staðar á landinu er sjávarstöðuhækkun mismikil og ræðst m.a. af landrisi eða landsigi. Víða er hún nokkrum tugum sentimetra meiri í hlýjum sviðsmyndum.

28. Sjávarstöðubreytingar munu halda áfram öldum saman, jafnvel þó takist að minnka losun gróðurhúsalofttegunda.

29. Skipulagsákvarðanir, sem teknar eru nú á dögum, munu hafa áhrif á byggð og innviði í nokkur hundruð ár. Þess vegna þarf að taka tillit til komandi sjávarstöðubreytinga á þessari öld og þeirri næstu við skipulagsákvarðanir.

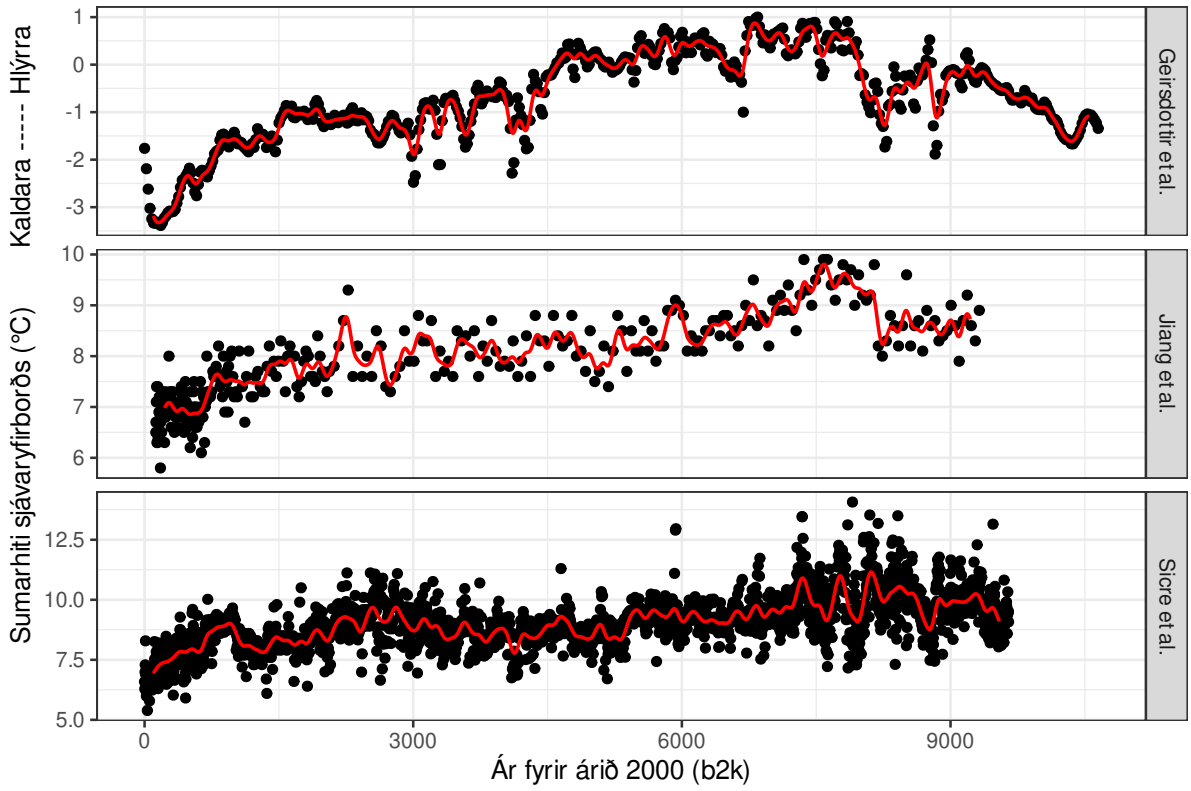
Í tveimur síðustu skýrslum vísindanefndar var farið yfir þær rannsóknir sem gerðar hafa verið á veðurfari, vatnafari, jöklum og tengdum sviðum hér á landi (sjá Halldór Björnsson o.fl. (2008) og Halldór Björnsson o.fl. (2018), **V2008** og **V2018** hér eftir). Niðurstöður rannsókna á þessum þáttum eru mjög viðamikið efni svo umfjöllun hefur einskorðast við þann hluta sem snýr að loftslagsbreytingum og áhrifum þeirra. Í þessum kafla verður farið yfir nýlegar rannsóknir á þessum eðlisþáttum jarðar.

2.1 Veðurfar

2.1.1 Þróun veðurfars á nútíma

Fjallað var um rannsóknir á loftslagssögu á Íslandi og í Norður-Atlantshafi í V2008 og V2018. Í stuttu máli sýna niðurstöður að á nútíma, frá síðasta jökulskeiði, hefur spönn langtíma hitastigsbreytinga á Íslandi verið um 4 °C (sjá grein 4.2 í V2018 og Miller o.fl. (2012)), sem er stærri spönn en að meðaltali fyrir jörðina á sama tíma. Hlýjast var á landinu fyrir um 6–8 þúsund árum. Síðan þá hefur kólnað, þó ekki órofa heldur skiptust á hlýrri og kaldari tímabil. Kaldasta tímabil nútíma virðist hafa verið á litlu ísöld, sem lauk í lok 19. aldar. Hlýnun síðan þá er um 0,8 °C á öld. Hér verður einungis gerð stuttlega grein fyrir niðurstöðum nýlegra rannsókna á veðurfarssögu Íslands. Samantektinni er ekki ætlað að vera tæmandi fyrir fornveðurfarsrannsóknir á Íslandi.

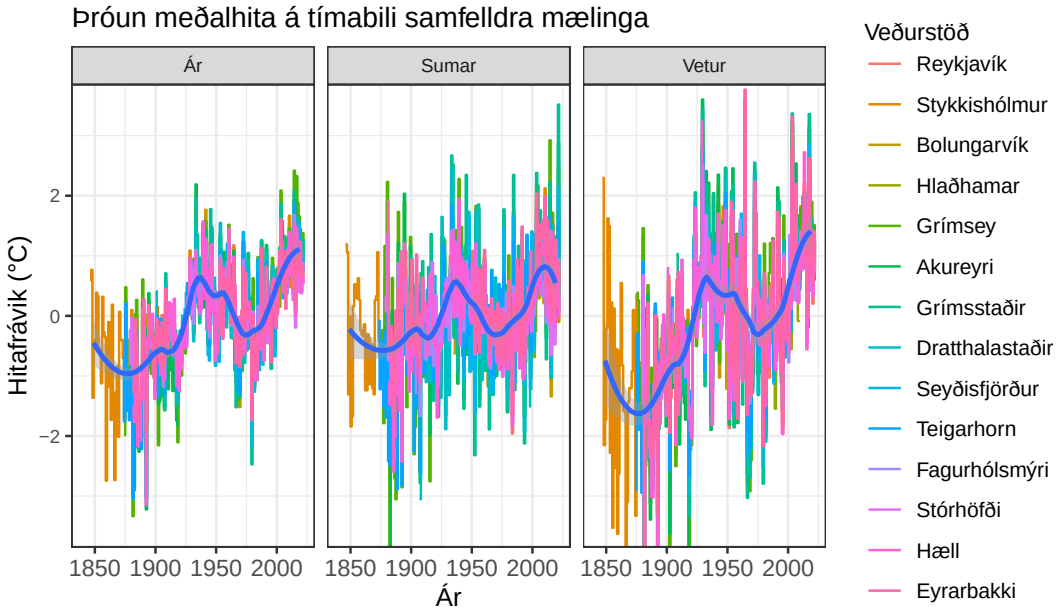
Í rannsóknum á vatna- og sjávarseti sýna gögn, sem tengja virkni lífvera við þróun veðurfars, sterka svörun við inngeislun sólar að sumri til (Geirsdóttir o.fl., 2013). Á norðurslóðum sýna margvísleg gögn að sumarkólnun á nútíma hafi orðið vegna minnkandi inngeislunar að sumarlagi. Það orsakast af reglubundnum breytingum í afstöðu jarðar og sólar. Rannsóknir á Íslandi hafa stutt við þessa mynd og bætt við þekkingu um sumarkólnun og þrepaskiptingu hennar (Geirsdóttir o.fl., 2019).



Mynd 2.1: Breytingar á hitafari á Íslandi og norðan við það á nútíma (athugið að tímaásinn er viðsnúinn: elsti hluti grafsins er til hægri og yngsti til vinstri, ásinn sýnir aftur í tímann frá árinu 2000). Efsta myndin byggist á vatnaseti frá sjö stöðuvötnum (Geirsdóttir o.fl., 2019), en neðri myndirnar tvær á sjávarseti frá setlagakjarnanum MD99-2275, sem tekinn var austan við Grímsey. Myndin í miðjunni byggist á kísilþörungum (Jiang o.fl., 2015) en sú neðri er s.k. alkenónvísir (Sicre o.fl., 2021). Á öllum myndunum sýna svartir punktar mæliniðurstöður, en rauði ferillinn er hlaupandi meðaltal reiknað með gássískri síu sem hefur 100 ára hálfvídd.

Magn lífræns kísils í vatnaseti sýnir lífvirkni (aðallega kísilþörunga) í vötnum að sumarlagi en hlutfall kolefnis og niturs (C:N hlutfall) sýnir breytingar á uppruna lífræns efnis, sem tengja má jarðvegsrofi og óstöðugleika yfirborðs. Samsettar mælirað ir á setkjörnum frá sjö stöðuvötnum sýna að sumarkólnunin, sem kemur fram í breytingum á magni lífræns kísils á mið- og síðari hluta nútíma, virðist hafa átt sér stað í þrepum, samfara breytingum á C:N hlutfalli sem bendir til víðtækra umhverfisbreytinga á sama tíma (Geirsdóttir o.fl., 2019). Fyrri rannsóknir sýndu að jöklar hurfu að mestu af landinu snemma á nútíma (sjá umfjöllun í V2018), en líklegt er að nýmyndun þeirra hafi fylgt í kjölfar þessara kólnunarþrepa. Langjökull fyrir um 5500 árum, Vatnajökull fyrir um 4500 árum og Drangajökull fyrir um 2600 árum (Geirsdóttir o.fl., 2019). Þá sýna rannsóknir einnig að fyrir um 1500 árum hafi orðið breytingar á C:N hlutfalli, sem bendir til umhverfisbreytinga og aukins jarðvegsrofs nokkru fyrir landnám (Geirsdóttir o.fl., 2019).

Sú saga fornveðurfars, sem gögn frá Íslandi lýsa, fellur í megindráttum að veðurfarssögu norðurhvelsins utan hitabeltis (Marcott o.fl., 2013) og þeim veðurfarsbreytingum sem ráða má af sjávarsetskjörnum sem teknir eru nærri Íslandi (sjá t.d. mynd 4.11 í V2018). Mynd 2.1 sýnir mat á hitafari á Íslandi á nútíma. Efst eru niðurstöður, byggðar á vatnaseti frá sjö stöðuvötnum á Íslandi (Geirsdóttir o.fl., 2019), en fyrir neðan eru sýndar niðurstöður á rannsóknum á sjávarsetkjarna sem tekinn var skammt austan Grímseyjar (MD99-2275). Á myndinni í miðjunni er hiti yfirborðssjávar að sumarlagi metinn út frá magni kísilþörunga og breytingum á þeim á nútíma (Jiang o.fl., 2015). Á neðstu myndinni er byggt á öðrum veðurvísi, svokölluðum alkenónvísi (Sicre o.fl., 2021). Lóðrétti ásinn á efstu myndinni er ekki beinn hitakvarði, en hann sýnir mun á kaldari (neikvæðar tölur) og hlýrri (jákvæðar tölur) skilyrðum. Kvarðinn á neðri myndunum sýnir yfirborðshita sjávar að sumarlagi. Þessum hitaferlum ber ekki vel saman í smáatriðum, þó sýna báðir að veður voru hlýjust snemma á nútíma og kaldasta tímabilið var í lok 19. aldar. Spönn sjávarhitabreytinga í þessum tveimur kjörnum er um 2,5 og 3 °C sem er minna en sú 4 °C spönn sem kom fram í V2018, en sú tala á við breytingar á landi. Aðferðafræðilegur munur á niðurstöðum Jiang o.fl. (2015) og Sicre o.fl. (2021) er nokkur, en munurinn á milli þeirra varpar ljósi á þá óvissu sem er til staðar í mati á breytingum á sjávarhita.



Mynd 2.2: Þróun meðalhita á Íslandi frá 1846 til 2022 a) ársmeðaltalshiti, b) sumarmeðaltalshiti og c) vetrarmeðaltalshiti. Framlenging og endurgerð á mynd 4.12 í V2018.

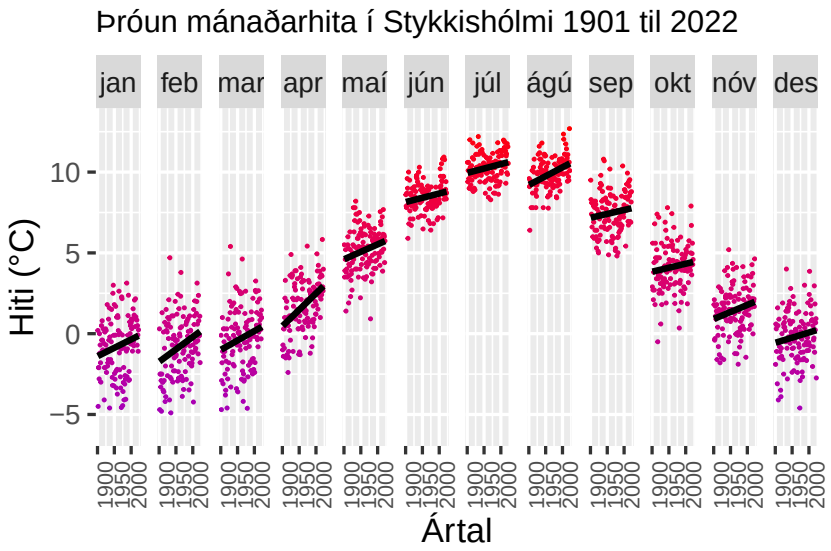
Kjarninn (MD99-2275) var staðsettur nærri skilum hlý- og kaldsjávar norðan við landið. Það þýðir að sveiflur í innflæði hlýsjávar norður fyrir landið valda líklega meiri hitasveiflum en við suðurströndina, þar sem slíkra áhrifa gætir síður. Ef hitabreytingar í hafi á síðustu áratugum

eru skoðaðar (sjá mynd 2.15) sést að þær eru ólíkar norðan við landið og sunnan við það. Í grein 3.6 eru niðurstöður á mynd 2.1 settar í samhengi við líklegar breytingar á næstu áratugum.

2.1.2 Hitaþróun á Íslandi á tíma samfelldra mælinga

Í V2018 var hitafar á Íslandi sett í samhengi við landfræðilega staðsetningu landsins og farið yfir langtímabreytingar og þróun á síðustu öld. Hitafar á landinu fór kólnandi síðustu þúsundir ára og kaldasta tímabilinu virðist hafa verið náð á litlu ísöld, sem lauk í lok 19. aldar. Frá þeim tíma hefur hlýnað verulega á landinu, hvort sem litið er til ársins í heild sinni, einstakra árstíða eða mánaða. Rétt eins og kólnunin, sem rædd var í 2.1.1, var hlýnunin ekki órofa. Á 2. áratug síðustu aldar var ákaft hlýnunarskeið en upp úr miðbiki aldarinnar kólnaði aftur fram að lokum 8. áratugar síðustu aldar. Þá tók við áköf hlýnun sem hefur varað fram til síðustu ára.

Mynd 2.2 sýnir þróun meðalhita á Íslandi fyrir árið, sumur (júní til ágúst) og vetur (desember til mars). Myndin sýnir að breytileiki í hita er meiri að vetri til en minnstur fyrir sumarmeðaltalið. Hallatölur í gögnum fyrir allt tímabilið sýna að hraði vetrarhlýnunar nam að jafnaði $1.4 \pm [1.3, 1.6]$ °C á öld, þar sem tölurnar innan hornklofa sýna 95% óvissumörk. Hraði sumarhlýnunar var um $0.7 \pm [0.6, 0.8]$ °C á öld og hraði hlýnunar fyrir ársmeðaltal er $1.0 \pm [0.9, 1.1]$ °C á öld. Í öllum tilvikum sýnir myndin að verulegar sveiflur eru á hraða hlýnunar og kólnunarskeið upp úr miðri öldinni er áberandi. Mynd 2.3 sýnir þróun meðalhita hvers mánaðar í Stykkishólmi frá 1901 til 2022, auk þess sem besta lína um hitagögn hvers mánaðar er sýnd. Myndin sýnir að allir mánuðir hafa hlýnað og er hlýnunin síðla vetrar og á vorin meiri en aðra mánuði ársins.

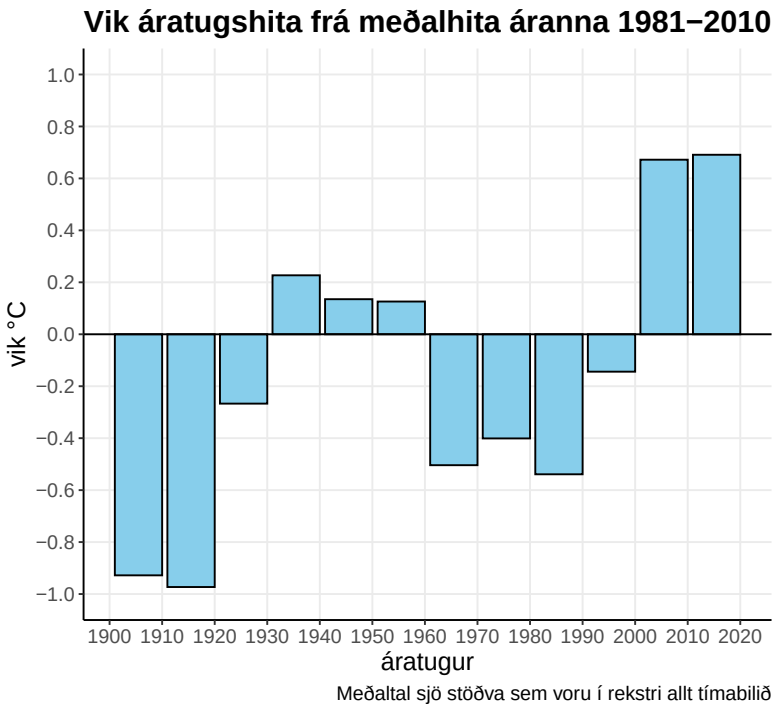


Mynd 2.3: Þróun meðalhita hvers mánaðar í Stykkishólmi. Lóðréttu dálkarnir afmarka hvern mánuð og einnig er sýnd besta lína gegnum gögn hvers mánaðar.

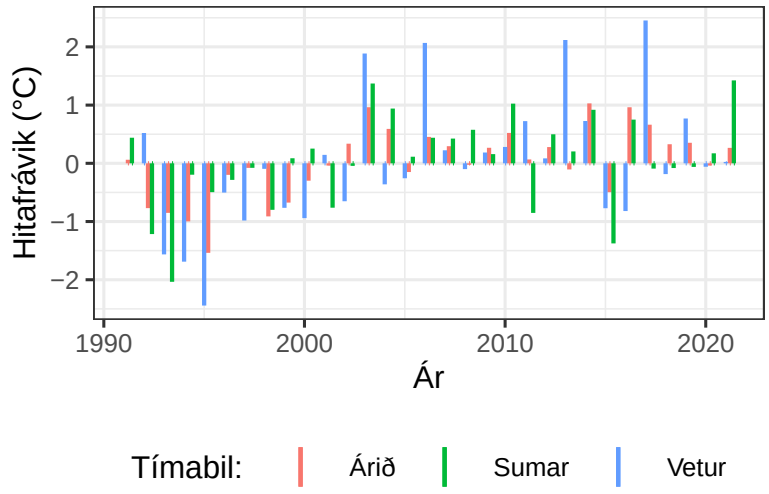
Frá útkomu V2018 hefur hægt á hinni áköfu hlýnun sem einkenndi hitafar á landinu frá því skömmu fyrir aldamót fram til 2016 sem var hlýjasta ár í sögu mælinga í Stykkishólmi. Þetta sýnir mynd 2.2. Hún sýnir einnig að eftir 2016 hefur verið mjög hlýtt á landinu, hvort sem er að vetri eða sumri. Sem dæmi má nefna að sumarið 2021 var það hlýjasta frá upphafi mælinga víða, m.a. á Akureyri, Egilsstöðum, Dalatanga og á Grímsstöðum á Fjöllum. Sumarið 2021 hafði flesta daga þar sem hámarkshiti mældist 20 °C eða meira einhvers staðar á landinu og það var líka óvenjusólríkt og þurrt á Norður- og Austurlandi.

Mynd 2.4 sýnir meðalhita hvers áratugar frá aldamótunum 1900 á sjö stöðvum sem eru nokkuð jafndreifðar um landið og voru í rekstri frá 1900. Athygli vekur að síðustu tveir áratugir eru mun heitari en hlýjustu áratugir um miðbik síðustu aldar, nokkuð sem sést ekki vel á mynd 2.2. Ástæðan er sú að á hlýindaskeiðinu um miðbik síðustu aldar var meiri munur á hlýjustu og köldustu árum innan hvers áratugar og köldustu árin drógu meðaltal hvers áratugar niður. Hlýja tímabilið sem hófst á 9. áratug síðustu aldar hefur ekki samsvarandi köld ár til að lækka meðaltal hvers áratugar.

Myndir 2.2, 2.3 og 2.4 eru alltar byggðar á mæligögnum veðurstöðva. Í V2018 var einnig byggt á niðurstöðum *endurgreininga* til að teikna kort af hita- og úrkomubreytingum. Eins og rakið er í grein 4A í V2018 þá eru endurgreiningar leið til þess að nota sem mest af gögnum til þess að gera sem besta mynd af ástandi lofthjúpsins á hverjum tíma og henta mjög vel til að skoða kort af þróun hita, úrkomu og veðurtengdra þátta. Í V2018 byggði fjórði kafli að nokkru á niðurstöðum ICRA endurgreiningar Veðurstofu Íslands (Nawri o.fl., 2017) en hér er einnig byggt á nýrri endurgreiningum, *CARRA* (Schyberg o.fl., 2020) fyrir Ísland og *ERA5* endurgreiningunni fyrir stærra svæði (Hersbach o.fl., 2017; Hersbach o.fl., 2020). Nánari mynd af hitabreytingum síðustu áratuga að vetri og sumri og yfir árið má sjá á mynd 2.5. Myndin er byggð á *CARRA* endurgreiningunni og sýnir vik frá meðaltali áranna 1991–2020.



Mynd 2.4: Þróun meðalhita hvers áratugar á Íslandi frá aldamótunum 1900. Sýnd eru vik frá meðaltali áranna 1981–2010. Myndin sýnir gögn frá sjö stöðvum víðs vegar um landið, þ.e. Reykjavík, Stykkishólmi, Akureyri, Grímsey, Stórhöfða, Teigarhorni og Hæli/Árnesi. Þessar stöðvar voru í rekstri allt tímabilið.

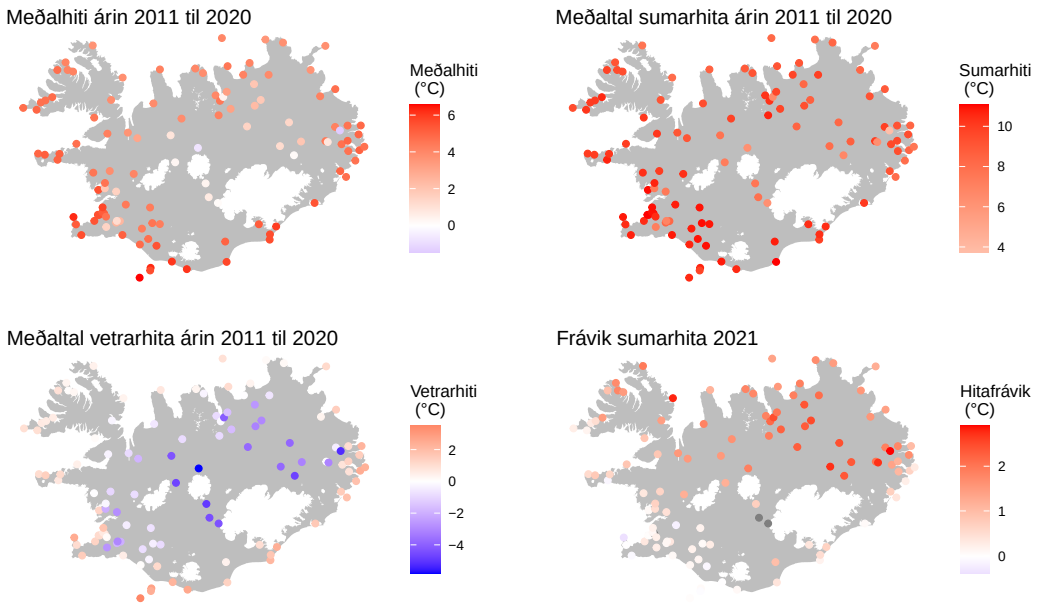


Mynd 2.5: Þróun hita á Íslandi samkvæmt CARRA greiningunni (sjá einnig mynd 2.7). Hver súla sýnir vik frá meðaltali áranna 1991 til 2020, fyrir ársmeðaltalshita og einnig meðaltalshita vetrar og sumars.

Fyrir árshitann eru lægstu gildin á fyrri hluta 10. áratugar liðinnar aldar, en eftir það hlýnar og árshitinn er yfir meðaltalinu flest ár nýrrar aldar. Mynd 2.4 sýnir að lítill munur er á meðaltölum síðustu tveggja áratuga og mynd 2.5 sýnir einnig lítinn mun á ársgildum á fyrsta og öðrum áratug þessarar aldar. Þótt litlar breytingar hafi verið milli áratuga hvað árshitann varðaði var nokkur munur á þróun sumar- og vetrarhita. Þrátt fyrir að sumarið 2021 sé það hlýjasta í CARRA greiningunni voru á fyrsta áratug þessarar aldar fleiri sumur sem voru heitari en meðaltal áranna 1991 - 2020, því kólnaði í heildina milli áratuga að sumarlagi. Að vetri til var þessu öfugt farið, á þeim árstíma hlýnaði áfram og áratugurinn 2010-2020 var hlýrri

en fyrsti áratugur þessarar aldar.

Mynd 2.7 sýnir þessar breytingar nánar, en hún sýnir kort af mismun milli meðaltalshita 10. áratugar síðustu aldar og 1. áratugar þessarar aldar og mismun meðaltalshita milli 1. og 2. áratugar þessarar aldar. Eins og mynd 2.5 byggist hún á CARRA endurgreiningunni og sýnir líka sams konar samanburð fyrir sumur og vetur. Vinstri dálkurinn á mynd 2.7 sýnir mismun meðalhita áratuga fyrir og eftir síðustu aldamót. Greinilegt er að hlýnunin er bæði mikil og víðfeðm, það hlýnar meira að vetri en sumri og árið í heild hlýnar einnig verulega. Með því að bera saman myndirnar í dálkunum tveimur má sjá þróun hitabreytinga yfir tímabilið. Hægri dálkurinn sýnir samanburð áratuganna 2001–2010 og 2011–2020 og í heildina er hlýnunin minni en sjá má í vinstri dálknum (fyrir áratugina 1991–2000 til 2001–2010). Á sumum svæðum verður kólnun, mest um hálfa til eina gráðu að sumri til. Fyrir árið í heild sinni er munurinn milli áratuga lítill, hlýnun víðast undir hálfri gráðu en kólnun suðvestantil á landinu. Að vetri til heldur hlýnun víða áfram, sérstaklega á Vestfjörðum og á Austurlandi en stöku svæði, sérstaklega suðvestanlands, kólna lítillega.

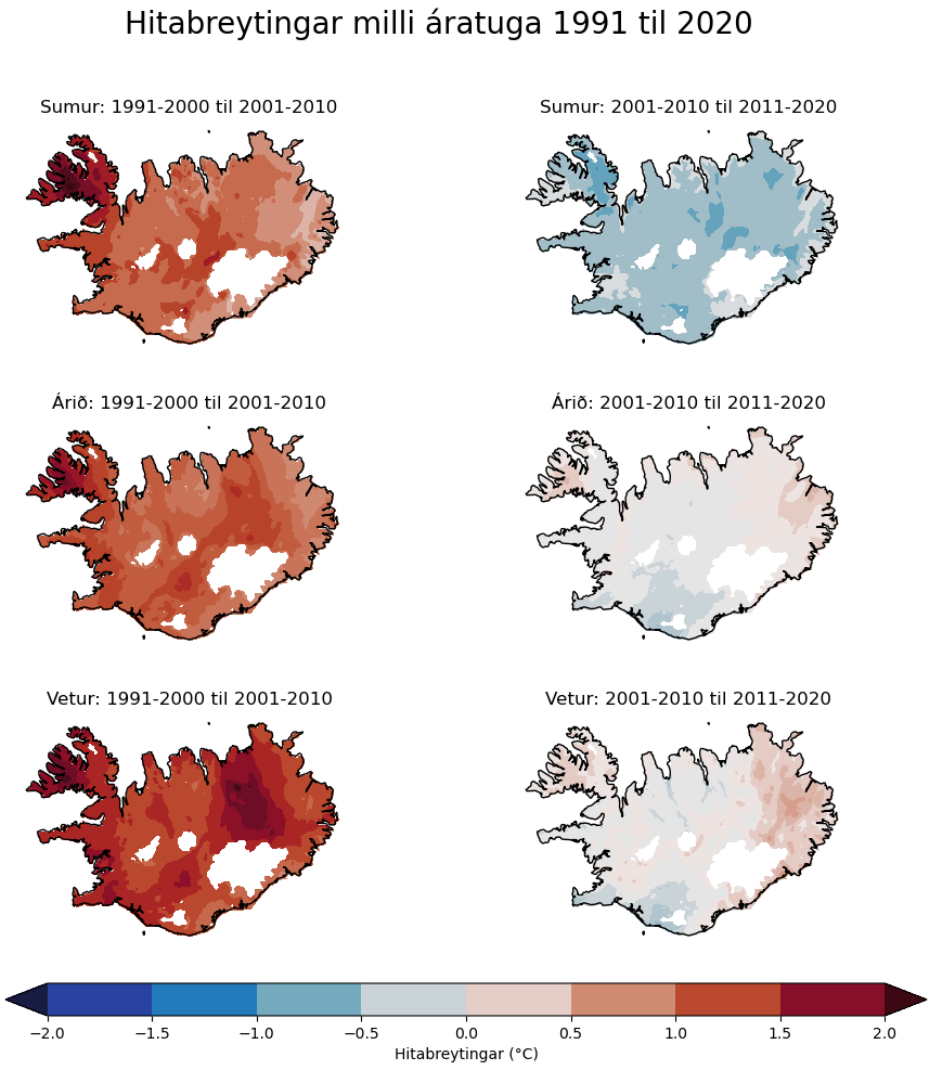


Mynd 2.6: Ársmeðalhiti á tímabilinu 2011–2020 á sjálfvirkum veðurstöðvum, sumarmeðalhiti og vetrarmeðalhiti og vik hita ársins 2021 frá sumarmeðaltalinu.

Frá aldamótum hefur sjálfvirkum veðurstöðvum á landinu fjölgað mikið, en mönnuðum veðurstöðvum að sama skapi fækkað. Á síðasta áratug var net sjálfvirkra veðurstöðva nokkuð þétt og sýnir mynd 2.6 ársmeðaltal, auk meðaltals sumar- og vetrarhita fyrir áratuginn 2011–2020. Þá sýnir myndin einnig frávik sumarhita árið 2021 og þau hlýindi sem urðu á norðan- og austanverðu landinu það sumar. Þó nokkur munur sé á tíðni mælinga á sjálfvirkum og mönnuðum stöðvum þá sýna þær sambærilega þróun hita, bæði í tíma og rúmi.

2.1.3 Þróun úrkomu

Í V2018 var greint frá helstu gögnum um úrkomu á Íslandi, bæði meðaltöl úrkomu og breytingar á síðustu áratugum. Meðalársúrkoma á landinu var lengi um 1500 mm (um 1000 mm á láglendi) á síðustu öld, en á 21. öld hefur hún aukist og er nú um 1600–1700 mm (1100–1200 mm á láglendi). Meðalársúrkoma jókst um allt landið á tímabilinu 1985–2014 en að sumarlagi var aukningin mest áberandi á vestanverðu landinu, á sama svæði og hlýnaði mest. Einnig kom fram að hámarks sólarhringsúrkoma hvers árs jókst en sú aukning var ekki tölfræðilega marktæk því verulegar sveiflur einkenna mæliraðir (sjá mynd 12.3 í V2018).



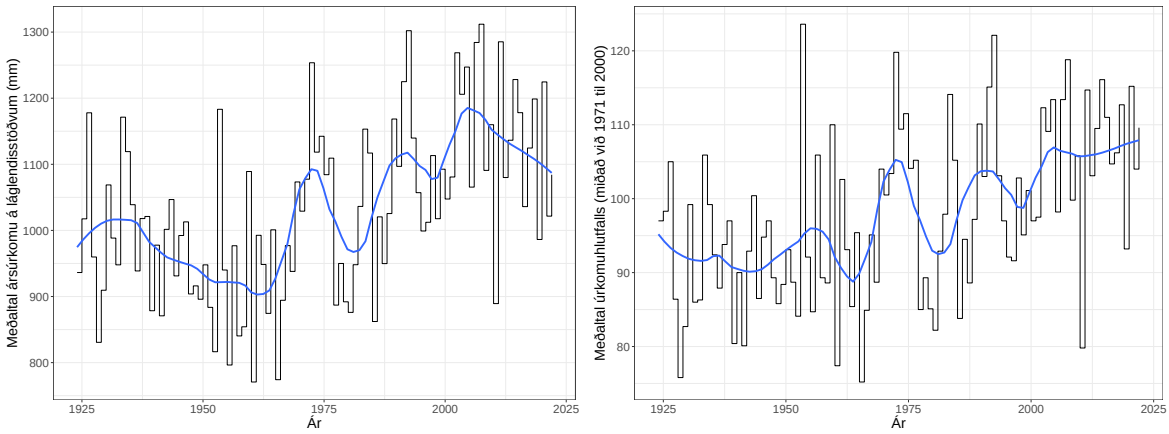
Mynd 2.7: Hlýnun milli áratuga í CARRA endurgreiningunni að sumri, á ársgrundvelli og að vetri. Kortin sýna annars vegar mismun meðaltala áratuganna 2001–2010 og 1991–2000 (vinstri dálkur) og hins vegar mismun meðaltala áratuganna 2011–2020 og 2001–2010 (hægri dálkur).

Mynd 2.8 sýnir að í meginatriðum hefur þróun úrkomu, sem lýst var í V2018, haldið áfram á síðustu árum. Á láglendisstöðvum er meðalársúrkoma síðustu ára á bilinu 1050 til 1200 mm sem er 5–10% meiri úrkoma en á tímabilinu 1971–2000 og mun meiri en fyrr á 20. öldinni. Leitnilínur gegnum mæliröðina sýna aukningu hámarksúrkomu, en sveiflur á milli ára eru stórar og því er aukningin ekki marktæk. Á síðustu árum hafa verið umtalsverðar breytingar á úrkomutegund og ákefð aftakaúrkomu.

2.1.3.1 Breytingar á aftakaúrkomu

Á undanförnum árum hafa orðið nokkur skyndiflóð vegna úrhellisrigningar í brattlendi við byggð, auk alvarlegra flóða og skriðufalla vegna óvenjulega mikillar uppsafnaðrar úrkomu yfir nokkra daga. Sem dæmi má nefna atburðinn á Seyðisfirði í desember 2020, þá varð uppsöfnuð úrkoma (RX5D) dagana 14.–18. desember samtals 569,9 mm sem er það mesta sem mælst hefur hér á landi. Óvenjuhlýtt var þessa daga miðað við þennan árstíma og því féll þessi úrkoma sem rigning. Afleiðingarnar voru mestu skriðuföll í sögu Seyðisfjarðarbyggðar.

Til að leggja mat á umfang aftakaúrkomu er reiknað út hversu mikil úrkoma fellur í fágætum



Mynd 2.8: Úrkomuþróun á láglendisstöðvum. Myndin til hægri sýnir meðaltal ársúrkomu en myndin til vinstri sýnir hlutfall úrkomu af meðaltali yfir tímabilið 1971–2000.

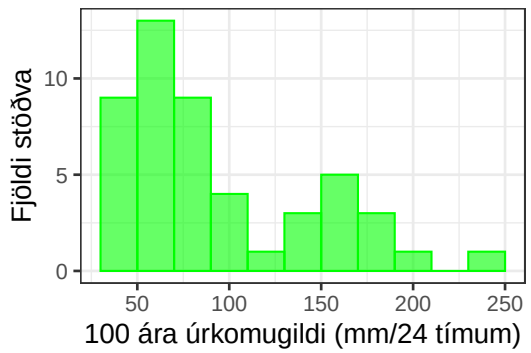
atburði eða hversu oft slíkur atburður gerist. Til dæmis er 100 ára úrkoma sú sólarhringsúrkoma sem hefur eitt prósent líkur á að verða á hverju ári, því að meðaltali myndi slík úrkoma verða á 100 ára fresti (sjá einnig umfjöllun í grein 12A í V2018 og gildi í töflu 2.1). Slíkt úrkomumagn er mikið meira en algeng hámörk, eins og mesta úrkoma hvers árs, og gagnlegt getur verið að meta hversu mikill munurinn er. Við skoðun á aftakaúrkomu er hér byggt á gögnum úr ICRA endurgreiningu veðurgagna (sjá umfjöllun í grein 2.1.2 og Nawri o.fl., 2017, auk greinar 4A í V2018) og úrkomumælingum frá 43 veðurstöðvum.

Tafla 2.1: Sú sólarhringsúrkoma (í mm) sem hefur 100 ára endurkomutíma, Massad o.fl. (2020). Stöðvum er raðað eftir úrkomumagni og sýndar eru þær 14 stöðvar þar sem reiknuð gildi voru hæst.

Staður	**100 ára úrkoma (mm/sólar-hring)**
Dalatangi	128
Höfn	130
Hveravellir	132
Siglufjörður	139
Neskaupstaður	155
Hellisskarð	155
Eskifjörður	157
Ólafsfjörður	162
Ölkelduháls	168
Grundarfjörður	174
Seyðisfjörður	186
Laufbali	188
Ólafsvík	193
Kvísker	247

Sérstaklega voru hámarksúrkoma og endurkomugildi aftakaúrkomu skoðuð (Massad o.fl., 2020). Tvær stærðir eru sérstaklega áhugaverðar, hámark sólarhringsúrkomu (skammstafað RX1D) og hámark fimm-daga uppsafnaðrar úrkomu (RX5D), og eru þessar stærðir bornar saman við dæmigerða hámarksúrkomu hvers árs. Þessar stærðir lýsa því hversu mikillar úrkomu má vænta frá verstu úrkomulægð hvers árs, og einnig frá hægfara veðrakerfi sem getur verið marga

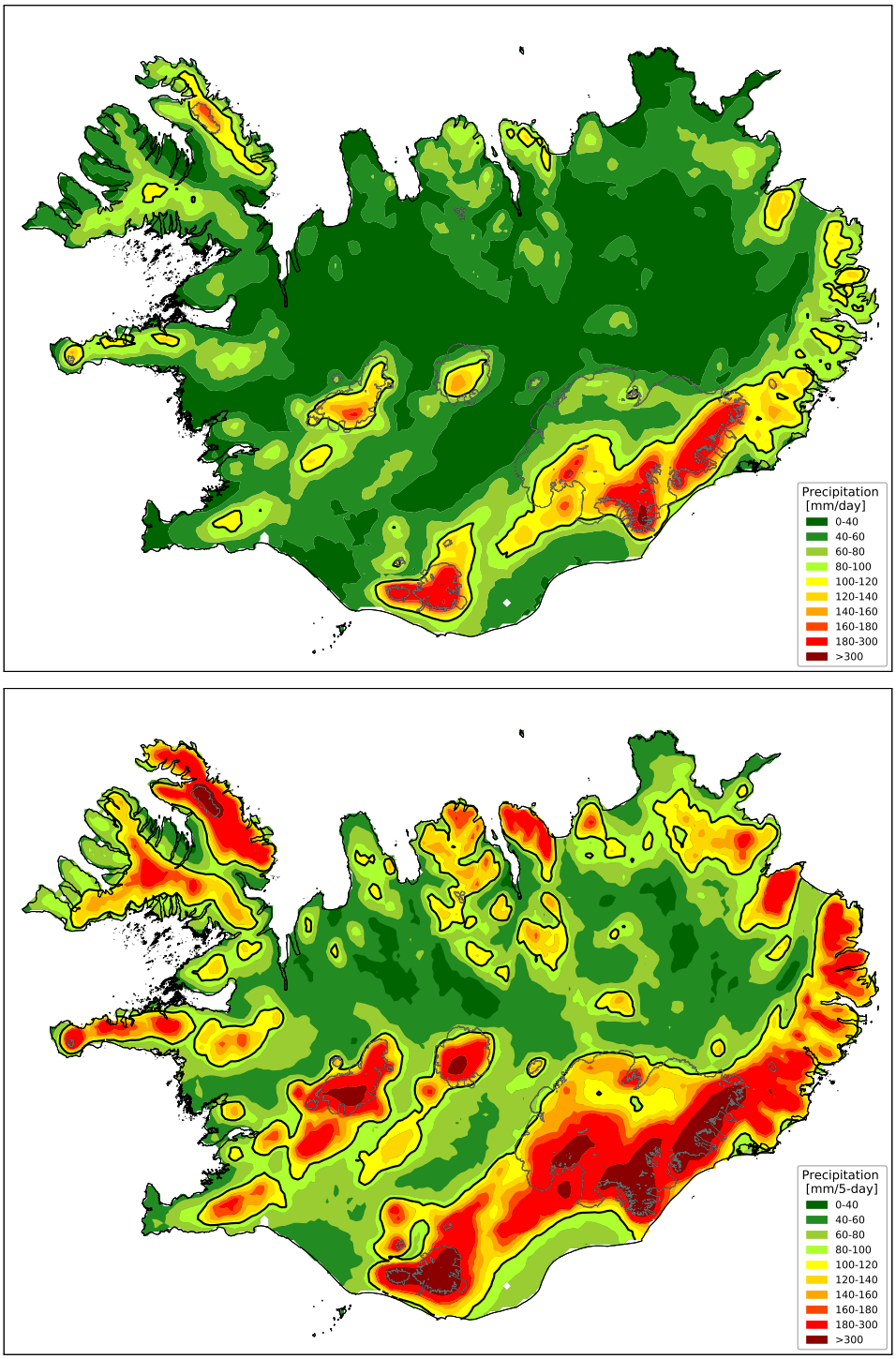
daga að skila af sér úrkomu eða ítrekuðum lægðagangi yfir nokkura daga tímabil. Mynd 2.10 byggist á reikningum á gögnum frá ICRA endurgreiningunni (Massad o.fl., 2020) og sýnir RX1D og RX5D fyrir tímabilið 1981–2010



Mynd 2.9: Aftök sólarhringsúrkomu á veðurstöðvum á landinu. Lárétti ásinn er gildi 100 ára sólarhringsúrkomu samkvæmt Massad o.fl. (2020) en lóðrétti ásinn sýnir fjölda stöðva með tiltekna 100 ára sólarhringsúrkomu.

Mesta sólarhringsúrkoma, sem búast má við á hverju ári, er á bilinu 40–60 mm víða um landið, en 80–100 mm austan- og suðaustanlands og á hálendi, en allt að 300 mm á jöklum. Mesta uppsafnaða úrkoma yfir fimm daga er víða 60–80 mm á láglendi en rúmlega 100 mm austan- og suðaustanlands og á hálendi og gildið er hæst á jöklum. Í skýrslu Massad o.fl. (2020) voru töflur með gildum fyrir 2, 5, 10, 25, 50 og 100 ára endurkomutíma úrkomu safnað upp í 3, 6, 12, 24 og 48 tíma. Slíkir útreikningar voru gerðir fyrir veðurstöðvar og tengdir niðurstöðum endurgreiningarinnar. Töflur í Massad o.fl. (2020) sýna að fyrir sólarhringsúrkomu er gildi með 100 ára endurkomutíma um 1.75 [1.6–2.2] -falt hærra en gildi með tveggja ára endurkomutíma. Miðgildi mestu ársúrkomu, eins og sýnt er á mynd 2.10, er yfirleitt sambærilegt úrkomu með tveggja ára endurkomutíma og því er hægt að tengja niðurstöður á myndinni niðurstöðum Massad o.fl. (2020).

Með því að margfalda gildin á efri myndinni með 1.75 fæst gróft mat á 100 ára sólarhringsúrkomu á landinu. Þetta magn er á bilinu 70–110 mm víða um landið, 140–180 mm austan- og suðaustanlands og á hálendi og meira en 500 mm á jöklum. Bera má þessa niðurstöðu saman við mynd 2.9 sem sýnir 100 ára sólarhringsúrkomu á öllum veðurstöðvunum í Massad o.fl. (2020). Greinilegt er að á flestum stöðvum er hámarkið á bilinu 50–100 mm en annað hámark í dreifingunni er 130–190 mm á sólarhring. Þessi síðari flokkur inniheldur þær 14 stöðvar sem sýndar eru í töflu 2.1. Í grein 3.2.3 eru ofangreindar niðurstöður settar í samhengi við líklegar breytingar á aftakaúrkomu á næstu áratugum.



Mynd 2.10: Miðgildi hámarksúrkomu hvers árs samkvæmt gögnum úr ICRA endurgreiningunni fyrir tímabilið 1981–2010. Efri myndin sýnir niðurstöður fyrir sólarhringshámörk (RX1D), neðri myndin hámörk á fimm-daga úrkomu (RX5D) (byggt á gögnum frá Massad o.fl., 2020).

2.2 Vatnafar

Í 8. kafla AR6-WG1 (Douville o.fl., 2021) er fjallað um breytingar á vatnshringrás. Hlýnun jarðar hefur í för með sér breytingar á úrkomusvæðum og með hlýnun eykst úrkomuákefð. Flóðatíðni getur aukist, bæði vegna úrkomubreytinga og massataps jökla. Í kaflanum er lögð áhersla á að tengsl breytinga á úrkomu og flóðum sé flókin. Meiri úrkoma þarf ekki alltaf að þýða stærri flóð því hún er háð mörgum þáttum s.s. landslagi, gerð vatnasviðs, hversu lengi rignir og jarðveginum sem rigningin fellur á. Aukist gegnumdreypni jarðvegs og rýmd til að geyma vatn hafa úrkomubreytingar minni áhrif á flóð, en þurrkar geta leitt til yfirborðs sem verður nær ógegndræpt og geymir því ekkert vatn sem eykur yfirborðsafrennsli í vötn og ár. Áhrif breytingar á árstíðasveiflu og tegund úrkomu geta einnig verið flókin. Aukin rigning á kostnað snjókomu og vorleysingar sem hefjast fyrr á vorin geta á köldum svæðum aukið vetrar- og vorflóð, en minni vetrarsnjór getur minnkað líkur á stærri flóðum í kjölfar snöggrar leysingar.

2.2.1 Afrennsli og flóð

Úrkoma á landinu hefur aukist undanfarin ár (sjá mynd 2.8) og hlýnun hefur leitt til rýrnunar jökla og aukins afrennslis, sjá nánar grein 2.4. Ekki er hneigð til meira afrennslis í ám, eins og rakið er í grein 5.2 í V2018, en mælingar á afrennsli sýna verulegan breytileika milli ára. Þróun rennslis í nokkrum dragám er sýnd á mynd 2.11 og þar sést að aukin úrkoma á liðnum árum hefur ekki leitt til hærra meðalrennslis, og sveiflur á milli ára eru verulegar.

Hlýnun hefur haft áhrif á ýmsar tímasetningar, t.d. upphaf leysinga og hvenær vorflóð og hámarksrennsli er. Skoðun á ICRA endurgreiningunni fyrir tímabilið 1979–2017 (Massad o.fl., 2022) sýnir að upphaf leysingatíma á nokkrum vatnasviðum hefur færst fyrr á árið (sjá töflu 2.2). Í V2008 og V2018 var fjallað um vorleysingar og bent á að með hlýnun muni leysingartíminn hefjast fyrr. Í V2018 kom fram að vetrarflóð, sérstaklega í dragám, muni líklega verða tíðari aukist hlutfall rigningar í úrkomu að vetri (sjá grein 2.2.2), en leysingaflóð að vori verði minni að sama skapi. Afrennsli frá jöklum mun aukast í takt við massatap þeirra og tími mesta afrennslis mun líklega hefjast fyrr að vori og ná lengra fram á haustið. Tafla 2.2 sýnir að nokkur munur er eftir landshlutum, á vatnasvæðum Þórisvatns, Tungnaár og við Búðarháls er tilfærsla upphafs leysingartíma 20 dagar eða meira og hún er á bilinu 10–19 dagar á öðrum vatnasviðum sunnanlands. Norðaustanlands er tilfærslan lítil, leysing hefst fimm dögum fyrr í Hágöngulóni og átta dögum síðar í Ufsárlóni. Með aukinni hlýnun geta vetrarleysingar orðið ofar á hálendinu, í V2018 kemur fram að síðustu áratugi hafa mestu vetrarflóðin orðið vestanlands, af svæði sem er í um 400 m hæð yfir sjávarmáli. Einnig kemur fram að mestu leysingaflóð að vori koma frá svæði á Sprengisandi sem liggur í um 600–800 m hæð. Aukin vetrarhlýnun eykur leysingu ofar á hálendinu og flóð þaðan gætu færst yfir á vetrartímann.

Síðan V2018 kom út hefur farið fram greining á flóðum í íslenskum ám og stærð flóða við mismunandi endurkomutíma, samtals í 63 rennslisröðum (Hilmar Björn Hróðmarsson og Tinna Þórarinsdóttir, 2018). Samanburður á stærð algengari og sjaldgæfari flóða[1] sýnir að rennsli í algengari flóðum hefur háa fylgni við rennsli sjaldgæfari flóða. Mynd 2.12 sýnir reiknað rennsli flóða með 5, 10, 25, 50, 100 og 200 ára endurkomutíma sem fall af rennsli flóðs með tveggja ára endurkomutíma fyrir hverja rennslisröð og tafla 2.3 sýnir reiknaðan halla á línunum fyrir hvern endurkomutíma. Eftir því sem flóðin eru sjaldgæfari eru þau stærri, þannig er flóð með 25 ára endurkomutíma um tvöfalt stærra en flóð með tveggja ára endurkomutíma í sömu á og fyrir sjaldgæfari flóð er hlutfallið hærra.

Jafnvel þótt loftslagsbreytingar muni hafa í för með sér ýmiss konar breytingar á hringrás

[1]Hér verður talað um flóð sem hafa 2 ára eða 5 ára endurkomutíma sem algeng flóð, en flóð með 50, 100 eða 200 ára endurkomutíma sem sjaldgæf flóð. Eins og rætt er í grein 12A í V2018 eru þetta einungis leiðbeinandi nafngiftir. Flóð með tveggja ára endurkomutíma hefur 50 % árslíkur, en flóð með 100 ára endurkomutíma hefur 1 % árslíkur. Því væri nákvæmara að tala um líklegri og ólíklegri flóð, frekar en algengari og sjaldgæfari. Oftast valda algengari flóð litlu tjóni en af þeim getur verið nokkur ami og eru slík flóð kölluð *amaflóð*.

Tafla 2.2: Tilfærsla upphafs leysingatíma í dögum á tímabilinu 1979–2017, byggð á reikningum í ICRA-gagnasafninu. Upphaf leysingartíma byrjar sífellt fyrr á vorin á flestum vatnasviðum, neikvæðar tölur þýða að leysing byrjar fyrr í árinu. (Massad o.fl., 2022, tafla 2).

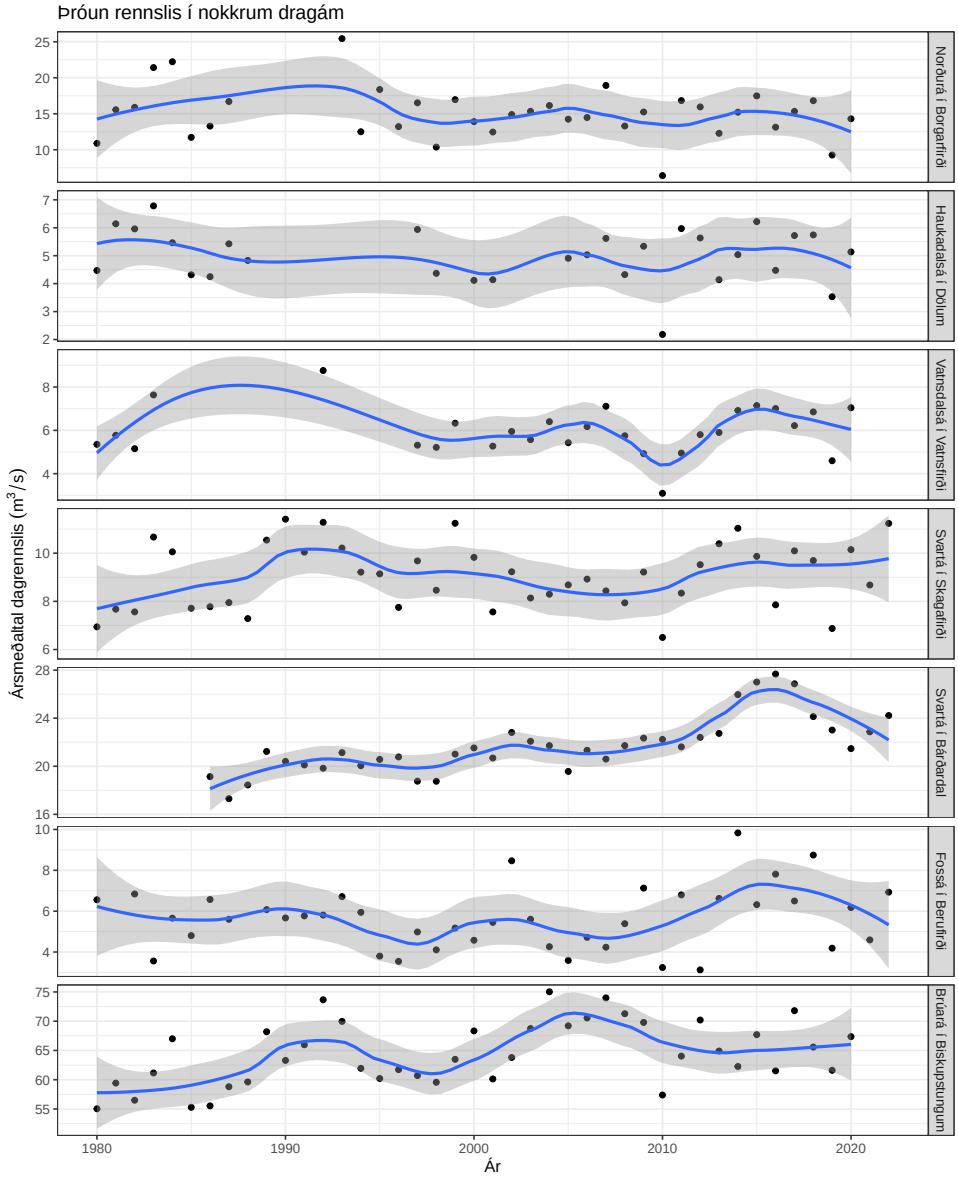
Vatnasvið	**Tilfærsla upphaf, leysingartíma (dagar)**
Blöndulón	−9
Búðarháls	−21
Hágöngulón	−5
Hálslón	0
Hraunaveita	−11
Kvíslaveita	−12
Sultartangi	−12
Þingvallavatn	−19
Þórisvatn	−27
Tungnaá	−29
Ufsárlón	8

vatns, eins og stærð flóða, er þó líklegt að áfram verði svipað samband milli stærðar algengra og sjaldgæfari flóða, a.m.k. fyrir þær ár sem eru háðar breytileika í veðri (t.d. úrkomuflóð, leysingaflóð). Ekki er hægt að staðhæfa að engar breytingar verði á hallatölunum sem sýndar eru í töflu 2.3 en á næstu árum og áratugum er ekki líklegt að sambandið breytist verulega. Hér þarf þó að setja þann fyrirvara að þetta á líklega ekki við um ár þar sem jökulhlaupa gætir. Þrjú áberandi vik frá línunum sjást á línuritunum fyrir flóð með 100 og 200 ára endurkomutíma á mynd 2.12. Þau eru öll frá ám þar sem jökulhlaup geta valdið stórflóðum. Rýrnun jökla á næstu áratugum og öldum (sjá grein 2.4) getur breytt sambandi rennslis í algengari og sjaldgæfari flóðum í jökulám sem hlaupa. Þrátt fyrir þennan fyrirvara sýnir mynd 2.12 og tafla 2.3 að mikilvægt er að fylgjast vel með breytingum í rennsli algengari flóða. Í mörgum ám geta þær breytingar verið vísir á líklegar breytingar í rennsli sjaldgæfari flóða.

Tafla 2.3: Hallatala línu gegnum punktasafn sem lýsir sambandi á rennsli algengs flóðs (flóð með tveggja ára endurkomutíma) og flóða með lengri endurkomutíma (sjá mynd 2.12). Tölur innan hornklofa sýna bil 95% marktækni hverrar hallatölu. (Gögn: Hilmar Björn Hróðmarsson og Tinna Þórarinsdóttir, 2018).

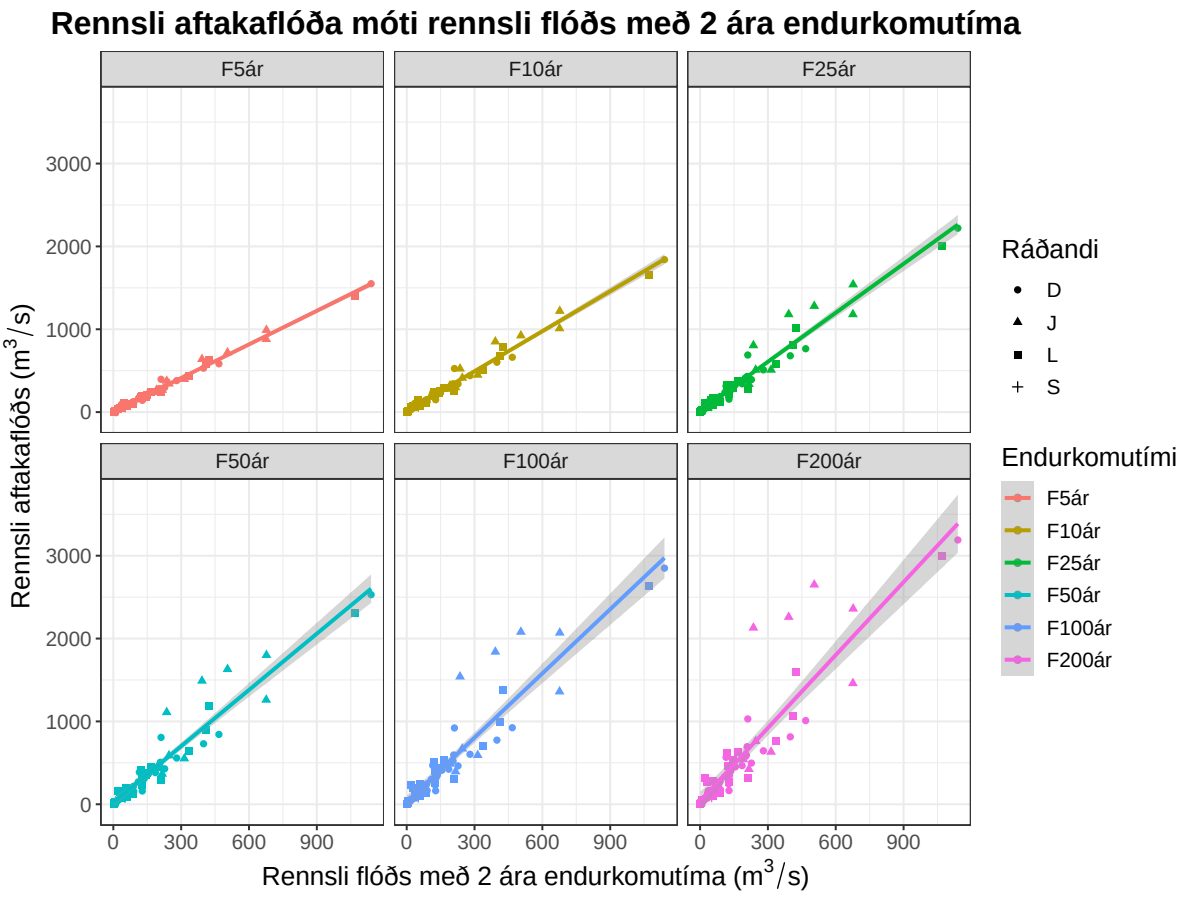
Endurkomutími	**Hallatala**
F5ár	1.35 [1.32 – 1.38]
F10ár	1.61 [1.55 – 1.67]
F25ár	1.97 [1.85 – 2.09]
F50ár	2.26 [2.09 – 2.44]
F100ár	2.58 [2.33 – 2.84]
F200ár	2.93 [2.57 – 3.30]

Vatnafræðilega líkaninu Hype hefur verið beitt á nokkur vatnasvið, sem hafa dragár, lindár og vatnsföll sem eiga upptök í stöðuvötnum, til að leggja mat á líklegar breytingar í tímasetningu og stærð flóða vegna loftslagsbreytinga í framtíðinni (Crochet, 2020; 2021; 2022). Úrkomu- og hitafarsbreytingar frá CORDEX verkefninu (CORDEX, 2012) voru notaðar sem innlagsgögn. CORDEX notaði losunarsviðsmyndirnar RCP4.5 og RCP8.5 (sjá grein 3C í V2018) til að reikna veðurfarsbreytingar á þéttu reiknineti, m.a. fyrir Ísland (sjá kafla 4.5 í V2018). Niðurstöður



Mynd 2.11: Þróun rennslis í nokkrum dragám á tímabilinu 1980–2022 (m^3/s). Ársmeðaltal dagrennslis (punktar) og útjafnaður (loess) ferill (bláar línur).

sýna vel áhrif minni snjóþekju og aukið hlutfall rigningar í úrkomu með hækkandi hitastigi. Samkvæmt reikningunum munu flóð færast á milli árstíða þannig að fjöldi flóða mun aukast yfir haust- og vetrarmánuði en vor- og sumarflóðum fækkar. Þegar líður á öldina minnkar rennsli á vormánuðum, rennslistoppar vorleysinga minnka og færast fyrr á árið. Í hlýrri sviðsmyndinni (RCP8.5) hverfa vorleysingar í lok aldarinnar. Samfara minni flóðtoppum að vori og sumri mun rennsli yfir haust- og vetrarmánuði aukast. Á vatnasviðum, þar sem núverandi hámarksrennsli ársins er jafnan í vorleysingum, hefur þessi tilfærsla töluverð áhrif þar sem hámarksrennsli ársins mun þá í auknum mæli eiga sér stað að vetri eða hausti. Niðurstöður sýna ekki mikla breytingu í sumarrennsli en í þessari rannsókn var ekki skoðað vatnasvið með umtalsverðum jökulþætti í afrennsli. Rennsli flóða með tiltekinn endurkomutíma mun aukast um minna en 20% á þeim vatnasviðum sem voru skoðuð. Slík aukning hefur þó veruleg áhrif því munur á rennsli sjaldgæfra flóða er oftast minni en þetta, til dæmis er minna en 20% munur á rennsli í flóðum með 50 og 100 ára endurkomutíma og á rennsli flóða með 100 ára og 200 ára endurkomutíma. Það er líka innan við 20% munur á rennsli í flóðum með 10 ára og 25 ára endurkomutíma í



Mynd 2.12: Reiknað rennsli flóða með 5, 10, 25, 50, 100 og 200 ára endurkomutíma sem fall af rennsli flóðs með tveggja ára endurkomutíma fyrir 63 rennslisraðir (Hilmar Björn Hróðmarsson og Tinna Þórarinsdóttir, 2018). Rennslisraðir eru merktar eftir ráðandi tegund vatnsfalls, D: dragá, J: jökulá, L: lindá og S: afrennsli úr stöðuvatni.

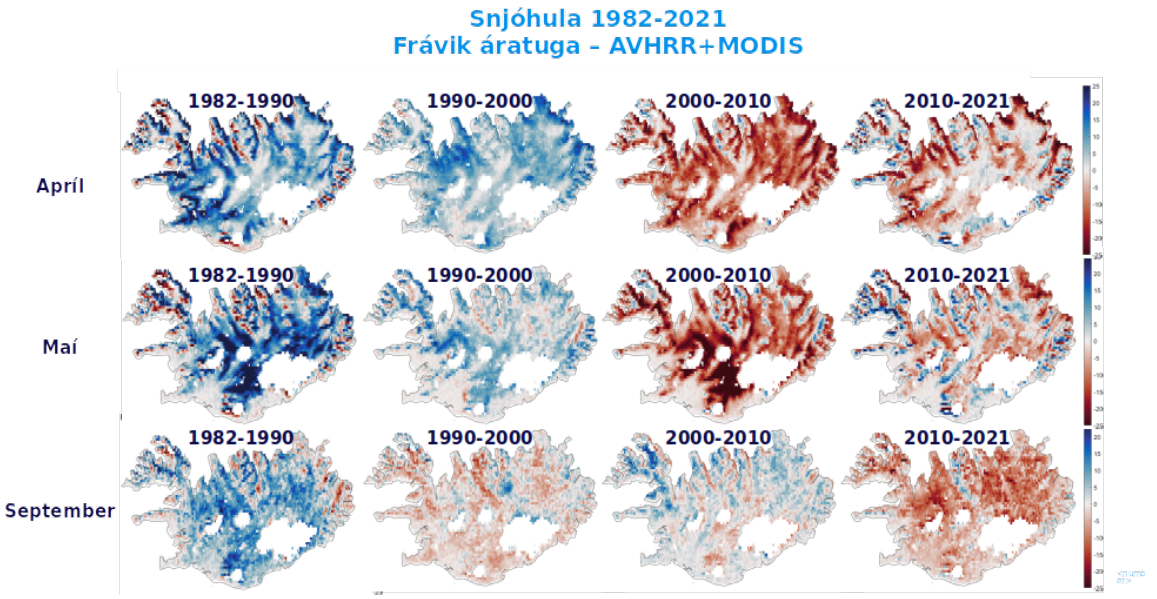
meirihluta rennslisraða (um 60%) sem mynd 2.12 og tafla 2.3 byggjast á. Flóð sem nú hafa tiltekinn endurkomutíma gætu gerst allt að tvöfalt oftar samkvæmt framtíðarsviðsmyndum fyrir 21. öld. Að aftakaatburðir af þeirri stærð sem nú er sjaldgæf verði algengari í framtíðinni er í samræmi við umfjöllun í 3.2.3 og einnig við niðurstöður IPCC (2021).

2.2.2 Breytingar á snjóhulu

Rannsókn á snjóhulu- og snjóþykktarbreytingum frá því snemma á 20. öldinni (Eythorsson o.fl., 2023) sýnir aukningu í úrkomu samfara hlýnun. Niðurstöðurnar sýna að hlutfall snjóhulu í mælineti Veðurstofu Íslands jókst á kalda tímabilinu á síðari hluta 20. aldar, en minnkaði aftur þegar fór að hlýna á 10. áratug síðustu aldar. Eftir aldamótin jókst hlutfall snjóhulu aftur en bent er á að samfara fækkun á mönnuðum veðurstöðvum í upphafi þessarar aldar fækkaði stöðvum sem mæla snjóhulu og snjóþykkt. Eythorsson o.fl. (2023) reyna að mæta þessu með því að nota bæði gervitunglagögn og loftslagslíkön til þess að meta líklega þróun til loka þessarar aldar. Gervitunglagögnin sýna sambærilega aukningu í snjóhulu eftir aldamótin, sem bendir til þess að um raunverulega aukningu sé að ræða, en ekki bara breytingar á mælineti. Niðurstöður um snjóþykkt eru sambærilegar, eftir minnkandi snjóþykkt í lok 20. aldarinnar jókst hún aftur á síðasta áratug.

Mynd 2.13 sýnir breytingar á snjóhulu fyrir vor- og haustmánuði milli áratuga frá 1980 til 2021. Myndin sýnir greinilega að þrátt fyrir ofangreindar sveiflur í snjóhulu eru áberandi frávik

milli landshluta og árstíma. Minni snjóhula er greinileg eftir aldamótin, en fyrir aldamótin er munur á þróun vormánuða og haustmánuða áberandi.

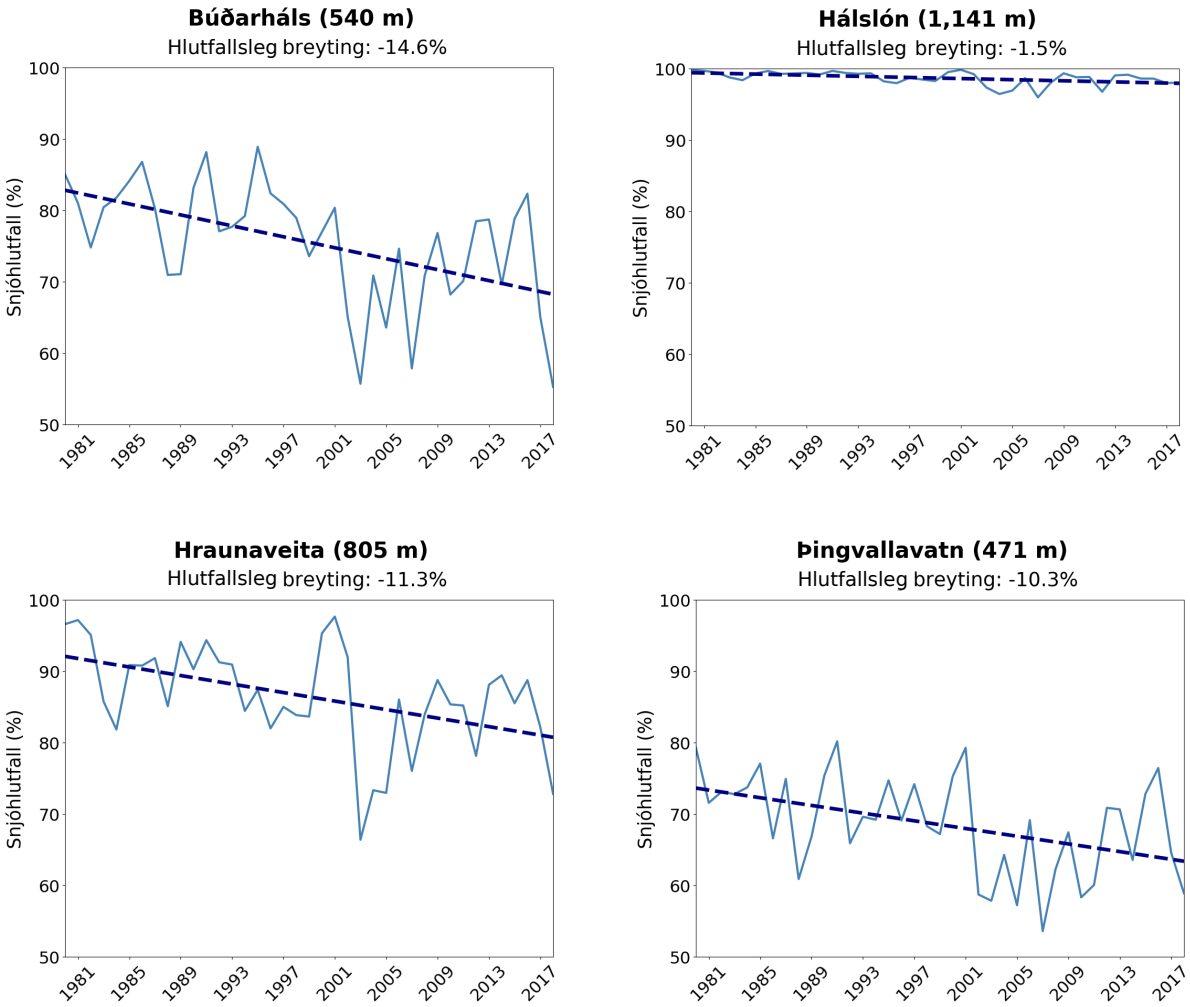


Mynd 2.13: Breytingar í snjóhulu milli áratuga fyrir þrjá mánuði ársins, apríl, maí og september. Fyrir hvern mánuð sýnir myndin frávik meðaltals viðkomandi áratugar frá meðaltali alls tímans. Blár litur þýðir meiri snjóhula, rauður litur minni. (Mynd: Andri Gunnarsson, Landsvirkjun).

Þróun á snjóhlutfalli, þ.e. hlutfalli þeirra daga þar sem úrkoma fellur sem snjór, á fjórum vatnasviðum sem standa mishátt er sýnd á mynd 2.14. Gögnin eru frá ICRA greiningunni (Massad o.fl., 2022) og sýna myndirnar að þróunin er háð hæð því hitastig stjórnar hvort úrkoma fellur sem rigning eða snjór. Á vatnasviðinu sem hæst stendur (Hálslón, 1141 m.y.s) er snjóhlutfallið hæst og lækkaði einungis um 1.5% frá 1980 til 2017. Snjóhlutfallið lækkaði um 14.6% á vatnasviði Hraunaveitu (805 m.y.s.), 11.3% á vatnasviði Búðarháls (540 m.y.s.) og 10.3% á vatnasviði Þingvallavatns (471 m.y.s). Fleiri rannsóknir sýna að snjóhlutfall hefur farið lækkandi og niðurstöður loftslagslíkana (sjá nánar 3.1) sýna að með áframhaldandi hlýnun má gera ráð fyrir að hlutfall snævar í úrkomu minnki og muni halda áfram að lækka (Eythorsson o.fl., 2023). Breytingar á snjóhlutfalli geta haft mikil áhrif á árstíðabundið rennsli í ám og aftakarigning sem fellur að vetri getur sett af stað skyndiflóð falli hún á frosna jörð. Dæmi eru um að langur rigningakafli að vetri valdi skriðuföllum, sbr. umfjöllun um skriðufallið á Seyðisfirði í desember 2020 í grein 2.1.3.1. Eins og kemur fram í grein 2.2.1 má gera ráð fyrir tíðari vetrarflóðum haldi snjóhlutfallið áfram að falla.

2.2.3 Breytingar á afrennsli vegna hops jökla

Rætt var um mögulegar breytingar á afrennsli vegna rýrnunar jökla í V2018. Í töflu 5.3 eru sýnd dæmi um jökulár sem skipt hafa um farveg og í töflu 5.4 er listi yfir ár þar sem breytingar á farvegum eru yfirvofandi. Í grein 2.4 er rætt um jöklabreytingar á Íslandi og framtíðarhorfur þeirra. Víða við jökla eru stöðuvötn bak við ísstíflur, þar verða oft jökulhlaup við það að vatnið kemst undir eða framhjá ísstíflunni. Stærð slíkra hlaupa er í hlutfalli við rúmmál stöðuvatnsins. Ísstífluð stöðuvötn á Íslandi skipta tugum. Kunnust þeirra eru Grímsvötn í miðjum Vatnajökli og Grænalón sem Skeiðarárjökull stíflaði. Þegar jöklarnir hopa minnka ísstíflur, t.d. hefur Grænalón ekki myndast aftur eftir að það tæmdist í jökulhlaupi árið 2012. Mjög ólíklegt er nú talið að Grænalón geti aftur safnað vatni og þaðan verði jökulhlaup (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2020). Jökulhlaup úr Grímsvötnum hafa orðið oft á síðustu áratugum og er fylgst grannt með stærð

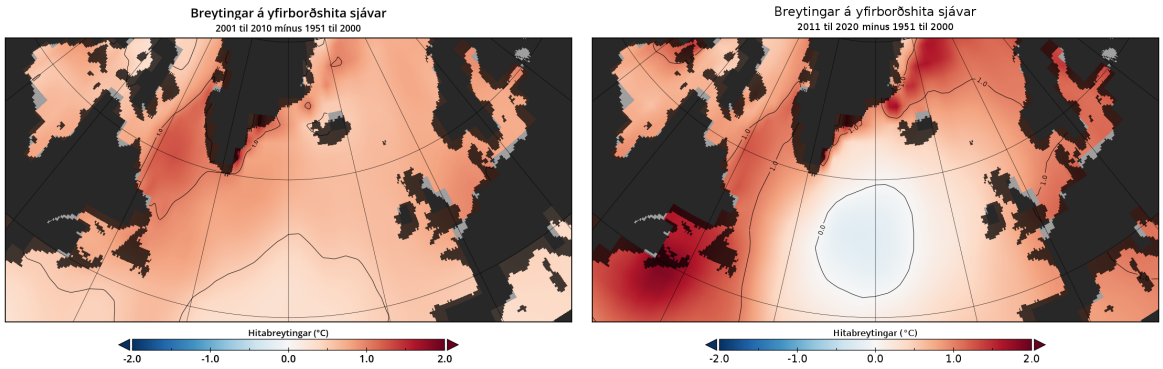


Mynd 2.14: Snjóhlutfall á fjórum vatnasviðum. Lækkandi hlutfall þýðir að meira af úrkomu fellur sem regn og minna sem snjór. (Byggt á mynd 9 í Massad o.fl., 2022)

stöðuvatnsins. Nú er metið að ekki safnist mikið meira en um 1 km^3 af vatni í Grímsvötnum áður en hleypur úr þeim (Finnur Pálsson og Eyjólfur Magnússon, 2021; 2022) Jaðarlónum fyrir framan hopandi jökla fjölgar, einkum við suðurhluta Vatnajökuls, þau stækka og farvegir fallvatna þaðan eru stöðugri (Guðmundsson o.fl., 2020). Í nokkur þessara lóna kelfir jökulsporðurinn. Jökulsárlón á Breiðamerkursandi er þeirra stærst, um 35 km^2 árið 2022. Skoðun á botnkortum og aðstæðum við Skeiðarárjökul benda til að færsla Súlu í Gígju á Skeiðarársandi sé varanleg til áratuga (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2020) og einnig er ólíklegt að vatnaskil Hverfisfljóts og Skaftár nærri jökuljaðri breytist á næstunni (Finnur Pálsson o.fl., 2019).

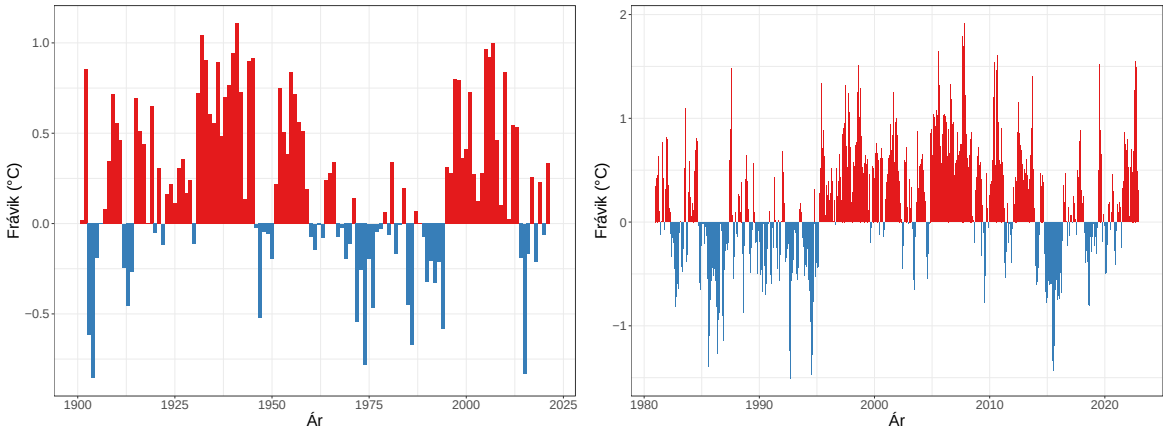
2.3 Ástand sjávar

Fjallað er ítarlegar um ástand sjávar umhverfis landið í kafla 5 en hér verður tæpt á hitabreytingum í Norður-Atlantshafi á síðustu áratugum, en þær má setja í samhengi við hitabreytingar á landi (sjá grein 2.1.2) og líklegar breytingar í Norður-Atlantshafi á öldinni (sjá grein 3.3.2).



Mynd 2.15: Yfirborðshlýnun sjávar í Norður-Atlantshafi frá aldamótum. Myndin til vinstri sýnir meðaltalshlýnun áranna 2001–2010, miðað við viðmiðunartímabilið 1951-2000, og myndin til hægri sýnir sambærilega niðurstöðu fyrir tímabilið 2011–2020. Byggt á ERSSTV5 endurgreiningu sjávarhita (Huang o.fl., 2017).

Heimshöfin hlýnuðu verulega á síðustu öld, mynd 2.15 sýnir að í Norður-Atlantshafi hélt sú hlýnun áfram á fyrsta áratug þessarar aldar. Hlýnunin norður af landinu var meiri en suður af því og á öðrum áratug þessarar aldar herti á hlýnuninni norður af landinu, en það hægðist á henni og hún stöðvaðist suður af landinu. Á stóru svæði sunnan við Grænland varð kólnun, sem hefur fengið nokkra umfjöllun í vísindaheiminum (Josey o.fl., 2018), og í fjölmiðlum, þar sem svæðið hefur verið kallað *blái bletturinn*. Á þessu svæði hafa í gegnum tíðina verið umtalsverðar sveiflur í sjávarhita, eins og sjá má á mynd 2.16. Myndin sýnir meðalhita á svæði sem afmarkast af 48–58°N og 20–35°V en það svæði nær að þekja bláa blettinn (Josey o.fl., 2018).



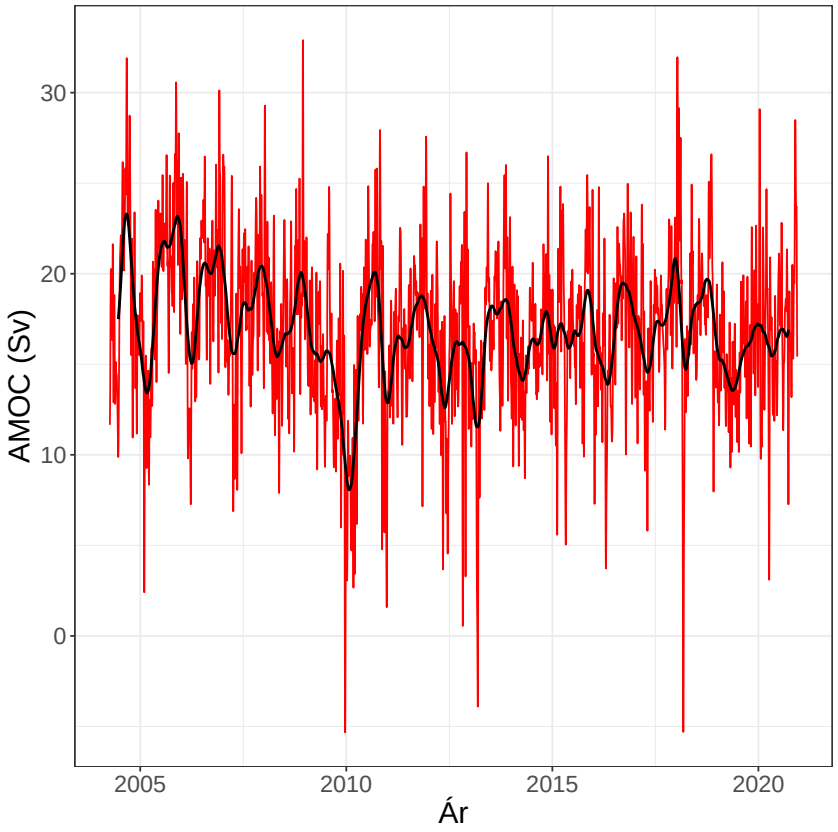
Mynd 2.16: Sveiflur í sjávarhita á svæðinu 48–58° N og 20–35° V frá aldamótunum 1900. Myndin til vinstri sýnir frávik ársmeðaltals yfirborðshita sjávar frá meðaltalinu 1971–2000 fyrir tímabilið 1900–2022 og myndin til hægri sýnir frávik í mánaðarhita fyrir tímabilið 1980–2022. (Framlenging á mynd 3 í Josey o.fl. (2018), gögn frá ERSSTV5 um endurgreiningu sjávarhita (Huang o.fl., 2017)).

Þessi kólnun hefur oft verið rædd í samhengi við samdrátt í lóðréttri hringrás í Norður-Atlantshafi (veltihringrásin, AMOC) eins og rætt var í grein 4C í V2018. Mælingar á styrk

þeirrar hringrásar sýna að á tímabilinu 2004 til 2010 dró úr styrk innflæðis á hlýsjó til Norður-Atlantshafsins yfir 26°N. Eftir 2010 breyttist styrkurinn lítið (Smeed o.fl., 2016). Þessi þróun var sýnd á mynd 4.35 í V2018 og mynd 2.17 sýnir framlengingu á þeirri tímaröð til ársins 2020. Myndin sýnir að innflæðið hefur að jafnaði haldist nokkuð stöðugt síðasta áratuginn.

Loftslagslíkön sýna að með hlýnun heimshafanna er líklegt að það dragi úr styrk AMOC. Það myndi að öllu jöfnu kæla hluta Norður-Atlantshafsins, eða a.m.k. draga úr hlýnun, því samfara hringrásinni er varmaflæði til norðurs í Atlantshafi. Áhyggjur af samdrættinum tengdust mögulegu hruni þessarar hringrásar, sem gæti leitt til skarprar kólnunar á norðurslóðum, jafnvel þótt hnattræn hlýnun ætti sér stað á sama tíma. Mynd 4.36 í V2018 sýnir fremur hægfara samdrátt í veltihringrásinni í niðurstöðum margra CMIP5 líkana og byggt á þeim niðurstöðum var í AR5 (og SROCC) metið að hrun veltihringrásarinnar á þessari öld sé *mjög ólíklegt*. Umræðu um veltihringrásina má finna í AR6-WG1 (Fox-Kemper o.fl., 2021) og sérstaklega eru breytingar á henni ræddar í grein 9.2.3.1 í AR6-WG1.

Rannsóknir síðustu ára hafa dregið úr vissu um að hrun sé *mjög ólíklegt*. Í AR6-WG1 hefur matinu því verið breytt og nú er talin *miðlungs vissa* fyrir því að hrun veltihringrásarinnar eigi sér ekki stað á öldinni. Hrun veltihringrásarinnar myndi án efa hafa í för með sér verulegar breytingar skilyrða í Norður-Atlantshafi og valda kólnun. Hér eru þó tvö atriði sem taka þarf fram. Í fyrsta lagi er mikilvægt að hafa í huga að jafnvel þótt veltihringrásin hrynji ekki eru sveiflur sjávarhita sem ná yfir nokkur ár eða áratugi líklegar (sjá umfjöllun í grein 3.3.2). Mynd 2.16 sýnir að slíkar sveiflur eru ekki undantekning heldur reglan. Myndin sýnir einnig að á síðustu árum hefur hlýnað á svæðinu þar sem kólnun var áður áberandi (þ.e. á bláa blettinum).

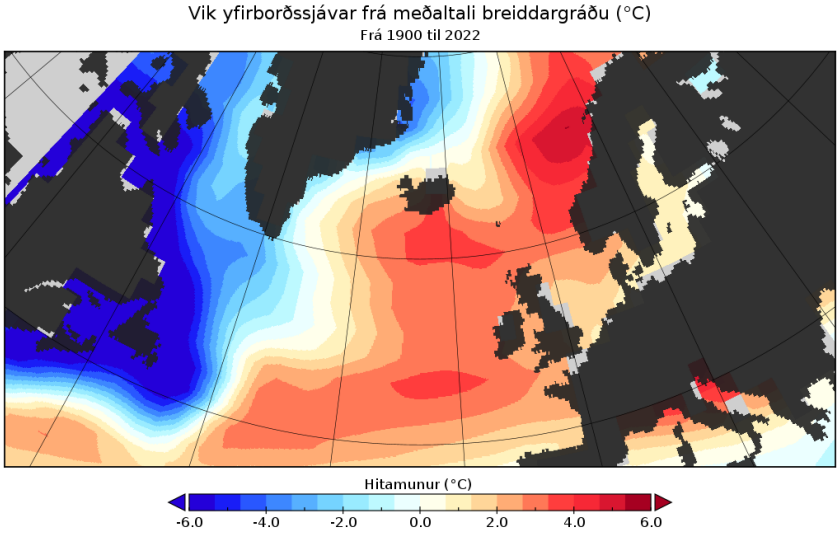


Mynd 2.17: Styrkur veltihringrásarinnar (Sv) frá 2004 til 2020. Myndin sýnir niðurstöður mælinga á sniði í Norður-Atlantshafi við 26° N. Rauða línan sýnir niðurstöður mælinga og svarta línan sýnir útjafnaðan feril. (Framlenging á mynd 4.35 í V2018, gögn frá Smeed o.fl. (2016)).

Í öðru lagi skiptir máli að hafa í huga að fleiri þættir en veltihringrásin hafa áhrif á hitafar í Norður-Atlantshafi. Í V2018 er vitnað í bók Þorvaldar Thoroddsen: Lýsingu Íslands, þar sem

segir: *Á Íslandi er úthafsveður og eyjaloft miklu mildara og hlýrra en mætti búast við eftir legu landsins á hnettinum* (Þorvaldur Thoroddsen, 1911). Mynd 4.3 í V2018 sýnir hvernig lofthiti við yfirborð jarðar víkur frá meðaltali breiddargráðunnar. Mynd 2.18 sýnir sambærileg frávik fyrir yfirborðshita sjávar í Norður-Atlantshafi. Rétt eins og myndin í V2018 sýnir mynd 2.18 að á vesturhluta Norður-Atlantshafsins er mun hlýrra en austan til. Segja má að frá austurströnd Grænlands og suður fyrir Nova Scotia sé sjór kaldari en að meðaltali á breiddargráðunni, en austan þessa svæðis sé sjór hlýrri. Þessi svæði samsvara áhrifasvæðum kaldra hafstrauma sem streyma meðfram Austur-Grænlandi og austurströnd Kanada. Hlýju svæðin liggja á áhrifasvæði Norður-Atlantshafsstraumsins sem er framlenging á Golfstraumnum sem liggur meðfram strönd Norður Ameríku.

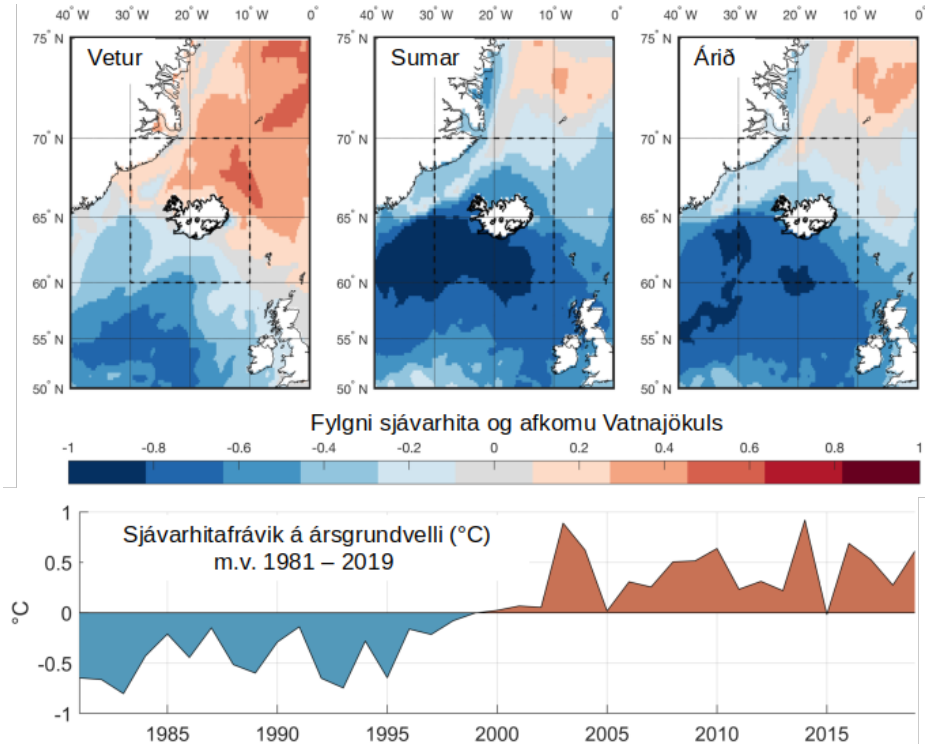
Í almennri umræðu er þetta straumakerfi oft kallað Golfstraumurinn, en í raun á það nafn aðeins við hluta þeirra hafstrauma sem flytja hlýjan sjó frá austurströnd Norður-Ameríku til norðurs og austurs í Norður-Atlantshafi. Eftir sem áður er mikilvægt að hafa í huga að óháð því hvort þetta kerfi er kallað Golfstraumskerfið eða Norður-Atlantshafsstraumurinn þá er veltihringrásin hluti af yfirborðshringrásinni og stöðvun eða samdráttur veltihringrásarinnar myndi hafa áhrif á það hversu mikinn varma hafið flytur til norðurs og austurs. Mynd 2.18 sýnir að við suðurströnd Íslands er sjávarhitinn 2–4 °C hlýrri en meðaltal breiddargráðunnar. Hluti þessarar umframhlýnunar stafar af varmaflutningi hafstrauma, þótt fleiri þættir hafi áhrif (Seager o.fl., 2002). Mögulegt hrun eða samdrátt veltihringrásarinnar þarf að skoða í þessu ljósi. Áhrif veltihringrásarinnar eru einungis hluti af heildaráhrifum sjávar og því takmörk fyrir því hversu mikil kólnun hlytist af samdrætti veltihringrásarinnar við Íslandsstrendur. Þetta er rætt nánar í grein 3.3.2 þar sem farið er yfir niðurstöður loftslagslíkana og mögulega kólnun í Atlantshafi.



Mynd 2.18: Hitavik breiddargráðu, þ.e. mismunur yfirborðshita sjávar í Norður-Atlantshafi og á meðtali sjávarhita á breiddargráðunni. (Sjávarhitaútgáfa af mynd 4.3 í V2018, gögn frá ERSSTV5 endurgreiningu sjávarhita (Huang o.fl., 2017) fyrir árabilið 1900 til 2022.)

Hitasveiflur í hafi geta haft margvísleg áhrif á náttúrufar hér á landi (sjá t.d. grein 4C í V2018). Nokkrar rannsóknir hafa sýnt samband breytileika í yfirborðssjávarhita og afkomu jökla (t.d. Steingrímur Jónsson, 2023; Björnsson o.fl., 2013). Fylgni afkomu Vatnajökuls og sjávarhita umhverfis landið er sýnd á mynd 2.19. Fylgnin að vetri til er jákvæð norðan við landið, sem þýðir að hlýnun sjávar þar eykur á ákomuna á jöklinum, en fylgnin við sjávarhita suður og vestur af landinu er neikvæð á sumrin. Það þýðir að hlýindi sjávar sunnan og vestan við landið auka bráðnun jökulsins, sem leiðir til lélegri afkomu.

Mikilvægt er að hafa í huga að víxlhrif lofthjúps og hafs eru margþætt og erfitt getur verið að greina milli áhrifaþátta. Þannig hafa vindáttir áhrif á það hvort staðbundnar hitabreytingar sjávar fjær landinu ná að berast til landsins. Nánar er rætt um hvaða hafsvæði hafa mest áhrif á hitafar á landinu í grein 4C í V2018.



Mynd 2.19: Fylgni sjávarhita umhverfis landið og afkomu Vatnajökuls fyrir vetur, sumar og ársmeðaltal (efri myndir). Neðri mynd: Þróun sjávarhita umhverfis landið síðustu áratugi (sjá reit afmarkaðan með strikalínu á efri mynd). (Mynd: Andri Gunnarsson, Landsvirkjun).



Mynd 2.20: Morsárjökull 1931 (til vinstri, ljósm. Emily Todtmann) og 2019 (til hægri, ljósm. Hrafnhildur Hannesdóttir). Á þessu tímabili hefur Morsárjökull hopað um tvo km. Dökkt yfirborð jökulsins á nýrri myndinni er vegna skriðu sem féll á jökulinn árið 2007.

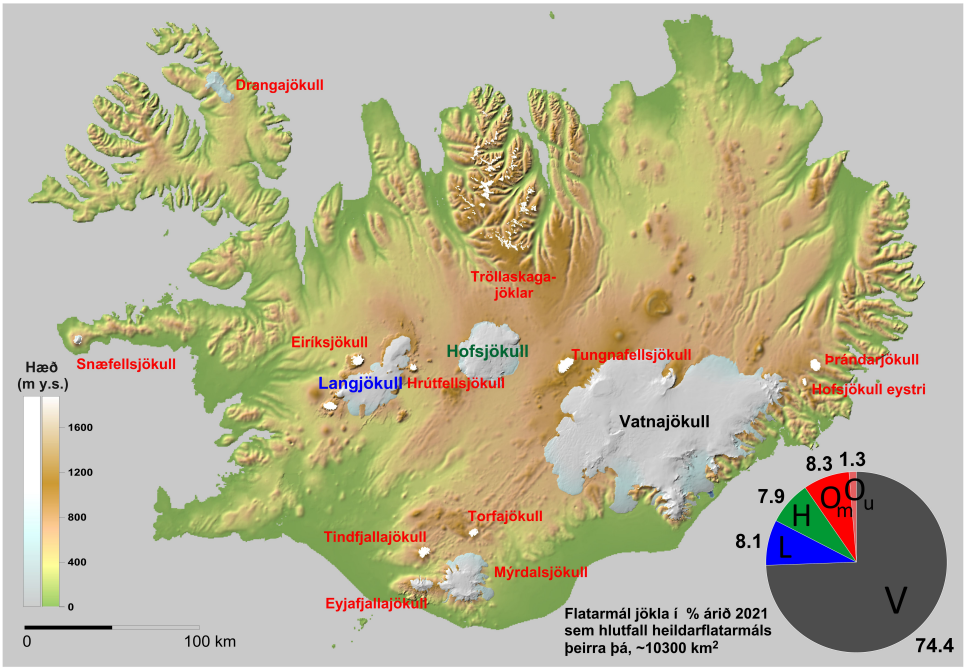
2.4 Jöklar

Í tveimur síðustu skýrslum vísindanefndar (V2008 og V2018) var birt yfirlit um niðurstöður rannsókna á veðurfari, vatnafari, jöklabreytingum og öðrum umhverfisþáttum hér á landi. Íslensku jöklarnir hafa haldið áfram að hörfa en breytileiki á milli ára jókst og einnig hægði nokkuð á rúmmálstapi jöklanna eftir árið 2010 (Aðalgeirsdóttir o.fl., 2020). Heildarmassi allra jökla á Íslandi samsvarar nú um 9 mm af jafndreifðri sjávarstöðuhækkun og heildarrúmmál þeirra er nærri 3400 km^3 íss. Heildarflatarmál helstu jökla landsins er sýnt á mynd 2.21. Frá ritunartíma V2018 hafa nokkrar vísindagreinar um ástand og þróun íslenskra jökla komið út og þær skerpa myndina af hörfun jöklanna og nokkrar framtíðarspár hafa verið settar fram. Myndir 3 og 2.20 sýna tvö pör sögulegra ljósmynda af Morsárjökli og Skaftár- og Svínafellsjökli frá mismunandi tímum og sést vel hversu miklar breytingar hafa orðið á jökulsporðunum á u.þ.b. síðustu 100 árum.

2.4.1 Ástand og breytingar frá lokum litlu ísaldar

Frá aldamótunum 2000 hafa íslensku jöklarnir tapað tæplega 850 km^2 en heildarflatarmál jökla árið 2021 var um 10.300 km^2 (Hrafnhildur Hannesdóttir o.fl., 2021, uppfærðar tölur). Frá hámarksútbreiðslu undir lok 19. aldar hafa jöklarnir minnkað um 2300 km^2, sem samsvarar 19% af hámarksflatarmálinu. Vatnajökull tapaði um 13% af flatarmáli sínu á tímabilinu ∼1890–2022 en hinir stóru jöklarnir 20–50% og þeir minni 35–80%. Nú þegar hafa nokkrir tugir lítilla jökla horfið, eða eftir eru einungis leifar sem hættar eru að skríða undan eigin þunga, og hefur hvarf Okjökuls líklega vakið mesta athygli. Minnisvarði um þann jökul var settur upp á Okinu 18. ágúst 2019. Á Tröllaskaga eru horfnir 13 jöklar sem töldust nægilega merkilegir til þess að ganga undir eigin nafni, sex á Austfjörðum, sex nærri Vatnajökli, sjö í Kerlingarfjöllum, tveir nærri Langjökli og þrír á öðrum svæðum landsins. Flestir þessara jökla voru litlir með flatarmál á bilinu 0,1–1 km^2 í upphafi þessarar aldar. Flatarmálsbreytingar nokkurra stærri jöklanna eru sýndar á mynd 2.22. Gögnin eru frá mörgum rannsóknahópum sem hafa gert mælingar og dregið útlínur jöklanna af kortum, loftmyndum og gervitunglagögnum. Stökkið uppávið, sem sést í báðum efri myndunum, er vegna framhlaups Brúarjökuls 1963–1964 (Björnsson o.fl., 2003).

Eins og rakið er í grein 2.2.3 veldur hörfun jökla því að ný jaðarlón myndast fyrir framan þá og eldri lón stækka. Mörg dæmi þessa má finna við sunnanverðan Vatnajökul og er samanlagt flatarmál sporðlóna þar nú orðið um 60 km^2 (Guðmundsson o.fl., 2020). Stærsta lónið er Jökulsárlón á Breiðamerkursandi sem var um 35 km^2 árið 2022 en það byrjaði að myndast um 1933.



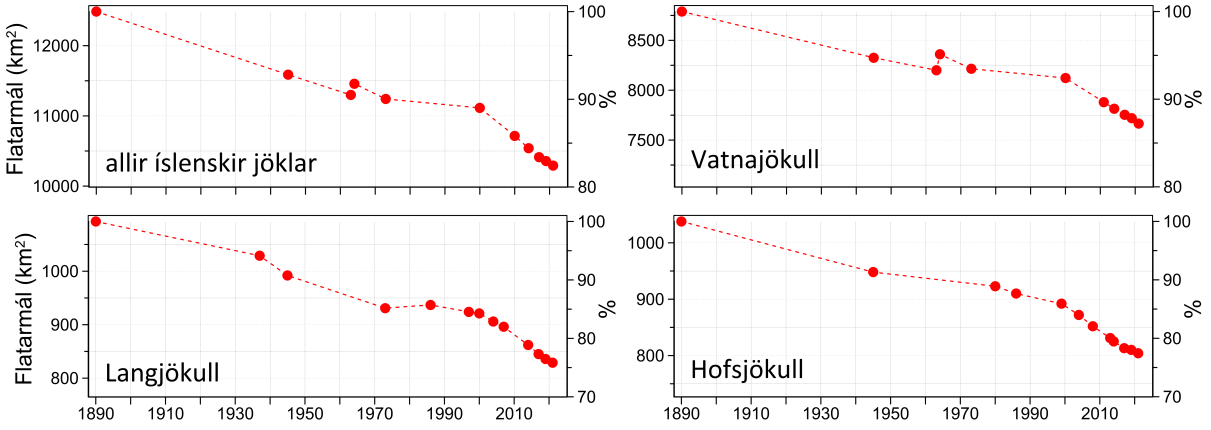
Mynd 2.21: Helstu jöklar á Íslandi. Sýnd er flatarmálsskipting þeirra sem hlutfall af heildarflatarmáli árið 2021 sem var ∼10.300 km². Vatnajökull (V) er langstærstur jöklanna, 74.4%, Langjökull (L) og Hofsjökull (H) eru um 8% hvor, en þeir minni eru samtals <10% af heildarflatarmáli (O_m eru aðrir jöklar sem eru mældir og O_u eru aðrir ómældir jöklar). Myndin er uppfærð útgáfa af mynd úr yfirlitsgrein um afkomu jöklanna síðan ∼ 1890 (Aðalgeirsdóttir o.fl., 2020).

Samkvæmt síðustu spordamælingum á vegum sjálfboðaliða Jöklarannsóknafélags Íslands eru flestir jökulsporðar að hörfa (Hrafnhildur Hannesdóttir, 2022). Af þeim hopaði Skeiðarárjökull mest 2021–2022, eða um 600 m þar sem mest var, við austanverðan sporðinn en á undanförnum árum hafa brotnað stórir flákar framan af sporðum margra jökla vegna rýrnunar þeirra. Skaftafellsjökull og Breiðamerkurjökull hopuðu einnig um hundruð metra þar sem kelfir af sporðunum í lón. Nánari upplýsingar um jöklabreytingar er að finna á nýrri jöklavefsjá[2] sem er samstarfsverkefni þeirra sem stunda jöklamælingar á Íslandi. Þar er að finna mælingar og yfirlit um jöklarannsóknir, þ.m.t. sporðamælingar, afkomumæliraðir, jökuljaðra, safn ljósmynda og margvíslegan fróðleik um jökla.

Yfirborðsafkoma meginjökla landsins, Vatnajökuls, Hofsjökuls og Langjökuls, hefur verið mæld árlega síðan á árabilinu 1988–1997 að reglulegar mælingar hófust. Óreglulegar mælingar hafa einnig verið gerðar á Mýrdalsjökli, Drangajökli, Eyjafjallajökli og á nokkrum jöklum á Tröllaskaga og á Suðurlandi. Jökulárið 2021–2022 var yfirborðsafkoma mæld á 123 stöðum á stærri jöklum landsins (Andri Gunnarsson o.fl., 2022). Mælingar á Vatnajökli og Langjökli eru gerðar í samstarfi Jarðvísindastofnunar Háskólans og Landsvirkjunar og á Hofsjökli eru mælingar gerðar af Veðurstofu Íslands. Niðurstöður mælinga á yfirborðsafkomu þessara þriggja jökla (reiknað fyrir allt yfirborðið út frá punktmælingum og síðan heildað yfir hvern jökul) eru sýndar á mynd 2.23. Myndin sýnir að afkoma jöklanna hefur að mestu verið neikvæð frá jökulárinu 1994–1995. Áberandi eru áhrif Eyjafjallajökulgossins 2010; þá féll gjóska á jöklana sem lækkaði endurkaststuðulinn (*e. albedo*) víðast hvar og jók sumarleysingu. Eftir 2010 hefur sumarleysing verið heldur minni, heildarafkoman var jákvæð jökulárið 2014–2015 og jökulárið 2021–2022 voru jöklarnir nærri því að vera í jafnvægi.

Til viðbótar við árlegar afkomumælingar eru veðurstöðvar reknar á jöklunum. Á bilinu

[2]Sjá vefsvæðið *www.islenskirjoklar.is*



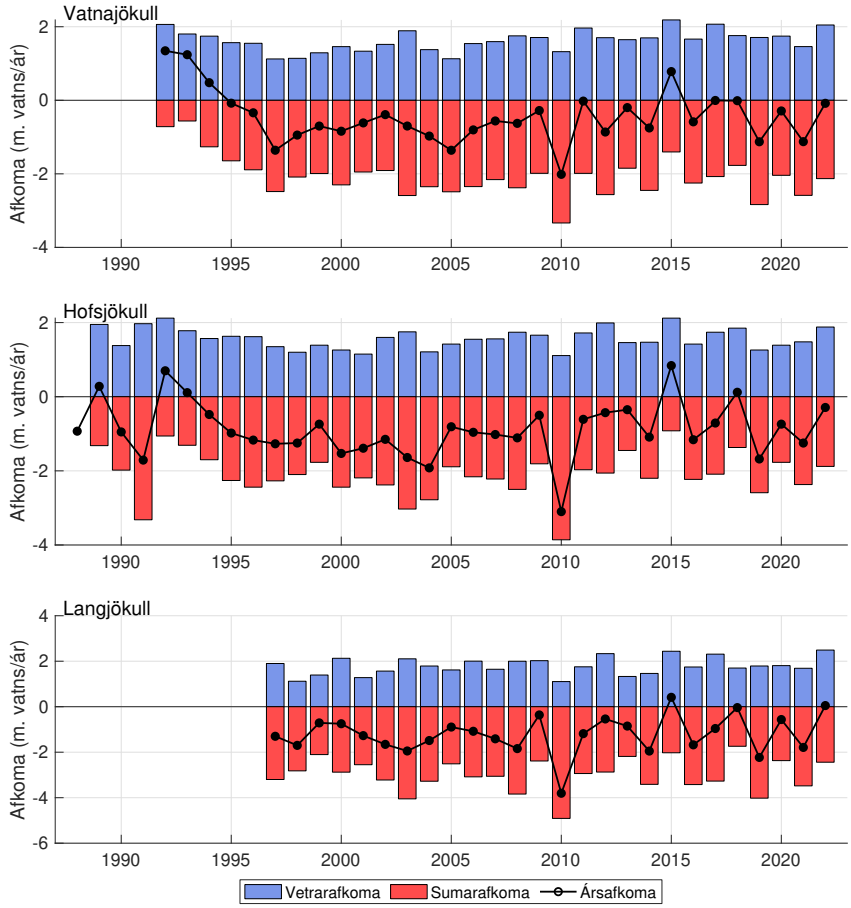
Mynd 2.22: Flatarmálsbreytingar stærstu jökla á Íslandi frá 1890: efst til vinstri heildarflatarmál allra jökla Íslands, efst til hægri Vatnajökull, sem er langstærstur, og á neðri myndunum tveimur eru sýndar breytingar á Langjökli og Hofsjökli. Á vinstri ás er flatarmálið í km^2 en á hægri ás er hlutfallsleg breyting. (Gögnin eru aðgengileg á vefsíðunni www.islenskirjoklar.is. Á vefsíðunni eru einnig gögn fyrir fleiri jökla en sýndir eru hér). Stökkið upp í efri myndunum er vegna framhlaups Brúarjökuls sem varð 1963–1964 og er ekki loftslagstengt.)

4–6 veðurstöðvar eru reknar allt árið á Vatnajökli en á vorin eru til viðbótar settar upp 5–7 veðurstöðvar á Vatnajökli, Hofsjökli, Langjökli og Mýrdalsjökli sem eru teknar niður á haustin. Þær mæla alla þætti orkubúskapar við yfirborð; hita, raka, vindhraða, inn- og útgeislun á stutt- og langbylgjum og á sömu stöðum er einnig mælt hvernig yfirborðið lækkar yfir sumarið. Mælingarnar eru notaðar til rauntímavöktunar á jöklum yfir leysingartímabilið en hafa einnig verið notaðar til að sannreyna og kvarða m.a. loftslagslíkön, vatnafars- og jöklalíkön, auk afurða úr fjarkönnun (Schmidt o.fl., 2020; Belart o.fl., 2020; Gunnarsson o.fl., 2021; Noël o.fl., 2022; Berthier o.fl., 2023). Til þess að reikna leysingu á yfirborði jökla þarf endurkaststuðull yfirborðsins að vera þekktur og gervitunglagögn hafa nýst vel til að meta þann stuðul, sem er mjög breytilegur á milli ára (Gunnarsson o.fl., 2021).

Á mynd 2.24 er sýnt samhengi vetrar- og sumarafkomu við heildarafkomu Vatnajökuls, Langjökuls og Hofsjökuls. Myndirnar sýna með lóðréttri strikalínu og tölum þá vetrarafkomu (ræðst að mestu af snjósöfnun) og sumarafkomu (ræðst að mestu af yfirborðsleysingu) sem hver jökull þyrfti að hafa til þess að hann sé í jafnvægi, miðað við núverandi lögun. Á þeim árum sem mælingarnar hafa verið gerðar hefur meðaltal vetrarafkomu allra jöklanna verið of lágt til að jafnvægi haldist, á Vatnajökli 93%, á Langjökli 86% og á Hofsjökli 84% af jafnvægisgildinu. Á sama tíma hefur meðaltal sumarleysingar verið hátt, þ.e. 119% umfram jafnvægisgildi á Vatnajökli, 144% á Langjökli og 145% á Hofsjökli. Hvort tveggja hefur stuðlað að rýrnun jöklanna þau ár sem mælingarnar spanna.

Hafa þarf í huga að auk leysingar á yfirborði bráðnar ís vegna jarðhita, eldgosa og varma vegna stöðuorkutaps við ísskrið en einnig brotnar framan af jökulsporðum sem ganga út í jaðarlón og er það kallað kelfing. Þessi leysing er mismikil en reiknast á bilinu 5.5–9 cm vatnsgildis á ári fyrir Langjökul, Hofsjökul og norður- og vesturhluta Vatnajökuls, en rúmlega 30 cm vatnsgildis á ári fyrir suðurhluta Vatnajökuls og Mýrdalsjökul (Tómas Jóhannesson o.fl., 2020). Samtals nemur leysing af þessum toga um 2 Gt á ári (gígatonn=10^{12} kg) fyrir alla íslensku jöklana, sem er um 20% af árlegu massatapi þeirra að meðaltali á tímabilinu 2000–2019. Þetta massatap kemur til viðbótar við yfirborðsleysinguna sem sýnd er á mynd 2.23 og er summan kölluð heildarafkoma.

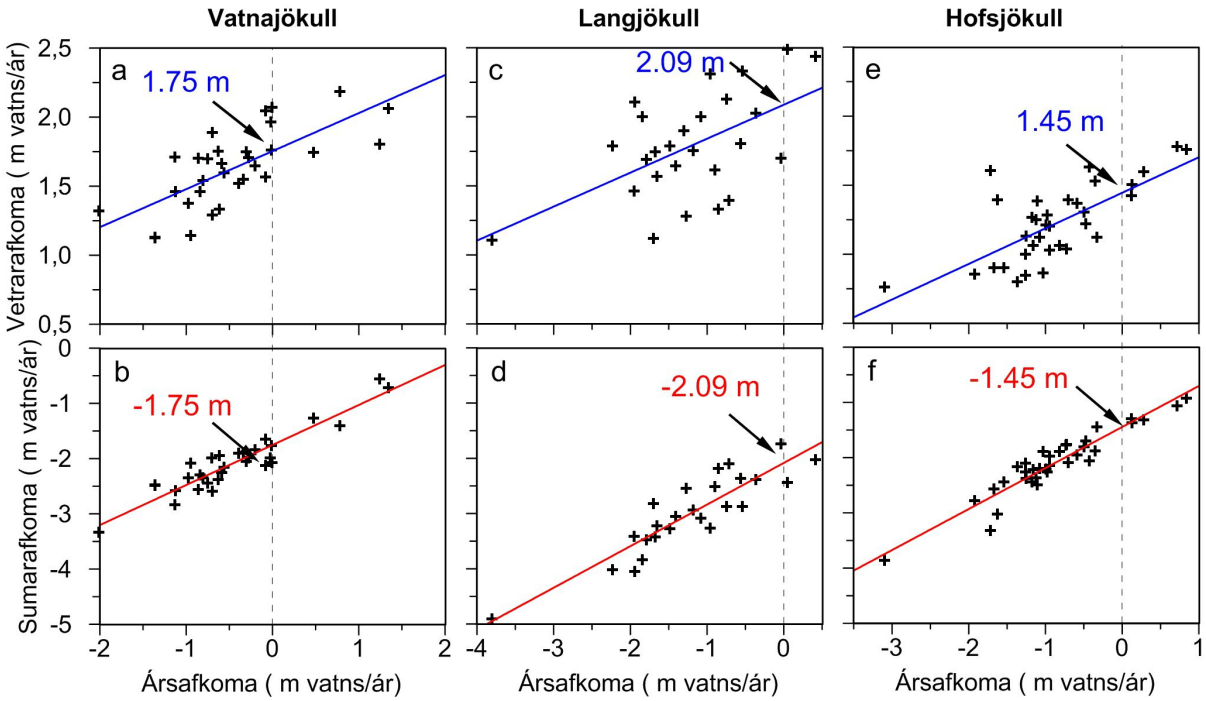
Uppsöfnuð yfirborðs- og heildarafkoma er sýnd á mynd 2.25, en þá er afkoma hvers árs lögð við afkomu áranna á undan og þannig hægt að sýna heildartap jöklanna yfir lengra tímabil. Tafla 2.4 sýnir heildartap þriggja stærstu jöklanna á mælitímabilinu. Vatnajökull og Hofsjökull hafa að jafnaði verið að tapa tæpum metra (81 cm og 99 cm) en Langjökull rúmlega það, eða



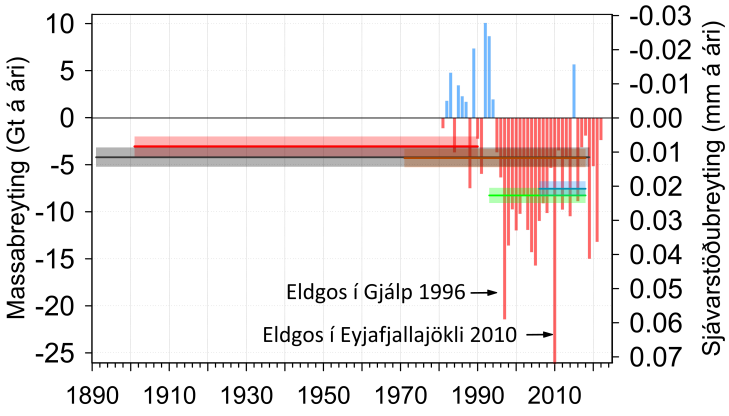
Mynd 2.23: Yfirborðsafkomumælingar, vetrarafkoma (bláar súlur), sumarafkoma (rauðar súlur) og heildarafkoma (grænir punktar), á þremur stærstu jöklum Íslands, Vatnajökli, Hofsjökli og Langjökli (Andri Gunnarsson o.fl., 2022; Finnur Pálsson o.fl., 2022a; Finnur Pálsson o.fl., 2022b; Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2017). Athugið að lóðrétti ásinn á myndinni fyrir Langjökul er annar en á efri myndunum tveimur (gögn aðgengileg á vefsíðunni islenskirjoklar.is).

um 126 cm á ári (mælt sem vatnsgildi). Vatnajökull hefur á þessu tímabili tapað um 26 m af ísþykkt (6.9%), en Hofsjökull 31 m (12%) og Langjökull 39 m (18%).

Samantekt á öllum gögnum sem lýsa þróun jökla á Íslandi sýnir að massatapið var mest á tveimur tímabilum, þ.e. 1930–1950 og 1994–2010 (Aðalgeirsdóttir o.fl., 2020). Heildarmassatap á öllu tímabilinu 1890–2019 var 540 ± 130 Gt eða sem svarar 16 ± 4% af heildarmassa árið 1890, en það samsvarar 1.50 ± 0.36 mm sjávarstöðubreytingu að meðaltali yfir öll heimshöfin. Eins og mynd 2.26 sýnir varð nærri helmingur af heildarmassatapinu á tímabilinu 1994–2019 eða 240 ± 20 Gt en þá tapaðist að meðaltali −9.6 ± 0.8 Gt á ári miðað við −4.2 ± 1.0 Gt á ári fyrir allt tímabilið frá 1890 (Aðalgeirsdóttir o.fl., 2020). Öðrum aðferðum hefur einnig verið beitt til þess að meta afkomu jöklanna. Hugonnet o.fl. (2021) notuðu ASTER ljósmyndir og ArcticDEM og REMA hæðargögn til þess að meta hæðarbreytingar allra jökla á jörðinni, þ.m.t. íslensku jöklanna, yfir tímabilið 2000–2020 og gerðu mat á árlegu massatapi þeirra. Þeim niðurstöðum ber vel saman við beinu mælingarnar á afkomu jöklanna á Íslandi sem sýndar eru hér að ofan. Niðurstöður frá GRACE (Wouters o.fl., 2019) og CryoSat-2 (Foresta o.fl., 2016) gervitunglunum eru ekki eins nákvæmar og aðferð Hugonnet o.fl. (2021). Samanburður á öllum fjarkönnunaraðferðunum og niðurstöðum beinu mælinganna var gerður af Berthier o.fl. (2023). Þar kemur fram hve vel gögnin frá íslensku jöklunum nýtast til sannprófunar á fjarkönnunargögnum.



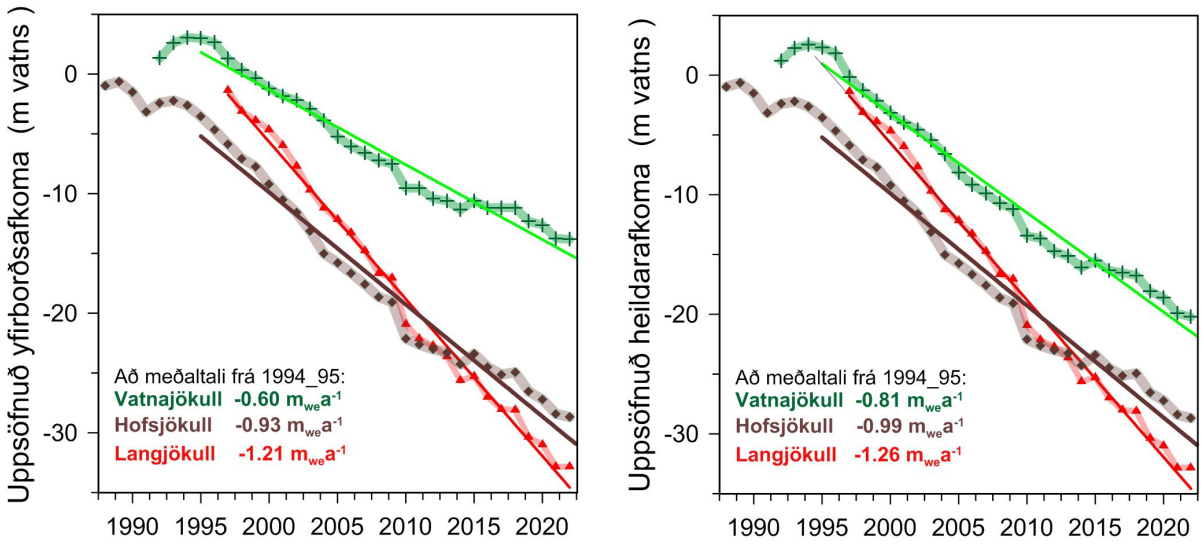
Mynd 2.24: Samhengi vetrar- (efri röð) og sumarafkomu (neðri röð) við ársafkomu Vatnajökuls, Langjökuls og Hofsjökuls. Lóðrétta strikaða línan og tölurnar á hverri mynd sýna þá vetrarafkomu (í efri röð) og sumarafkomu (í neðri röð) sem myndi skila jökli í jafnvægi (ársafkoma = 0). Meðaltal áranna sem afkoman hefur verið mæld er heldur minni vetrarafkoma, en meiri leysing en þarf fyrir jafnvægisástand (flestir punktanna eru vinstra megin við lóðréttu strikuðu línuna). Því hafa jöklarnir verið að rýrna á undanförnum árum.



Mynd 2.26: Heildarafkoma jökla á Íslandi, mælieining er Gt á ári (gígatonn=10^{12} kg) á vinstri ás en á hægri ás er mælieiningin meðalsjávarstöðubreyting í mm SLE á ári. Myndin byggir á afkomumælingum (Andri Gunnarsson o.fl., 2022; Finnur Pálsson o.fl., 2022a; Finnur Pálsson o.fl., 2022b; Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2017), mismunakortum (Belart o.fl., 2019; Belart o.fl., 2020) og rúmmáls-flatarmáls skölun. Einnig er tekið tillit til annars massataps en á yfirborði (Tómas Jóhannesson o.fl., 2020) (Mynd er uppfærð frá Aðalgeirsdóttir o.fl. (2020)).

Afkoma margra minni jökla landsins og Mýrdalsjökuls (Belart o.fl., 2019; Belart o.fl., 2020; Bernat, 2022) hefur verið metin með greiningu landlíkana frá mismunandi tímum með upphafslandlíkani sem byggst á AMS-kortunum frá 1945. Mynd 2.27 sýnir afkomu minni jöklanna með hring fyrir hvern jökul. Litur hringjanna sýnir afkomu (rauður fyrir neikvæða og blár fyrir jákvæða afkomu) og breyting í stærð þeirra sýnir breytingu í flatarmáli. Á tímabilinu 1994–2010 var rýrnun meiri en á hinum tímabilunum. Mynd 2.28 sýnir breytingu í hæð yfirborðs Mýrdalsjökuls milli áranna 2010 og 2021. Yfirborð jökulsins lækkaði um hátt í 50 m víða við jökuljaðarinn á þessu árabili en hæðin breyttist lítið um miðbik jökulsins.

Vöktun á jöklum með fjarkönnun hefur fleygt fram á síðari árum og nú er til dæmis unnt að búa til



Mynd 2.25: Uppsöfnuð yfirborðsafkoma (til vinstri) og heildarafkoma (til hægri) stóru jöklanna (m vatnsgildi). Byggt á afkomumælingunum sem sýndar eru á mynd 2.23. Eftir 2010 hefur hægt á rýrnun, en breytileiki á milli ára aukist, afkoma var jákvæð jökulárið 2014–2015 og 2021–2022 voru jöklarnir nærri því að vera í jafnvægi.

Tafla 2.4: Heildarafkoma stóru jöklanna á tímabilinu 1994/1995–2021/2022, hér er innri leysing vegna jarðhita, kelfingar og eldgosa tekin með í reikninginn. Fyrstu tveir dálkar sýna breytingar í ísþykkt (m) og rúmmáli (km^3). Þriðji dálkurinn sýnir hlutfallslega rýrnun og fjórði hlutfallslega rýrnun á ári að meðaltali yfir tímabilið. Síðasti dálkurinn sýnir breytingu sem vatnsgildi (m vatns/ári), en þar er búið að reikna breytingu á jökulís yfir í samsvarandi rúmmál af vatni (gögn sýnd á mynd 2.25).

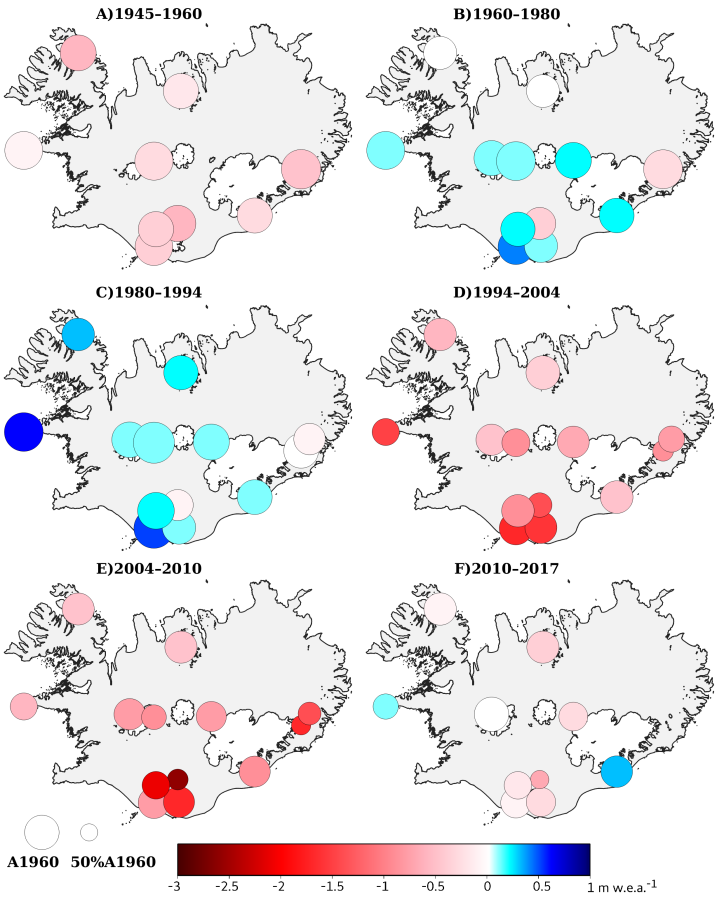
Nafn jökuls	**Ísþykkt (m)**	**Rúmmál íss** (km^3)	**Hlutfallsleg rýrnun (%)**	**Rýrnun (%) á ári**	**Árleg breyting** (m_{vatns}/**ár**)
Vatnajökull	20	200	6.3	0.23	−0.84
Hofsjökull	29	26	14	0.48	−0.96
Langjökull	33	32	16	0.59	−1.33

nákvæmar myndir af samfelldum yfirborðshraða íslensku jöklanna og hvernig hann er að breytast (sjá mynd 2.30), sem byggst á gögnum frá Sentinel-1 gervitunglum ESA Wuite o.fl., 2022). Þessi nýju gögn opna marga möguleika á nákvæmum rannsóknum á flæði jöklanna og þau nýtast einnig til sannprófunar á líkönum fyrir framtíðarspár.

2.4.2 Líklegar breytingar íslenskra jökla á komandi öld

Í V2018 voru sýndar spár um framtíð Hofsjökuls og Langjökuls en í V2008 voru eldri spár fyrir þessa sömu jökla og til viðbótar spár sem sýndu mögulega framtíð suðurhluta Vatnajökuls. Þessar spár sýndu allar að jöklarnir munu halda áfram að tapa massa á komandi áratugum. Núverandi stærð þeirra og hraði hlýnunar ræður mestu um hversu fljótt þeir kunna að verða horfnir með öllu. Líkur eru á að flestir af smærri jöklunum muni hverfa alveg á næstu áratugum eða verða mikið minni en þeir eru nú vegna hlýnunar sem orðin er.

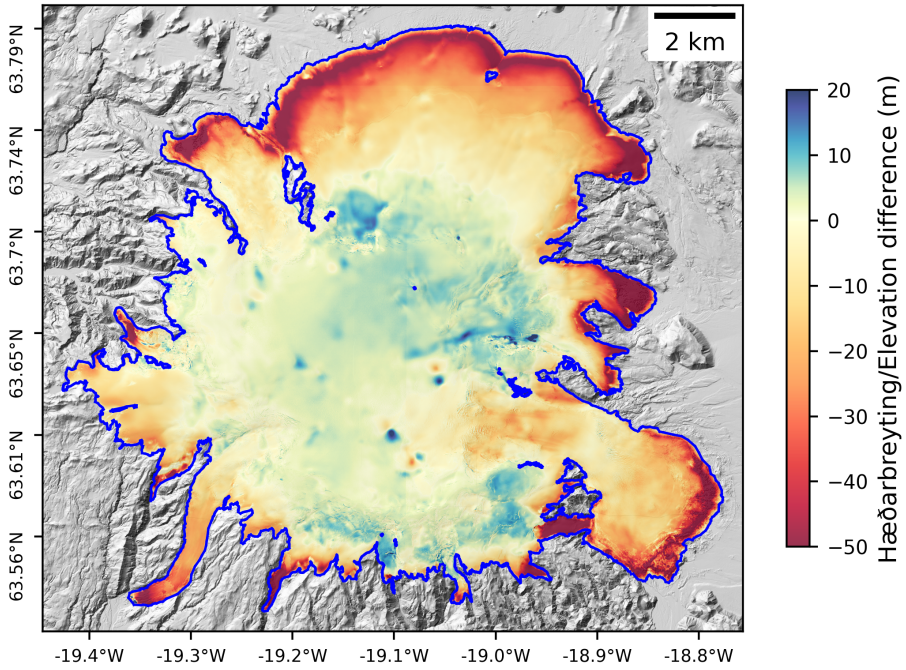
Spá um framtíð Vatnajökuls (Schmidt o.fl., 2020) sýnir að það hefur mikið að segja fyrir jökulinn hversu hratt tekst að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda á næstu áratugum. Reikningarnir



Mynd 2.27: Afkoma minni jökla landsins, reiknuð með greiningu á landlíkönum á mismunandi tímum. Hver hringur sýnir afkomu í m vatns á ári, sjá litaskala, rauður litur fyrir rýrnun en blár fyrir jákvæða afkomu. Frá árinu 1994 til 2010 var rýrnunin mun meiri en á síðastliðnum 10 árum. Stærð hringjanna sýnir breytingu í flatarmáli. (Mynd frá Belart o.fl. (2020)).

voru gerðir með samtengdu ísflæðilíkani (PISM, 2010) og orkubúskapslíkani innan HIRHAM líkansins (sjá lýsingu í Schmidt o.fl., 2020) með nokkrum jaðarskilyrðum frá svæðisbundnum loftslagslíkönum úr safni CORDEX (2012). Loftslagslíkönin gefa spár fram til ársins 2100 en keyrt var áfram í 200 ár til viðbótar (til ársins 2300) með sama loftslagi og á síðustu tveimur áratugum þessarar aldar. Tvær sviðsmyndir voru notaðar; RCP4.5, en í henni hlýnar um rétt rúmlega 2 °C að meðaltali á jörðinni miðað við meðaltalið 1850–1900, og RCP8.5, þar sem hlýnunin er um 4 °C. Á mynd 2.29 er sýnt hvernig Vatnajökull bregst við hugsanlegri hlýnun. Fram til 2100 er rúmmálstap hans svipað í öllum keyrslunum (um það bil 20%), en eftir það sést að ef hlýnun takmarkast við 2 °C við lok aldarinnar, eins og Parísarsamningurinn segir til um, þá er mögulegt að um 30–60% af núverandi rúmmáli Vatnajökuls verði eftir og að jökullinn finni nýtt jafnvægi í hlýrra loftslagi. Ef hins vegar hlýnunin verður 4 °C við lok aldarinnar minnkar hann hraðar og gæti horfið alveg, eða einungis litlir sundurslitnir jöklar orðið eftir á hæstu fjöllunum undir núverandi jökli.

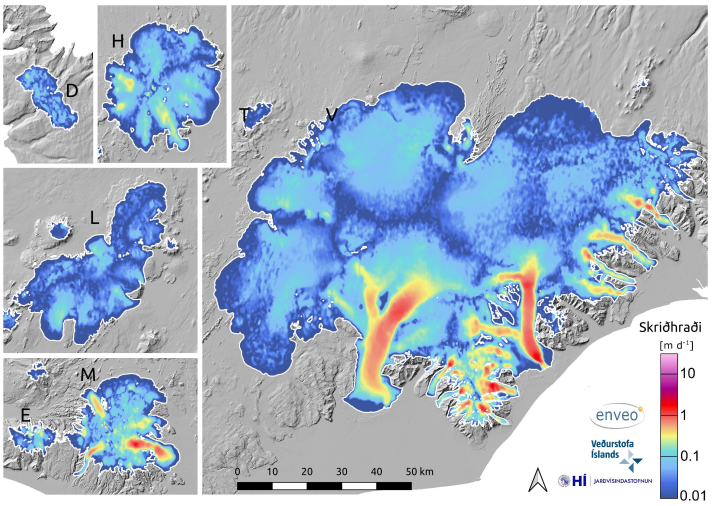
Fleiri spár um framtíð jökla á jörðinni, annarra en stóru jökulbreiðanna á Suðurskautslandinu og Grænlandi, hafa verið gerðar. Samantekt Hock o.fl. (2019) og Marzeion o.fl. (2020) gerir grein fyrir niðurstöðum frá sex jöklalíkönum fyrir fjórar sviðsmyndir og 25 mismunandi lofthjúpslíkön. Flatarmáls- og massabreytingar eru reiknaðar fyrir 19 svæði með jöklum á jörðinni og er Ísland eitt þeirra. Fyrir loftslagssviðsmyndina RCP4.5 er því spáð að massi jökla á jörðinni minnki um u.þ.b. 30% til 2100, miðað við árið 2015, en þeirra íslensku um u.þ.b. 40%. Gerð er ítarleg grein fyrir óvissu í þessari niðurstöðu, sem skipt er upp í fjóra þætti. Þegar kemur fram undir aldarlok



Mynd 2.28: Breyting á hæð yfirborðs Mýrdalsjökuls skv. kortum sem byggð eru á leysimælingum úr flugvél (2010) og á ljósmyndum Pléiades gervitungla (2021). (Mynd frá Bernat o.fl. (2023)).

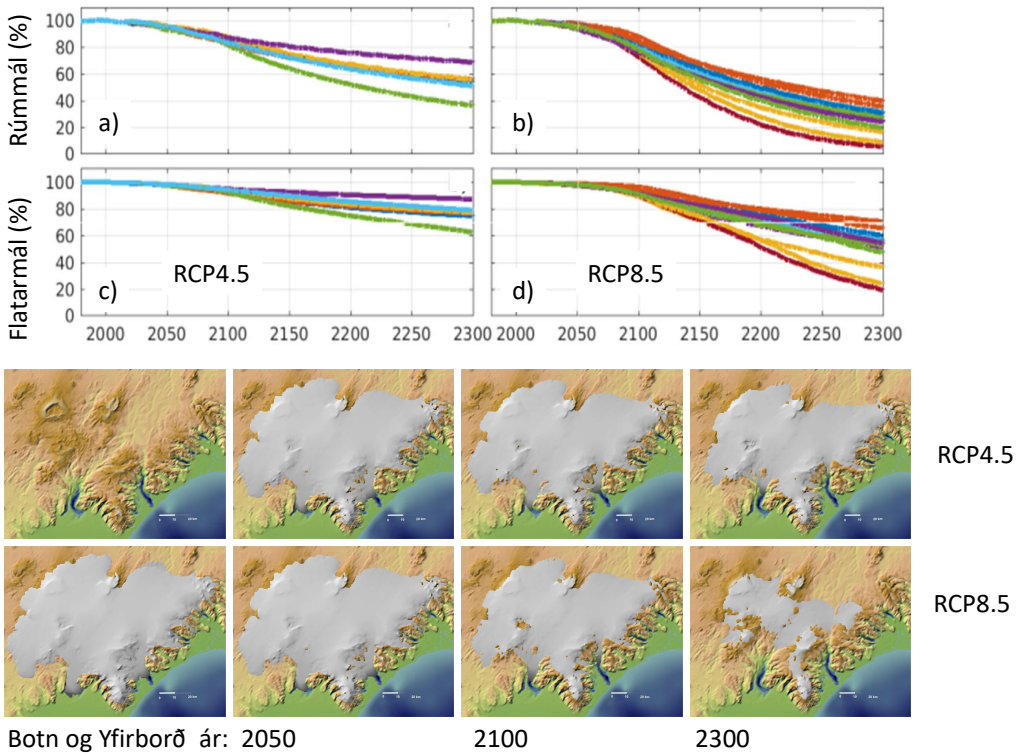
skiptir óvissa, sem á rætur að rekja til mismunandi *sviðsmynda*, mestu máli. Hún vex jafnt og þétt eftir því sem líður á öldina. Óvissa, sem stafar af mismunandi *jöklalíkönum*, er mikilvægust á fyrri hluta aldarinnar og fer hlutfallslegt mikilvægi hennar minnkandi með tíma. Óvissa vegna mismunandi *lofthjúpslíkana* og *náttúrulegs breytileika* í veðurfari er tiltölulega lítil þegar litið er til jarðarinnar allrar en getur tímabundið haft mikið að segja á mismunandi svæðum.

Hnattræna jöklalíkanið PyGEM (Rounce o.fl., 2023) sýnir að sambærilegar niðurstöður, eins og fyrir íslensku jöklana, skipta miklu máli um að það takist að takmarka hlýnun eins mikið og hratt og frekast er unnt. Í sviðsmynd, þar sem hlýnar um 1.5 °C til ársins 2100, er því spáð að massatap jökla verði 25 ± 6% miðað við árið 2010 og í sviðsmynd, þar sem hlýnar um 4 °C, tapast 41 ± 11% en það samsvarar 90 ± 26 eða 154 ± 44 mm sjávarstöðuhækkun að meðaltali fyrir heimshöfin.



Mynd 2.30: Yfirborðsskriðhraði jökla á Íslandi. Sýndur er meðaltalsskriðhraði yfir tímabilið október 2014 til desember 2022. Myndin byggir á ratsjárgögnum frá Sentinel 1A og 1B gervitunglum ESA og er framlenging á gögnunum sem eru birt í grein Wuite o.fl., 2022.

Á mynd 2.31 eru niðurstöður Rounce o.fl. (2023) fyrir stærstu íslensku jöklana bornar saman við fyrri spár um framtíð þeirra. Aðrir jöklar en þessir þrír eru <10% af flatarmáli jökla landsins og gefa þessar niðurstöður því góða mynd af hugsanlegum breytingum á jöklunum öllum. Myndin sýnir niðurstöður hnattræna jöklalíkansins PyGEM fyrir sex RCP og SSP sviðsmyndir

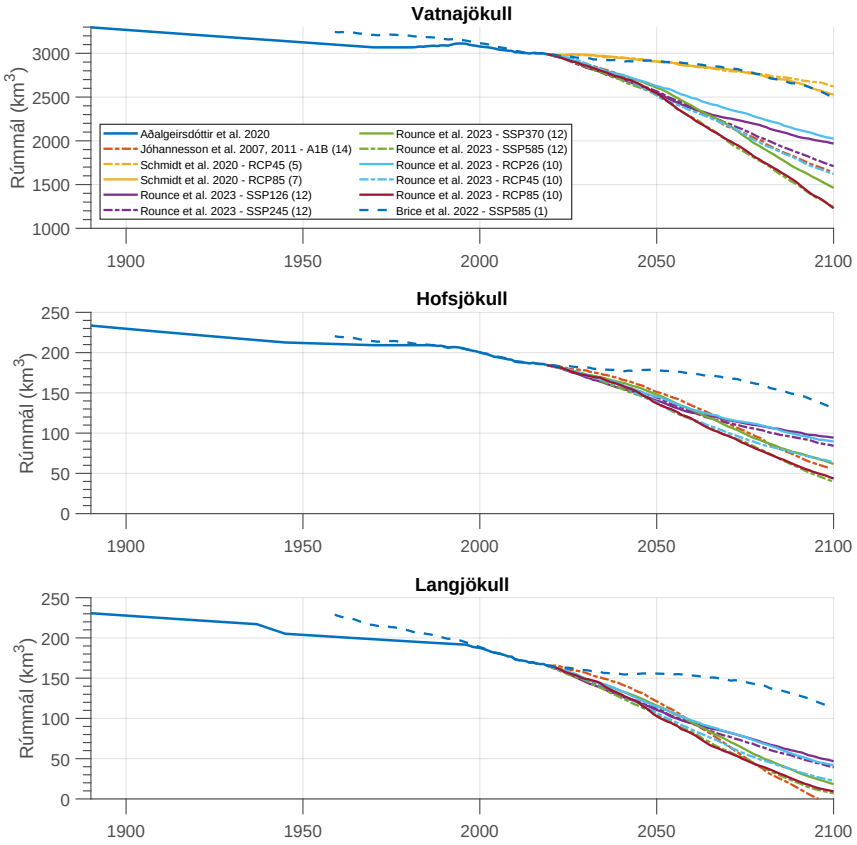


Mynd 2.29: Framtíð Vatnajökuls reiknuð með ísflæðilíkaninu PISM og afkomu frá mismunandi loftslagslíkönum úr safni CORDEX (sjá nánari skýringar í texta) (Schmidt o.fl., 2020). Efri myndirnar sýna rúmmáls- ((a) og (b)) og flatarmálsbreytingar ((c) og (d)) fyrir tvær sviðsmyndir (RCP4.5 til vinstri, RCP8.5 til hægri). Hver ferill sýnir eina keyrslu með einu loftslagslíkani úr safninu. Neðri myndir lengst til vinstri sýna botn og yfirborð Vatnajökuls við upphaf keyrslnanna. Efri röðin af myndunum sýnir yfirborðið árin 2050, 2100 og 2300 í RCP4.5 sviðsmyndinni og neðri röðin í RCP8.5 sviðsmyndinni. Yfirborðin eru úr keyrslu með loftslagi frá HIRHAM–EC-Earth sem er um það bil um miðbik keyrslanna sem sýndar eru í myndunum fyrir ofan.

(Rounce o.fl., 2023) og RACMO afkomulíkansins fyrir eina SSP sviðsmynd (Noël o.fl., 2022). Til samanburðar eru sýndar spár skv. norræna CES verkefninu (Jóhannesson o.fl., 2007; Tómas Jóhannesson o.fl., 2011), sem byggt var á í V2018 og miðast við eldri IPCC sviðsmyndirnar B2/A2 og A1B (niðurstöður fyrir sunnanverðan Vatnajökul hafa verið aðlagaðar til þess að ná til jökulsins alls með hliðsjón af afkomumælingum á tímabilinu 1992–2023) og niðurstöður líkanreikninga með samtengdu PISM ísflæðilíkani og HIRHAM orkubúskaparlíkani (Schmidt o.fl., 2020) fyrir tvær RCP sviðsmyndir. Afkomulíkansniðurstöður Noël o.fl. (2022) hafa verið keyrðar gegnum einfalt kvikt jöklalíkan til þess að þær séu sambærilegar við aðrar niðurstöður sem myndin sýnir. Líkanreikningar Compagno o.fl. (2021) með jöklalíkaninu GloGEMflow fyrir íslenska jökla, með fjölmörgum loftslagslíkönum, eru í aðalatriðum sambærilegar við niðurstöður Rounce o.fl. (2023). Í sviðsmyndunum B2/A2, A1B, RCP4.5 og SSP2-4.5 hlýnar að jafnaði um u.þ.b. 2 °C að sumri hér á landi til næstu aldamóta. Í þessum sviðsmyndum er hnattræn hlýnun meiri en ef gripið er til öflugra aðgerða til þess að hemja losun gróðurhúsalofttegunda (RCP2.6, SSP1-2.6) en minni en ef aðgerðir eru litlar sem engar (RCP8.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5).

Loftslagslíkön eru keyrð á grófu reiknineti og niðurstöður þeirra eru oft bjagaðar á stórum svæðum með tilliti til veðurmælinga. Auk þess endurspeglar svæðisbundinn náttúrulegur breytileiki síðustu áratugi í líkanreikningunum víðast hvar ekki raunverulegar, náttúrulegar breytingar á viðkomandi svæði. Mismunandi aðferðum er beitt til þess að leiðrétta bjögun af þessum toga. Í líkanreikningum CES-verkefnisins, Compagno o.fl. (2021) og Rounce o.fl. (2023) voru líkönin stillt af þannig að þau endurspegla mælda rýrnun íslensku jöklanna á síðustu

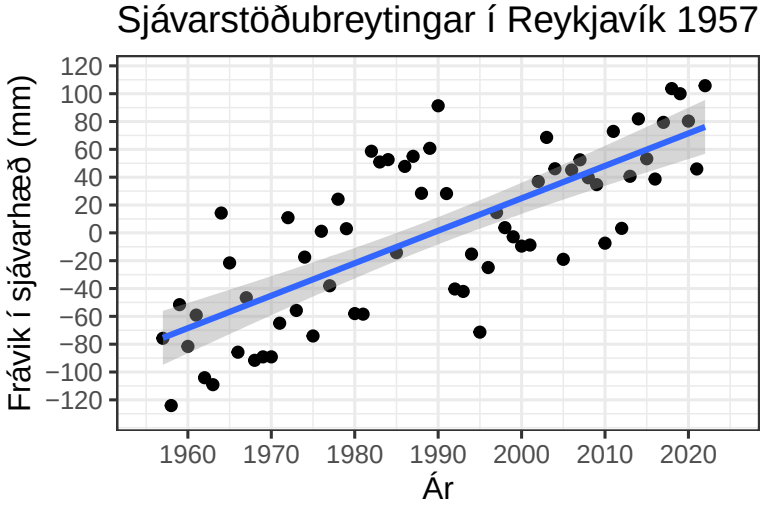
áratugum en í líkanreikningum Schmidt o.fl. (2020) er rýrnun Vatnajökuls síðan 1995 vanmetin, og þá væntanlega einnig spá um rýrnun jökulsins næstu áratugi. Niðurstöðurnar spanna breitt bil og stjórnast af forsendum um áhrif losunar gróðurhúsalofttegunda á þróun loftslags, en einnig skiptir náttúrulegur breytileiki loftslags á N-Atlantshafi miklu máli, svo og tæknileg útfærsla hinna kviku jökla- og afkomulíkana sem beitt er við reikningana. Ef hafsvæði suður af Íslandi og Grænlandi helst kalt næstu áratugi miðað við nærliggjandi svæði, eins og verið hefur undanfarna áratugi, eða ef dregur úr styrk hafhringrásar á N-Atlandshafi (sjá umfjöllun í greinum 2.3 og 3.3.2) kunna breytingar á íslensku jöklunum að verða tiltölulega litlar fram undir miðja öldina eins og niðurstöður Noël o.fl. (2022) gefa til kynna, en þar er gengið út frá loftslagslíkani sem sýnir slíka þróun. Í mörgum öðrum loftslagskeyrslum gætir þessa kaldara svæðis ekki eins mikið. Í þeim er hlýnun á hafsvæðum suður af landinu meiri og rýrnun íslensku jöklanna verður hröð og sambærileg við aðra jökla á jörðinni, u.þ.b. 40–50% til loka aldarinnar (miðað við 2015), eins og fram kemur í líkanreikningum norræna CES verkefnisins (Jóhannesson o.fl., 2007; Tómas Jóhannesson o.fl., 2011) og niðurstöðum Compagno o.fl. (2021) og Rounce o.fl. (2023). Ef ekki tekst að ná tökum á losun gróðurhúsalofttegunda og loftslagsþróun til 2100 verður svipuð og í sviðsmyndum RCP8.5, SSP3-7.0 eða SSP5-8.5 er einnig mögulegt að rýrnunin verði hraðari.



Mynd 2.31: Rúmmálsþróun þriggja stærstu jökla landsins 1890–2100. Fyrir tímabilið 1890–2019 er sýnt mat frá Aðalgeirsdóttir o.fl. (2020) (sjá mynd 2.26 og frá 2019 eru sýndar líkanniðurstöður miðað við ýmsar sviðsmyndir um loftslagsbreytingar (fjöldi keyrslna er sýndur með tölum í sviga). Sjá umfjöllun um keyrslurnar í texta.

2.5 Sjávarstöðubreytingar

Sjávarstöðubreytingar voru ræddar ítarlega í V2018 og sett fram mat á líklegum sjávarstöðubreytingum í kringum Ísland til loka þessarar aldar (sjá grein 5.3 í V2018). Í V2018 var byggt á 13. kafla skýrslu WG1 fyrir AR5 (Church o.fl., 2013) til að leggja mat á eiginlegar breytingar sjávarstöðu við Ísland sem hlutfall af hnattrænum breytingum og síðan tekið tillit til líklegra landhæðarbreytinga til þess að leggja mat á afstæða breytingu sjávarstöðu. Að gefnum forsendum um bráðnun Grænlandsjökuls og Suðurskautslandsins var metið að hækkun sjávarstöðu á Íslandi yrði um 30–40% af hnattrænni hækkun. Stærsti óvissuþátturinn er tengdur því hversu mikið bráðnar af hverju íshveli.



Mynd 2.32: Sjávarstöðubreytingar í Reykjavík frá 1956 til 2022. Myndin sýnir frávik í mm frá meðalsjávarhæð tímabilsins 1971 til 2000. Bein lína á myndinni hefur hallatöluna 2.3 [1.8–2.8] mm/ári.

Bent var á að þessar niðurstöður væru túlkun á gögnum frá IPCC, en byggðust ekki á lausn hnattræns sjávarstöðulíkans, sem yki enn á óvissuna í niðurstöðum fyrir Ísland. Nú hefur forritið SELEN (Spada og Melini, 2019) verið notað til að reikna nánar breytingar fyrir Ísland en það leysir sjávarstöðujöfnuna og metur áhrif fingrafars jöklabráðnunar fyrir Ísland, eins og rakið er í grein 2.5.2. Í V2018 er fjallað stuttlega um skort á langtímastöðvum til að mæla sjávarstöðu, en elsta mæliröðin á Íslandi er í Reykjavík. Á vegum Siglingasviðs Vegagerðarinnar og Veðurstofu Íslands hefur síðan verið gert átak að bæta mælistöðvar, en til að skoða breytingar á liðnum áratugum er mæliröðin í Reykjavík eina mæliröðin sem er aðgengileg (PSMSL, 2023). Mynd 2.32 er uppfærsla á mynd 5.16 í V2018 og sýnir sjávarstöðubreytingar í Reykjavík frá 1956–2022. Myndin sýnir að töluverðar sveiflur eru í sjávarhæð í Reykjavík en hallatala bestu línu sýnir að sjávarstaða hefur að jafnaði hækkað um 2.3 [1.8–2.8] mm/ári á tímabilinu. Þetta er hærri hallatala en var sýnd í V2018 en þar var hækkun sjávarborðs í Reykjavík frá 1957 til 2014 metin 2.0 [1.4–2.6] mm/ári. Ástæðan er að á síðustu árum hefur sjávarstaða verið há miðað við fyrri ár, eins og sést á mynd 2.32, en munurinn er innan óvissumarka.

Eins og lýst er í grein 5.3 í V2018 má rekja orsakir sjávarstöðubreytingar til nokkurra áhrifaþátta sem gætir í mismiklum mæli á Íslandi. Þeim er skipt í hnattræna og svæðisbundna áhrifaþætti. Í kafla 9.6 í skýrslu WG1 fyrir AR6 (Fox-Kemper o.fl., 2021) er gerð grein fyrir nýjustu þekkingu á sjávarstöðubreytingum (sjá mynd A.2 og umræðu um hana í kafla 1) og, byggt á þeirri umfjöllun, sýnir tafla 2.5 hvernig hraði hnattrænna sjávarstöðubreytinga hefur þróast frá upphafi 20. aldar. Fyrir alla þættina er hraðinn mestur á síðasta tímabilinu, 2006–2018.

2.5.1 Orsakir sjávarstöðubreytinga

Varmaþensla sjávar er stærsti áhrifaþátturinn í sjávarstöðubreytingum en aðrir þættir, eins og framlag jökla og ísbreiða á Grænlandi og Suðurskautslandinu, eru að stækka. Í IPCC AR6-WG1 (Fox-Kemper o.fl., 2021) er metið að varmaþensla hafi valdið tæplega 39% af um 4.4 cm hækkun

Tafla 2.5: Hraði hnattrænna sjávarstöðubreytinga frá upphafi 20. aldar til 2018, eining talna er mm á ári. Tölur innan hornklofa sýna 5 til 95% óvissumörk. Sýnd eru 5 tímabil og hraði breytinga er mestur á því síðasta. Tölurnar eru úr töflu 9.5 í Fox-Kemper o.fl. (2021) en í þeirri töflu eru einnig sýndar tölur fyrir heildarhækkun sjávarstöðu á sömu tímabilum. Samanburður á tveimur neðstu línunum, metnu heildarframlagi allra þátta og mæliniðurstöðum, sýnir að fyrir öll tímabilin skarast óvissubil heildarframlags allra áhrifaþátta og mælinga á sjávarstöðuhækkun (samanburður á neðstu tveimur línunum).

Áhrifaþáttur	**1901–1990**	**1971–2018**	**1993–2018**	**2006–2018**	**1901–2018**
Varmaþensla sjávar	0.36 [0.17–0.54]	1.01 [0.73–1.29]	1.31 [0.95–1.66]	1.39 [0.74–2.05]	0.54 [0.40–0.68]
Jöklar, nema á Suðurskautslandinu og Grænlandi	0.58 [0.34–0.82]	0.44 [0.21–0.67]	0.55 [0.40–0.70]	0.62 [0.57–0.68]	0.57 [0.36–0.79]
Ísbreiðan og jöklar á Grænlandi	0.33 [0.18–0.47]	0.25 [0.16–0.34]	0.43 [0.36–0.51]	0.63 [0.51–0.74]	0.35 [0.23–0.46]
Ísbreiðan og jöklar á Suðurskautslandi	0.00 [−0.10–0.11]	0.14 [−0.09–0.37]	0.25 [0.16–0.33]	0.37 [0.24–0.50]	0.06 [−0.03–0.15]
Vatnsgeymslur á landi	−0.15 [−0.35–0.04]	0.15 [−0.05–0.36]	0.31 [0.13–0.49]	0.60 [0.32–0.88]	−0.11 [−0.39–0.17]
Heildarframlag	1.11 [0.71–1.52]	2.00 [1.52–2.49]	2.85 [2.41–3.29]	3.61 [2.88–4.35]	1.41 [1.00–1.82]
Sjávarstöðuhækkun samkvæmt mælingum	1.35 [0.78–1.92]	2.33 [1.55–3.12]	3.25 [2.88–3.61]	3.69 [3.21–4.17]	1.73 [1.28–2.17]

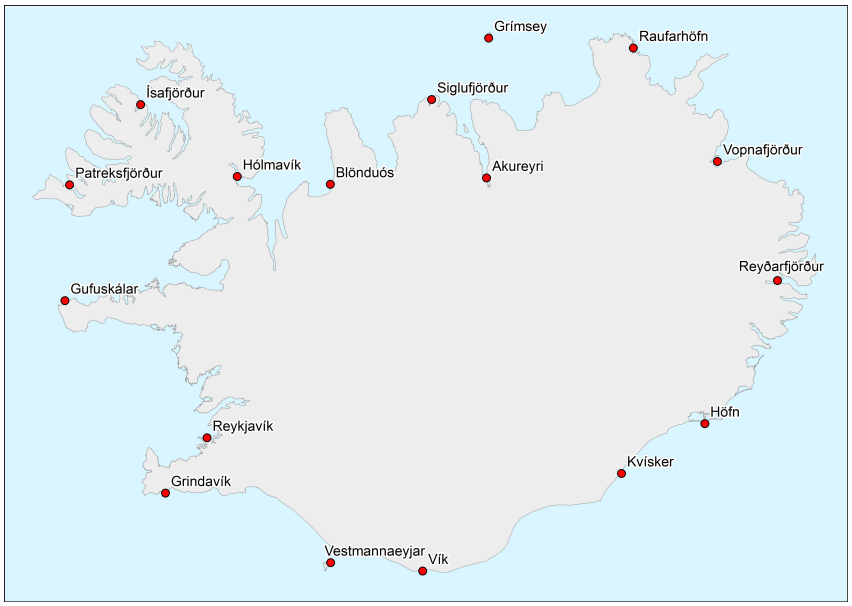
hnattrænnar sjávarstöðu á tímabilinu 2006–2018. Á sama tímabili lagði massatap jökla og ísbreiða til rúmlega 17% og 27% hvort, en afgangur hnattrænnar hækkunar sjávarstöðu (rúmlega 16%) er vegna breytinga í vatnsgeymslum á landi.

Svæðisbundnar sjávarstöðubreytingar verða vegna áhrifaþátta sem styttast að mestu út þegar hnattrænt meðaltal er reiknað. Aflrænir áhrifaþættir eru breytingar á loftþrýstingi, vindi og hafstraumum sem geta valdið sjávarstöðuhækkun á einum stað en sjávarstöðulækkun á öðrum. Fingrafar jöklabráðnunar og aðlögun að flotjafnvægi eru áhrifaþættir sem valda svæðisbundnum sjávarstöðubreytingum (sjá ítarlega umfjöllun í grein 5A í V2018). Massi jökla viðheldur hærri sjávarstöðu nærri þeim svo massatap veldur því að sjávarstaða lækkar nærri þeim – en hækkar þá meira fjær þeim. Þetta er hið s.k. fingrafar jöklabráðnunar og afleiðingar þess fyrir sjávarstöðubreytingar við Ísland eru tvíþættar. Massatap jökla á Íslandi og Grænlandi breytir þyngdarsviðinu þannig að sjávarstaða hér við land myndi að öðru óbreyttu lækka, en massatap jökla fjarri landinu og ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu veldur sjávarstöðuhækkun hér. Þessi hækkun er hin eiginlega hækkun sjávarstöðu, en lóðrétt færsla lands (landsig eða landris), m.a. sem svörun jarðskorpunnar við fargbreytingum vegna massataps jökla veldur, leggst við eða dregst frá eiginlegu hækkuninni, og niðurstaðan verður hin afstæða sjávarstöðuhækkun.

Fyrir mat á sjávarstöðubreytingum er því gagnlegt að skipta verkefninu í tvo hluta, að meta *eiginlegar* og *afstæðar* sjávarstöðubreytingar. Eiginlegar breytingar eru miðaðar við fasta landhæð, en afstæðar breytingar taka einnig tillit til landhæðarbreytinga, sem eru verulegar á Íslandi (sjá grein 2.5.3).

2.5.2 Sviðsmyndir um eiginlegar sjávarstöðubreytingar

Frá útkomu AR5 (Church o.fl., 2013) hafa auknar rannsóknir á þeim þáttum sem leiða til sjávarstöðubreytinga, þar með talið á íshvelum Grænlands og Suðurskautslands og þeim ferlum sem leiða til massataps þeirra, bætt við þekkingu á bæði orðnum og komandi sjávarstöðubreytingum.



Mynd 2.33: Staðir við strönd Íslands þar sem sjávarstöðu- og landhæðarbreytingar eru reiknaðar sérstaklega (kort byggt á Berglind Pétursdóttir (2023)) og sýndar í töflum 2.8, 2.9, 2.10 og 2.10.

Þetta er rakið í úttekt WG1 í AR6 (Fox-Kemper o.fl., 2021) og þar eru einnig settar fram niðurstöður sviðsmyndareikninga (sjá 3.1) um líklegar sjávarstöðubreytingar á komandi öldum. Hér verður fjallað um þrjár þessara sviðsmynda, SSP2-4.5 þar sem losun gróðurhúsalofttegunda er slík að hlýnun er 2,7 °C á öldinni, SSP5-8.5 þar sem losun er áköf og hlýnun um 4,4 °C á öldinni(sjá umfjöllun um sviðsmyndir í 3.1 og viðauka C). Ef bornar eru saman niðurstöður fyrir

þessar sviðsmyndir og sambærilegar losunarsviðsmyndir í AR5 (RCP4.5 og RCP8.5, sjá V2018) er ljóst að mat á framlagi ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu er hærra í nýrri skýrslu IPCC, en aðrir þættir breytast minna. Fyrir sambærilegar losunarsviðsmyndir er mat á hnattrænni sjávarstöðuhækkun 3–5 cm hærra fyrir árið 2100 í AR6. Þriðja sviðsmyndin sem hér verður skoðuð, SSP5-8.5LC (LC fyrir Low Confidence), er sviðsmynd sem hefur sömu hlýnun og SSP5-8.5 en í þessari sviðsmynd er tekið tillit til ferla sem meiri óvissa er um eins og ákafari rýrnunar ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu.

Í V2018 kom fram að það er lítill breytileiki í varmaþenslu umhverfis landið í hverri sviðsmynd. Þess vegna er hægt að nota eina tölu fyrir varmaþenslu í hverja sviðsmynd. Ný spá um varmaþenslu fram til 2100 og 2150 er sett fram í töflu 9.8 í Fox-Kemper o.fl. (2021), gögnin eru einnig aðgengileg á sjávarstöðusíðu NASA (NASA, 2021) og eru þær sýndar í töflu 2.6.

Tafla 2.6: Spá fyrir varmaþenslu (í cm) við Íslandsstrendur árin 2100 og 2150 í tveimur sviðsmyndum IPCC. Fyrir sviðsmynd SSP5-8.5LC er gert ráð fyrir sömu varmaþenslu og í SSP5-8.5 (NASA, 2021)

Sviðsmynd	**2100**	**2150**
SSP2-4.5	29	44
SSP5-8.5	44	77

Samkvæmt Fox-Kemper o.fl. (2021) hafa rannsóknir á síðustu árum leitt í ljós að á um 3000 ára tímabili í lok síðasta jökulskeiðs (fyrir 11,4 þúsund árum að 8,2 þúsund árum) hækkaði sjávarstaða nokkuð jafnt og þétt um ∼15 m á hverjum 1000 árum, með stöku tímabilum þar sem sjávarborð reis enn hraðar. Vesturhvelið á Suðurskautslandi er sjávarísbreiða, þ.e. hún stendur á sjávarbotni, og vitað er að slíkar ísbreiður geta verið óstöðugar (Weertman, 1974).

Tafla 2.7: Spönn óvissu í spám um eiginlegar sjávarstöðubreytingar við Ísland árin 2100 og 2150 í þremur sviðsmyndum. Hlutfallsleg staðsetning miðgildis (p) er mælikvarði á ósamhverfu óvissunnar og er hún notuð í mati á óvissu í spám um afstæðar sjávarstöðubreytingar (sjá töflur 2.10 og 2.11.

	2100		**2150**	
Sviðsmynd	Spönn (cm)	p (%)	Spönn (cm)	p (%)
SSP2-4.5	44.4	42	53.6	41
SSP5-8.5	52.4	42	109.4	42
SSP5-8.5LC	123.8	61	478.8	30

Seint á síðasta jökulskeiði hvarf þannig sjávarísbreiða í Barentshafi milli Svalbarða og Noregs (Ingólfsson, 2011). Líklegt er að meginhrun ísbreiðunnar hafi tekið um 2000 ár og að breytingar á umhverfisaðstæðum, m.a. hækkun sjávarborðs, hafi verið ráðandi þáttur (Petrini o.fl., 2020). Hverfi Vesturhvel Suðurskautslandins á sama hátt myndi það valda hækkun hnattrænnar sjávarstöðu um 3,3 m (Bamber o.fl., 2009). Því hefur mikilli athygli verið beint að stöðugleika sjávarísbreiða á síðustu árum og þeim möguleika að hrun þeirra geti flýtt fyrir hröðu massatapi Vesturhvels Suðurskautslandins. Niðurstaða IPCC er að þekking á slíkum ferlum, sem gætu valdið hröðu og óafturkræfu massatapi sjávarísbreiðunnar, er ekki næg til að hægt sé að leggja mat á líkur þess að slíkt gerist (Fox-Kemper o.fl., 2021) og þess vegna er einnig sett fram sviðsmyndin SSP5-8.5LC sem tekur tillit til ferla sem *lítil vissa* er fyrir, en ekki er hægt að útiloka. Í sviðsmyndinni er gert ráð fyrir sömu losun gróðurhúsalofttegunda og í heitu sviðmyndinni (SSP5-8.5) og því er hlýnun jarðar og varmaþensla sjávar óbreytt. Hins vegar þýðir aukið massatap ísbreiðanna meiri sjávarstöðubreytingar, hnattrænt er 11 cm meiri sjávarstöðuhækkun

aldamótin 2100 og 66 cm árið 2150 í SSP5-8.5LC en í SSP5-8.5. Svæðisbundinn munur á sjávarstöðubreytingum í þessum sviðsmyndum er einnig töluverður, sérstaklega nærri Grænlandi og Suðurskautslandinu (NASA, 2021).

Tafla 2.8: Eiginlegar sjávarstöðubreytingar (í cm) á 17 stöðum umhverfis Ísland (sjá skýringar í texta). Ekki er tekið tillit til landhæðarbreytinga. Óvissumat fyrir hverja sviðsmynd og hvort ár er sýnt í töflu 2.7.

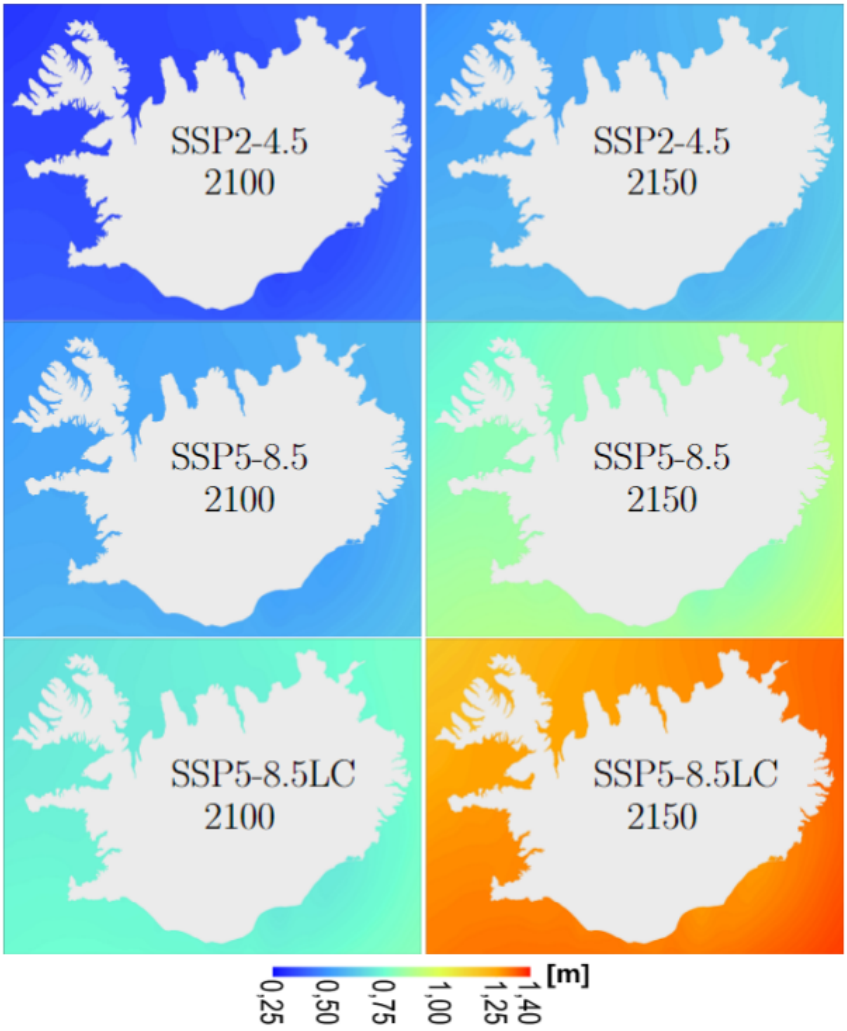
	2100			2150		
Staður	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5LC	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5LC
Reykjavík	32.2	45.3	63.3	47.5	74.2	121.6
Gufuskálar	31.5	43.6	61.6	44.7	70.1	116.4
Patreksfjörður	30.3	41.4	59.4	41.6	65.3	110.8
Ísafjörður	30.5	41.7	59.7	41.9	65.9	111.5
Hólmavík	30.8	43.0	60.9	44.1	69.4	115.9
Blönduós	30.9	43.0	61.0	44.3	69.6	116.1
Siglufjörður	31.9	44.2	62.2	45.8	71.3	118.1
Grímsey	32.4	44.9	62.9	46.8	72.6	119.6
Akureyri	31.8	44.0	62.0	45.9	71.3	118.2
Raufarhöfn	33.7	46.8	64.9	49.4	76.3	123.9
Vopnafjörður	33.8	46.9	65.0	50.4	77.1	125.2
Reyðarfjörður	34.4	47.6	65.7	52.0	78.8	127.6
Höfn	32.0	43.4	61.5	48.4	71.8	120.5
Kvísker	31.9	43.2	61.4	48.2	71.6	120.3
Vík	32.7	45.3	63.4	49.2	74.9	123.3
Vestmannaeyjar	32.9	46.0	64.1	49.3	76.0	124.1
Grindavík	33.0	46.2	64.2	48.5	75.6	123.1

Til að aðlaga þessar niðurstöður fyrir Ísland notaði Berglind Pétursdóttir (2022) forritið SELEN (Spada og Melini, 2019) sem leysir sjávarstöðujöfnuna til að reikna áhrif fingrafars jöklabráðnunar á hafsvæðið í kringum Ísland. Sem jaðarskilyrði er massatap ísbreiðanna á Grænlandi og Suðurskautslandinu frá IPCC AR6-WG1 (Fox-Kemper o.fl., 2021) fyrir sviðsmyndirnar SSP2-4.5, SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC notað. Fyrir íslensku jöklana er notað mat á massatapi þeirra í sviðsmyndum RCP4.5 og RCP8.5 byggt á Schmidt o.fl. (2020) og V2018 og það aðlagað fyrir SSP sviðsmyndirnar. Þar sem óvissa um hrun ísbreiða á ekki við um íslenska jökla er notað sama massatap fyrir íslenska jökla í sviðsmyndum SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC. Mynd 2.33 sýnir þá staði sem skoðaðir voru sérstaklega og mynd 2.35 sýnir framlag fingrafars jöklabráðnunar til sjávarstöðuhækkunar árið 2100 ásamt varmaþenslu (sjá töflu 2.6) fyrir tvær sviðsmyndir, SSP2-4.5 og SSP5-8.5.

Massatap ísbreiðunnar á Grænlandi og jöklanna á Íslandi veldur sjávarstöðulækkun vegna þyngdarsviðsáhrifa bráðnunarinnar. Áhrifin eru mest næst massanum sem tapast þannig að áhrif massataps ísbreiðunnar á Grænlandi lækkar sjávarstöðuna mest á Ísafirði og massatap íslensku jöklanna (Vatnajökull er þar langstærstur) lækkar sjávarstöðuna mest á Höfn í Hornafirði og við Kvísker. Fingrafar jöklabráðnunar á Suðurskautslandinu veldur sjávarstöðuhækkun sem er um það bil jafnmikil að stærð og lækkun vegna massataps Grænlandsjökuls í sviðsmyndinni SSP2-4.5 en hlutfallslega minni í sviðsmyndinni SSP5-8.5. Varmaþenslan sem veldur sjávarstöðuhækkun í kringum Ísland vegur á móti þessum svæðisbundnu áhrifum og veldur því að summa þessara þátta er jákvæð eða sjávarstöðuhækkun í báðum sviðsmyndum. Svarta súlan sýnir samanlagða þætti og eru þeir, ásamt hnattrænum þáttum (NASA, 2021) og niðurstöðum fyrir sviðsmyndina

SSP5-8.5LC fyrir sömu staði bæði árin 2100 og 2150, sýnd í töflu 2.8.

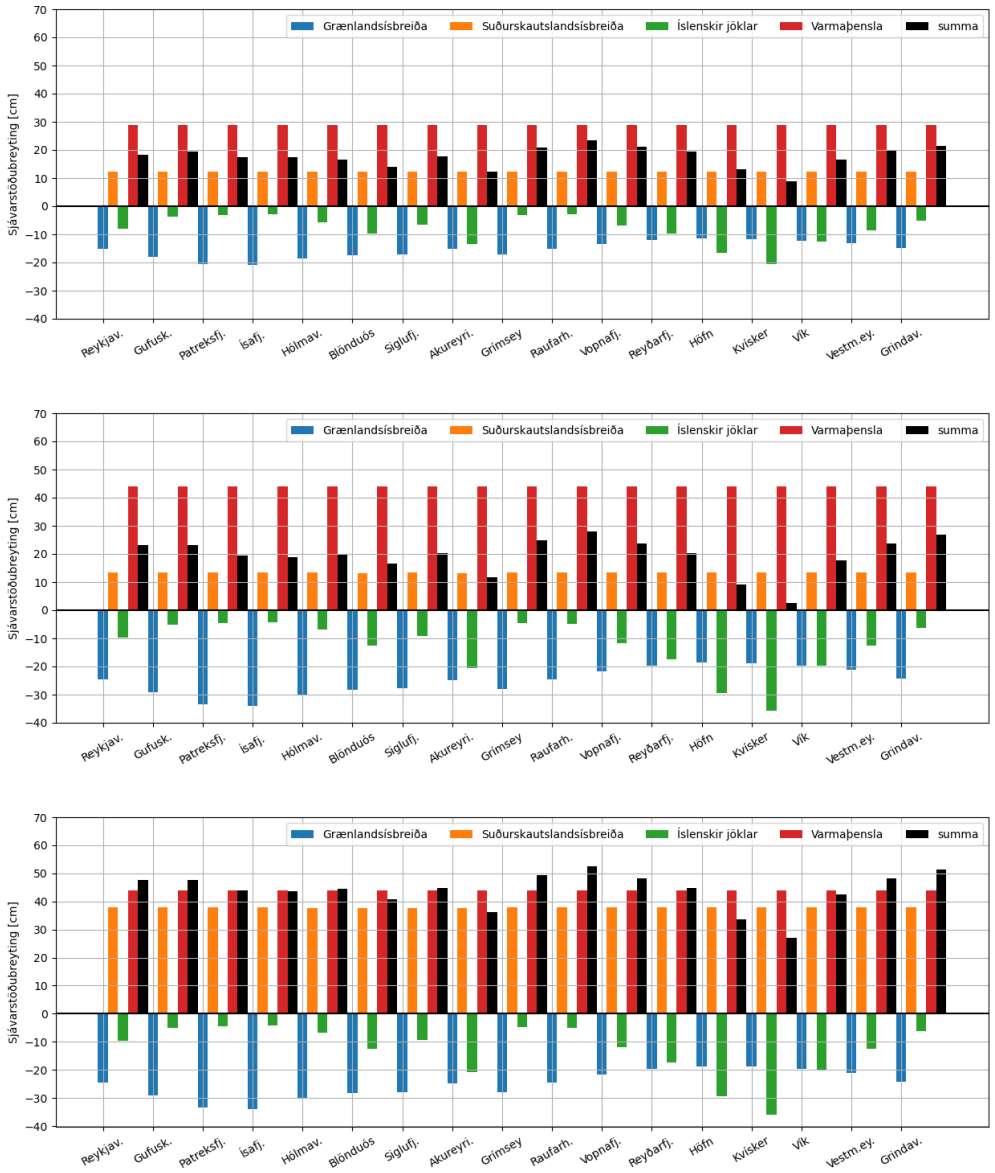
Til að leggja mat á óvissu í spánum fyrir sjávarstöðubreytingar kringum Ísland í framtíðinni er óvissumat IPCC (Fox-Kemper o.fl., 2021), sem sýnir 17% til 83% óvissubil, yfirfært á þessar spár (sjá töflu 2.7). Óvissa vegna landhæðabreytinga í töflu IPCC er dregin frá heildaróvissunni og einnig litið framhjá óvissu í vatnsgeymslu á landi (sem er mjög lítil stærð). Óvissan í töflum IPCC er ósamhverf og því er hlutfallsleg staðsetning miðgildis dreifingarinnar reiknuð og sama hlutfall notað fyrir íslensku spána (einnig sýnt í töflu 2.7). Mynd 2.34 sýnir eiginlega sjávarstöðuhækkun við Íslandsstrendur fyrir sviðsmyndirnar þrjár árin 2100 og 2150. Myndin sýnir spár um breytingar á sjávarstöðu vegna varmaþenslu (sjá töflu 2.6) og massataps jökla og ísbreiða, fingrafars jöklabráðnunar (reikningar með sjávarstöðulíkaninu SELEN, Berglind Pétursdóttir (2022), sjá dæmi á mynd 2.35).



Mynd 2.34: Eiginlegar sjávarstöðubreytingar fyrir þrjár sviðsmyndir árið 2100 (vinstri dálkur) og 2150 (hægri dálkur). Gert er ráð fyrir varmaþenslu (sjá töflu 2.6, massatapi jökla og ísbreiða og fingrafari jöklabráðununar.

2.5.3 Landhæðarbreytingar

Breytingar á landhæð á Íslandi voru raktar í grein 5.3.1 í V2018 og kort af hraða landhæðarbreytinga, auk tímaraða frá samfelldu GPS-mælineti var sýnt á mynd 5.21. Það kort byggði á mælingum frá 2004–2016 og samfelldum GPS mæliröðum til 2015. Mynd 2.36, sem sýnir uppfærslu á fyrrgreindri mynd, byggist á mælingum Landmælinga Íslands á tímabilinu 2004–2022 og GPS-mælingum frá mælineti Veðurstofu Íslands til ársins 2022. Rétt eins og fyrri mynd byggist mynd 2.36 á GPS-mælingum á yfirborði jarðar en nýlegar niðurstöður sem fengnar eru með fjarkönnunargögnum gefa sams konar mynd af lóðréttri tilfærslu lands (Drouin og Sigmundsson, 2019; Cao o.fl., 2022). Kortið sýnir ákaft landris inn til landsins og við suðausturströndina. Einnig er landris við suðurströndina, en á hluta Reykjanesskaga, Snæfellsness og nyrst á Norðurlandi er landsig. Víða við vestur- og norðurströndina er óverulegt landris (0–5 mm/ári), og sama má segja um Austfirði.

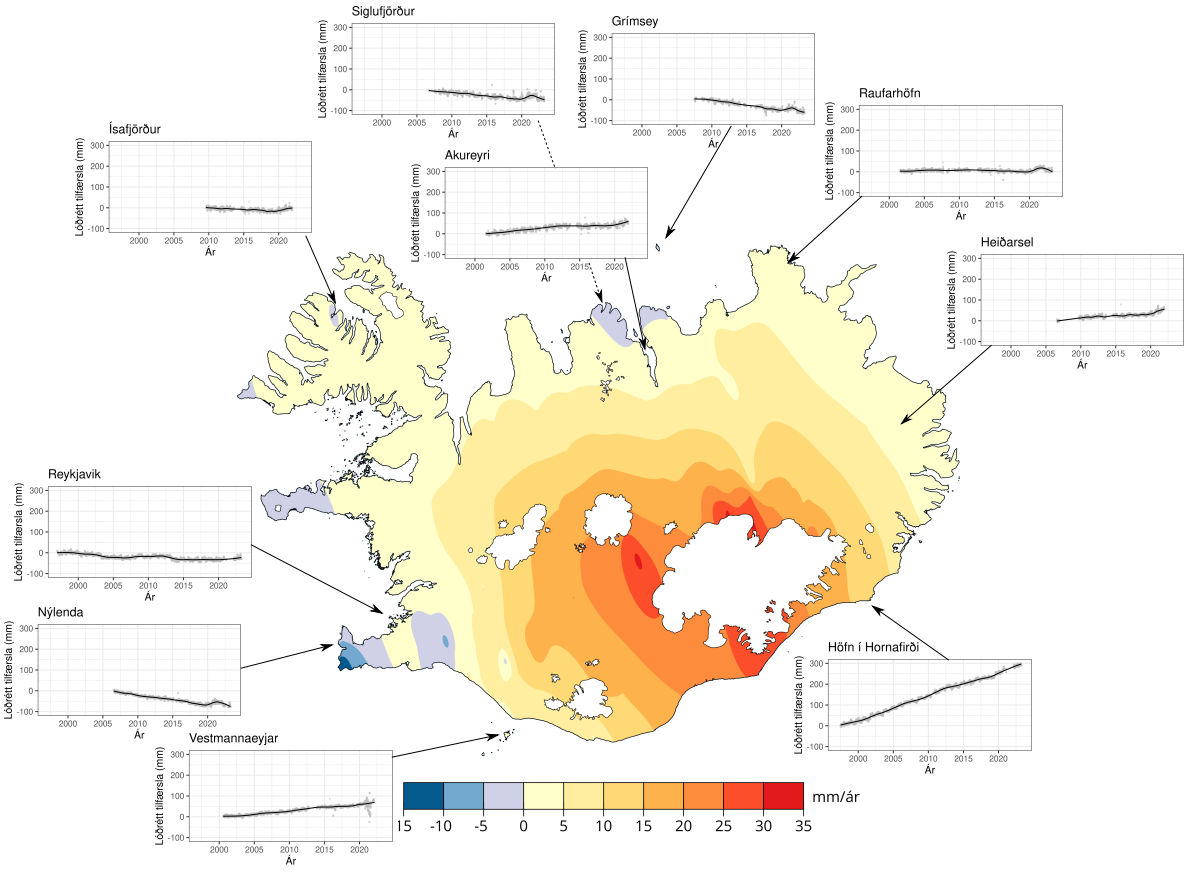


Mynd 2.35: Fingrafar jöklabráðnunar og varmaþensla á nokkrum stöðum við ströndina kringum Ísland árið 2100. Valdar staðsetningar eru sýndar á mynd 2.33. Massatap ísbreiðunnar á Grænlandi og íslensku jöklanna veldur sjávarstöðu lækkun (bláar og grænar súlur) en massatap ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu veldur sjávarstöðuhækkun (appelsínugular súlur). Varmaþensla (rauðar súlur) er sú sama á öllum stöðunum og er samkvæmt töflu 2.6. Efsta myndin sýnir niðurstöður fyrir sviðsmynd SSP2-4.5 (RCP4.5 fyrir íslensku jöklana), miðmyndin fyrir sviðsmynd SSP5-8.5 (RCP8.5 fyrir íslensku jöklana og neðsta myndin fyrir sviðsmyndina SSP5-8.5LC (aukið framlag frá ísbreiðu Suðurskautslandins) (Berglind Pétursdóttir, 2022). Summa þáttanna (svartar súlur) ásamt hnattrænum þáttum og niðurstöðum fyrir 2150 á sömu stöðum eru sýnd í töflu 2.8.

GPS-mælirðirnar, sem einnig eru sýndar á mynd 2.36, segja sömu sögu og var sýnd í V2018, en þó sýnir heildregna línan, þar sem árstíðasveifla hefur verið numin burt, uppsveiflu eftir 2020 sem er tímabundin í sumum stöðvanna. Ástæður þessarar tímabundnu uppsveiflu eru ókunnar, en hneigð línanna er sú sama og í V2018. Eins og rakið er í V2018 benda líkanreikningar til þess að landris um miðbik og á suðausturhluta landsins sé að stærstum hluta vegna rýrnunar jökla. Fyrir ítarlegri umfjöllun er vísað í V2018, en einnig er rætt um landhæðarbreytingar (Kierulf

o.fl., 2019) í grein 2.5.2.

Ekki hafa verið gerðar spár um hvernig þróun landhæðarbreytinga verður á næstu áratugum, unnið er í þróun reiknilíkana fyrir slíkar spár, en hér verður notast við framreiknaðar landhæðarbreytingar út frá þeim gögnum sem til eru. Sömu sautján staðir umhverfis landið og sýndir voru í kafla 2.5.2 voru valdir (sjá mynd 2.33), landhæðarbreytingar fyrir þá staði lesnir af kortinu á mynd 2.36 og framreiknaðar til 2100 og 2150. Niðurstöður þessara framreikninga eru sýndar í töflu 2.9.



Mynd 2.36: Fyrir miðju: Kort sem byggist á GPS-mælingum á hraða á lóðréttum tilfærslum (mm/ári) á mælistöðvum Landmælinga Íslands á tímabilinu 2004 til 2022. Línurit umhverfis: Niðurstöður frá nokkrum GPS-stöðvum nærri ströndinni þar sem til eru samfelldar GPS-mælingar hluta tímabilsins 1996–2022. Línuritin hafa öll sama kvarða, punktar sýna mælingar með fimm punkta miðgildis-síu og heildregin lína sýnir feril án árstíðasveiflu. (Kort byggt á gögnum LMÍ og GPS gögn frá VÍ).

Til að leggja gróft mat á óvissuna í framreiknaðri heildarlandhækkun, sem sýnd er í töflu 2.9, var reiknað línulegt framhald fyrir öll línuritin á myndinni og síðan reiknað óvissubil spánna fyrir 2100 og 2150. Það óvissubil reyndist 5–15 cm fyrir árið 2100 og 7.5–22.5 cm fyrir árið 2150. Lengd tímaraðar hafði ráðandi áhrif á spönn óvissubilsins en ef miðað er við lengd þess tímabils sem kortið byggist á verður spönn óvissu fyrir 2100 um 10 cm og 15 cm fyrir 2150. Hér er sjálfsagt að taka fram varnagla á þessu óvissumati. Í fyrsta lagi er hér verið að meta óvissu með því að skoða samfelldar raðir og nota óvissuna á kort sem byggist á nokkrum endurteknum mælingum. Í öðru lagi eru allar mæliraðirnar sem teiknaðar eru á mynd 2.36 stuttar, og með því að nota spönn óvissubils fyrir spárnar fyrir árin 2100 og 2150 er verið að gera ráð fyrir því að meginhneigð og breytileiki séu stöðug fyrir lengra tímabil en þessar stuttu mæliraðir sýna. Eins og fyrr segir má líklega rekja stóran hluta af landrisi til rýrnunar jökla, en mörg önnur jarðfræðileg ferli hafa áhrif á landhæðarbreytingar svo beinn framreikningur, eins og sýndur er

Tafla 2.9: Hraði landhæðarbreytinga (mm/ár) og framreiknuð heildarlandhækkun (cm) fyrir árin 2100 og 2150. Hraðinn er lesinn af kortinu á mynd 2.36. Gróf spönn óvissu sem byggist á línuritum á mynd 2.36 er 10 cm fyrir 2100 og 15 cm fyrir árið 2150.

Staðir	**mm/ár**	**2100 (cm)**	**2150 (cm)**
Reykjavík	0.5	4.0	6.6
Gufuskálar	−1.3	−10.0	−16.3
Patreksfjörður	0.7	5.5	8.9
Ísafjörður	−0.6	−6.1	−9.9
Hólmavík	2.6	21.1	34.2
Blönduós	4.3	34.1	55.3
Siglufjörður	−1.2	−9.5	−15.4
Akureyri	3.5	27.7	45.0
Grímsey	−2.7	−21.6	−35.1
Raufarhöfn	0.6	4.9	7.9
Vopnafjörður	0.9	7.3	11.9
Reydarfjörður	4.4	35.5	57.7
Höfn	14.2	112.7	183.1
Kvísker	25.5	204.5	332.3
Vík	5.3	42.6	69.2
Vestmannaeyjabær	3.3	25.8	42.0
Grindavík	−7.1	−55.6	−90.4
Spönn óvissu (cm)		10	15

hér, hefur verulega óvissu. Yfirstandandi rannsóknir á líklegri þróun landhæðarbreytinga munu væntanlega skila betra mati á næstu árum. Eins og fram kemur í grein 2.5.2 er rýrnun jökla og ísbreiða ráðandi í óvissu á sjávarstöðubreytingum á næstu öldum.

2.5.4 Afstæðar sjávarstöðubreytingar kringum Ísland

Til að gera spá fyrir afstæðar sjávarstöðubreytingar fyrir árin 2100 og 2150 á stöðunum 17 umhverfis landið eru niðurstöðurnar, sem sýndar eru í töflum 2.8 og 2.9 fyrir eiginlegar sjávarstöðubreytingar og landhæðarbreytingar, notaðar. Töflur 2.10 og 2.11 sýna þessar niðurstöður með óvissumörkum sem reiknuð eru frá töflu 2.7 fyrir eiginlega sjávarstöðuhækkun og óvissumati fyrir framtíðarlandhæðarbreytingar sem sýnt er í töflu 2.9. Samanlögð óvissa þáttanna tveggja er rót kvaðratsummu þeirra sem þýðir að óvissan í eiginlegri sjávarstöðuhækkun er ráðandi í óvissubilinu sem sýnt er í töflum 2.10 og 2.11.

Niðurstöðurnar sýna að spárnar gera ráð fyrir að umhverfis landið muni afstæð sjávarstaða hækka víða. Þar sem landris er mest á suðausturhluta landsins nær það þó að yfirvinna eiginlega sjávarstöðuhækkun og afstæð sjávarstaða lækkar því á þessu svæði. Þetta er í samræmi við niðurstöður V2018 en töflur 2.10 og 2.11 gefa skýrari mynd af líklegum sjávarstöðubreytingum í framtíðinni og stærð óvissu þeirra.

Vert er að benda á að óvissan í spánum um hækkun sjávarstöðu vex töluvert eftir árið 2100. Sviðsmynd SSP5-8.5LC sker sig úr, í henni veldur massatap ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu mikilli hnattrænni hækkun sjávarstöðu og líka hér við land. Óvissan um massatapið er mikið sem veldur því að spönn óvissunnar fyrir þessa sviðsmynd verður einnig mjög mikil. Ef efri óvissumörk þessarar sviðsmyndar eru skoðuð sýnir spáin verulega sjávarstöðuhækkun umhverfis landið árið 2150 (tafla 2.11), líka á þeim stöðum þar sem landris er mest. Þetta endurspeglar þá miklu óvissu sem er um þróun sjávarstöðu á næstu öld.

Fyrir hinar sviðsmyndirnar er óvissan ekki jafnmikil og sjávarstöðuhækkunin minni, þótt hún

Tafla 2.10: Afstæð hækkun sjávar (cm) á 17 stöðum umhverfis landið fyrir árið 2100. Sýndar eru niðurstöður fyrir sviðsmyndir SSP2-4.5, SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC. Tölur innan hornklofa tákna 17%–83% óvissumörk, eða líklega (66%) spönn óvissunnar. Afstæð hækkun tekur tillit til landhæðarbreytingar og eiginlegra sjávarstöðubreytinga.

Staður	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**	**SSP5-8.5LC**
Reykjavík	28	41	59
óvissa	[9 til 55]	[19 til 72]	[−17 til 108]
Gufuskálar	42	54	72
óvissa	[22 til 68]	[31 til 85]	[−14.2 til 120]
Patreksfjörður	24	36	54
óvissa	[6 til 51]	[14 til 67]	[−22 til 102]
Ísafjörður	37	48	66
óvissa	[18 til 63]	[26 til 79]	[−10 til 114]
Hólmavík	10	22	40
óvissa	[−9 til 36]	[−1 til 53]	[−36 til 88]
Blönduós	−3	9	27
óvissa	[−22 til 23]	[−13 til 40]	[−49 til 75]
Siglufjörður	41	54	72
óvissa	[22 til 68]	[31 til 85]	[−4 til 120]
Akureyri	4	16	34
óvissa	[−15 til 31]	[−6 til 47]	[−41 til 82.8]
Grímsey	54	67	85
óvissa	[35 til 80]	[44 til 97]	[9 til 133]
Raufarhöfn	29	42	60
óvissa	[10 til 55]	[20 til 73]	[−16 til 109]
Vopnafjörður	27	40	58
óvissa	[7 til 53]	[17 til 71]	[−18 til 106]
Reyðarfjörður	−1	12	30
óvissa	[−20 til 25]	[−10 til 43]	[−46 til 79]
Höfn	−81	−69	−51
óvissa	[−100 til −54]	[−92 til −38]	[−127 til −3]
Kvísker	−173	−161	−143
óvissa	[−192 til −146]	[−184 til −130]	[−219 til −95]
Vík	−10	3	20
óvissa	[−29 til 17]	[−20 til 34]	[−55 til 69]
Vestmannaeyjar	7	20	38
óvissa	[−12 til 34]	[−2 til 51]	[−38 til 87]
Grindavík	89	102	120
óvissa	[70 til 115]	[79 til 133]	[44 til 168]

Tafla 2.11: Afstæð hækkun sjávar (cm) á 17 stöðum umhverfis landið fyrir árið 2150. Sýndar eru niðurstöður fyrir sviðsmyndir SSP2-4.5, SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC. Tölur innan hornklofa tákna 17% til 83% óvissumörk, eða líklega (66%) spönn óvissunnar. Afstæð hækkun tekur tillit til landhæðarbreytingar og eiginlegra sjávarstöðubreytinga.

Staður	**SSP2-4.5**	**SSP5-8.5**	**SSP5-8.5LC**
Reykjavík	41	68	115
óvissa	[18 til 74]	[21 til 132]	[−29 til 450]
Gufuskálar	61	86	133
óvissa	[38 til 94]	[40 til 150]	[−11 til 468]
Patreksfjörður	33	56	102
óvissa	[10 til 66]	[10 til 120]	[−42 til 437]
Ísafjörður	52	76	122
óvissa	[29 til 85]	[30 til 140]	[−22 til 457]
Hólmavík	10	35	82
óvissa	[−13 til 43]	[−11 til 99]	[−62 til 417]
Blönduós	−11	14	61
óvissa	[−34 til 22]	[−32 til 78]	[−83 til 396]
Siglufjörður	61	87	133
óvissa	[38 til 94]	[40 til 151]	[−10 til 469]
Akureyri	1	26	73
óvissa	[−22 til 34]	[−20 til 90]	[−70 til 409]
Grímsey	82	108	155
óvissa	[59 til 115]	[61 til 172]	[11 til 490]
Raufarhöfn	42	68	116
óvissa	[19 til 74]	[22 til 133]	[−28 til 451]
Vopnafjörður	39	65	113
óvissa	[16 til 71]	[19 til 129]	[−30 til 449]
Reyðarfjörður	−6	21	70
óvissa	[−29 til 27]	[−25 til 85]	[−74 til 405]
Höfn	−135	−111	−63
óvissa	[−158 til −102]	[−158 til −47]	[−206 til 273]
Kvísker	−284	−261	−212
óvissa	[−307 til −251]	[−307 til −197]	[−356 til 123]
Vík	−20	6	54
óvissa	[−43 til 13]	[−41 til 70]	[−90 til 389]
Vestmannaeyjar	7	34	82
óvissa	[−16 til 40]	[−12 til 98]	[−62 til 417]
Grindavík	139	166	214
óvissa	[116 til 172]	[120 til 230]	[70 til 549]

sé veruleg á flestum stöðunum, meiri í sviðsmynd SSP5-8.5 en í sviðsmynd SSP2-4.5 og meiri árið 2150 en árið 2100. Mikilvægt er að hafa í huga að sjávarstöðubreytingar munu halda áfram öldum saman, jafnvel þótt losun gróðurhúsalofttegunda verði minnkuð eða stöðvuð. Í IPCC AR6-WG1 er spáin fyrir hnattræna sjávarstöðuhækkun árið 2300 meiri en þrír metrar, jafnvel í sviðsmynd þar sem náðst hefur að minnka losun gróðurhúsalofttegunda (SSP1-2.6) (Fox-Kemper o.fl., 2021). Það má því búast við því að sú hækkun sem sýnd er í töflum 2.10 og 2.11 fyrir sviðsmyndir SSP2-4.5 og SSP5-8.5 muni rætast að lokum, jafnvel þó að framvindan verði hægari en reikningar samkvæmt þessum sviðsmyndum gefa til kynna.

Það er mikilvægt að tekið sé tillit til þessara spáa fyrir þróun sjávarstöðubreytinga við skipulag við strönd landsins. Tæplega 30 ár eru síðan fyrst voru gefnar út viðmiðunarreglur um viðbrögð við sjávarstöðubreytingum. Þær áttu við um árið 2100 sem þá var eftir 105 ár. Árið 2023 eru 77 ár til ársins 2100 og 127 til ársins 2150. Mörg dæmi eru um það að byggð við sjávarsíðuna á Íslandi hafi verið skipulögð á 19. öld eða fyrr, þ.e. fyrir lengri tíma síðan en nú er til ársins 2150. Sem dæmi má nefna staðsetningu Kvosarinnar í Reykjavík og byggðakjarna á seteyrum eins og á Oddeyri á Akureyri. Því er vert að gera ráð fyrir því að skipulagsákvarðanir, sem teknar eru nú, geti haft áhrif fram til ársins 2150. Það er því mikilvægt er að haga skipulagi við strendur landsins með væntanlegar sjávarstöðubreytingar í huga svo ekki verði aukin vandamál sem tengjast ágangi sjávar sem mun fylgja hækkun sjávarstöðu.

Heimildir

Aðalgeirsdóttir, Guðfinna, Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Thorsteinn Thorsteinsson, Joaquín M.C. Belart, Tómas Jóhannesson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Bergur Einarssong, Etienne Berthier, Louise Steffensen Schmidt, Hannes Haraldsson og Helgi Björnsson (2020). „Glacier changes in Iceland from ∼1890 to 2019“. Í: *Frontiers in Earth Science* 8, bls. 520. DOI: 10.3389/feart.2020.523646.

Andri Gunnarsson, Finnur Pálsson, Þorsteinn Þorsteinsson, Hrafnhildur Hannesdóttir og Skafti Brynjólfsson (2022). „Afkoma íslenskra jökla 2021-2022“. Í: *Jökull* 72, bls. 81–86. DOI: 10.33799/jokull2022.72.079o.

Bamber, Jonathan L, Riccardo EM Riva, Bert LA Vermeersen og Anne M LeBrocq (2009). „Reassessment of the potential sea-level rise from a collapse of the West Antarctic Ice Sheet“. Í: *science* 324.5929, bls. 901–903.

Belart, Joaquín M. C., Eyjólfur Magnússon, Etienne Berthier, Ágúst Þ Gunnlaugsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Thorsteinn Thorsteinsson og Helgi Björnsson (2020). „Mass Balance of 14 Icelandic Glaciers, 1945–2017: Spatial Variations and Links With Climate“. Í: *Frontiers in Earth Science* 8, bls. 163. DOI: 10.3389/feart.2020.00163.

Belart, Joaquín M. C., Eyjólfur Magnússon, Etienne Berthier, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir og Tómas Jóhannesson (2019). „The geodetic mass balance of Eyjafjallajökull ice cap for 1945–2014: processing guidelines and relation to climate“. Í: *Journal of Glaciology* 65 (251), bls. 395–409. DOI: 10.1017/jog.2019.16.

Berglind Pétursdóttir (2022). *Jöklabreytingar og sjávarstaða umhverfis Ísland*. Rannís - Lokaskýrsla.

— (2023). „Áhrif massataps Grænlandsísbreiðu á sjávarstöðu umhverfis Ísland“. B.Sc. thesis. Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands.

Bernat, Maud (2022). *Geodetic mass balance of Mýrdalsjökull ice cap, 1999–2021: DEM processing and climate analysis. Glaciology.* Tæknileg skýrsla. PSL Université Paris, bls. 29. URL: https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03772002.

Bernat, Maud, Joaquín M.C. Belart, Etienne Berthier, Tómas Jóhanesson, Romain Hugonnet, Amaury Dehecq, Eyjolfur Magnússon og Andri Gunnarsson (2023). „Geodetic Mass Balance of Mýrdalsjökull ice cap 1999–2021“. Journal Article.

Berthier, Etienne, Dana Floriciou, Alex S Gardner, Noel Gourmelen, Livia Jakob, Frank Paul, Désirée Treichler, Bert Wouters, Joaquín M C Belart, Amaury Dehecq, Ines Dussaillant, Romain Hugonnet, Andreas Kääb, Lukas Krieger, Finnur Pálsson og Michael Zemp (2023). „Measuring glacier mass changes from space—a review“. Í: *Reports on Progress in Physics* 86.3, bls. 36801. DOI: 10.1088/1361-6633/acaf8e.

Björnsson, Helgi, Finnur Pálsson, Sverrir Gudmundsson, Eyjólfur Magnússon, Gudfinna Adalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Etienne Berthier, Oddur Sigurdsson og Thorsteinn Thorsteinsson (2013). „Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: Trends and variability since the Little Ice Age“. Í: *Geophysical Research Letters* 40.8, bls. 1546–1550. DOI: 10.1002/grl.50278.

Björnsson, Helgi, Finnur Pálsson, Oddur SigurÃ°sson og Gwenn E. Flowers (2003). „Surges of glaciers in Iceland“. Í: *Annals of Glaciology* 36, bls. 82–90. DOI: https://doi.org/10.3189/172756403781816365.

Cao, Yunmeng, Sigurjon Jonsson og Sigrun Hreinsdottir (2022). „Iceland Kinematics from InSAR“. Í.

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer og A.S. Unnikrishnan (2013). „Sea Level Change“. Í: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Gefið út af T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung,

A. Nauels, Y. Xia, V. Bex og P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Compagno, Loris, Harry Zekollari, Matthias Huss og Daniel Farinotti (2021). „Limited impact of climate forcing products on future glacier evolution in Scandinavia and Iceland“. Í: *Journal of Glaciology* 67.264, bls. 727–743. DOI: 10.1017/jog.2021.24.

CORDEX (2012). *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*. URL: https://cordex.org/.

Crochet, Philippe (2020). *Flood frequency analysis in a changing climate - Climate change impact on design flood*. Tæknileg skýrsla Report 2020-1. Prepred for Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar.

— (2021). *Impact of climate change on mean and high streamflow characteristics in Icelandic watersheds: a case study*. Tæknileg skýrsla Report 2021-RD01. Prepared for Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar.

— (2022). *Hydrological response of Icelandic river basins to projected climate change during the 21st century: A case study*. Tæknileg skýrsla Report 2022-RD01. Prepared for Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar.

Douville, H, K Raghavan, J Renwick, R P Allan, P A Arias, M Barlow, R Cerezo-Mota, A Cherchi, T Y Gan, J Gergis, D Jiang, A Khan, W Pokam Mba, D Rosenfeld, J Tierney og O Zolina (2021). „Water Cycle Changes“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 1055–1210. DOI: 10.1017/9781009157896.010.

Drouin, Vincent og Freysteinn Sigmundsson (2019). „Countrywide observations of plate spreading and glacial isostatic adjustment in Iceland inferred by Sentinel-1 radar interferometry, 2015–2018“. Í: *Geophysical Research Letters* 46.14, bls. 8046–8055.

Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Joaquín M.C. Belart og Helgi Björnsson (2020). *Áhrif breytinga Skeiðarárjökuls á farvg og rennsli Súlu*. Tæknileg skýrsla. Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans. RH-5-20, bls. 17.

Eythorsson, Darri, Sigurdur M Gardarsson, Andri Gunnarsson og Oli Gretar Blondal Sveinsson (2023). „Observed and predicted trends in Icelandic snow conditions for the period 1930–2100“. Í: *The Cryosphere* 17.1, bls. 51–62.

Finnur Pálsson og Eyjólfur Magnússon (2021). *Greinargerð vegna styrks af tilraunafé árið 2020: Samvinna um rannsóknir í Grímsvötnum*. Tæknileg skýrsla. Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans. Júní 2021, bls. 18.

— (2022). *Greinargerð vegna styrks af tilraunafé árið 2021: Samvinna um rannsóknir í Grímsvötnum*. Tæknileg skýrsla. Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans. RH-03-22, bls. 18.

Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Eyjólfur Magnússon, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Sveinbjörn Steinþórsson, Karl Eiríksson og Andri Björnsson (2022a). *Vatnajökull: Mass balance, meltwater drainage and surface veloicity of the glacial year 2021 - 22*. Tæknileg skýrsla. Institute of Earth Sciences University of Iceland og National Power Company.

Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Sveinbjörn Steinþórsson, Karl Eiríksson og Þorbjörg Anna Sigurbjörnsdóttir (2022b). *Afkomu- og hraðamælingar á Langjökli, jökulárið 2021–2022*. Tæknileg skýrsla. Jarðvísindastofnun Háskólans og Landsvirkjun.

Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon og Hrafnhildur Hannesdóttir (2019). *Könnun á legu vatnaskila við jökulbotn milli Skaftár og Hverfisfljóts á Tungnaárjökli sunnan Skaftárkatla*. Tæknileg skýrsla. RH-01-2019, bls. 83.

Foresta, L, N Gourmelen, F Pálsson, P Nienow, H Björnsson og A Shepherd (2016). „Surface elevation change and mass balance of Icelandic ice caps derived from swath mode CryoSat-2 altimetry“. Í: *Geophysical Research Letters* 43.23, bls. 12, 112–138, 145. DOI: https://doi.org/10.1002/2016GL071485.

Fox-Kemper, B, H T Hewitt, C Xiao, G Aðalgeirsdóttir, S S Drijfhout, T L Edwards, N R Golledge, M Hemer, R E Kopp, G Krinner, A Mix, D Notz, S Nowicki, I S Nurhati, L Ruiz, J.-B. Sallée, A B A Slangen og Y Yu (2021). „Ocean, Cryosphere and Sea Level Change". Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 1211–1362. DOI: 10.1017/9781009157896.011.

Geirsdóttir, Áslaug, Gifford H. Miller, John T. Andrews, David J. Harning, Leif S. Anderson, Christopher Florian, Darren J. Larsen og Thor Thordarson (2019). „The onset of neoglaciation in Iceland and the 4.2 ka event". Í: *Climate of the Past* 15, bls. 25–40.

Geirsdóttir, Áslaug, Gifford H. Miller, Darren J. Larsen og Steinunn Ólafsdóttir (2013). „Abrupt Holocene climate transitions in the northern North Atlantic region recorded by synchronized lacustrine records in Iceland". Í: *Quaternary Science Reviews* 70, bls. 48–62.

Guðmundsson, Snævarr, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Thorsteinn Saemundsson og Tómas Jóhannesson (2020). „Terminus lakes on the south side of Vatnajökull ice cap, SE-Iceland". Í: *Jökull* 69, bls. 1–34. DOI: 10.33799/jokull2019.69.001.

Gunnarsson, A, S M Gardarsson, F Pálsson, T Jóhannesson og Ó G B Sveinsson (2021). „Annual and inter-annual variability and trends of albedo of Icelandic glaciers". Í: *The Cryosphere* 15.2, bls. 547–570. DOI: 10.5194/tc-15-547-2021.

Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson og Trausti Jónsson (2018). *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018.* Veðurstofa Íslands. URL: https://www.vedur.is/media/loftslag/Skyrsla-loftslagsbreytingar-2018-Vefur-NY.pdf.

Halldór Björnsson, Árný E Sveinbjörnsdóttir, Anna K Daníelsdóttir, Árni Snorrason, B D Sigurdsson, Einar Sveinbjörnsson, Gísli Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Snorri Baldursson, Sólveig Þorvaldsdóttir og Trausti Jónsson (2008). „Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi". Í: *Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar, Umhverfisráðuneyti.*

Hersbach, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, Carole Peubey, Raluca Radu, Dinand Schepers, Adrian Simmons, Cornel Soci, Saleh Abdalla, Xavier Abellan, Gianpaolo Balsamo, Peter Bechtold, Gionata Biavati, Jean Bidlot, Massimo Bonavita, Giovanna De Chiara, Per Dahlgren, Dick Dee, Michail Diamantakis, Rossana Dragani, Johannes Flemming, Richard Forbes, Manuel Fuentes, Alan Geer, Leo Haimberger, Sean Healy, Robin J. Hogan, Elías Hólm, Marta Janisková, Sarah Keeley, Patrick Laloyaux, Philippe Lopez, Cristina Lupu, Gabor Radnoti, Patricia de Rosnay, Iryna Rozum, Freja Vamborg, Sebastien Villaume og Jean-Noël Thépaut (2020). „The ERA5 global reanalysis". Í: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730, bls. 1999–2049. DOI: https://doi.org/10.1002/qj.3803.

Hersbach, Hans, Brian Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, Carole Peubey, Raluca Radu, Dian Schepers, Adrian Simmons, Cornel Soci, Saleh Abdalla, Xavier Abellan, Gianpaolo Balsamo, Peter Bechtold, Giovanni Biavati, Jean Bidlot, Massimo Bonavita, Giovanna De Chiara, Per Dahlgren, Dick Dee, Michail Diamantakis, Rossana Dragani, Johannes Flemming, Richard Forbes, Manuel Fuentes, Alan Geer, Leopold Haimberger, Sean Healy, Robin J. Hogan, Elias Hólm, Martina Janisková, Sarah Keeley, Patrick Laloyaux, Pablo Lopez, Ciprian Lupu, Gabor Radnoti, Patricia de Rosnay, Iryna Rozum, Freja Vamborg, Sebastien Villaume og Jean-Noël Thépaut (2017). „Complete ERA5 from 1940: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate". Í: *Copernicus Climate Change Service (C3S) Data Store (CDS).* DOI: 10.24381/cds.143582cf.

Hilmar Björn Hróðmarsson og Tinna Þórarinsdóttir (2018). *Flóð íslenskra vatnsfalla flóðagreining rennslisraða.* Tæknileg skýrsla 2018-003. VÍ Skýrsla.

Hock, Regine, Andrew Bliss, Ben Marzeion, Rianne H. Giesen, Yukiko Hirabayashi, Matthias Huss, Valentina Radić og Aimée B. A. Slangen (2019). „GlacierMIP - A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections“. Þýð. P5658. Í: *Journal of Glaciology* 65.251, bls. 453–467. ISSN: 0022-1430. DOI: 10.1017/jog.2019.22. URL: https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022143019000224/type/journal_article.

Hrafnhildur Hannesdóttir (2022). „Jöklabreytingar 1930-1970, 1970-1995, 1995-2020 og 2020-2021“. Í: *Jökull* 72, bls. 71–80. DOI: 10.33799/jokull2022.72.071o.

Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Ragnar H Þrastarson, Snævarr Guðmundsson, Joaquín M C Belart, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Skúli Víkingsson, Ingibjörg Kaldal og Tómas Jóhannesson (2021). „A national glacier inventory and variations in glacier extent in Iceland from the Little Ice Age maximum to 2019“. Í: *Jökull* 2020.70, bls. 1–34. DOI: 10.33799/jokull2020.70.001.

Huang, Boyin, Peter W. Thorne, Viva F. Banzon, Tim Boyer, Gennady Chepurin, Jay H. Lawrimore, Matthew J. Menne, Thomas M. Smith, Russell S. Vose og Huai-Min Zhang (2017). *NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5*. NOAA National Centers for Environmental Information. URL: https://doi.org/10.7289/V5T72FNM (skoðað 14.06.2023).

Hugonnet, Romain, Robert McNabb, Etienne Berthier, Brian Menounos, Christopher Nuth, Luc Girod, Daniel Farinotti, Matthias Huss, Ines Dussaillant, Fanny Brun og Andreas Kääb (2021). „Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century“. Þýð. P8473. Í: *Nature* 592.7856, bls. 726–731. DOI: 10.1038/s41586-021-03436-z.

Ingólfsson, Ó (2011). „Fingerprints of Quaternary glaciations on Svalbard“. Í: *Geological Society, London, Special Publications* 354.1, bls. 15–31.

IPCC (2021). „Summary for Policymakers“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, 3-32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.

Jiang, Hao, Raimund Muscheler, Svante Björck, Marit-Solveig Seidenkrantz, Jesper Olsen, Longbin Sha, Jesper Sjolte, Jón Eiríksson, Lisheng Ran, Karen Luise Knudsen og Mads Faurschou Knudsen (2015). „Solar forcing of Holocene summer sea-surface temperatures in the northern North Atlantic“. Í: *Geology* 43.3, bls. 203–206.

Josey, Simon A, Joel J-M Hirschi, Bablu Sinha, Aurélie Duchez, Jeremy P Grist og Robert Marsh (2018). „The recent Atlantic cold anomaly: Causes, consequences, and related phenomena“. Í: *Annual Review of Marine Science* 10, bls. 475–501.

Jóhannesson, T, G Aðalgeirsdóttir, H Björnsson, P Crochet, E B Elíasson, S Gumundsson, J F Jónsdóttir, H Ólafsson, F Pálsson, Ó Rögnvaldsson, O Sigurðsson, Ó G Blöndal-Sveinsson og Th Thorsteinsson (2007). *Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. Reykjavík*. Tæknileg skýrsla.

Jóhannesson, Tómas, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, A. Ahlstrøm, L. M. Andreassen, S. Beldring, Helgi Björnsson, P. Crochet, Bergu Einarsson, H. Elvehøy, Sverrir Guðmundsson, R. Hock, H. Machguth, K. Melvold, Finnur Pálsson, V. Radic, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson (2011). „Hydropower, snow and ice“. Í: *Climate Change and Energy Systems. Impacts, Risks and Adaptation in the Nordic and Baltic Countries*. Gefið út af Þorsteinn Þorsteinsson og Halldór Björnssson. TemaNord 2011:502. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, bls. 91–111.

Jóhannesson, Tómas, Bolli Pálmason, Árni Hjartarson, Alexander H Jarosch, Eyjólfur Magnússon, Joaquín M C Belart og Magnús Tumi Gudmundsson (2020). „Non-surface mass balance of glaciers in Iceland“. Í: *Journal of Glaciology* 66.258, bls. 685–697. DOI: 10.1017/jog.2020.37.

Kierulf, Halfdan, Gunnar Valsson, Karl-Uwe Evers, Martin Lidberg, Pekka Häkli, Dalia Prizginiene, Geir Hjelle, Olav Vestøl, Maria Håkansson og Markku Poutanen (2019). „Towards a Dynamic Reference Frame in Iceland“. Í: *Geophysica* 54, bls. 3–17.

Marcott, Shaun A, Jeremy D Shakun, Peter U Clark og Alan C Mix (2013). „A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years“. Í: *Science* 339.6124, bls. 1198–1201.

Marzeion, Ben, Regine Hock, Brian Anderson, Andrew Bliss, Nicolas Champollion, Koji Fujita, Matthias Huss, Walter W. Immerzeel, Philip Kraaijenbrink, Jan Hendrik Malles, Fabien Maussion, Valentina Radić, David R. Rounce, Akiko Sakai, Sarah Shannon, Roderik van de Wal og Harry Zekollari (2020). „Partitioning the Uncertainty of Ensemble Projections of Global Glacier Mass Change“. Þýð. P9192. Í: *Earth's Future* 8.7, e2019EF001470. DOI: 10.1029/2019EF001470.

Massad, Andréa-Giorgio, Guðrún Petersen, Tinna Þórarinsdóttir og Matthew James Roberts (okt. 2020). *Reassessment of precipitation return levels in Iceland*. Icelandic Meteorological Office, bls. 1–140.

Massad, Andréa-Giorgio, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson, Matthew James Roberts og Tinna Þórarinsdóttir (sep. 2022). *Extreme precipitation in Iceland: Climate projections and historical changes in precipitation type*. Icelandic Meteorological Office, bls. 1–100.

Miller, G. H., Á. Geirsdóttir, Y. Zhong, D. J. Larsen, B. L. Otto-Bliesner, M. M. Holland, D. A. Bailey, K. A. Refsnider, S. J. Lehman, J. R. Southon, C. Anderson, H. Björnsson og T. Thordarson (2012). „Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks“. Í: *Geophysical Research Letters* 39, bls. L02708. DOI: 10.1029/2011GL050168.

NASA (2021). *Sea Level Projection Tool*. URL: https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool.

Nawri, Nikolai, Bolli Pálmason, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson og Sigurður Þorsteinsson (2017). *The ICRA-2016 Atmospheric reanalysis project for Iceland*. Tæknileg skýrsla VÍ-2017-005. Veðurstofa Íslands.

Noël, Brice, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson, Bert Wouters, Stef Lhermitte, Jan M Haacker og Michiel R van den Broeke (2022). „North Atlantic Cooling is Slowing Down Mass Loss of Icelandic Glaciers“. Í: *Geophysical Research Letters* 49.3, e2021GL095697. DOI: https://doi.org/10.1029/2021GL095697.

Petrini, Michele, Florence Colleoni, Nina Kirchner, Anna LC Hughes, Angelo Camerlenghi, Michele Rebesco, Renata G Lucchi, Emanuele Forte, Renato R Colucci, Riko Noormets o.fl. (2020). „Simulated last deglaciation of the Barents Sea Ice Sheet primarily driven by oceanic conditions“. Í: *Quaternary Science Reviews* 238, bls. 106314.

PISM (2010). *Parallel Ice Sheet Model*. URL: https://www.pism.io/.

PSMSL (2023). *Permanent Service for Mean Sea Level*. URL: https://psmsl.org/.

Rounce, David R, Regine Hock, Fabien Maussion, Romain Hugonnet, William Kochtitzky, Matthias Huss, Etienne Berthier, Douglas Brinkerhoff, Loris Compagno, Luke Copland, Daniel Farinotti, Brian Menounos og Robert W McNabb (2023). „Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters“. Í: *Science* 379.6627, bls. 78–83. DOI: 10.1126/science.abo1324.

Schmidt, Louise Steffensen, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson, Peter L Langen, Sverrir Guðmundsson og Helgi Björnsson (2020). „Dynamic simulations of Vatnajökull ice cap from 1980 to 2300“. Í: *Journal of Glaciology* 66.255, bls. 97–112. DOI: 10.1017/jog.2019.90.

Schyberg, Harald, Xiaohua Yang, Morten A.Ø. Køltzow, Bjørn Amstrup, Åsmund Bakketun, Eric Bazile, Jana Bojarova, Jason E. Box, Per Dahlgren, Sverre Hagelin, Maria Homleid, András Horányi, Jacob Høyer, Åke Johansson, Mari Anne Killie, Heiner Körnich, Patrick Le Moigne, Magnus Lindskog, Terhikki Manninen, Poul Nielsen Englyst, Klaus P. Nielsen, Erik Olsson, Bjorn Palmason, Carlos Peralta Aros, Roger Randriamampianina, Patrick Samuelsson, Robert

Stappers, Eyvind Støylen, Steinþór Thorsteinsson, Teresa Valkonen og Zhen-Qing Wang (2020). „Arctic regional reanalysis on height levels from 1991 to present“. Í: *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.8679900d.

Seager, Richard, David S. Battisti, Jianjun Yin, Neil Gordon, Naomi Naik, Amy C. Clement og Mark A. Cane (2002). „Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters?“ Í: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography* 128.586, bls. 2563–2586. DOI: 10.1256/003590002320603584.

Sicre, Marie-Alexandrine, Bassem Jalali, Jón Eiríksson, Karen-Luise Knudsen, Vincent Klein og Violaine Pellichero (2021). „Trends and centennial-scale variability of surface water temperatures in the North Atlantic during the Holocene“. Í: *Quaternary Science Reviews* 265, bls. 107033. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107033.

Smeed, David, Gerard McCarthy, Darren Rayner, Ben I Moat, William E Johns, Molly O Baringer og Christopher S Meinen (2016). „Atlantic meridional overturning circulation observed by the RAPID-MOCHA-WBTS (RAPID-Meridional Overturning Circulation and Heatflux Array-Western Boundary Time Series) array at 26N from 2004 to 2015“. Í.

Spada, G. og D. Melini (2019). „SELEN^4 (SELEN version 4.0): a Fortran program for solving the gravitationally and topographically self-consistent sea-level equation in glacial isostatic adjustment modeling“. Í: *Geoscientific Model Development* 12.12, bls. 5055–5075. DOI: 10.5194/gmd-12-5055-2019. URL: https://gmd.copernicus.org/articles/12/5055/2019/.

Steingrímur Jónsson (2023). „The role of the ocean circulation in melting the glaciers in Iceland“. Í: *EGU General Assembly 2023*. EGU23-12667. Vienna, Austria. URL: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-12667.

Weertman, Johannes (1974). „Stability of the junction of an ice sheet and an ice shelf“. Í: *Journal of Glaciology* 13.67, bls. 3–11.

Wouters, Bert, Alex S Gardner og Geir Moholdt (2019). „Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002–2016)“. Þýð. P7593. Í: *Frontiers in Earth Science* 7, bls. 96. DOI: 10.3389/feart.2019.00096.

Wuite, Jan, Ludivine Libert, Thomas Nagler og Tómas Jóhannesson (2022). „Continuous monitoring of ice dynamics in Iceland with Sentinel-1 satellite radar images“. Í: *Jökull* 72, bls. 1–20. DOI: https://doi.org/10.33799/jokull2021.72.001.

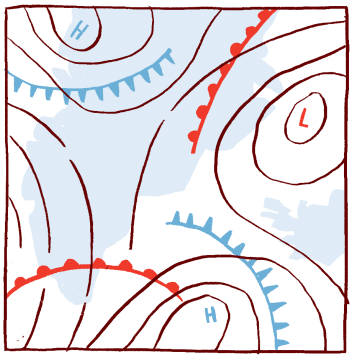
Þorsteinn Þorsteinsson, Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson og Bergur Einarsson (2017). *Afkomumælingar á Hofsjökli 1988–2017*. Tæknileg skýrsla. Veðurstofa Íslands, bls. 82. URL: https://vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2017/2017_016_hofsjokull30_rs.pdf.

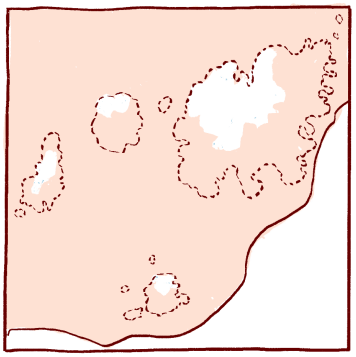
Þorvaldur Thoroddsen (1911). *Lýsing Íslands*. Kaupmannahöfn: Hið Íslenska Bókmenntafélag.

KAFLI

3

LÍKLEGAR LOFTSLAGSBREYTINGAR Á ÍSLANDI Á ÖLDINNI



Efnisyfirlit kafla

3.1 Losunarsviðsmyndir, reikniverkefni og líkön 76
Sérgrein 3A: CMIP6 og SSP sviðsmyndir 76
3.2 Líklegar hita- og úrkomubreytingar við Ísland 79
3.2.1 Niðurstöður loftslagslíkana fyrir tímabilið 1860 til 2015 79
3.2.2 Niðurstöður loftslagslíkana fyrir 21. öldina 80
3.2.3 Hámarksúrkoma 81
3.2.4 Breytingar á árstíðasveiflu 86
3.3 Loftslagsbreytingar og náttúrulegur breytileiki 88
3.3.1 Valda aukin gróðurhúsaáhrif hitabreytingum á Íslandi? 88
3.3.2 Náttúrulegur breytileiki og sviðsmyndir um loftslagsbreytingar 89
3.4 Samanburður á niðurstöðum þriggja síðustu skýrslna 92
3.5 Sviðsmyndir og óvissa 94
3.6 Langtímasamhengi líklegra hitabreytinga 95

Samantekt

1. Veðurfar á Íslandi verður gjörólíkt því sem verið hefur frá landnámi og hugsanlega án fordæma síðan ísöld lauk, gangi heitasta sviðsmynd eftir. Fyrir miðlungsheitar sviðsmyndir er hlýnunin einnig án fordæma frá landnámi, en þó mögulegt að sumur hafi verið heitari snemma á nútíma.

2. Loftslagslíkön ná að herma þá hlýnun sem varð á Íslandi og nærliggjandi svæðum á síðustu áratugum sé reiknað með sögulegri aukningu gróðurhúsalofttegunda. Í útreikningum þar sem styrk gróðurhúsalofttegunda er haldið föstum herma þau ekki þá hlýnun sem varð á síðustu áratugum.

3. Fyrir Ísland og nærliggjandi hafsvæði er líklegt að fram að miðbiki aldarinnar hlýni um 1.0–1.7 °C [-1.1–2.6] °C frá meðaltali áranna 1986 til 2015. Fram að miðbiki aldarinnar er ekki mikill munur á niðurstöðum loftslagslíkana fyrir ólíkar sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda.

4. Á síðari hluta aldarinnar dregur sundur með ólíkum sviðsmyndum og í heitustu sviðsmyndinni er hlýnun 3.5 °C [2.3–5.4] °C en 1.0 °C [-1.0–4.1] °C í þeirri köldustu.

5. Verði losun gróðurhúsalofttegunda þannig að markmið Parísarsamningsins náist getur heitasta sviðsmyndin ekki raungerst. Einnig veldur losun síðustu áratuga því að erfitt er að fylgja þeirri sviðsmynd þar sem geislunarálag er hvað minnst. Í sviðsmyndum sem liggja á milli þeirra heitustu og köldustu er hlýnunin í lok aldarinnar 2–2.8 °C [0–5.4] °C.

6. Úrkomubreytingar í sviðsmyndum eru ekki mjög eindregnar, en útlit er fyrir að úrkoma aukist um rúmlega 1% fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Þó að líkönum beri ekki vel saman um umfang úrkomubreytinga benda niðurstöður til þess að aukningin verði meiri á haustmánuðum en minnst síðla vetrar.

7. Aftakaúrkoma (100 ára sólarhringshámark) gæti aukist um 5-15%, sem er aukning um 4-15 mm á sólarhring frá núverandi úrkomu, fyrir flest svæði en meira fyrir þá staði þar sem úrkoma er mest.

8. Endurkomutími þess úrkomumagns sem nú telst 100 ára úrkoma styttist þegar aftakaúrkoma eykst. Í heitari sviðsmyndum gæti slík úrkoma orðið sex- til áttfalt algengari í lok aldarinnar.

9. Niðurstöðum loftslagslíkana, sem notuð eru í þessari skýrslu, ber vel saman við þær niðurstöður sem kynntar voru í skýrslu síðustu vísindanefndar um loftslagsbreytingar, en bæði hlýnun og úrkomuaukning eru þó aðeins minni.

10. Samantekt á niðurstöðum þessarar skýrslu og skýrslum vísindanefndar 2008 og 2018 sýnir að ákafi hlýnunar í sviðsmyndareikningum er álíka. Til loka aldarinnar er ákafi hlýnunar á bilinu 0.1–0.16 °C á áratug í köldustu sviðsmyndum, í miðlungssviðsmyndum er hann 0.21–0.24 °C á áratug og 0.27–0.41 °C/á áratug í hlýjustu sviðsmynd. Í köldustu sviðsmyndum dregur úr ákafa hlýnunar á síðari hluta aldarinnar, en í hinum er hann óbreyttur eða eykst.

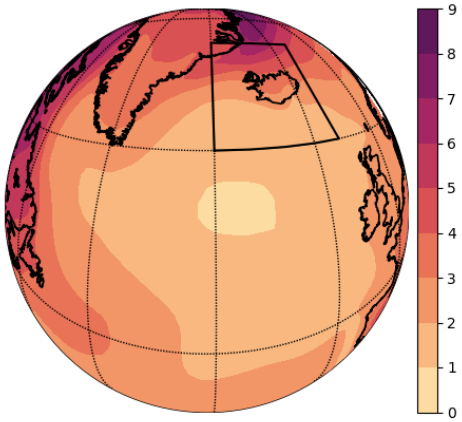
11. Niðurstöður líkanreikninga benda eindregið til þess að hlýnun verði meiri norðan við landið en sunnan við það.

12. Jafnvel þó að hlýni á öldinni í öllum sviðsmyndum og flestum líkönum, gætir tímabundinnar, staðbundinnar kólnunar í mörgum líkönum. Slík kólnun er algengari suður af landinu, en gætir skemur í heitari sviðsmyndum. Tímabundinnar kólnunar gætti lengur en 20 ár í 5–15%.

3.1 Losunarsviðsmyndir, reikniverkefni og líkön

Í skýrslum vísindanefndar árið 2008 og 2018 (V2008,V2018) voru kynntar niðurstöður loftslagslíkana um þróun veðurfars á reit sem þekur Ísland og nærliggjandi hafsvæði. Þessi reitur er í skýrslunum kallaður *Íslandsreiturinn* og afmarkast af 10–30°V og 60–70°N (sjá mynd 3.1). Þetta svæði samsvarar ágætlega því svæði sem kallað er *landið og miðin* í veðurfréttum, en var upphaflega valið með hliðsjón af upplausn reiknineta loftslagslíkana. Í fyrri skýrslum var byggt á gögnum frá CMIP3 og CMIP5 reikniverkefnunum, en innan þeirra voru nokkrir tugir líkana látin reikna sömu fjórar losunar-sviðsmyndirnar og auk þess *sögulega sviðsmynd*, þ.e. þróun loftslags við þær breytingar sem raunverulega urðu á *geislunarálagi*[1].

Í þessari skýrslu er byggt á niðurstöðum reikniverkefnisins CMIP6 (Eyring o.fl., 2016) þar sem var beitt tugum loftslagslíkana til að reikna endurbættar sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Nánar er fjallað um losunarsviðsmyndir í viðauka C og sérgrein 3A fjallar um reikniverkefni margra loftslagslíkana og sviðsmyndir. Næstu greinar fjalla svo um niðurstöður líkananna fyrir Íslandsreitinn.



Mynd 3.1: Hitabreytingar (°C) á Norður-Atlantshafi. Sýndur er mismunur meðalhita tveggja tímabila, 1986–2015 og 2081–2100, í sviðsmynd SSP3-7.0. Myndin sýnir einnig staðsetningu Íslandsreitsins (frá 10–30°V og 60–70°N).

3A CMIP6 og SSP sviðsmyndir

Við gerð matsskýrslna IPCC er stuðst við niðurstöður frá CMIP-reikniverkefnum[a] þar sem tugir loftslagslíkana nota sömu forsendur um losun. Skýrslur vísindanefndar byggjast að hluta á sömu gögnum.

Í skýrslu vísindanefndar 2018 (V2018) var notast við sviðsmyndir frá CMIP5-verkefninu en þær byggðust á fjórum RCP-sviðsmyndum[b] um losun gróðurhúsalofttegunda (Meinshausen o.fl., 2011). Aukning gróðurhúsalofttegunda breytir afdrifum varmageislunar í lofthjúpnum. Einn mælikvarði á það hversu mikið varmageislun til yfirborðsins breytist er geislunarálag sem er mælt í W/m^2. Hver RCP-sviðsmynd lýsti þróun geislunarálags og aukningin til loka 21. aldar var notuð til aðgreiningar, t.d. RCP-2.6 og RCP-8.5.

Í CMIP6-verkefninu (Eyring o.fl., 2016) var notast við víðtækari SSP-sviðsmyndir [c] sem taka tillit til samfélagslegrar og hagrænnar þróunnar (Vuuren o.fl., 2011; O'Neill o.fl., 2014; Riahi o.fl., 2017). Hver SSP sviðsmynd býður upp á ólíka möguleika um þróun

[1] Geislunarálag er sú breyting sem verður á styrk gróðurhúsaáhrifa vegna losunar gróðurhúsalofttegunda eða annarra áhrifaþátta, s.s. styrks sólar eða agnamengunar. Það er mælt í W/m^2 og er hluti af nafni sviðsmynda, t.d. SSP2-4.5 sem hefur geislunarálagið 4.5 W/m^2 í lok 21. aldar.

geislunarálags, en í CMIP6-verkefninu var þróun geislunarálags í RCP-sviðsmyndunum höfð til hliðsjónar og sviðsmyndir með sambærilega losun gróðurhúsalofttegunda auðkenndar SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 og SSP5-8.5 (Meinshausen o.fl., 2020). Rétt eins og fyrir RCP-sviðsmyndirnar vísar talan á eftir bandstrikinu til aukningar geislunarálags í losunarsviðsmyndinni.
Auk þessara fjögurra losunarsviðsmynda var höfð til samanburðar söguleg sviðsmynd með metinni þróun geislunarálags frá 1850 til 2015, og til samanburðar við hana var einnig notuð sviðsmynd án aukinna gróðurhúsaáhrifa, þ.e. þar sem náttúrulegir áhrifaþættir geislunarálags eru þeir sömu og í sögulegu sviðsmyndinni, en losun gróðurhúsalofttegunda er óbreytt frá því fyrir iðnbyltingu.
Úrvinnsla hita- og úrkomusviðsmynda er sambærileg við fyrri skýrslur, viðmiðunartímabil er nú áratug lengra en í síðustu skýrslu, eða 1986-2015, og samanburðartímabil í lok aldarinnar er nú einn áratugur (2091-2100).

Niðurstöður CMIP6 og heit líkön

Niðurstöður CMIP6-líkana voru sóttar í gagnasafn loftslagslíkana (Cinquini o.fl., 2014; Balaji o.fl., 2018). Ein af niðurstöðum CMIP6 verkefnisins var að í sumum líkönum hlýnaði of mikið miðað við þróun geislunarálags. Í skýrslu IPCC (Lee o.fl., 2021) var brugðið á það ráð að nota samanburð á sögulegu sviðsmyndinni og raunverulegri hitaþróun ásamt upplýsingum um svörun líkana til þess að reikna vegið meðaltal, sem besta mat á líklegri hitaþróun[d]. Þrátt fyrir að þessi aðferðafræði dugi vel við mat á hnattrænum breytingum er hún óheppileg fyrir svæðisbundnar breytingar og Hausfather o.fl. (2022) hafa lagt til einfaldari aðferðafræði, sem skilar sambærilegum niðurstöðum hvað varðar hnattræna meðalhlýnun og dreifingu hennar. Hausfather og meðhöfundar leggja til að sleppa líkönum þar sem TCR fellur utan við bilið 1.4-2.2 °C sem talið er *líklegt* (66% líkindi) af IPCC (Forster o.fl., 2021). Það skiptir máli fyrir mat á hlýnun við Ísland hvort notast er við öll líkön eða einungis þau þar sem TCR fellur innan *líklegra* marka eins og sjá má á mynd 3.2. Hún sýnir hlýnun í Íslandsreitnum í SSP sviðsmyndunum fjórum í öllum CMIP6-líkönum og í þeim líkönum þar sem TCR féll innan *líklegra* marka. Í síðara tilvikinu er greinilegt að líkön, þar sem hlýnun fer yfir 6 °C í Íslandsreitnum, falla á TCR-prófinu.
Tafla 3.1 sýnir fjölda líkana sem reiknuð voru í CMIP6 í hverri sviðsmynd og fjölda þeirra líkana þar sem TCR var innan *líklegra* marka. Í þessari skýrslu er ráðleggingum Hausfather ofl. (2022) fylgt og einungis þau líkön sem standast TCR-prófið notuð við að meta hlýnun og breytingar á úrkomu. Ef ætlunin er að skoða eðlisfræðilega þætti sem ætla má að séu óháðir því hversu skarpa hlýnun líkön sýna er allt safnið notað. Í þeim tilvikum er slíkt tekið fram sérstaklega.
Til að meta breytingar á aftakaúrkomu eru notuð gögn frá Kópernikus-gagnaþjónustunni[e] en þar má finna skrár þar sem búið er að reikna hámarks-24 tíma og -120 tíma úrkomu hvers árs. Tafla 3.2 sýnir hversu mörg líkön voru notuð fyrir hámarksúrkomu.

[a] Reikniverkefnin eru kölluð *Climate Model Intercomparison Project*, sem er skammstafað CMIP.

[b] Á ensku voru þessar sviðsmyndir nefndar *Radiative Concentration Pathways*, skammstafað RCP.

[c] Sviðsmyndir CMIP6 eru fimm ólíkar brautir samfélags- og hagrænnar þróunar, á ensku nefndar *Shared Socioeconomic Pathways*, skammstafað SSP1 til SSP5 (sjá nánar í viðauka C)

[d] Með svörun líkana er átt við það hversu næm þau reynast fyrir breytingum á styrk gróðurhúsalofttegunda, en sérstakar reiknitilraunir eru gerðar til þess að meta bæði *jafnvægissvörun (Equlibrium Climate Sensitivity, ECS)* sem er hlýnun loftslagslíkans eftir að styrkur CO_2 er aukinn skyndilega og svo haldið föstum, og *svipula svörun (Transient Climate Response, TCR)* sem er hlýnun loftslagslíkans eftir að 1% árleg aukning í styrk CO_2 hefur tvöfaldað styrkinn frá 1850.

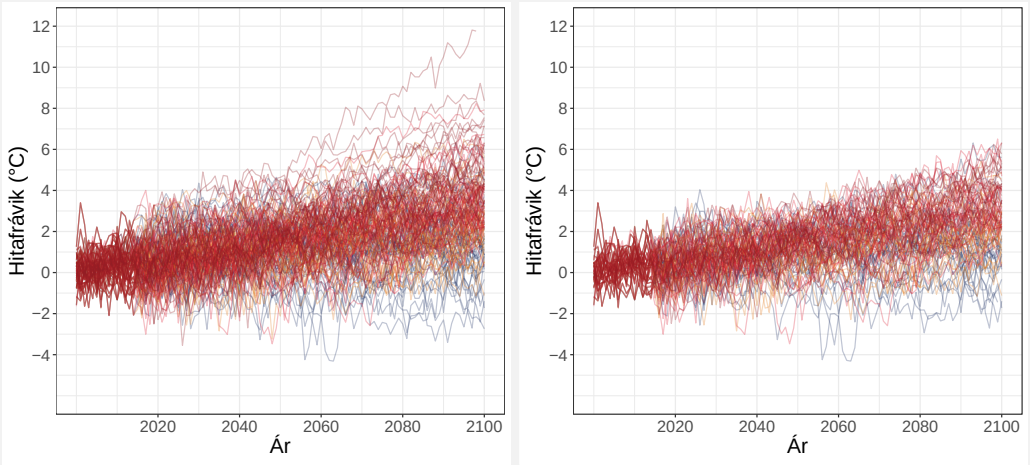
[e] Sjá CMIP6 climate projections á Copernicus Climate Data Store (Copernicus Climate Change Service, 2022).

Tafla 3.1: Sviðsmyndir notaðar í CMIP6-verkefninu, geislunarálag í hverri sviðsmynd, fjöldi líkana í CMIP6-safninu og fjöldi líkana með TCR á bilinu 1.4-2.2 °C, en þau voru notuð til að greina hita og úrkomubreytingar í grein 3.2. Í þeirri sviðsmynd þar sem engin losun á sér stað helst styrkur gróðurhúsalofttegunda (GHL) óbreyttur frá iðnbyltingu.

Sviðsmynd	**Geislunarálag** W/m^2	**Fjöldi líkana**	**Fjöldi líkana sem stóðust TCR-próf**
Söguleg	Raunþróun	58	34
SSP1-2.6	2.6	44	27
SSP2-4.5	4.5	42	26
SSP3-7.0	7.0	40	30
SSP5-8.5	8.5	45	26
Án losunar	GHL óbreytt	14	11

Tafla 3.2: Sviðsmyndir og fjöldi líkana sem notuð voru í til að kanna hámarksúrkomu.

Sviðsmynd	**Fjöldi líkana**	**Fjöldi sem stóðust TCR próf**
Söguleg	26	14
SSP1-2.6	25	14
SSP2-4.5	25	15
SSP3-7.0	20	14
SSP5-8.5	27	15

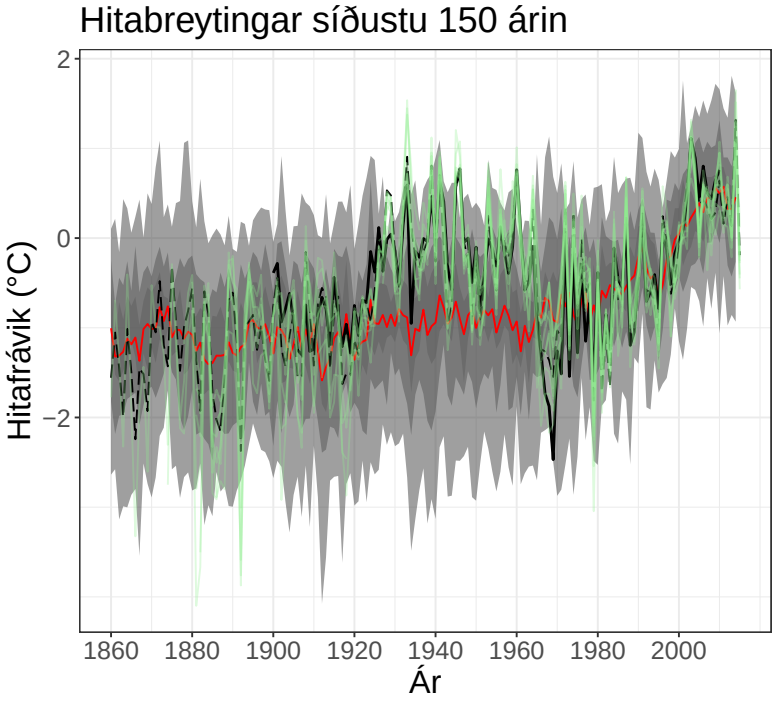


Mynd 3.2: Þróun meðalhita í Íslandsreitnum samkvæmt niðurstöðum CMIP6-líkana. Myndin til vinstri sýnir niðurstöður fyrir allar SSP sviðsmyndir og öll CMIP6-líkön, en myndin til hægri sýnir einungis niðurstöður fyrir þau líkön sem hafa TCR á bilinu 1.4-2.2 °C sem talið er líklegt (66% líkindi) af IPCC. Hitavik eru miðuð við tímabilið 1986 - 2015.

3.2 Líklegar hita- og úrkomubreytingar við Ísland

3.2.1 Niðurstöður loftslagslíkana fyrir tímabilið 1860 til 2015

Fyrst eru skoðaðar þær hitabreytingar sem loftslagslíkön reikna fyrir Íslandsreitinn í sögulegu sviðsmyndinni. Eins og í fyrri vísindaskýrslum er mikilvægt að árétta að í sögulegu sviðsmyndinni er þróun geislunarálagsins einu upplýsingarnar sem líkön fá um raunverulega þróun á 19. og 20. öld. Líkön fá engar upplýsingar um þróun loftslagsins á þessu tímabili, heldur er það reiknað sem langtímaþróun reiknaðs veðurs og breytinga á því. Ólíkt hefðbundinni veðurspá er það veður, sem reiknað er í loftslagslíkönum, því ekki spá fyrir neinn tiltekinn dag, heldur eining í safn sem gefur mynd af loftslagi. Sögulegu keyrslurnar skoða hvernig þetta loftslag hefur breyst vegna breytinga á geislunarálagi, en ekki er spáð fyrir um þróun innri breytileika í veðurfari. Hvernig sá breytileiki reiknast kann að fara eftir upphafsgildum líkana (t.d. ólíkir upphafsdagar til að byrja keyrslu) eða smáatriðum í hönnun þeirra sem setur takmörk um hversu vel líkönum getur borið saman.



Mynd 3.3: Hitabreytingar (°C) í Íslandsreitnum á tímabilinu 1860–2015. Hitavik eru reiknuð miðað við tímabilið 1986–2015. Skyggðir borðar sýna dreifingu á niðurstöðum loftslagslíkana og afmarkar ljósgrár litur 5–95% dreifingarinnar, grár litur 20–80% og dökkgrár 35–65%. Meðaltal líkana er sýnt sem rauð lína. Heildregin svört lína sýnir niðurstöður ERA20C-greiningarinnar en brotalína sýnir niðurstöður BEST-hitagreiningarinnar. Fíndregnar ljósgrænar línur sýna mælingar á 14 veðurstöðvum á Íslandi (sömu stöðvar og á mynd 2.2).

Þegar reikniniðurstöður í sögulegu sviðsmyndinni eru skoðaðar er ekki við því að búast að loftslagslíkön hermi í smáatriðum eftir þróun loftslags í Íslandsreitnum, því margir loftslagsatburðir (s.s. hafísárin, kaldur vetur 1880 o.s.frv.) stafa ekki af breytingum í geislunarálagi heldur eru dæmi um afleiðingar innri breytileika í náttúrunni og það er undir hælinn lagt hvort loftslagslíkön ná að herma slíkan breytileika. Eftir sem áður má gera þá kröfu að breytileiki þess loftslags sem líkönin reikna sé í takt við raunverulegan breytileika, og auk þess er eðlilegt að búast við því að þróun loftslags endurspegli breytingar á geislunarálagi, t.d. vegna stórgosa eða bruna jarðefnaeldsneytis. Ef niðurstöður margra líkana eru skoðaðar og bornar saman við raunverulega þróun loftslags er því mikilvægt að skoða hvort langtímabreytingar séu trúverðugar og að dreifing á niðurstöðum loftslagslíkana nái að spanna náttúrulegan breytileika.

Mynd 3.3 sýnir reikniniðurstöður 34 loftslagslíkana fyrir sögulegu sviðsmyndina, hitaþróun á 14 íslenskum veðurstöðvum og tvær greiningar raunþróun hita, ERA20C-endurgreiningunni og BEST-hitagreiningunni (Rohde og Hausfather, 2020). Gráskyggða svæðið á myndinni sýnir niðurstöður líkana og lýsir breidd þess breytileika líkana. Athuganir eru yfirleitt innan gráskyggða svæðisins sem sýnir að í heildina ná líkönin að spanna náttúrulegan breytileika. Augljóst er samt að rauða línan, sem sýnir meðaltal

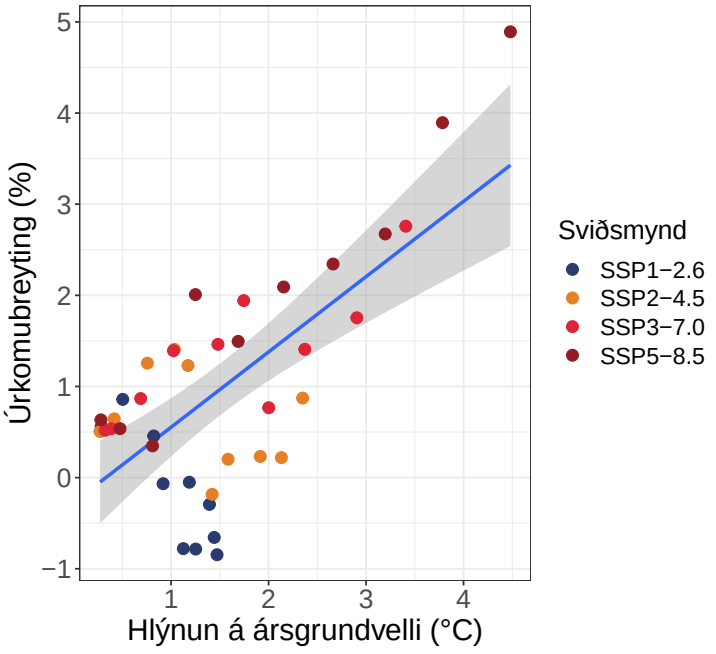
líkana, víkur víða frá raunverulegri þróun hitafars, en eins og rætt var í skýrslu vísindanefndar 2018 þá herma loftslagslíkön ekki hlýnun sem varð um miðbik síðustu aldar, enda sú hlýnun ekki drifin af breytingum í geislunarálagi.

Sama má segja um skemmri kuldaskeið, eins og t.d. hafísárin á 7. áratug síðustu aldar. Upp úr 1960 hlýnar í líkönum í Íslandreitnum en mælingar og endurgreining fara ekki að sýna hlýnun að ráði fyrr en upp úr 1980. Augljós spurning er að hversu miklu leyti hlýnun síðustu áratuga megi rekja til hnattrænna loftslagsbreytinga og hver sé hluti náttúrulegs breytileika. Þetta atriði er rætt frekar í grein 3.3, en rétt eins og fyrir CMIP5-líkönin í skýrslu vísindanefndar 2018, eru niðurstöðurnar hér þær að CMIP6-líkönin fara nærri því að spanna náttúrulegan breytileika hitafars í Íslandsreitnum en herma að meðaltali ekki eftir raunverulegri hitaþróun fyrr en á síðasta hluta 20. aldar.

3.2.2 Niðurstöður loftslagslíkana fyrir 21. öldina

Hita- og úrkomubreytingar á Íslandsreitnum voru reiknaðar sem vik frá meðaltali áranna 1985 til 2015. Fyrir úrkomu var hlutfallslegt frávik reiknað. Myndir 3.5 og 3.6 sýna niðurstöður fyrir ársmeðaltöl.

Eins og á fyrri mynd afmarkar ysti borðinn 5–95% dreifingarinnar, sá næsti 20-80% og innsti borðinn 35-65%. Rauða línan sýnir svo meðaltal líkana. Meðaltöl áratuga voru reiknuð fyrir miðja öldina og lok hennar og eru kassarit fyrir þær niðurstöður einnig sýnd á myndunum. Töflur 3.3 til 3.6 sýna sömu niðurstöður og kassaritin og sýnir hver tafla hlutfallsmörk (5%, 25%, 50%, 75% og 95%) dreifingarinnar við miðbik aldarinnar eða við aldarlok. Eins og í fyrri skýrslum sýnir hver dálkur þau mörk þar sem tiltekið hlutfall líkana er jafnkalt eða kaldara (töflur 3.3 og 3.4) eða jafnþurrt eða þurrara (töflur 3.5 og 3.6), t.d. er helmingur líkana jafnkaldur eða kaldari en gildið í 50% dálki 3.3 og 3.4).



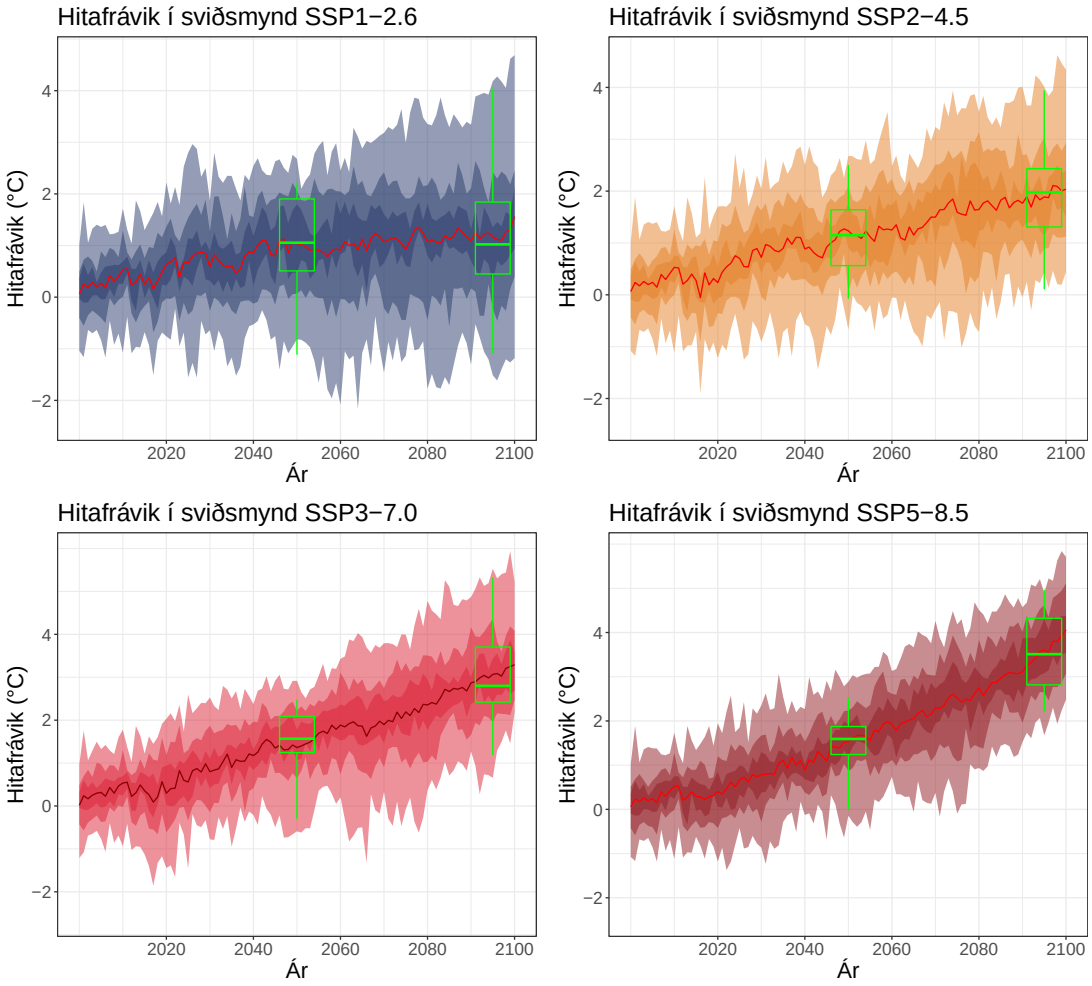
Mynd 3.4: Úrkomubreytingar á móti hitabreytingum í Íslandsreitnum. Sýnd eru 10 ára meðaltöl fyrir sviðsmyndirnar fjórar. Notast er við öll CMIP6-líkönin.

Hvað hitabreytingar varðar er hlýnun í ólíkum sviðsmyndum 1–1.7 °C við miðbik aldarinnar en 1–3.5 °C við lok hennar. Veruleg dreifing er þó á niðurstöðum, mest fyrir köldustu sviðsmyndina (rúmlega 5 °C spönn við lok aldarinnar), minni fyrir þá hlýjustu (rúmlega 2.5 °C). Fyrir miðbik aldarinnar er munur milli sviðsmynda yfirleitt ekki tölfræðilega marktækur en á síðari hluta aldarinnar dregur sundur milli ólíkra sviðsmynda og marktækur munur verður á milli þeirra.

Að meðaltali eykst úrkoma lítillega í flestum sviðsmyndum við lok aldarinnar en aukningin er þó ekki mikil og dreifing niðurstaðna slík að tölfræðilegur munur finnst ekki á milli sviðsmynda.

Eins og í fyrri skýrslum voru skoðuð áratugameðaltöl hita fyrir öll líkön í hverri sviðsmynd og þau borin saman við úrkomumeðaltöl sama tíma. Við þennan samanburð voru notuð öll CMIP6-líkönin óháð TCR-gildi, enda snýst samanburðurinn um eðlisfræðilegt samband sem gera má ráð fyrir að sé óháð því hvernig líkön svara breytingum í geislunarálagi. Mynd 3.4 sýnir að

úrkoma eykst með hlýnun og er aukningin rúmlega 1% fyrir hverja gráðu sem hlýnar eftir 2015. Þessi aukning er marktæk, en þó lægri en sambærilegur samanburður í CMIP5-líkönum (sem var um 1.5%) og enn lægri en niðurstöður CMIP3-líkana (2–3%).



Mynd 3.5: Hitabreytingar í Íslandsreitnum í SSP-sviðsmyndunum. Hitavik eru reiknuð miðað við tímabilið 1986–2015. Skyggðir borðar sýna dreifingu á niðurstöðum loftslagslíkana og eins og á mynd 3.3 afmarkar ljósasti liturinn 5–95% dreifingarinnar, næsti 20–80% og sá dekksti 35–65%. Meðaltal líkana er sýnt sem rauð lína. Kassarit eru sýnd fyrir meðaltöl áratuganna 2046-2055 og 2091-2100 og sýna sömu gögn og í töflum 3.3 og 3.4.

Í heildina eru niðurstöður CMIP6-líkana í Íslandsreitnum líkar niðurstöðum CMIP5-líkana sem lýst var í síðustu skýrslu vísindanefndar. Niðurstöður CMIP6 eru lítið eitt kaldari en CMIP5 niðurstöður og úrkoman er aðeins minni. Munurinn er þó ekki mikill og má teljast eðlilegur í ljósi þess að ferill geislunarálags í RCP- og SSP-sviðsmyndum er ekki alveg sá sami (sjá t.d. mynd SM1.1 í Abram o.fl. (2019)), auk þess sem nokkur þróun hefur verið í loftslagslíkönum síðasta áratug. Nánar er fjallað um samanburð CMIP3, CMIP5 og CMIP6 fyrir Íslandsreitinn í grein 3.4.

3.2.3 Hámarksúrkoma

Hámörk sólarhringsúrkomu hvers árs (RX1D) og árshámörk fimm-daga uppsafnaðrar úrkomu (RX5D) hafa verið reiknuð fyrir sum líkana í CMIP6-safninu og gerð aðgengileg hjá gagnagátt Kópernikusaráætlunarinnar (sjá töflu 3.2). Þessi gögn henta vel til að leggja mat á aftakaúrkomu en með þeim er auðvelt að meta magn 100 ára úrkomu og breytingar á henni. Nokkur munur er á

Tafla 3.3: Hitafarsbreytingar (°C) í Íslandsreitnum frá meðaltali áranna 1986-2015 til 2046-2055. Taflan sýnir hlutfallsmörk dreifingar á niðurstöðum loftslagslíkana. Sjá einnig kassarit á mynd 3.5.

Sviðsmynd	**5%**	**25%**	**50%**	**75%**	**95%**
SSP1-2.6	-1.09	0.59	1.06	1.95	2.24
SSP2-4.5	-0.13	0.61	1.11	1.70	2.55
SSP3-7.0	-0.30	1.20	1.59	2.10	2.49
SSP5-8.5	0.07	1.30	1.65	1.90	2.61

Tafla 3.4: Hitafarsbreytingar (°C) í Íslandsreitnum frá meðaltali áranna 1986-2015 til 2091-2100. Taflan sýnir hlutfallsmörk dreifingar á niðurstöðum loftslagslíkana. Sjá einnig kassarit á mynd 3.5.

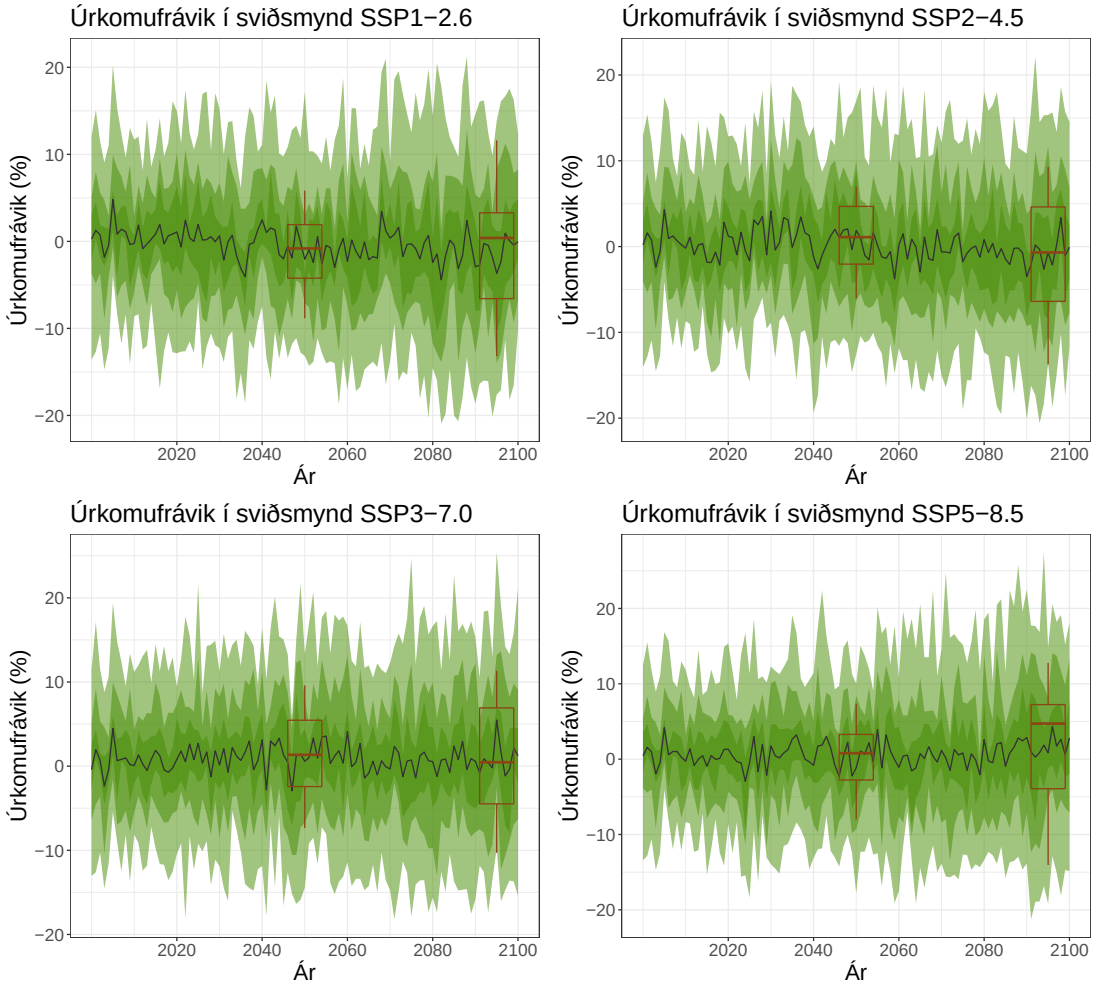
Sviðsmynd	**5%**	**25%**	**50%**	**75%**	**95%**
SSP1-2.6	-1.02	0.39	1.01	1.91	4.11
SSP2-4.5	0.12	1.31	1.97	2.47	4.00
SSP3-7.0	1.17	2.45	2.81	3.75	5.38
SSP5-8.5	2.29	2.85	3.53	4.42	5.04

Tafla 3.5: Úrkomubreytingar (%) í Íslandsreitnum frá meðaltali áranna 1986-2015 til 2046-2055. Taflan sýnir hlutfallsmörk dreifingar á niðurstöðum loftslagslíkana. Sjá einnig kassarit á mynd 3.6.

Sviðsmynd	**5%**	**25%**	**50%**	**75%**	**95%**
SSP1-2.6	-8.76	-3.96	-1.06	2.20	5.85
SSP2-4.5	-7.15	-2.41	0.31	4.93	6.80
SSP3-7.0	-6.88	-2.38	2.08	5.19	8.87
SSP5-8.5	-7.78	-2.93	1.50	3.14	7.65

Tafla 3.6: Úrkomubreytingar (%) í Íslandsreitnum frá meðaltali áranna 1986-2015 til 2091-2100. Taflan sýnir hlutfallsmörk dreifingar á niðurstöðum loftslagslíkana. Sjá einnig kassarit á mynd 3.6.

Sviðsmynd	**5%**	**25%**	**50%**	**75%**	**95%**
SSP1-2.6	-12.73	-5.62	1.32	3.44	11.25
SSP2-4.5	-14.23	-6.67	-0.06	5.93	10.11
SSP3-7.0	-10.63	-4.12	0.99	5.97	11.01
SSP5-8.5	-13.78	-4.11	4.10	7.66	13.62



Mynd 3.6: Úrkomubreytingar í Íslandsreitnum í SSP-sviðsmyndunum. Skyggðir grænir borðar sýna dreifingu á niðurstöðum loftslagslíkana og, eins og á mynd 3.5, afmarkar ljósasti liturinn 5–95% dreifingarinnar, næsti 20–80% og sá dekksti 35–65%. Meðaltal líkana er sýnt sem dökkgræn lína. Kassarit eru sýnd fyrir meðaltöl áratuganna 2046-2055 og 2091-2100 og sýna sömu gögn og í töflum 3.5 og 3.6

úrkomumagni í líkönum en þau má bera saman með því að reikna hver árshámörk eru að jafnaði í hverju líkani á viðmiðunartíma. Þá má skoða hlutfallsleg frávik frá jafnaðargildinu, bera saman breytingar frávika allra líkana fyrir allar sviðsmyndir og loks nota almenna aftakagreiningu til að meta hversu mikils fráviks er að vænta fyrir ólíka endurkomutíma.

Aftakagildin sem eru reiknuð eru það úrkomumagn sem hefur 100 ára endurkomutíma, reiknað frá árshámörkum sólarhringsúrkomu eða fimm daga uppsafnaðrar úrkomu. Hér verða þessi 100 ára úrkomugildi kölluð *aftakaúrkoma* þar sem við á. Töflur 3.7 og 3.8 sýna niðurstöður fyrir hlutfallslegar breytingar á aftakaúrkomu (RX1D og RX5D) á Íslandsreitnum fyrir allar sviðsmyndir. Jafnaðargildi hvers líkans var reiknað frá gögnum sögulegu sviðsmyndarinnar fyrir tímabilið 1985-2014 og töflurnar sýna hlutfallslegar breytingar á 100 ára gildi frávika.

Töflurnar sýna að í sögulegu keyrslunni er aftakaúrkoman rúmlega 1.5 [1.3 til 1.8] falt hærri en jafnaðargildið, en í sviðsmyndunum hækkar þetta hlutfall með hlýnun. Niðurstöður eru meira afgerandi fyrir sólarhringshámörk (RX1D) en þar er aftakagildið í sviðmynd SSP5-8.5 um 1.76-falt jafnaðargildi sem er tæp 15% hækkun frá sögulegu keyrslunni. Fyrir sömu sviðsmynd og fimm daga uppsafnaða úrkomu (RX5D) er samsvarandi hækkun um 12%. Hlutföllin eru hærri því heitari sem sviðsmyndin er, en SSP5-8.5 reyndist sú eina sem var afgerandi tölfræðilega frábrugðin sögulegu keyrslunni. Eins og tafla 3.2 sýnir voru einungis 14 til 15 líkön bak við þessar

niðurstöður. Ef einnig voru notuð þau líkön sem féllu á TCR-prófinu (sjá grein 3.1) breyttist miðgildið í töflum 3.7 og 3.8 lítið, en dreifingar breyttust nægilega til þess að SSP3-7.0 varð einnig marktækt frábrugðin sviðsmyndakeyrslunni og SSP2-4.5 færðist nær því að ná alltaf sk. 95% marktækni. Í þessari sviðsmynd er 100 ára gildi úrkomu um 1.6-falt jafnaðargildi sem er rúm 5% hækkun frá sögulegu keyrslunni. Aukning aftakaúrkomu á bilinu 5% til 15% er meiri en í rannsókn Massad o.fl. (2022) sem fengu 4 til 5% aukningu í CMIP5-sviðsmyndum. Nokkur aðferðafræðilegur munur var á þessum rannsóknum og getur hann útskýrt muninn.

Tafla 3.7: Hlutfallslegar breytingar á 100 ára gildi hámarksúrkomu eins dags (RX1D) á ársgrundvelli. Hlutföllin eru miðuð við dæmigerða hámarksúrkomu hvers árs á viðmiðunartímabilinu.

Sviðsmynd	**5%**	**25%**	**50%**	**75%**	**95%**
Söguleg	1.33	1.44	1.54	1.61	1.82
SSP1-2.6	1.45	1.52	1.58	1.68	1.71
SSP2-4.5	1.46	1.53	1.59	1.70	1.91
SSP3-7.0	1.43	1.49	1.60	1.77	2.04
SSP5-8.5	1.57	1.72	1.76	1.94	2.01

Tafla 3.8: Hlutfallslegar breytingar á 100 ára gildi árshámarks fimm daga uppsafnaðrar úrkomu (RX5D). Hlutföllin eru miðuð við dæmigerða fimm daga hámarksúrkomu hvers árs á viðmiðunartímabilinu.

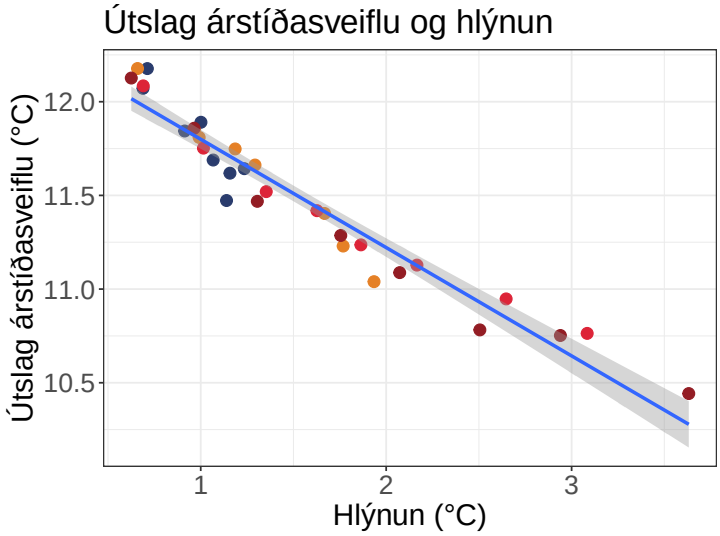
Sviðsmynd	**5%**	**25%**	**50%**	**75%**	**95%**
Söguleg	1.38	1.50	1.52	1.60	1.69
SSP1-2.6	1.49	1.55	1.64	1.67	1.92
SSP2-4.5	1.43	1.54	1.58	1.74	1.85
SSP3-7.0	1.43	1.53	1.59	1.69	1.96
SSP5-8.5	1.57	1.60	1.71	1.75	1.82

Tafla 3.9: Endurkomutími (í árum) þeirrar úrkomu sem hafði 100 ára endurkomutíma í sögulegu keyrslunni við lok aldarinnar í ólíkum sviðsmyndum.

Sviðsmynd	Endurkomutími	
	RX1D	RX5D
SSP1-2.6	43	87
SSP2.4.5	31	56
SSP3-7.0	17	25
SSP5-8.5	13	37

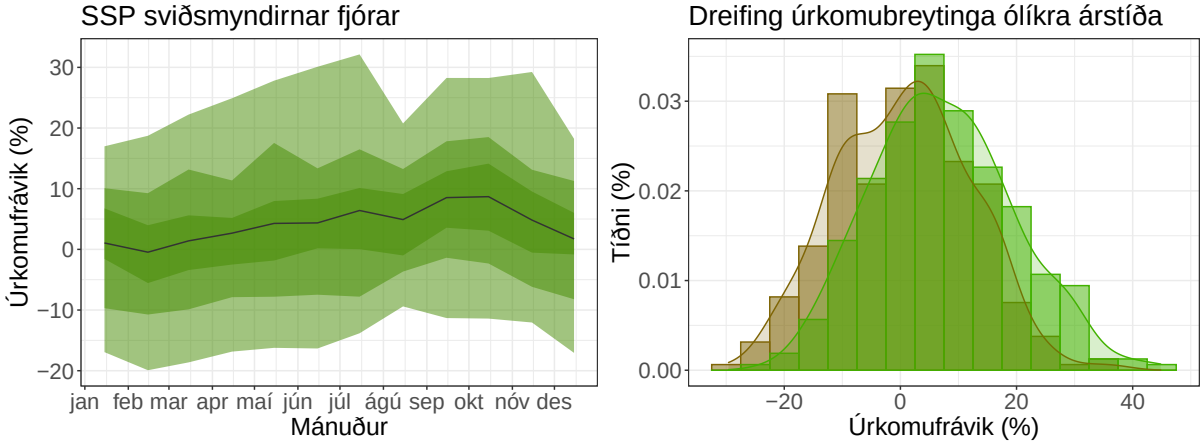
Eins og rakið var í grein 2.1.3 sýna niðurstöður Massad o.fl. (2020) að 100 ára hámörk sólarhringsúrkomu voru að jafnaði 1.75-falt hærri en miðgildi hámarksúrkomu hvers árs (metið með reikningi á 2 ára endurkomutíma) sem er nokkuð meira en gildið sem fæst í sögulegu keyrslunni í töflum 3.7 og 3.8. Líklegt er að þessi munur endurspegli þá staðreynd að möskvastærð reiknineta loftslagslíkana er um 50 til 100 km, en möskvastærð reikninets endurgreiningarinnar er um 2.5 km. Þekkt er að yfirleitt herma reiknilíkön úrkomu betur eftir því sem upplausn reikninets er meiri og því eðlilegt að 2.5 km reikninet skili betra mati á hámarksúrkomu en mun grófara reiknineti. Við mat á aukningu aftakaúrkomu er því eðlilegt að nota til viðmiðunar 100 ára úrkomuna hjá Massad o.fl. (2020) og nota 5%–15% aukningu frá sögulegu keyrslunni í niðurstöðum loftslagslíkana. Massad o.fl. (2020) sýndu að 100 ára gildi hámarksúrkomu er á

bilinu 70-100 mm fyrir flestar stöðvar á láglendi en getur verið hærri á sumum stöðvum og er almennt hærri austan- og suðaustanlands og til fjalla. Hækkun á 100 ára úrkomu um 5-15% nemur því allt að 4-15 mm á sólarhring fyrir flestar stöðvar, en er mun hærri tala fyrir þær stöðvar þar sem úrkoma er mest (sjá töflu 2.1).



Mynd 3.7: Breytingar í útslagi árstíðasveiflu á móti hlýnun í Íslandsreitnum. Punktarnir sýna meðaltöl hvers áratugs eftir 2020, litað eftir sviðsmynd (eins og á mynd 3.4). Einnig er sýnd besta lína og óvissumat hennar skyggt.

Einnig má bera saman breytingar á endurkomutíma hámarksúrkomu í niðurstöðum loftslagslíkana. Hér hefur verið fjallað um niðurstöður reikninga á 100 ára hámarksúrkomu. Slíkt úrkomumagn getur hent oftar eða sjaldnar en á 100 ára fresti, því samkvæmt skilgreiningu er 100 ára atburður sá atburður sem hefur 1% árslíkur á að gerast (sjá grein 12A í V2018). Sú aftakaúrkoma sem nú hefur 1% árslíkur verður algengari þegar úrkoma eykst, þ.e. árslíkur hennar aukast og endurkomutími styttist. Tafla 3.9 sýnir hvernig endurkomutími þess úrkomumagns sem var 100 ára úrkoma á viðmiðunartímabilinu verður í lok aldarinnar í hverri sviðsmynd. Taflan sýnir að endurkomutíminn styttist verulega, bæði fyrir hámark sólarhringsúrkomu (RX1D) og fimm daga uppsafnaða úrkomu (RX5D). Fyrir sviðsmyndir SSP3-7.0 og SSP5-8.5 styttist endurkomutíminn í 17 ár og 13 ár, en 25 og 37 ár fyrir fimm daga úrkomuna. Niðurstaðan er sú að úrkoman sem nú telst vera 100 ára úrkoma gæti orðið sexfalt til áttfalt algengari í lok aldarinnar, ef litið er til sólarhringsúrkomu, en þrefalt til fjórfalt algengari ef litið er til 5 daga uppsafnaðrar úrkomu.



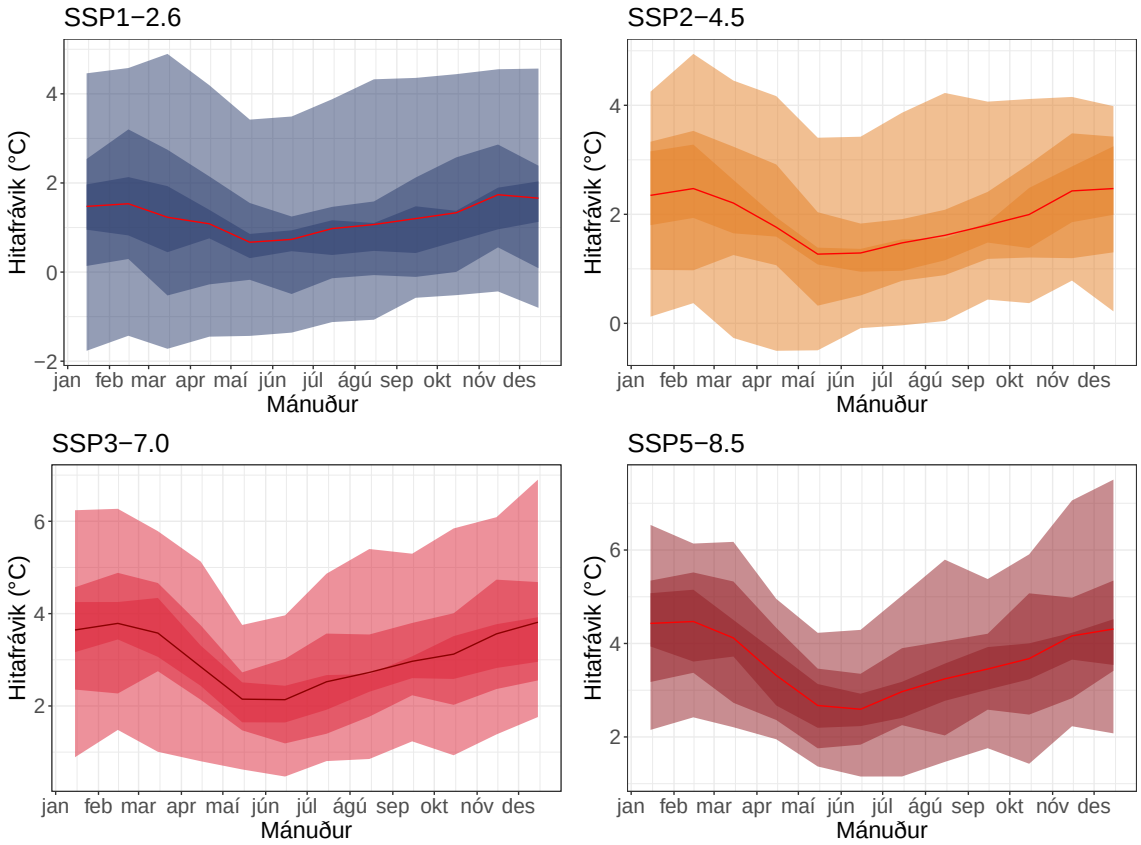
Mynd 3.8: Þróun árstíðasveiflu úrkomu í Íslandsreitnum í sameinuðum gögnum frá öllum SSP-sviðsmyndunum. Myndin til vinstri sýnir breytingar á árstíðasveiflu úrkomu (%) frá tímabilinu 1986-2015 til 2091-2100. Myndin til hægri sýnir dreifingu frávika vetrarmánaða (janúar til mars, brúnleitt) og haustmánuða (september til nóvember, grænt). Marktækur munur er á breytingu þessara mánaða.

3.2.4 Breytingar á árstíðasveiflu

Lengi hefur verið ljóst að hlýnun vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa er ekki jafndreift yfir árið. Á norðlægum breiddargráðum hlýnar meira að vetri en sumri (Christensen o.fl. (2007), V2008, V2018).

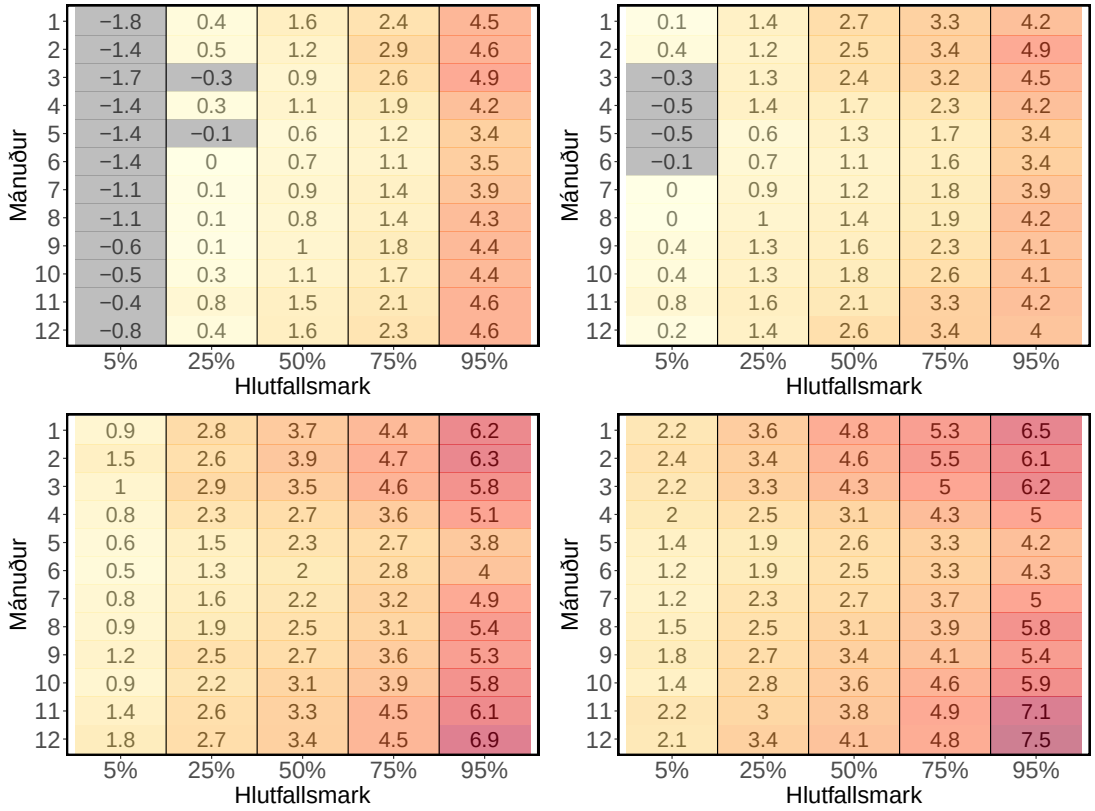
Mynd 3.9 sýnir hitabreytingar frá viðmiðunartímabilinu 1986-2015 til 2091-2100 fyrir hvern mánuð í SSP-sviðsmyndum. Mest hlýnar að vetri til, en minnst að sumri. Í sviðsmynd SSP1-2.6 hlýnar þannig um rúmlega 1.5 °C að vetri en 0.8 °C að sumri og í sviðsmynd SSP5-8.5 hlýnar um 4.5 °C að vetri en 2.5 °C að sumri. Mynd 3.7 sýnir samband hlýnunar og útslags árstíðasveiflu fyrir áratugameðaltöl allra sviðsmynda. Hallatala línunnar á myndinni gefur til kynna að ef hlýnar um 1 °C á ársgrundvelli þá dragi úr árstíðasveiflu hita um 0.6 °C. Dæmi um slíkt væri að það hlýnaði um 2.3 °C á vorin, haustin og á árs grundvelli, en hlýnunin er 3 °C að vetri og 1.6 °C að sumri.

Þá minnkar árstíðasveifla hita um 1.4 gráður sem er rúmlega 0.6-falt ársgildið. Þessar niðurstöður eru sambærilegar við fyrri skýrslur, bæði hvað útslagsbreytingu varðar (meiri hlýnun að vetri en sumri) og samband árshlýnunar og minnkunar árstíðasveiflu hita. Niðurstöður þessara mynda eru dregnar á mynd 3.10 sem sýnir töflur með dreifingum hitabreytinga hvers mánaðar fyrir allar sviðsmyndir.



Mynd 3.9: Þróun árstíðasveiflu hita í Íslandsreitnum í SSP-sviðsmyndunum. Sýndur er mismunur meðalhita hvers mánaðar fyrir tvö tímabil, 1986-2015 og 2081-2100.

Úrkomubreytingar eru ekki jafneindregnar og hitabreytingar, þó að mynd 3.4 sýni samband á milli hlýnunar og úrkomuaukningar. Eins og fram kom í grein 3.2.2 var lítill munur á hlutfallslegum úrkomubreytingum á ársgrundvelli og sú mynd breyttist ekki þegar úrkomubreytingar voru skoðaðar fyrir hvern mánuð. Mynd 3.8 sýnir breytingar á árstíðasveiflu úrkomu í Íslandsreitnum. Þar sem allar sviðsmyndir skila álíka niðurstöðu voru þær sameinaðar og dreifing teiknuð fyrir hvern mánuð. Þess var gætt að mismunur ársmeðaltala sviðsmynda og mismunandi lengd mánaða



Mynd 3.10: Töflur sem sýna hlutfallsmörk hitabreytinga í hverri sviðsmynd. Tölurnar sýna hitabreytingar frá 1986-2015 til 2091-2100 (°C).

hefði ekki áhrif á samanburðinn.

Myndin sýnir að árstíðasveifla úrkomu hefur tilhneigingu til að breytast á þann veg að úrkoma aukist mest á haustmánuðum en minnst á fyrstu mánuðum ársins. Þessi munur var marktækur í öllum sviðsmyndum og sambærilegur við niðurstöður V2018 og Jóhannesson o.fl. (2007). Fyrstu mánuði ársins er að meðaltali ákaflega lítil aukning í úrkomu, en á haustin er hún að meðaltali nær 10%. Þó að niðurstöður hvers mánaðar dreifist verulega umhverfis meðaltalið sýnir myndin einnig að eftir sem áður er greinilegur munur á dreifingum vetrarmánaða (janúar til mars) og haustmánaða (september til nóvember).

Draga má breytingar í árstíðasveiflu úrkomu og hita saman á þann hátt að hlýnun verði meiri að vetri en sumri, og úrkoma aukist líklega mest á haustin.

3.3 Loftslagsbreytingar og náttúrulegur breytileiki

3.3.1 Valda aukin gróðurhúsaáhrif hitabreytingum á Íslandi?

Í grein 2.1.2 sýna myndir 2.2 og 2.4 þróun hita á síðustu öld. Myndirnar sýna að síðustu áratugi hefur verið tiltölulega heitt á landinu, en fyrir miðbik síðustu aldar var einnig hlýindaskeið þar sem hlýjustu árin voru sambærileg við hlý ár eftir aldamótin 2000. Ef áratugameðaltölin á mynd 2.4 eru skoðuð sést hinsvegar að meðalhiti síðustu áratuga er mun hærri en meðalhiti áratuga á hlýskeiði síðustu aldar. Eins og fram kemur í grein 2.1.2 liggur munurinn í að á hlýindaskeiði síðustu aldar komu einnig köld ár, ólíkt því sem verið hefur síðustu áratugi.

Mynd 3.3 sýnir að í loftslagslíkönum fer að gæta hlýnunar upp úr 1960 og verður hlýnunin áberandi eftir 1980. Sambærileg niðurstaða fyrir hnattræna samantekt var rædd í kafla 1, en sú hlýnun hefur verið rakin til breytinga í geislunarálagi (sjá V2008, mynd 1.6 og Hegerl o.fl. (2007)). Rökin fyrir því að hnattrænu hlýnunina megi rekja til aukinna gróðurhúsaáhrifa byggjast m.a. á samanburði líkanreikninga þar sem sögulega sviðsmyndin er borin saman við sviðsmynd þar sem losun gróðurhúsalofttegunda af mannavöldum átti sér ekki stað en náttúrlegar breytingar á geislunarálagi voru að öðru leyti eins. Slíkur samanburður hefur verið gerður fyrir hnattrænar breytingar og meginlönd (sjá t.d. mynd SPM.4 í Solomon o.fl. (2007)), en fyrir smærri svæði hefur reynst erfiðara að sjá marktækan mun.

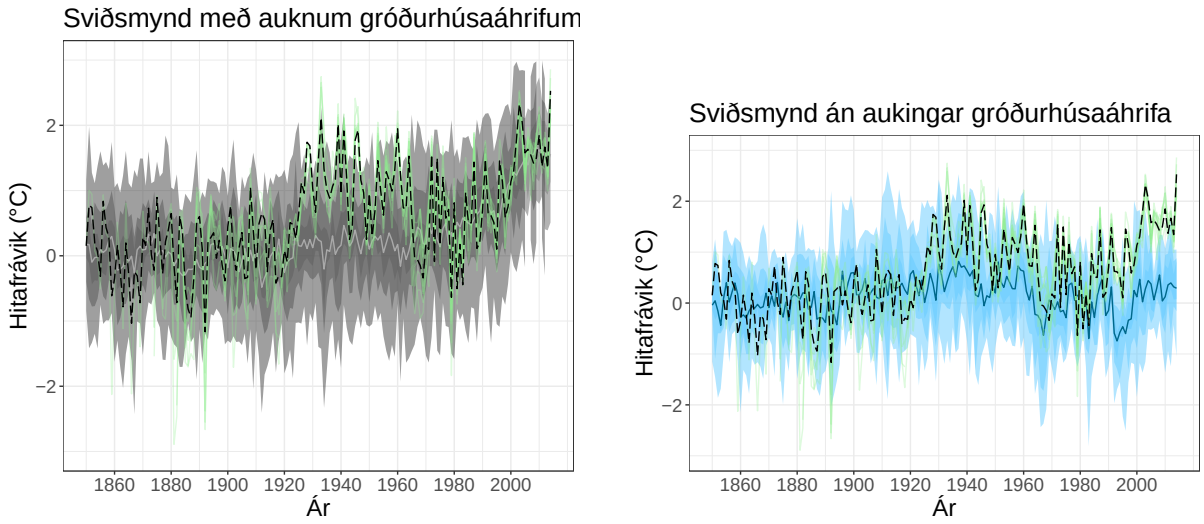
Mynd 3.11 sýnir slíkan samanburð fyrir Íslandsreitinn á tímabilinu 1850–2015. Hitavik eru reiknuð miðað við tímabilið 1850–1900, en þá gætti áhrifa losunar gróðurhúsalofttegunda lítið. Efri myndin byggist á mynd 3.3 og sýna gráskyggðir borðar dreifingu niðurstaðna ólíkra líkana fyrir sögulegu sviðsmyndina en á neðri myndinni sýna ljósbláir borðar niðurstöður sviðsmyndar þar sem aukningar gróðurhúsaáhrifa gætir ekki. Meðaltöl líkana eru sýnd sem fölgrá lína fyrir sögulegu sviðsmyndina og fölblá lína fyrir hina sviðsmyndina. Rétt eins og á mynd 3.3 sýnir svört brotalína niðurstöður BEST-hitagreiningarinnar og ljósgrænar línur mælingar á veðurstöðvum á Íslandi. Fyrir mæligögnin eru hitafrávikin einnig miðuð við tímabilið 1851–1900, en BEST-greiningin er 1.29 °C kaldari fyrir þetta tímabil en 1986–2015 og hefur mæligögnum verið hliðrað samsvarandi.

Eins og kom fram í 3.2.1 nær breytileiki í loftslagslíkönum að mestu leyti að spanna náttúrulegan breytileika í mælingum, þó að hlýskeið um miðbik síðustu aldar fari nærri efri mörkum dreifingar loftslagslíkana. Ef mynd 3.11 er skoðuð er ljóst að sama má segja um sviðsmyndina þar sem gróðurhúsaáhrif aukast ekki. Framan af nær hún að spanna raunverulega hitaþróun, en hlýnunin um miðbik síðustu aldar fer þó nærri jaðrinum. Öðru gildir um þá hlýnun sem átt hefur sér stað frá síðasta hluta 20. aldar. Sú hlýnun er utan við það umslag sem líkön spanna ef ekki er gert ráð fyrir aukningu gróðurhúsalofttegunda, en vel innan þess sem líkön sýna í sögulegu sviðsmyndinni.

Það umslag sem líkön spanna á myndum 3.3–3.6 lýsir mun á milli reikniniðurstaðna ólíkra líkana og breytileika milli ára og áratuga í niðurstöðum hvers líkans. Þessum breytileika líkana er ekki ætlað að herma nákvæmlega náttúrulegan breytileika, þó að niðurstöður sýni að líkönin ná að spanna hann. Þetta skiptir máli við túlkun á þeim niðurstöðum sem mynd 3.11 sýnir.

Nokkur vafi hefur verið á því hvort þær hitabreytingar sem átt hafa sér stað á Íslandi á síðustu áratugum séu dæmi um náttúrulegan breytileika eða afleiðingar aukinna gróðurhúsaáhrifa. Sú staðreynd að ekki er hægt að herma þessar breytingar nema í sviðsmynd þar sem gert er ráð fyrir auknum gróðurhúsaáhrifum bendir til að stór hluti þeirrar hlýnunar sem orðið hefur hér á landi á síðustu áratugum sé af mannavöldum.

Mótrök við þessari staðhæfingu eru þau að þó að hitafar á Íslandi sé nú með því hlýjasta frá því að samfelldar mælingar hófust, komu álíka hlý ár þegar best lét fyrir miðbik síðustu aldar, samanber umfjöllunina hér að ofan. Eftir sem áður er ljóst af meðaltölum áratuga (mynd 2.4) að eftir aldamót hefur verið hlýrra á Íslandi en verið hefur frá því að samfelldar mælingar hófust. Einnig má benda á að niðurstöðurnar á mynd 3.11 eru sambærilegar við niðurstöður frá mörgum öðrum svæðum og reyndar líka við hnattræna samantekt (sjá t.d mynd TS.7 í



Mynd 3.11: Hitabreytingar (°C) í Íslandsreitnum á tímabilinu 1850–2015. Efri myndin er einföldu útgáfa af mynd 3.3 og gráskyggða svæðið sýnir dreifingu líkana fyrir sögulegu sviðsmyndina, ljósgrá lína sýnir meðaltal líkana en svört brotalína og grænar línur sýna BEST greininguna og mælingar á veðurstöðvum. Á neðri myndinni eru sömu mæligögn en bláskyggða svæðið sýnir niðurstöður fyrir keyrslur þar sem geislunarálag þróast í samræmi við náttúrulegar breytingar en án aukningar í styrk gróðurhúsalofttegunda. Ljósblá lína sýnir þar meðaltal líkana. Hitafrávik eru miðuð við tímabilið 1851–1900, þ.e. áður en aukningar gróðurhúsalofttegunda fór að gæta að ráði.

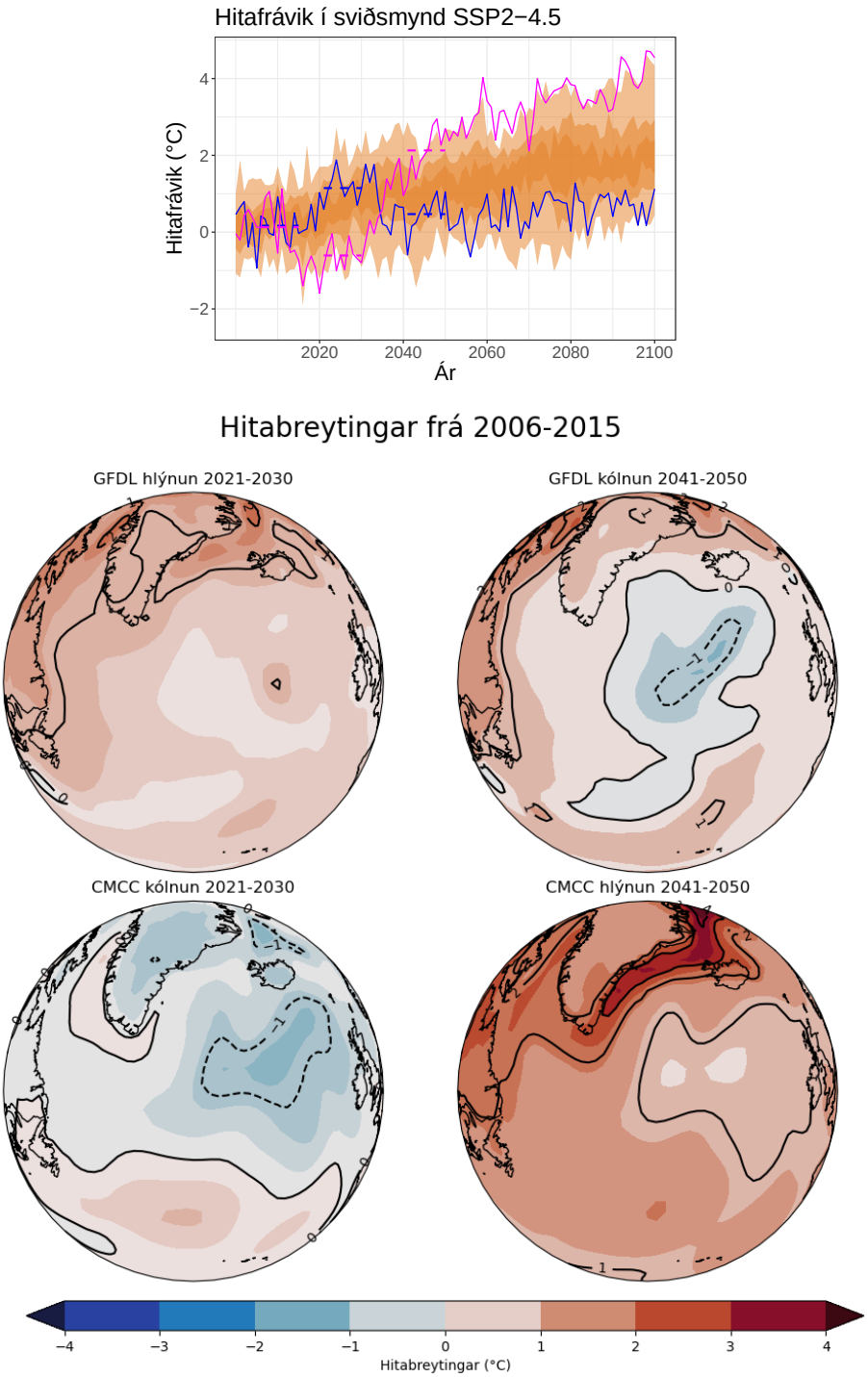
Arias o.fl., 2021). Sú staðreynd passar illa við hugmyndir um að hlýnunin á Íslandi sé dæmi um náttúrulegan breytileika eingöngu. Það liggur því beinast við að gera ráð fyrir áhrifum aukinna gróðurhúsalofttegunda til að útskýra hlýnun á Íslandi og niðurstöðurnar á mynd 3.11.

Tengt umræðunni um hvort hlýnun síðustu áratuga á Íslandi sé dæmi um náttúrulegan breytileika eða vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa er spurningin hvort núverandi hlýnun geti gengið til baka. Hvað þetta varðar skiptir máli hver sé breytileiki í niðurstöðum sviðsmyndareikninga og hvernig hlýni á Norður-Atlantshafi.

3.3.2 Náttúrulegur breytileiki og sviðsmyndir um loftslagsbreytingar

Í fyrri skýrslum vísindanefndar hefur verið fjallað um náttúrulegan breytileika og framreikninga um hitafar (sjá t.d. grein 3A í V2008). Einnig hefur verið fjallað nokkuð um breytingar í hafi (sjá t.d. grein 4C í V2018) en náttúrulegan breytileika sem nær yfir nokkur ár eða áratugi má oft rekja til breytinga á aðstæðum í hafi. Í niðurstöðum loftslagslíkana má oft sjá töluverðar sviptingar milli áratuga í einstökum líkönum. Línuritið á mynd 3.12 sýnir hitaþróun allra líkana fyrir SSP2-4.5 sviðsmyndina í Íslandsreitnum (einföldun á mynd 3.5), en einnig eru sýnd dæmi um hitaþróun tveggja líkana, GFDL-ESM4 og CMCC-ESM2 (blá og rauð lína). Láréttar brotalínur á línuritinu sýna þrjú tíu ára tímabil á fyrri hluta aldarinnar (2006–2015, 2021–2030 og 2041–2050) og kortin á neðri myndinni sýna hitabreytingar á Norður-Atlantshafssvæðinu milli þessara tímabila. Ef hitaþróun líkananna tveggja er skoðuð sést að á þriðja áratug þessarar aldar hlýnar í niðurstöðum GFDL-líkansins en það kólnar í CMCC-líkaninu. Þegar nær dregur miðbiki aldarinnar snýst þetta við. Niðurstöður GFDL-líkansins sýna snögga kólnun en skörp hlýnun verður í CMCC-líkaninu. Kort af hitabreytingunum sýna að á hlýskeiðum er í báðum líkönum sérstaklega hlýtt norðan við landið en á kuldaskeiðum er áberandi kalt á stóru svæði sunnan við landið.

Það er mikilvægt að hafa í huga að þrátt fyrir þessar sveiflur sýna bæði líkön hlýnun á öldinni, einnig þegar litið er til þess hluta Norður-Atlantshafsins sem kortin á mynd 3.12 sýna.

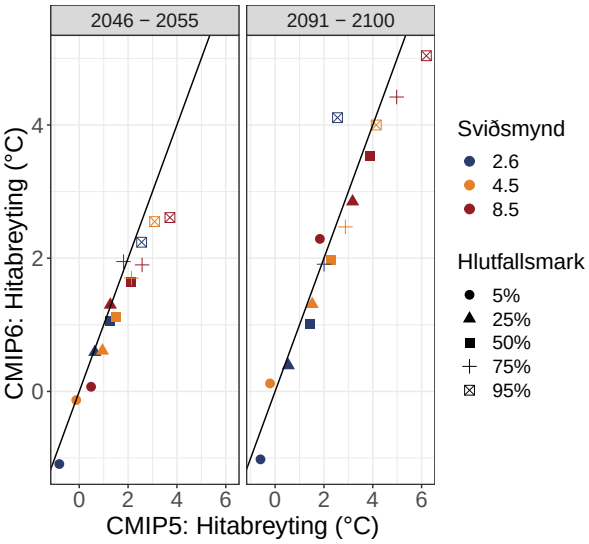


Mynd 3.12: Efri mynd: Dæmi um hlýinda- og kuldaskeið í tveimur líkönum á 21. öldinni í sviðsmynd SSP2-4.5 teiknuð ofan á dreifingu allra líkana (sjá SSP2-4.5 í 3.5). Hitaþróun GFDL-líkansins í Íslandsreitnum er merkt blálituð, en þróun í CMCC-líkaninu er merkt með rauðleitum ferli. Á myndinni eru þrjú 10 ára tímabil afmörkuð með brotalínum. Neðri mynd: Kort af hitabreytingum á Norður-Atlantshafssvæðinu, byggt á niðurstöðum líkananna tveggja fyrir 10 ára tímabilin sem merkt eru á efri myndina.

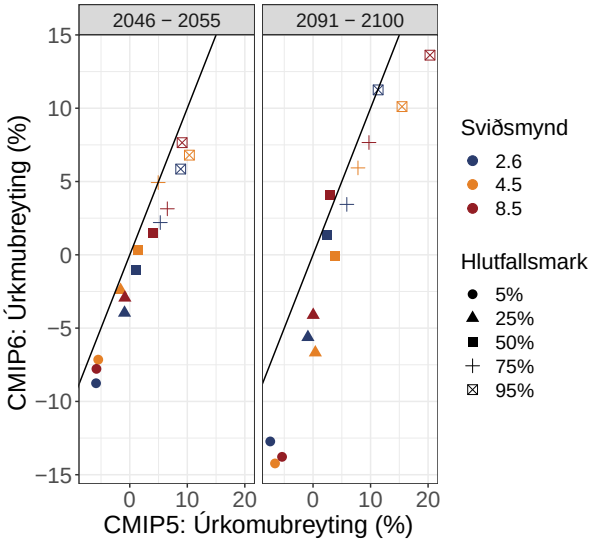
Í niðurstöðum flestra líkana má finna álíka dæmi um kólnun einhvers staðar á Norður-Atlantshafi á 21. öldinni.

Sem dæmi má nefna að ef hitabreytingar milli 2015–2024 og 2091–2100 í SSP-sviðsmyndakeyrslum allra líkana í töflu 3.1 eru skoðaðar, finnst staðbundin kólnun einhversstaðar á Norður-Atlantshafi í 88% líkanniðurstaðna í sviðsmynd SSP1-2.6, 76% SSP2-4.5, 48% í SSP3-7.0 og 35% í SSP5-8.5.

Þrátt fyrir þetta hlýnar í öllum líkönum og öllum sviðsmyndum á Norður-Atlantshafssvæðinu í heild sinni. Ástæðan er sú að í flestum tilvikum er kólnunin staðbundin og þótt kólni á einu svæði hlýna nærliggjandi svæði. Ef talningin er einskorðuð við þau tilvik þar sem víðtæk staðbundin kólnun nær Íslandsströndum þá gerist slíkt í 48% líkanniðurstaðna í sviðsmynd SSP1-2.6, 40% SSP2-4.5, 21% í SSP3-7.0 og 15% í SSP5-8.5. Eftir sem áður hefur þetta ekki stórvægileg áhrif til kólnunar í Íslandsreitnum, tafla 3.4 sýnir að einungis í köldustu sviðsmyndinni (SSP1-2.6) fæst kólnun í Íslandsreitnum, og þá í mjög fáum líkönum.



Mynd 3.13: Samanburður á hitabreytingum CMIP5 og CMIP6 fyrir sviðsmyndir með sama geislunarálag í lok aldarinnar (2.6, 4.5 og 8.5 W/m^2). Ólík tákn eru notuð fyrir hvert hlutfallsmark. Skálínan sýnir hvar reikniverkefnin gefa sömu niðurstöðu.



Mynd 3.14: Samanburður á úrkomu CMIP5 og CMIP6 fyrir sviðsmyndir með sama geislunarálag í lok aldarinnar (2.6, 4.5 og 8.5 W/m^2). Ólík tákn eru notuð fyrir hvert hlutfallsmark. Skálínan sýnir hvar reikniverkefnin gefa sömu niðurstöðu.

Í þeim niðurstöðum sem sýndar eru á mynd 3.5 er í öllum líkönum breytileiki milli ára og áratuga. Í sumum tilvikum, sérstaklega framan af 21. öldinni, sýna niðurstöður kólnun frá viðmiðunartímabilinu 1986–2015. Einföld talning leiddi í ljós að fyrir tímabilið 2016 til 2100 sýndu 22% allra líkana einhver ár með kólnun í sviðsmynd SSP1-2.6, 14% í SSP2-4.5, 11% í SSP3-7.0 og 9% í sviðsmynd SSP5-8.5. Í langflestum líkönum stóð slík kólnun ekki í mörg ár, í 70-75% tilvika varði hún minna en 5 ár en 10-15% kuldaskeiða entust í um áratug (5-15 ár) og álíka hlutfall kuldakasta entist lengur en 20 ár. Ekki var teljandi munur milli sviðsmynda á því hversu lengi kuldaköstin stóðu, þó að þau væru þeim mun færri eftir því sem sviðsmyndin var heitari.

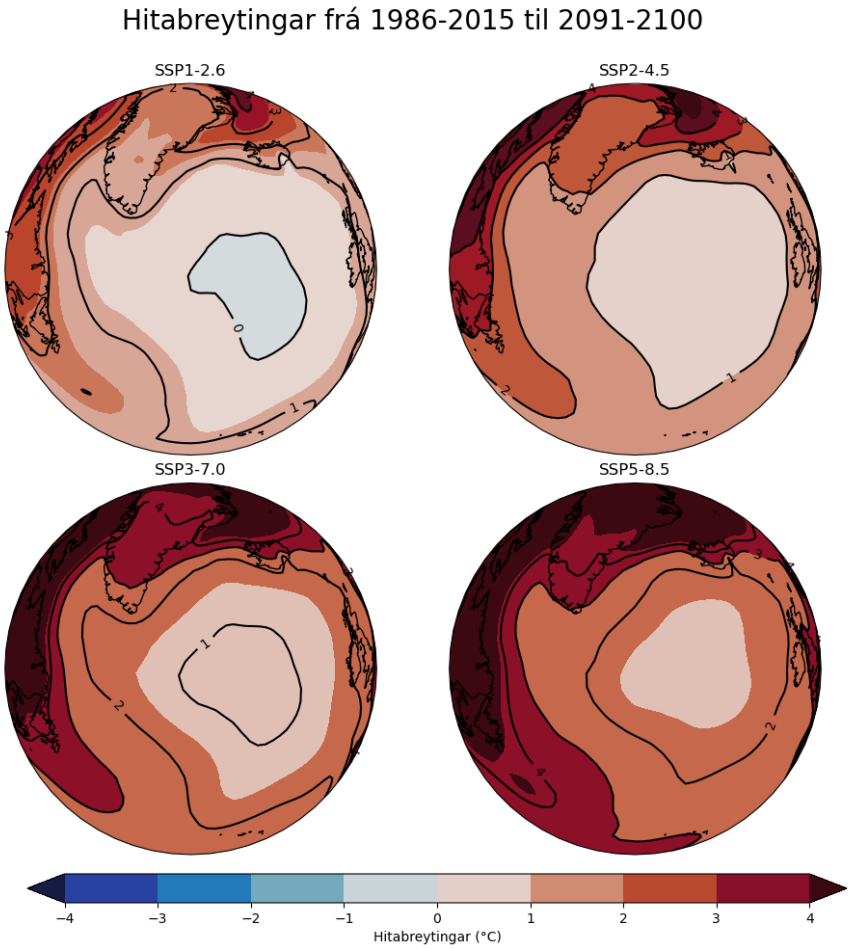
Kortlagning á þessum hitasveiflum leiddi í ljós að rétt eins og á mynd 3.12 er áberandi að svæðisbundin kuldaköst verða gjarnan í hafi sunnan við Ísland, en skörp hlýnun sést frekar norðan við landið. Hlýnunin norðan við landið er að hluta svokölluð *heimskautamögnun hlýnunar*, en gögn sýna að á norðurslóðum hlýnar mun hraðar en að hnattrænu meðaltali. Þessa gætir í meðaltölum sviðsmynda, en mynd 3.15 sýnir meðaltal hitabreytinga frá 1986–2015 og síðasta áratug 21. aldar.

Meðaltalið er reiknað fyrir öll líkön hverrar sviðsmyndar sem stóðust TCR-prófið, en ef öll

líkön væru notuð fást svipaðar myndir, sem þó víðast um gráðu hlýrri.

Meiri hlýnun norðan við landið en sunnan er í takt við það sem gerst hefur á síðustu áratugum svo að mynd 3.15 sýnir að vissu leyti framhald á þróun sem þegar hefur átt sér stað. Mikilvægt er að hafa í huga að svæðisbundnar breytingar sem þessar stafa iðulega af samspili ólíkra þátta, t.d. vindafari, varmaflutningi í hafi og hafísþekju en verða sjaldnast raktar beint til staðbundinnar aukningar geislunarálags.

Í stuttu máli má því segja að líklega verði hlýnunin fyrir norðan land meiri en fyrir sunnan það, en gera verði ráð fyrir nokkrum breytileika, jafnvel með kólnun sunnan við landið. Ekki er líklegt að slík kuldaskeið vari lengi og að meðaltali sýna líkön hlýnun á Norður-Atlantshafssvæðinu, og þar með Íslandi.



Mynd 3.15: Hitabreytingar (°C) í öllum líkönum hverrar sviðsmyndar frá 1986–2015 til 2091–2100

3.4 Samanburður á niðurstöðum þriggja síðustu skýrslna

Vísindanefnd hefur nú þrisvar tekið saman yfirlit um líklega hlýnun á 21. öldinni, árið 2008 fyrir reikniverkefnið CMIP3, árið 2018 fyrir CMIP5 og nú fyrir CMIP6. Þrátt fyrir að sviðsmyndir og viðmiðunartímabil séu ólík er tilefni til að bera þær saman.

Hvað CMIP5 og CMIP6 varðar sýna myndir 3.13 og 3.14 samanburð á töflum 4.1 og 4.4 í V2018 og töflum 3.3 til 3.6 í þessari skýrslu. Niðurstöður fyrir sviðsmyndir RCP-2.6, RCP-4.5 og RCP-8.5 í CMIP5 eru bornar saman við CMIP6-sviðsmyndir með sama geislunarálag, þ.e. SSP1-2.6, SSP2-4.5 og SSP5-8.5. Hlutfallsmörk dreifinganna eru borin saman og tillit tekið til mismunar í lengd tímabila sem hitabreytingar eru reiknaðar yfir (100 ár í CMIP5 og 95

Tafla 3.10: Hraði hlýnunar (°C á áratug) á Íslandsreitnum reiknaður til loka aldarinnar í ólíkum sviðsmyndum og reikniverkefnum. Tölur innan hornklofa sýna 5% og 95% hlufallsmörkin. Heiti sviðsmynda vísa til þeirra losunarsviðsmynda sem notaðar voru í CMIP3, CMIP5 og CMIP6. Byggt á töflum 3.1 í V2008, 4.2 í V2018, auk 3.4 hér að framan.

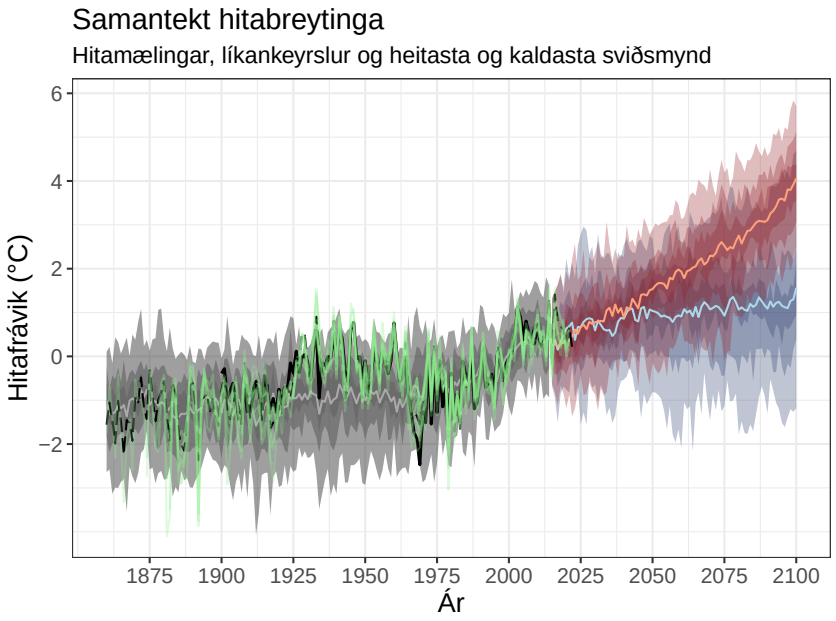
Skýrsla (CMIP)	**Kaldasta sviðsmynd**	**Miðlungs sviðsmynd**	**Heitasta sviðsmynd**
Vísindanefnd 2008 (CMIP3)	B2	A1B	A2
Hraði hlýnunar (°C/áratug)	0.16 [0, 0.33]	0.23 [0.08, 0.33]	0.27 [0.11, 0.41]
Vísindanefnd 2018 (CMIP5)	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Hraði hlýnunar (°C/áratug)	0.15 [-0.06, 0.27]	0.24 [-0.02, 0.44]	0.41 [0.19, 0.65]
Vísindanefnd 2023 (CMIP6)	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Hraði hlýnunar (°C/áratug)	0.11 [-0.11, 0.43]	0.21 [0.01, 0.42]	0.37 [0.24, 0.53]

ár í CMIP6). Hvert gildi í töflunum er teiknað sem einn punktur, litað eftir geislunarálagi sviðsmyndar (2.6, 4.5 eða 8.5 W/m^2) og lögun punkts fer eftir hlutfallsmarki. Skálína sýnir hvar CMIP5 og CMIP6 gefa sömu niðurstöðu, Munur milli niðurstaðna er meiri eftir því sem punktar liggja fjær skálínunni. Fyrir hitabreytingar er ekki mikill munur á CMIP5 og CMIP6 því punktar á myndinni liggja nærri skálínunni. Niðurstöður CMIP5 sýna þó aðeins meiri hlýnun fyrir fyrri hluta aldarinnar, sérstaklega þegar kemur að hærri hlutfallsmörkum, Þegar litið er til loka aldarinnar er þessi munur að mestu horfinn. Fyrir úrkomuna er greinilegt að í CMIP5 sýna niðurstöður meiri úrkomubreytingar en í CMIP6, bæði fyrir miðja öldina og lok hennar. Þetta er í samræmi við grein 3.2.2 þar sem niðurstöður CMIP6 sýna lægri hita en CMIP5 og eilítið minni úrkomu.

Erfiðara er að bera CMIP3 saman við síðari reikniverkefni. Í fyrsta lagi voru sviðsmyndir ólíkar, t.d. var meiri losun í þeirri köldustu (B1) en köldustu sviðsmynd CMIP5 og CMIP6 (RCP2.6 og SSP1-2.6, sjá t.d. mynd 1.15 í Cubasch o.fl. (2013)). Á móti kemur að svörun CMIP3 líkana var ekki jafn mikil og í CMIP5 (sjá grein 4.4.4 í V2018) og CMIP6 en það þýðir að í CMIP3 þurfti meira geislunarálag til að fá sambærilega hlýnun og í síðari reikniverkefnum. Í töflu 3.10 er því brugðið á það ráð að bera saman niðurstöður fyrir köldustu, miðlungs og heitustu sviðsmyndir í hverri skýrslu og meðaltal hlýnunar á áratug fram til loka aldarinnar er reiknað. Tölur innan hornklofa sýna 5 og 95% hlutfallsmörk dreifingar á líkanniðurstöðum.

Af töflunni má sjá að köldustu sviðsmyndirnar sýna hlýnun um 0.1-0.16 °C á áratug til loka aldarinnar, miðlungssviðsmyndir um 0.21-0.24 °C á áratug og þær heitustu um 0.27 til 0.41 °C á áratug. Þessar niðurstöður breytast lítið milli CMIP3, CMIP5 og CMIP6, en það er tilhneiging til þess að óvissan aukist, þ.e. að 5%–95% spönn niðurstaðna sé meiri í CMIP5 og CMIP6. Samskonar skoðun fyrir miðbik aldarinnar leiddi í ljós minni mun milli sviðsmynda. Að meðaltali hlýnaði um 1 °C og 5%-95% spönn var að meðaltali á bilinu -0.6 til 2.4 °C. Hlýnun um 1 °C á fimm áratugum samsvarar um 0.2 °C hlýnun á áratug að jafnaði. Á síðari hluta aldarinnar skilur á milli sviðsmynda, í þeim kaldari verður frekari hlýnun takmörkuð en í miðlungs sviðsmyndum verður hlýnunin áfram rúmlega 0.2 °C á áratug til loka aldarinnar eða um 2.2 °C [0.4 til 4 °C] í heildina. Fyrir heitustu sviðsmyndir er hlýnunin svo um 0.35 °C á áratug til loka aldarinnar eða 3.5 °C [2.3 til 5.2 °C] í heildina.

3.5 Sviðsmyndir og óvissa



Mynd 3.16: Samantekt hitabreytinga í Íslandsreitnum. Sögulegar keyrslur, sviðsmynd SSP1-2.6 (kaldasta) og SSP5-8.5 (heitasta). Raunverulegar hitabreytingar (BEST og ERA20C) merktar með svörtu og veðurstöðvar á Íslandi með grænu. Hitafrávik eru reiknuð miðað við tímabilið 1986–2015.

Mynd 3.16 sýnir samantekt á niðurstöðum CMIP6-líkana fyrir Íslandsreitinn. Myndin, sem er hliðstæð við mynd 4.23 í V2018, sýnir hitabreytingar líkana í sögulegu keyrslunni og í sviðsmyndum SSP1-2.6 og SSP5-8.5. Eins og á mynd 3.3 sýnir svört lína niðurstöður ERA20C-greiningarinnar, brotalína sýnir niðurstöður BEST-hitagreiningarinnar og ljósgrænar línur sýna mælingar á veðurstöðvum á Íslandi (sömu stöðvar og á mynd 2.2). Myndir af þessu tagi eru algengar í umfjöllun um loftslagsmál, bæði í hnattrænu og svæðisbundnu samhengi. Þær sýna ágætlega spönn þeirrar óvissu sem stafar af ólíkri hegðan líkana innan sömu sviðsmyndar, og mismun sviðsmynda. Fyrri óvissutegundin sem stafar af breytileika líkana var rædd í grein 3.3 en þá seinni má kalla *sviðsmyndaróvissu* og snýr að því hversu mikið verður losað, en ekki því hvernig loftslagskerfið bregst við losun. Ef bilið milli meðaltala sviðsmyndanna er notað til að leggja mat á þessa óvissu er hún frá 1.5 °C yfir í 4 °C, þ.e. 2.5 °C spönn.

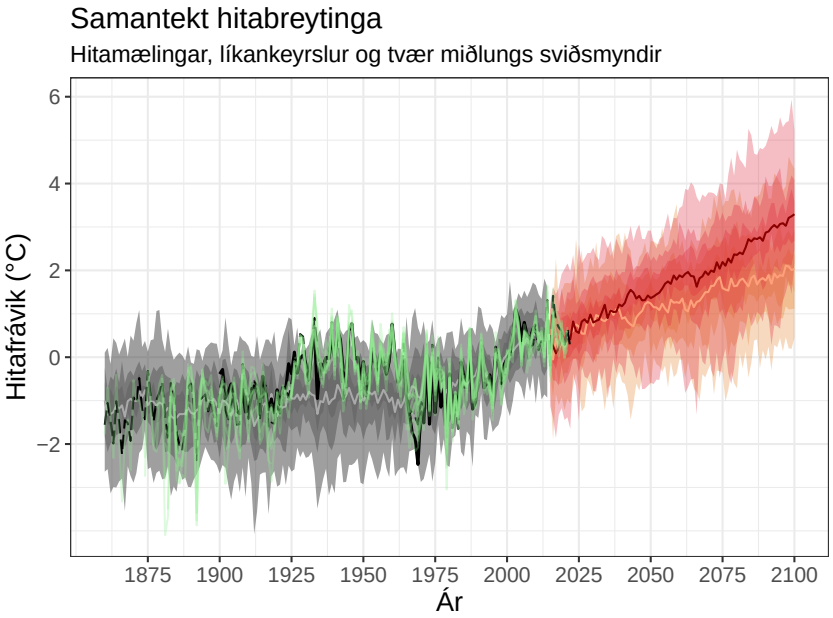
Ef horft er til næstu áratuga er munur milli sviðsmynda ekki mikill í samanburði við breytileika líkana, en á síðari hluta aldarinnar dregur sundur með sviðsmyndum. Þetta má einnig sjá í töflum 3.3 og 3.4 sem sýna að líkleg hitaþróun er mjög háð því hvaða losunarsviðsmynd raungerist.

Uppruna þeirra losunarsviðsmynda sem CMIP5 og CMIP6 byggjast á má rekja til ársins 2010 (Meinshausen o.fl., 2011). Síðan þá hefur alþjóðasamfélagið náð samkomulagi um aðgerðir til að draga úr loftslagsbreytingum og þjóðir lýst yfir vilja til að draga úr losun. Verði staðið við þær yfirlýsingar er ólíklegt að þróun geislunarálags á síðari hluta aldarinnar fylgi SSP5-8.5 (Hausfather og Peters, 2020). Eftir sem áður hefur losun á síðustu árum verið slík að erfitt verður að ná þeim takmörkum sem lægstu losunarsviðsmyndir setja (Programme, 2022). Það er umdeilt hvaða sviðsmynd er líklegust að raungerast (Schwalm o.fl., 2020) og er háð því til hversu langs tíma er litið (Huard o.fl., 2022). Engu að síður er mögulegt að sviðsmyndaróvissan á mynd 3.16 sé ofmetin, því báðar sviðsmyndirnar séu ólíklegri en þær sem fara bil beggja.

Mynd 3.17 er sambærileg við mynd 3.16 en sýnir sviðsmyndir SSP2-4.5 og SSP3-7.0, sem segja má að séu miðlungs-sviðsmyndir. Ef miðað er við meðaltöl sviðsmynda við lok aldarinnar fæst hlýnun á bilinu 2.0-3.5 °C og spönn sviðsmyndaróvissu því 1.5 °C. Ekki eru efni til að leggja nánara mat á það hvaða sviðsmynd sé líklegust til að rætast, en hlýnun á ofangreindu bili fyrir Íslandsreitinn er algeng niðurstaða miðlungs sviðsmynda (grein 3.4) og fellur einnig að niðurstöðum Gosseling (2017) fyrir háupplausnarlíkön.

Í grein 2.1.1 var sýnd mynd (2.1) með hitabreytingum á nútíma á og við Ísland. Myndin sýndi m.a. niðurstöður Sicre o.fl. (2021) um þróun yfirborðshita sjávar að sumarlagi metið með s.k. alkenone-vísi, byggt á sjávarkjarna MD99-2275 sem tekin var á Skjálfandadjúpi (á 66.55°N og 17.7°V). Til að bera þessar niðurstöður saman við mældan yfirborðshita sjávar að sumri voru notuð gögn fyrir þessa staðsetningu frá Hadley Center (Rayner o.fl., 2003) og niðurstöður CMIP6 loftslagslíkana (frá CDS, sjá grein 3.1) fyrir tvær sviðsmyndir (SSP1-2.6 og SSP5-8.5) auk sögulegrar keyrslu.

Mynd 3.18 sýnir samanburð þessara ólíku gagna. Öll gögn sem myndin sýnir eru reiknuð sem frávik miðað við tímabilið 1871 til 1970. Niðurstöður fyrir setkjarnan eru sýndar sem kassarit og sýnir kassi fyrir hverja öld dreifingu niðurstaðna Sicre o.fl. (2021) fyrir yfirborðshita sjávar að sumri. Brotalína gegnum kassana sýnir hlaupandi vegið meðaltal sjávarhitans reiknað með 100 ára gássískri síu sem hefur 48 ára hálfvídd. Slík sía dregur fram langtímasveiflur sem taka nokkra áratugi eða lengur. Sjávarhitagögn Hadley Center (Rayner o.fl., 2003) byggja á öllum aðgengilegum mælingum frá síðari hluta 19. aldar og eru gögnin netsett á 1 x 1 gráðu reiknineti. Yfirborðshiti sjávar í júlí í þessum gögnum fyrir tímabilið 1870 til 2022 var línulega brúaður niður á staðsetningu sjávarsetkjarnans og græna línan á mynd 3.18 sýnir niðurstöðurnar eftir að búið er að sía þær til að draga fram lengri sveiflur í gögnunum. Gráskyggða svæðið á myndinni sýnir niðurstöður CMIP6 líkana fyrir sjávarhita í júlí mánuði reiknaðan fyrir reit sem markast af 66–67°N og 17–18°V. Rauðlituðu niðurstöðurnar eru fyrir SSP5-8.5 og þær blálituðu fyrir SSP1-2.6. Fyrir sviðsmyndirnar er síað meðaltal líkana einnig sýnt sem heildregin lína.

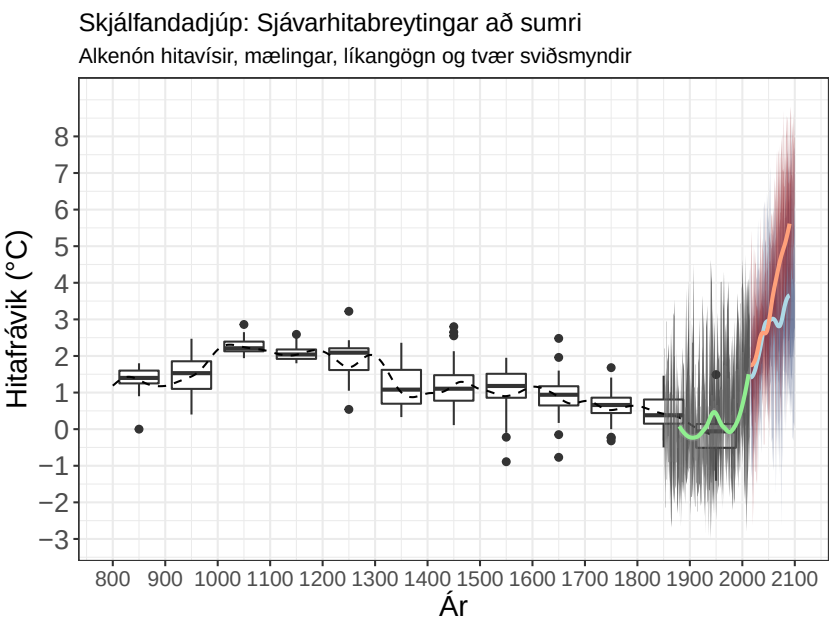


Mynd 3.17: Samantekt hitabreytinga í Íslandsreitnum. Sögulegar keyrslur, og hitagögn. Eins og mynd 3.16 en með miðlungssviðsmyndirnar tvær (SSP2-4.5 og SSP3-7.0) þar sem hlýnun er minni en í þeirri heitustu, en meiri en í þeirri köldustu.

3.6 Langtímasamhengi líklegra hitabreytinga

Ólíkir óvissuþættir fylgja þessum gögnum og þeir draga úr því hversu trúverðugan samanburð hægt er að gera á milli þeirra. Eins og fram kom í grein 2.1.1 er staðsetning sjávarsetkjarnans slík að hiti í honum sveiflast í takt við breytingar á innflæði hlýsjávar sem berst sunnan að norður fyrir landið og kaldsjávar sem berst úr ísafinu, og staðsetningin þýðir líka að hann er ekki mjög háður breytingum sunnan við Ísland sem ræddar eru í grein 3.3.2. Norðan við landið eru hitaskil í sjónum milli kaldsjávar og hlýsjávar. Staðsetning kjarnans er slík að sveiflur í sjávarhita vegna breytinga á staðsetningu skilanna ættu að koma vel fram (Sicre o.fl., 2021) en eins og mynd 2.1 sýnir eru þessar sveiflur ekki í smáatriðum lýsandi fyrir breytingar á Íslandi eða stærra svæði.

Tilgangurinn með þessari mynd er því ekki að gera nákvæman samanburð á þróun sjávarhita



Mynd 3.18: Samsett mynd af niðurstöðum byggðum á sjávarsetkjarna, mælingum á sjávarhita og loftslagslíkönum. Kassarit og svört lína sýna mat á breytingum á yfirborðshita sjávar að sumarlagi byggt gögnum úr sjávarsetkjarna, græn lína sýnir sjávarhitagögn frá Hadley Center. Niðurstöður loftslagslíkana eru sýndar sem línur og skyggð svæði, grálitað fyrir sögulegu sviðsmyndina, blátt og rautt fyrir losunarsviðsmyndnar. Sjá nánari umfjöllun í texta.

norðan við landið frá landnámi og líklegri þróun á komandi öld, heldur bera saman umfang sjávarhitabreytinga á öldum áður og líklegra breytinga á komandi öld. Eins og kemur fram í grein 3.5 hefur losun gróðurhúsalofttegunda á síðustu árum verið slík að erfitt verður að ná að fylgja þeirri losun sem kaldari sviðsmyndin á myndinni byggir á. Hlýnun sjávarhita gæti því vel orðið meiri en kaldari sviðsmyndin sýnir, en jafnvel þó þessi sviðsmynd gengi eftir yrði sjávarhitinn að sumri norður af landinu meiri en verið hefur frá landnámi.

Niðurstöður þessa samanburðar sýna því að líklega verður veðurfar á Íslandi gjörólíkt því sem verið hefur frá landnámi og hugsanlega án fordæma síðan ísöld lauk. Fyrir miðlungs heitar sviðsmyndir er hlýnunin einnig án fordæma frá landnámi, en þó mögulegt að sumur hafi verið heitari snemma á nútíma. Eins og rakið er í grein 2.1.1 og í V2018 er vitað að á norðlægum breiddargráðum voru sumur hlý snemma á nútíma, en sú hlýnun sem reiknast í sviðsmyndum er meiri að vetri til en að sumri.

Heimildir

Abram, Nerilie, Jean-Pierre Gattuso, Anjal Prakash, Lijing Cheng, Maria Paz Chidichimo, Susan Crate, Hiroyuki Enomoto, Matthias Garschagen, Nicolas Gruber, Sherilee Harper o.fl. (2019). „Framing and context of the report“. Í: Intergovernmental Panel on Climate Change Geneva, Switzerland, bls. 73–129.

Arias, P A, N Bellouin, E Coppola, R G Jones, G Krinner, J Marotzke, V Naik, M D Palmer, G.-K. Plattner, J Rogelj, M Rojas, J Sillmann, T Storelvmo, P W Thorne, B Trewin, K Achuta Rao, B Adhikary, R P Allan, K Armour, G Bala, R Barimalala, S Berger, J G Canadell, C Cassou, A Cherchi, W Collins, W D Collins, S L Connors, S Corti, F Cruz, F J Dentener, C Dereczynski, A Di Luca, A Diongue Niang, F J Doblas-Reyes, A Dosio, H Douville, F Engelbrecht, V Eyring, E Fischer, P Forster, B Fox-Kemper, J S Fuglestvedt, J C Fyfe, N P Gillett, L Goldfarb, I Gorodetskaya, J M Gutierrez, R Hamdi, E Hawkins, H T Hewitt, P Hope, A S Islam, C Jones, D S Kaufman, R E Kopp, Y Kosaka, J Kossin, S Krakovska, J.-Y. Lee, J Li, T Mauritsen, T K Maycock, M Meinshausen, S.-K. Min, P M S Monteiro, T Ngo-Duc, F Otto, I Pinto, A Pirani, K Raghavan, R Ranasinghe, A C Ruane, L Ruiz, J.-B. Sallée, B H Samset, S Sathyendranath, S I Seneviratne, A A Sörensson, S Szopa, I Takayabu, A.-M. Tréguier, B van den Hurk, R Vautard, K von Schuckmann, S Zaehle, X Zhang og K Zickfeld (2021). „Technical Summary“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, 33-144. DOI: 10.1017/9781009157896.002.

Balaji, Venkatramani, Karl E Taylor, Martin Juckes, Bryan N Lawrence, Paul J Durack, Michael Lautenschlager, Chris Blanton, Luca Cinquini, Sébastien Denvil, Mark Elkington, Francesca Guglielmo, Eric Guilyardi, David Hassell, Slava Kharin, Stefan Kindermann, Sergey Nikonov, Aparna Radhakrishnan, Martina Stockhause, Tobias Weigel og Dean Williams (sep. 2018). „Requirements for a global data infrastructure in support of CMIP6“. Í: *Geoscientific Model Development* 11 (9), bls. 3659–3680. DOI: 10.5194/gmd-11-3659-2018.

Christensen, Jens Hesselbjerg, Bruce Hewitson, Aristita Busuioc, Anthony Chen, Xuejie Gao, Isaac Held, Richard Jones, Rupa Kumar Kolli, Won-Tae Kwon, René Laprise o.fl. (2007). „Regional climate projections“. Í.

Cinquini, Luca, Daniel Crichton, Chris Mattmann, John Harney, Galen Shipman, Feiyi Wang, Rachana Ananthakrishnan, Neill Miller, Sebastian Denvil, Mark Morgan, Zed Pobre, Gavin M. Bell, Charles Doutriaux, Robert Drach, Dean Williams, Philip Kershaw, Stephen Pascoe, Estanislao Gonzalez, Sandro Fiore og Roland Schweitzer (júl. 2014). „The Earth System Grid Federation: An open infrastructure for access to distributed geospatial data“. Í: *Future Generation Computer Systems* 36, bls. 400–417. DOI: 10.1016/j.future.2013.07.002.

Copernicus Climate Change Service (2022). *Copernicus Climate Datastore*. Copernicus. URL: https://cds.climate.copernicus.eu (skoðað 2022).

Cubasch, U, D Wuebbles, D Chen, M C Facchini, D Frame, N Mahowald og J.-G. Winther (2013). „Introduction“. Í: gefið út af T F Stocker, D Qin, G.-K. Plattner, M Tignor, S K Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex og P M Midgley. Cambridge University Press, bls. 119–158. ISBN: ISBN 978-1-107-66182-0. DOI: 10.1017/CBO9781107415324.007.

Eyring, Veronika, Sandrine Bony, Gerald A Meehl, Catherine A Senior, Bjorn Stevens, Ronald J Stouffer og Karl E Taylor (2016). „Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization“. Í: *Geoscientific Model Development* 9 (5), bls. 1937–1958.

Forster, P, T Storelvmo, K Armour, W Collins, J.-L. Dufresne, D Frame, D J Lunt, T Mauritsen, M D Palmer, M Watanabe, M Wild og H Zhang (2021). „The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang,

K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 923–1054. DOI: 10.1017/9781009157896.009.

Gosseling, M (2017). *CORDEX climate trends for Iceland in the 21st century*. Icelandic Meteorological Office, bls. 46.

Hausfather, Zeke, Kate Marvel, Gavin A Schmidt, John W Nielsen-Gammon og Mark Zelinka (2022). „Climate simulations: Recognize the 'hot model'problem". Í: *Nature* 605, bls. 26–29.

Hausfather, Zeke og Glen P. Peters (nóv. 2020). „RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions". Í: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (45), bls. 27791–27792. DOI: 10.1073/pnas.2017124117.

Hegerl, Gabriele C, Francis W Zwiers, Pascale Braconnot, Nathan P Gillett, Yong Luo, Jose A Marengo Orsini, Neville Nicholls, Joyce E Penner, Peter A Stott, M Allen o.fl. (2007). *Understanding and attributing climate change*.

Huard, David, Jeremy Fyke, Iñigo Capellán-Pérez, H. Damon Matthews og Antti-Ilari Partanen (okt. 2022). „Estimating the Likelihood of GHG Concentration Scenarios From Probabilistic Integrated Assessment Model Simulations". Í: *Earth's Future* 10 (10). DOI: 10.1029/2022EF002715.

Jóhannesson, T, G Aðalgeirsdóttir, H Björnsson, P Crochet, E B Elíasson, S Gumundsson, J F Jónsdóttir, H Ólafsson, F Pálsson, Ó Rögnvaldsson, O Sigurðsson, Ó G Blöndal-Sveinsson og Th Thorsteinsson (2007). *Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. Reykjavík*. Tæknileg skýrsla.

Lee, J.-Y., J Marotzke, G Bala, L Cao, S Corti, J P Dunne, F Engelbrecht, E Fischer, J C Fyfe, C Jones, A Maycock, J Mutemi, O Ndiaye, S Panickal og T Zhou (2021). „Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information". Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.

Massad, Andréa-Giorgio, Guðrún Petersen, Tinna Þórarinsdóttir og Matthew James Roberts (okt. 2020). *Reassessment of precipitation return levels in Iceland*. Icelandic Meteorological Office, bls. 1–140.

Massad, Andréa-Giorgio, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson, Matthew James Roberts og Tinna Þórarinsdóttir (sep. 2022). *Extreme precipitation in Iceland: Climate projections and historical changes in precipitation type*. Icelandic Meteorological Office, bls. 1–100.

Meinshausen, Malte, Zebedee R. J. Nicholls, Jared Lewis, Matthew J. Gidden, Elisabeth Vogel, Mandy Freund, Urs Beyerle, Claudia Gessner, Alexander Nauels, Nico Bauer, Josep G. Canadell, John S. Daniel, Andrew John, Paul B. Krummel, Gunnar Luderer, Nicolai Meinshausen, Stephen A. Montzka, Peter J. Rayner, Stefan Reimann, Steven J. Smith, Marten van den Berg, Guus J. M. Velders, Martin K. Vollmer og Ray H. J. Wang (ágú. 2020). „The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500". Í: *Geoscientific Model Development* 13 (8), bls. 3571–3605. DOI: 10.5194/gmd-13-3571-2020.

Meinshausen, Malte, S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders og D.P. P. van Vuuren (nóv. 2011). „The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300". Í: *Climatic Change* 109 (1-2), bls. 213–241. DOI: 10.1007/s10584-011-0156-z.

O'Neill, Brian C., Elmar Kriegler, Keywan Riahi, Kristie L. Ebi, Stephane Hallegatte, Timothy R. Carter, Ritu Mathur og Detlef P. van Vuuren (feb. 2014). „A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways". Í: *Climatic Change* 122 (3), bls. 387–400. DOI: 10.1007/s10584-013-0905-2.

Programme, United Nations Environment (2022). *Emissions Gap Report 2022 The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies.* Bls. 132.

Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent og A. Kaplan (2003). „Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century“. Í: *Journal of Geophysical Research* 108.D14, bls. 4407. DOI: 10.1029/2002JD002670.

Riahi, Keywan, Detlef P. van Vuuren, Elmar Kriegler, Jae Edmonds, Brian C. O'Neill, Shinichiro Fujimori, Nico Bauer, Katherine Calvin, Rob Dellink, Oliver Fricko, Wolfgang Lutz, Alexander Popp, Jesus Crespo Cuaresma, Samir KC, Marian Leimbach, Leiwen Jiang, Tom Kram, Shilpa Rao, Johannes Emmerling, Kristie Ebi, Tomoko Hasegawa, Petr Havlik, Florian Humpenöder, Lara Aleluia Da Silva, Steve Smith, Elke Stehfest, Valentina Bosetti, Jiyong Eom, David Gernaat, Toshihiko Masui, Joeri Rogelj, Jessica Strefler, Laurent Drouet, Volker Krey, Gunnar Luderer, Mathijs Harmsen, Kiyoshi Takahashi, Lavinia Baumstark, Jonathan C. Doelman, Mikiko Kainuma, Zbigniew Klimont, Giacomo Marangoni, Hermann Lotze-Campen, Michael Obersteiner, Andrzej Tabeau og Massimo Tavoni (jan. 2017). „The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview“. Í: *Global Environmental Change* 42, bls. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

Rohde, Robert A og Zeke Hausfather (2020). „The Berkeley Earth land/ocean temperature record“. Í: *Earth System Science Data* 12 (4), bls. 3469–3479.

Schwalm, Christopher R., Spencer Glendon og Philip B. Duffy (nóv. 2020). „Reply to Hausfather and Peters: RCP8.5 is neither problematic nor misleading“. Í: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (45), bls. 27793–27794. DOI: 10.1073/pnas.2018008117.

Sicre, Marie-Alexandrine, Bassem Jalali, Jón Eiríksson, Karen-Luise Knudsen, Vincent Klein og Violaine Pellichero (2021). „Trends and centennial-scale variability of surface water temperatures in the North Atlantic during the Holocene“. Í: *Quaternary Science Reviews* 265, bls. 107033. DOI: https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107033.

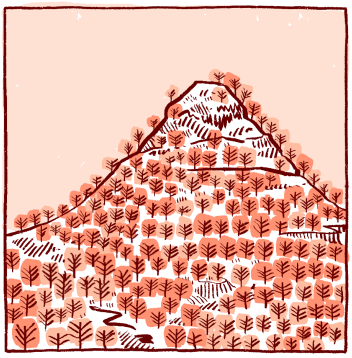
Solomon, Susan, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, K B Averyt, M Tignor og H L Miller (2007). „Summary for policymakers“. Í: *Climate change*, bls. 1–18.

Vuuren, D P van, J Edmonds, M Kainuma, K Riahi, A Thomson, K Hibbard, G C Hurtt, T Kram, V Krey, J F Lamarque, T Masui, M Meinshausen, N Nakicenovic, S J Smith og S K Rose (2011). „The representative concentration pathways: an overview“. Í: *Climatic Change* 109 (1-2), bls. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.

KAFLI

4

LÍFRÍKI LANDS OG LANDNÝTING


Efnisyfirlit kafla

4.1 Breytingar á lífríki . . . 105
4.1.1 Gróðurfar . . . 105
4.1.2 Dýralíf . . . 106
4.1.3 Framandi ágengar tegundir . . . 114
4.1.4 Stýrðar loftslagsrannsóknir á náttúrulegum landvistkerfum . . . 115
Sérgrein 4A: Náttúruleg vistkerfi og mótvægisaðgerðir . . . 117
4.2 Ræktun á landi . . . 118
4.2.1 Hefðbundinn landbúnaður . . . 118
Sérgrein 4B: Ræktunarskilyrði í dag og í framtíðinni . . . 121
4.2.2 Garðyrkja . . . 123
4.2.3 Viðbrögð landbúnaðar og garðyrkju við loftslagsbreytingum . . . 123
4.2.4 Skógrækt og landgræðsla . . . 124
4.3 Kolefnishringrás Íslands og mótvægisaðgerðir tengdar landi . . . 128
4.3.1 Kolefnishringrás Íslands . . . 128
4.3.2 Mótvægisaðgerðir tengdar landi . . . 130
4.3.3 Ný þekking á kolefnisforða ofanjarðar . . . 131
4.4 Áhrif loftslagsbreytinga í ferskvatni . . . 132
4.4.1 Vöktun og rannsóknir á lífríki ferskvatns . . . 132
4.4.2 Líffræðilegur fjölbreytileiki - Bleiklax í Norður-Atlantshafi . . . 135
4.4.3 Hlýnun Þingvallavatns - samspil bleikju og urriða . . . 137
4.4.4 Áframhaldandi þróun í stofnstærð laxfiska . . . 142
4.4.5 Nýrnasýking (PKD) – áhyggjuefni hlýnunar . . . 144

Samantekt

1. Ábendingar úr fyrri skýrslum vísindanefndar, um að áhrif loftslagsbreytinga á íslenska náttúru verði ekki umflúin, hafa komið fram. Áhrif loftslagsbreytinga á náttúrufar á Íslandi eru auðsæ og víðfeðm og niðurstöður benda til að þau aukist stöðugt.

2. Loftslagsbreytingar hafa haft talsverð áhrif á útbreiðslu tegunda. Hlýnandi loftslag hefur til dæmis átt þátt í að gera innfluttum skordýrategundum það kleift að ná hér fótfestu og leitt til breytinga á útbreiðslu innlendra tegunda.

3. Hlýnandi loftslag getur haft neikvæð áhrif á tegundir sem hafa aðlagast ákveðnum skilyrðum og eru því viðkvæmar fyrir umhverfisbreytingum.

4. Hlýnandi loftslag mun líklega valda auknum breytingum á gróðurfari landsins eftir miðja öldina, bæði hvað varðar innlendar tegundir og aðfluttar til landbúnaðar, garðræktar og skógræktar.

5. Líklegt er að hlýnunin muni auðvelda fleiri aðfluttum tegundum að dreifast út fyrir ræktunarsvæði sín og nánast er öruggt að einhverjar þeirra reynist ágengar í náttúru landsins. Þróun í annarri landnýtingu, svo sem beit búsmala, mun einnig hafa mikil áhif á þessa þróun.

6. Mikilvægt að hugað sé að skipulagi skógræktarsvæða og að við mat á nýjum svæðum sé tekið tillit til nágrannasvæða þeirra, líffræðilegrar fjölbreytni og möguleika á að aðfluttar tegundir geti dreifst út fyrir ætlað skógræktarsvæði.

7. Horfur eru á að skilyrði fyrir vaðfugla fari versnandi víða hérlendis á komandi áratugum. Þar koma meðal annars við sögu gróðurbreytingar vegna hlýnandi loftslags ásamt áformum um stóraukna ræktun, skóga og orkuplantna, sem mótvægisaðgerð gegn loftslagsbreytingum. Slíkt getur falið í sér umfangsmikið búsvæðatap fyrir vaðfugla. Aukin endurheimt votlendis gæti þó komið vaðfuglum til góða.

8. Auknar öfgar í veðri geta haft neikvæð áhrif á lífslíkur tegunda yfir álagstíma og geta í sumum tilfellum verið meiri áhrifavaldur en breytingar til lengri tíma. Á Íslandi eru til dæmis vísbendingar um neikvæð áhrif veðuröfga á viðkomu rjúpu og fálka.

9. Mikil fjölgun í stofni tófu á undanförnum áratugum hefur verið tengd við hlýnandi loftslag, en á síðastliðnum árum hafa komið fram vísbendingar um minnkandi viðkomu hjá tegundinni á ákveðnum svæðum. Hana má mögulega má rekja til loftlagsdrifinna breytinga á fæðustofnum hennar.

10. Víða erlendis hefur átt sér stað fækkun í hreindýrastofnum sem talin er tengjast loftslagsbreytingum. Neikvæðra áhrifa gætir ekki hjá íslenska hreindýrastofninum, sem er enn sem komið er góð, en lítill erfðabreytileiki gerir það að verkum að hann gæti átt erfitt með að bregðast við umhverfisbreytingum.

11. Fjórar stórar rannsóknir, þar sem hitabreytingum í náttúrulegum kerfum er stýrt, gefa til kynna að áhrif hlýnunar á lífríki mismunandi gróðurlenda og straumvatns geti orðið veruleg ef hlýnun heldur áfram, auk þess sem úrkomubreytingar hafa reynst umtalsverðar.

12. Vísbendingar eru um að hlýnun sjávar eigi þátt í því að hnúðlaxi hefur fjölgað í Norður-Atlantshafi. Til að mynda hefur orðið töluverð aukning í veiði á hnúðlaxi á Íslandi, og enn meira í Noregi þar sem hann er farinn að valda verulegum vandræðum.

13. Ársmeðalhiti Þingvallavatns hefur hækkað um 0,15 °C á áratug. Langtíma vöktun og rannsóknir hafa sýnt breytingar á stofnstærð og lífeðlisfræði bleikjuafbrigða í kjölfar

hlýnunar vatnsins. Stofnstærð murtu hefur hrunið og vaxtarhraði ungviðis allra fjögurra afbrigða tekið breytingum. Á sama tíma hefur stofnstærð urriða vaxið meðan magn sviflægra þörunga og krabbadýra hefur minnkað.

14. Stofnstærðir bleikju eru á undanhaldi í flestum landshlutum á sama tíma og stofnar urriða eru í uppsveiflu og laxastofnar haldast nokkuð jafnir. Sams konar þróun í stofnstærðum þessar þriggja tegunda er að finna í Norður-Noregi. Hlýnun er talin vera líklegur áhrifaþáttur þar sem bleikja er kuldakær tegund og lifir við lægra kjörhitastig en hinar tvær tegundirnar.

15. Smittíðni nýrnasýkingar (PKD) í fiskum hefur aukist á undanförnum árum, bæði í vötnum á láglendi og hálendi og dæmi eru um allt að 97% smittíðni í sumum vötnum. Sýkingin getur valdið afföllum hjá laxfiskum en nær sér ekki á strik nema vatnshiti hafi náð 12-15 °C í einn til þrjá mánuði. Hækkandi vatnshiti í kjölfar hlýnunar loftslags getur því haft töluvert neikvæð áhrif á afkomu laxfiska.

16. Losun gróðurhúsalofttegunda vegna landnotkunar er hlutfallslega mikil af heildarlosun og því mikilvægt að tölur um kolefnisbúskap vistkerfa séu vel undirbyggðar með vönduðum rannsóknum og vöktun.

17. Frekari rannsóknir skortir um losun frá landi og vegna breytinga á landnotkun. Þekking á kolefnisforða íslensks jarðvegs er brotakennd og þarf átak til að bæta þekkingargrunninn.

18. Nautgriparækt (og mjólkurframleiðsla) er loftslagsháð búgrein þar sem hún byggir á hágæða innlendri fóðurframleiðslu. Sauðfjárrækt og hrossarækt eru hinsvegar ekki eins næmar fyrir loftslagsbreytingum, né heldur svína- og kjúklingarækt á meðan innflutningur kjarnfóðurs raskast ekki.

19. Ýmsar umhverfisaðstæður landbúnaðar munu breytast verulega á komandi áratugum. Til að skilja betur hvernig þær munu eiga sér stað er mikilvægt að hermilíkön séu löguð að íslenskum aðstæðum og fyrir mismunandi búgreinar.

20. Ekki hefur farið fram almenn úttekt á núverandi og væntanlegum áhrifum loftslagsbreytinga á landbúnað, garðyrkju, skógrækt og landgræðslu síðan snemma á þessari öld. Né heldur fjallað skipulega um aðlögun að komandi loftslagsbreytingum innan þessara geira, nema þá helst fyrir skógrækt og kornrækt.

21. Jafnvel þó að úrkoma kunni að aukast með hlýnun þá eykst útgufun einnig og meiri úrkomu þarf til að viðhalda sama rakastigi í jarðvegi og áður. Haldi aukning úrkomu ekki í við uppgufun geta áhrif á ræktun orðið neikvæð. Mikil þörf er á að aðlaga hermilíkön að íslenskri jarðrækt til að skoða sameiginleg áhrif hitafars og úrkomu betur.

22. Jafnvel þó að markmið Parísarsamningsins, um að halda hnattrænni hlýnun innan 2 °C, náist munu ræktarskilyrði hér verða gjörbreytt í lok aldarinnar frá því sem nú er.

23. Síðustu ár var hitafar slíkt að rækta mátti korn til skepnufóðurs á stórum hluta láglendis en raungerist hlýrri sviðsmyndir 3 verður hægt að rækta það til manneldis á nær öllu ræktarlandi.

24. Yfirlit yfir kolefnishringrás lands og samfélags er uppfært með nýjustu vísindalegu þekkingu í skýrslunni. Árið 2021 var bein losun manna á CO_2, sem er mikilvægasta gróðurhúsalofttegundin, um 3,5 milljónir tonna og hafði aukist um 4,5% frá 2015. Enn stefnir því í öfuga átt hvað varðar beina losun CO_2 frá samfélaginu og er það talsvert áhyggjuefni.

25. Ný greining á kolefnisforða vistkerfa alls landsins sýnir að náttúruskógar, skógræktarsvæði, tún og akrar, sem aðeins þekja tæplega 4% landsins bera um 50% af ofanjarðarlífmassa þess. Annað vel gróið land, mýrlendi, graslendi og mólendi, þekja samtals um 32% landsins og bera 39% af ofanjarðarlífmassanum.

26. Nýir hvatar sem stjórnvöld hafa komið á eftir 2020 til að hvetja einkageirann til þátttöku í verkefnum, sem snúa að mótvægisaðgerðum gegn loftslagsbreytingum, eru smátt og smátt að auka þunga þeirra. Árleg metin kolefnisbinding (og samdráttur losunar vegna endurheimtar votlendis) hefur aukist um 33% frá 2015.

4.1 Breytingar á lífríki

4.1.1 Gróðurfar

Gróður virðist í framför á öllu landinu og heldur því áfram sama þróun og bent var á í síðustu skýrslum (V2008; V2018). Sú þróun þarf ekki að koma á óvart en, líkt og bent hefur verið á áður, er ekki einhlítt að breytingar megi alfarið tengja við loftslagsbreytingar heldur hefur landnýting og breyting á henni einnig áhrif. Þannig er ályktað í nýlegri skýrslu um gróðurbreytingar í Skaftafelli að meginorsök þeirra umtalsverðu breytinga sem urðu frá mælingum 1985–1987 til 2018 sé friðun lands fyrir sauðfjárbeit eftir þunga nýtingu á síðustu öld, þó að hlýnandi veðurfar sé einnig talið hafa áhrif (Borgþór Magnússon o.fl., 2022b).



Mynd 4.1: Gróðurbreytingar í Skaftafelli. Myndir teknar á reit 35 í vestanverðri Skaftafellsheiði. ***Mynd vinstra megin:*** *árið 1986 (ljósm: Kristbjörn Egilsson, birt með leyfi) og* ***mynd hægra megin:*** *árið 2018 (ljósm. Rannveig Thoroddsen, birt með leyfi). Sjá nánar í (Borgþór Magnússon o.fl., 2022b).*

Í V2008 voru birtar niðurstöður mæligagna frá Reykjavík, allt frá 1988 sem sýndu hvernig hvernig frjótími birkis hafði verið að færast fyrr á vorið á tíunda áratugnum og fram yfir aldamót. Passaði það vel við hlýnunina yfir það tímabil. Í nýrri grein voru þessi gögn endurgreind fyrir tímabilið 1988-2021 (Przedpelska-Wasowicz o.fl., 2021). Þar kom í ljós að þessi leitni til fyrri frjótíma hefur ekki haldið áfram eftir 2006, og aðeins eitt ár (2014) sker sig úr með frjótíma sem hófst í seinni hluta apríl, en það er í fyrsta skipti sem frjótími hefst í þeim mánuði síðan að mælingarnar hófust.

Í síðustu skýrslu (V2018) var sagt frá fjarkönnun á gróskustuðli (*e. NDVI*) en gróska jókst umtalsvert í lok síðustu aldar en á fyrsta áratug þessarar aldar dró úr henni á vissum svæðum þótt önnur sýndu enn aukningu. Samsvarandi rannsókn hefur ekki verið gerð síðan síðasta skýrsla kom út en þó hefur verið sýnt fram á að umtalsverður breytileiki er milli ára (Olafsson og Rousta, 2021). Arktískur hluti Íslands miðað við gróðurkort CAFF (CAVM, 2003; CAFF, 2013) er þó vaktaður, líkt og arktíska svæðið allt, af NOAA og samkvæmt síðustu skýrslu hefur gróska aldrei aukist jafnmikið og undanfarin ár (Frost o.fl., 2021).

Líkt og bent hefur verið á í fyrri skýrslum skortir frekari vöktun á breytingum á gróðurfari landsins. Náttúrufræðistofnun Íslands, í samstarfi við náttúrustofur, hefur nýverið hafið vöktun á vistgerðum landsins sem hluta af verkefninu *Vöktun náttúruverndarsvæða* (Náttúrufræði-

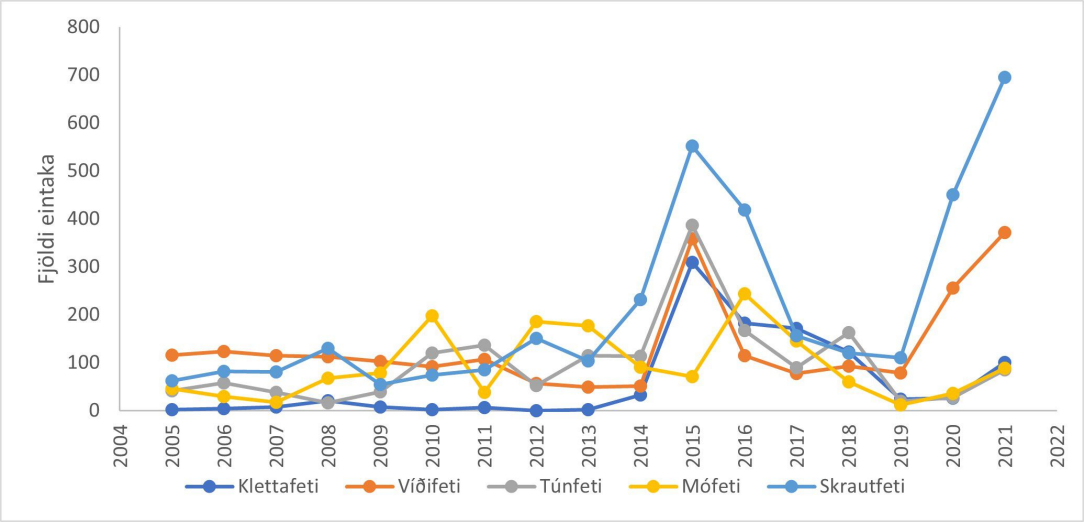
stofnun Íslands, 2023b). Meðal annars er áhersla á vöktun rústamýrarvistar sem viðkvæm er fyrir loftslagsbreytingum. Þannig voru endurteknar mælingar á 20 ára gömlum sniðum í Guðlaugstungum og Orravatnsrústum. Fleiri verkefni vakta breytingar á gróðurfari eins og Hagaverkefnið sem var til umfjöllunar í síðustu skýrslu (V2018). Síðan 2008 hefur tindagróður við Öxnadal verið vaktaður innan fjölþjóðlega verkefnisins GLORIA (*Global Observation Research Initiative in Alpina Environments*) en verkefnið felur í sér að á fjórum tindum, 540-1200 m yfir sjávarmáli, eru afmarkaðir fastir reitir og voru þeir endurmetnir 2021 en ekki hefur verið gerð grein fyrir niðurstöðum enn. Fylgst hefur verið með framvindu gróðurs á jökulskerjum í Breiðamerkurjökli síðan 1965 og hafa miklar breytingar átt sér stað þó að erfitt geti reynst að greina milli náttúrulegrar framvindu gróðurs og áhrifa loftslagsbreytinga, þótt tilkoma nýrra jökulskerja sé afleiðing hlýnunar.

4.1.2 Dýralíf

Útbreiðsla dýra stjórnast að miklu leyti af veðurfari, m.a. í gegnum búsvæðaval og fæðuframboð en einnig lífeðlisfræðilegar aðlaganir að t.d. hitastigi og raka. Með hlýnandi loftslagi munu einhverjar tegundir geta aðlagast þeim breyttu aðstæðum sem slíkt hefur í för með sér á meðan aðrar munu hörfa með breytingum og mögulegum samdrætti á útbreiðslu þeirra og stofnstærð.

4.1.2.1 Smádýr

Áhrif loftslagsbreytinga á smádýr birtast oft við breytingar á gróðurfari enda lifa flestar tegundir smádýra á gróðri eða öðrum tegundum sem eru háðar gróðri. Hingað berast stöðugt smádýr frá öðrum löndum, t.d. með plöntum, plöntuafurðum og gróðurmold. Þó að fæstar af þeim innfluttu tegundum sem hér hafa fundist eigi möguleika á að lifa af veturinn, þá hefur færst í aukana að þær nái fótfestu 2013.

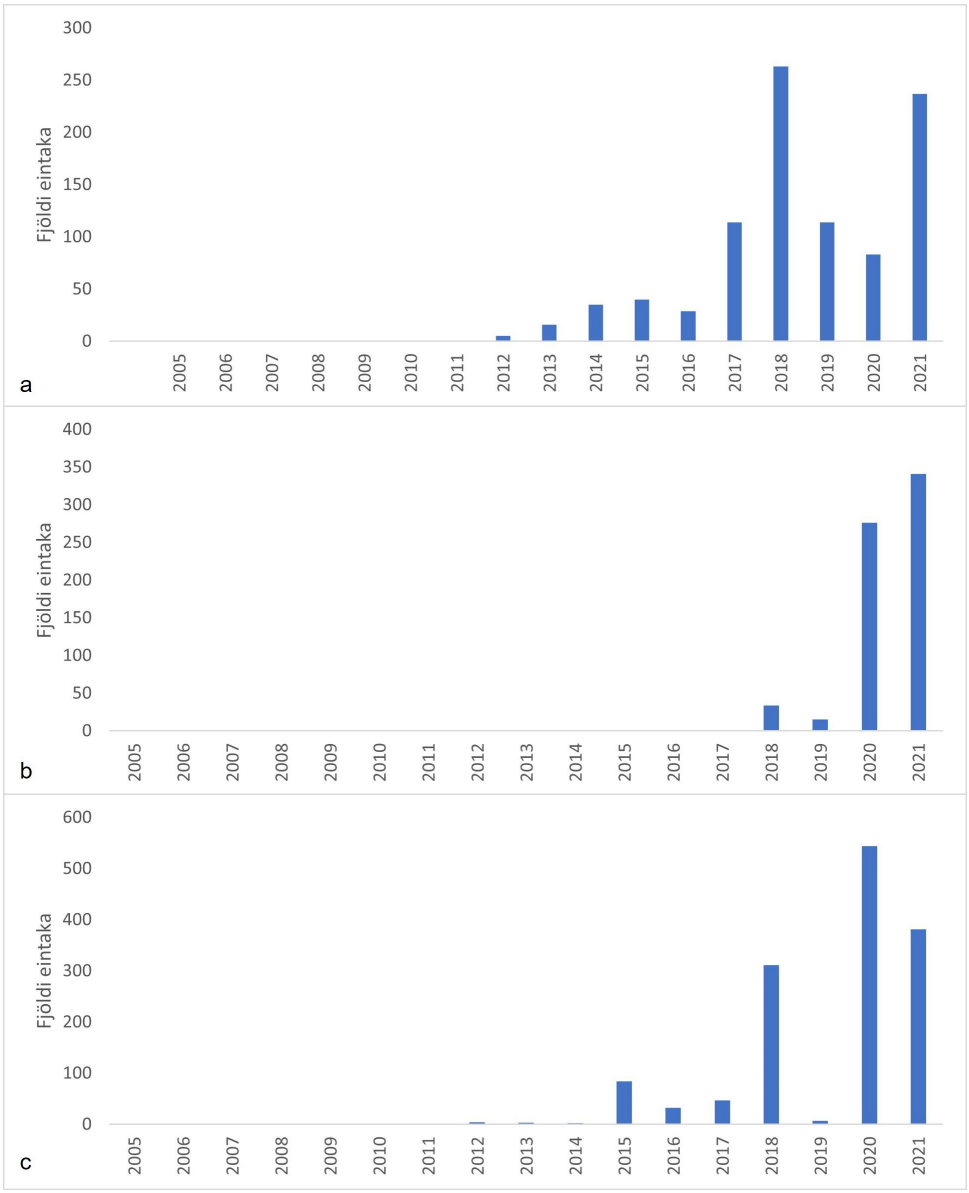


Mynd 4.2: Heildarveiði klettafeta (Entephria caesiata), víðifeta (Hydriomena furcata), túnfeta (Xanthorhoe decoloraria), mófeta (Eupithecia satyrata) og skrautfeta (Dysstroma citrata) úr ljósgildrum að Mógilsá í Kollafirði frá 2005 - 2021. (ljósm. Matthías S. Alfreðsson, birt með leyfi)

Telja má líklegt að mildari vetur og aukin ræktun á framandi tegundum auðveldi mörgum þeirra að lifa af og finna hentugar fæðuplöntur. Hlýnandi loftslag á síðustu áratugum hefur einnig leitt til breytinga á dreifingu og stofnum gamalgróinna tegunda, m.a. ýmissa skaðvalda á gróðri (sjá nánar í grein4.2.4.2 og grein Guðmundar Halldórssonar o.fl.(2013)). Náttúrufræðistofnun Íslands hefur staðið fyrir vöktun fiðrilda frá árinu 1995 sjá myndir (Náttúrufræðistofnun Íslands,

2023e, sjá myndir 4.2 og 4.3). Fyrst um sinn voru rannsóknarsvæðin tvö, Tumastaðir í Fljótshlíð og Kvísker í Öræfum, en í dag eru, í samstarfi við náttúrustofur landsins og Landbúnaðarháskóla Íslands á Hvanneyri, alls 19 vöktunarstaðir í öllum landshlutum. Notast er við sjálfvirkar ljósgildrur sem laða að náttförul fiðrildi og fer söfnun fram frá miðjum apríl fram undir miðjan nóvember ár hvert. Fiðrildavöktun er góð leið til að vakta stofnbreytingar innlendra tegunda og til þess að fylgjast með nýjum landnemum og flækingsfiðrildum sem berast til landsins árlega. Fiðrildi henta einnig sem vísir fyrir gróðurfarsbreytingar því þau eru upp til hópa plöntuætur og sumar tegundir eru mjög sérhæfðar í fæðuvali. Úrvinnslu gagna er ekki lokið en breytingar hafa orðið á stofnum nokkurra tegunda (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022). Síðustu ár hefur orðið mikil aukning hjá ýmsum tegundum af fetafiðrildaætt (*Geometridae*) og sama má segja um barrvefara af veffiðrildaætt (*Tortricidae*) en sú tegund fannst fyrst í Hallormsstaðaskógi 1992, því næst í Fljótshlíð árið 1997 og er núna eitt algengasta fiðrildi landsins (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023d).

Hingað hafa borist ýmsar tegundir, bæði af sjálfsdáðum en einnig aðrar sem útilokað er að hafi borist á annan hátt en með innflutningi. Nýlega hafa fundist þrjár nýjar tegundir í ljósgildrum á Mógilsá í Kollafirði. Birkikemba (*Heringocrania unimaculella*) er mikill skaðvaldur á birki og fannst tegundin fyrst í Hveragerði 2005. Árið 2012 kemur hún fyrst í gildru á Mógilsá og hefur henni fjölgað hratt síðan þá. Grenivefari (*Epinotia tedella*) er ný tegund sem hefur aðeins fundist á Mógilsá, fyrst árið 2012. Hér er um að ræða tegund sem verpir í rekla grenitrjáa (*Picea*). Birkiglitmölur (*Argyresthia goedartella*) er þriðja tegundin, hún verpir eggjum sínum í brum birkis (*Betula*) og elris (*Alnus*) og fannst fyrst á Mógilsá 2011. Einnig hefur nýlega numið hér land vorflugutegundin *Micropterna sequax*. Hún fannst fyrst á Mógilsá 2008 en hefur síðan fundist á tveimur stöðum til viðbótar, í Kjós og á Hvanneyri (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022; Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023d).



Mynd 4.3: Heildarveiði þriggja fiðrildategunda úr ljósgildrum að Mógilsá í Kollafirði a) Birkikemba, b) Grenivefari, c) Birkiglitmölur. (ljósm. Matthías S. Alfreðsson, birt með leyfi)

Einnig hefur orðið vart við breytingar hjá gamalgrónum fiðrildategundum á borð við ertuyglu (*Ceramica pisi*) og skógbursta (*Orgyia antiqua*). Lengi vel var ertuygla sjaldgæf tegund á suðurhluta landsins en nú hefur henni fjölgað mikið á Suðurlandi og hefur hún verið að útvíkka útbreiðslusvæði sitt til norðurs og má það að öllum líkindum rekja til hlýnandi loftslags og aukinnar útbreiðslu lúpínu (Brynja Hrafnkelsdottir o.fl., 2019a). Tegundin er mikill skaðvaldur á ýmsum plöntutegundum en lirfurnar kjósa helst tegundir af ertublómaætt. Skógbursti er önnur tegund sem var afar fágæt og fannst helst í Fljótshlíðinni og undir Eyjafjöllunum. Nú hefur tegundin breiðst hratt um sveitir Suðurlands og hefur stækkað útbreiðslusvæði sitt til vesturs. Skógbursti er fjölhæfur í fæðuvali og leggst á ýmsar jurtkenndar plöntur á borð við mjaðurt (*Filipendula ulmaria*), ljónslappa (*Alchemilla alpina*), kornsúru (*Bistorta vivipara*) sem og trjákenndar plöntur líkt og víði (*Salix)* (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023d). Fjölmörg dæmi eru um breytingar hjá öðrum hópum smádýra á síðustu árum. Lúsmý (*Culicoides reconditus*) blossaði upp í Kjós 2015 og hefur á skömmum tíma dreift sér víða um land. Lyngbobbi (*Arianta arbustorum*) er kuðungasnigill sem fannst fyrst 1995 í Reykjavík og á síðustu árum hefur tegundinni fjölgað gífurlega og, einkum á suðvesturhorni landsins. Varmasmiður (*Carabus*

nemoralis) er stórvaxin bjalla sem líklega hefur borist til landsins með innfluttum garðyrkjuvörum. Árið 1999 birtist hann í Hveragerði og fannst af og til í görðum í Reykjavík. Tegundinni fjölgaði hratt á Suðvesturlandi í kjölfarið og hefur hún aukið verulega landnámssvæði sitt. Nýjasti fundarstaðurinn er Vík í Mýrdal. Asparglytta (*Ptratora polaris*) er einnig dæmi um tegund sem hefur borist til landsins á seinni árum, að öllum líkindum með innfluttum plöntum. Tegundin er mikill skaðvaldur á víðitegundum (*Salix*) og öspum (Populus) og hefur fjölgað óheyrilega á síðustu árum og dreifingin verið hröð. Akurhumla (*Bombus pratorum*) fannst fyrst 2010 á Eskifirði og var það eini fundarstaðurinn um árabil.

Heyrst hefur af henni á Reyðarfirði en 2021 var nýr fundarstaður staðfestur á Egilsstöðum. Fíflalús (*Uroleucon taraxaci*) er nýlegur landnemi og eru fyrstu eintök Náttúrufræðistofnunar eru frá 2007. Síðan þá hefur tegundin dreifst um allt land og fjölgað gífurlega. Randakönguló (*Tetragnatha extensa*) var lengi vel staðbundin á nokkrum stöðum á landinu en á síðustu árum hefur tegundin fundist í auknum mæli víða á Suðvestur- og Suðurlandi (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022; Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023d). Starfsfólk Náttúrufræðistofnunar og Tilraunastöðvarinnar að Keldum hefur safnað Skógarmítli (*Ixodes ricinus*) síðan 1976. Fjöldi tilfella hefur farið vaxandi upp úr aldamótum (Richter o.fl., 2013) og árið 2015 hófst markviss vöktun á tegundinni hérlendis (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023c). Í Evrópu hefur orðið fjölgun hjá tegundinni og útbreiðslusvæði hennar til norðurs stækkað (Gray o.fl., 2009). Hingað til lands berast skógarmítlar með farfuglum á vorin og haustin og detta af þeim víða um land. Enn sem komið er hefur landnám skógarmítils ekki verið staðfest hérlendis en komið hefur í ljós að skógarmítill getur lifað af veturinn. Með mildari vetrum, aukinni skógrækt og fjölgun kanína má telja að auknar líkur séu á því að staðbundnir stofnar nái hér fótfestu. Full ástæða er til að fylgjast vel með dreifingu skógarmítils því tegundin getur borið með sér sjúkdómsvaldandi sýkla (Alfreðsson o.fl., 2017).



Mynd 4.4: Skógarmítill að athafna sig á húð. (ljósm. Erling Ólafsson, birt með leyfi).

Fleiri dæmi mætti tína til um breytingar á smádýralífi landsins á seinni árum (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022). Ljóst er að töluverðar breytingar eru að verða og hafa orðið hjá mörgum tegundum smádýra, ekki síst í byggð. Margar af þessum tegundum eru skaðvaldar á gróðri og má vænta þess að breytingar á loftslagi kunni að leiða til aukinna áhrifa af völdum þeirra (sjá nánari umfjöllun í grein 4.2.4.2).

4.1.2.2 Fuglar

Varpfuglar á Íslandi eru um 75 og reglulegir far-, sumar- og vetrargestir eru um 20 (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023a). Ísland ber alþjóðlega ábyrgð á fjölda fuglategunda en til ábyrgðartegunda teljast þeir fuglar þar sem um 20% af Evrópustofni viðkomandi tegundar nýtir Ísland til varps eða kemur hér við á ferðum sínum. Þessum hópi tilheyrir m.a. stór hluti sjófuglategunda og megnið af þeim vaðfuglategundum sem hér verpa. Auk geirfuglsins, sem er útdauður á heimsvísu, hafa þrjár fuglategundir orðið útdauðar hér á landi: gráspör, keldusvín og haftyrðill (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2018). Í tilfelli haftyrðils, sem er hánorræn tegund,

þá tengist útdauði hans hérlendis mögulega hlýnun. Á sama tíma virðist hafa orðið aukning á fjölda tegunda sem nema hér land (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2022). Það gæti tengst hlýnun, sérstaklega mildari vetrum, en einnig aukningu á skóglendi (Jóhann Óli Hilmarsson, 2002). Í síðustu skýrslu (V2018) kom fram að vandasamt væri að spá fyrir um áhrif loftslagsbreytinga á íslenska fugla nema með almennum hætti þar sem rannsóknir skortir á vistfræðilegum ferlum og öðrum áhrifaþáttum. Mátti þar nefna gróðurfarsbreytingar og breytta landnotkun sem oft er hægt að rekja til veðurfarsbreytinga, t.d. í landbúnaði og skógrækt. Þrátt fyrir að enn skorti heildrænar rannsóknir á vistfræðilegum ferlum, svo sem á tengslum fuglastofna við fæðustofna, þá hefur þekkingu á áhrifum gróðurfarsbreytinga og breyttri landnotkun á vaðfugla fleygt fram á síðustu árum (sjá yfirlit í Tómas Gunnarsson (2020)). Í fyrri skýrslu var einnig fjallað um rannsóknir á komutíma farfugla en í Evrópu hafa margar tegundir farfugla flýtt komu sinni á varpstöðvar í takt við hlýnandi loftslag og þeim tegundum sem hafa síður flýtt komu sinni fækkar hraðar en hinum. Hjá þeim tegundum sem eru ófærar um að laga sig að breyttum skilyrðum vegna hlýnunar getur myndast misræmi milli vistfræðilegra þátta (*e. ecological mismatch*) (Saino o.fl., 2011). Dæmi um slíkt misræmi milli atburða er tímasetning varps með tilliti til fæðuframboðs. Komutími íslenskra farfugla hefur lítt verið kannaður en gögn frá Uppsveitum Árnessýslu sýna þó að margar tegundir hafi flýtt komu sinni og að þær breytingar tengjast hitastigi (Tómas G. Gunnarsson og Gunnar Tómasson, 2011).

Vaðfuglastofnar á Íslandi eru gríðarstórir sem skýrist af miklu framboði af opnum búsvæðum sem allar tegundirnar, utan hrossagauks, eru háðar. Blikur eru þó á lofti að tekið sé að þrengja að búsvæðum þeirra víða vegna hlýnunar og breyttrar landnotkunar Tómas Gunnarsson (2020). Reglubundin vöktun á vaðfuglum er skammt á veg komin hérlendis en hófst þó á fáeinum stöðum eftir aldamótin síðustu og benda niðurstöður af talningasvæðum á Vestur- og Suðurlandi til þess að þar sé fækkun að eiga sér stað hjá nokkrum tegundum (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023f; Lilja Jóhannesdóttir o.fl., án árs). Nýlega var umfang vaðfuglavöktunar stóraukið í tengslum við verkefnið *Vöktun náttúruverndarsvæða* og fara nú talningar fram í öllum landshlutum (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023b).

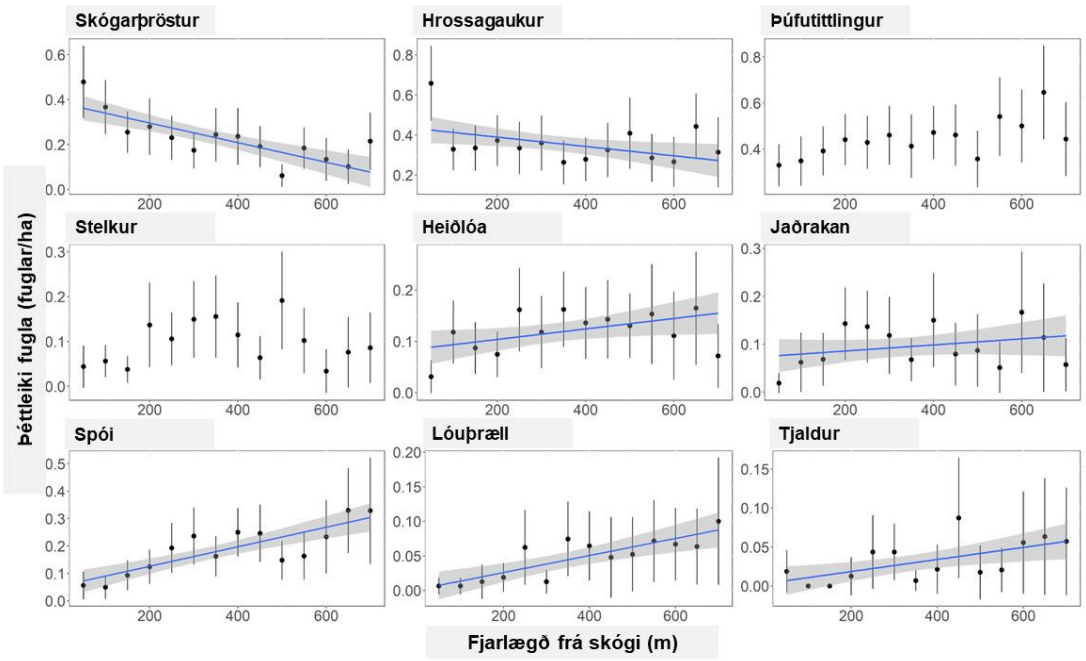


Mynd 4.5: Spói, einn af einkennisfuglum þurrlendis á Íslandi. (Ljósm. Erling Ólafsson, birt með leyfi).

Gróska hefur aukist mikið á Íslandi síðustu áratugi, sem að öllum líkindum má rekja til hækkandi hitastigs en tengist einnig samdrætti í sauðfjárbeit auk átaks í landgræðslu og skógrækt (Raynolds o.fl., 2015). Í nýlegri meistararitgerð voru breytingar á runnagróðri á Suðurlandi skoðaðar og leiddu þær í ljós að afar hröð aukning á runnagróðri hafði átt sér stað milli áranna 2001 og 2018. Þessi mikla aukning tengist líklega samverkandi þáttum hlýnunar og minnkandi sauðfjárbeitar. Í sömu rannsókn voru áhrif runnagróðurs á vaðfugla könnuð á árunum 2017-2018. Rannsóknin leiddi í ljós að þéttleiki fjögurra tegunda, þ.e. tjalds, heiðlóu, spóa og stelks, var minni þar sem var áberandi runnagróður. Enn fremur var sýnt fram á neikvætt samband á milli hæðar runna og þéttleika fyrir þrjár

tegundir: lóuþræl, jaðrakan og heiðlóu (Sigurður Björn Alfreðsson, 2018) Vaðfuglar, utan hrossagauks, þrífast ekki í skóglendi (T. Gunnarsson o.fl., 2006) en í nýútkominni grein er sýnt fram á að flestar vaðfuglategundir forðast einnig skógarjaðarinn sem lýsir sér þannig að þéttleiki þeirra er minni nær skóglendi en fjær og gætir þessara áhrifa í töluverðri fjarlægð frá skógum . Fyrir fimm tegundir af sjö, þ.e. heiðlóu, spóa, tjald, lóuþræl og jaðrakan, reyndist þéttleikinn innan 200 m frá skógræktarsvæðum vera um helmingur þess sem hann var fjær. Þéttleiki stelks var minnstur innan 150 m frá skógræktarreitum og einungis þéttleiki hrossagauks var meiri næst skógi. Þéttleiki heiðlóu, spóa og hrossagauks var lægri í grennd við hæstu skógana (>10 m á hæð) samanborið við 2-5 m háa skóga. Stærð skógarreita hafði ekki áhrif, þ.e. þéttleiki minnkaði jafnt við litla skógarreiti sem stóra. Skógrækt getur því falið í sér umfangsmikið búsvæðatap fyrir vaðfugla og áætlað að nú þegar hafi búsvæði tugþúsunda vaðfugla tapast undir skógræktarsvæði (Pálsdóttir o.fl., 2022).

Það má því ætla að skilyrði fyrir vaðfugla hafi og muni fara versnandi víða á láglendi og eru áætlanir um stóraukna skógrækt til kolefnisbindingar sem og stórfelld ræktun orkuplantna meðal þeirra þátta sem vaðfuglastofnum stafar ógn af (sjá nánar sérgrein 4A auk Pálsdóttir o.fl. (2022) og Tómas Gunnarsson (2020)). Endurheimt votlendis sem loftslagsaðgerð gæti þó komið vaðfuglum til góða Tómas Gunnarsson (2020).



Mynd 4.6: Þéttleiki mófugla (fuglar á hektara) í vaxandi fjarlægð frá skógum. Þar sem leitnilínan er gráskyggð er sambandið tölfræðilega marktækt. (Aðlagað frá (Pálsdóttir o.fl., 2022)).

Nokkrar rannsóknir hafa tengt lýðfræði fugla við veðurfar og í síðustu skýrslu (V2018) var t.d. fjallað um tengsl varpárangurs við hitastig hjá grágæs (Helgi Guðjónsson o.fl., án árs) og jaðrakan (Tómas Grétar Gunnarsson o.fl., 2017). Rannsóknir hafa einnig sýnt tengsl lýðfræði rjúpu og fálka við veðurfar. Báðar tegundir eru norrænar með útbreiðslu umhverfis pólinn. Fálki er sérhæfður afræningi á rjúpu og eru stofnbreytingar tegundanna tengdar sem lýsir sér þannig að fálkastofninn er í hámarki um tveimur árum eftir hámark rjúpnastofnsins (Ólafur K. Nielsen, 1999; Frédéric og Ó. K. Nielsen, 2018). Fálkar hefja undirbúning varps í mars/apríl en þá hættir kvenfuglinn veiðum og er algjörlega háð karlfuglinum um æti. Á þessum tíma safnar kvenfuglinn forða fyrir varptímann en karlfuglinn færir henni eingöngu rjúpur (Ólafur K. Nielsen, 1999; Ólafur K. Nielsen, 2003). Veiði karlfuglsins er háð stærð rjúpnastofnsins og tíðarfari, ef kvenfuglinn fær ekki nóg að éta á þessu skeiði verður ekki úr varpi það árið

(Ólafur K. Nielsen, 2011). Rjúpan er lykiltegund í fæðuvef þurrlendis á Íslandi, auk þess að vera mikilvæg bráð sportveiðimanna. Rjúpnastofninn sveiflast með nokkuð reglubundnum hætti en umskipti hafa orðið á síðustu áratugum. Á sumum svæðum hefur orðið langtímafækkun rjúpna (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2018) en einnig hafa stofnbreytingarnar frá því um aldamót verið mun örari en áður (Jenný Brynjarsdóttir o.fl., 2003; Fuglei o.fl., 2020; Ferrarini, 2022). Rjúpan er flokkuð sem tegund í yfirvofandi hættu á válista fugla (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2018).

Sveiflutíðnin hefur breyst og eru nú um fimm ár á milli toppa á Norðausturlandi en voru áður 10-12 ár (Jenný Brynjarsdóttir o.fl., 2003; Fuglei o.fl., 2020; Ferrarini, 2022). Til eru langar tímaraðir um lifun rjúpna Sýnt hefur verið fram á marktæk tengsl milli viðkomu rjúpunnar og veðurfarsþátta, þ.e. úrkomu og meðalvindhraða í júlí (yfir ungatímann). Rjúpum vegnar þannig verr ef það er vinda- eða úrkomusamt á þessum tíma og ef þessir þættir fara saman þá magnast áhrifin (Ólafur K Nielsen o.fl., 2004). Frá upphafi mælinga hafa komið nokkur ár þar sem viðkoma hefur verið sérstaklega slök og hefur verið hægt að rekja það til harðra hreta á ungatíma (Gardarsson, 1988; Ólafur K Nielsen o.fl., 2004; Ólafur K Nielssen, 2023). Líkamsástand rjúpu er mælt á haustin en það endurspeglar aðstæður mánuðina á undan og tengist grænkun úthaga að vori. Marktæk tengsl eru milli affalla og líkamsástands, þ.e. afföll ungfugla yfir veturinn og fram á vor eru meiri þegar fuglarnir eru litlir og grannir (Ólafur K. Nielsen og Guðmundur A. Guðmundsson, 2020). Að ofangreindu má sjá að frjósemi fálka tengist rjúpnastofninum og veðurfarsþáttum og að veðurfar hefur einnig áhrif á viðkomu og afföll hjá rjúpum. Auknar veðuröfgar á ákveðnum tímum árs gætu haft áhrif á stofna tegundanna og samspilið þeirra á milli. Umfjöllun um sjófugla er að finna í kafla 5.



Mynd 4.7: Rjúpukarri. (Ljósm. Erling Ólafsson, birt með leyfi).

4.1.2.3 Spendýr

Fáar tegundir landspendýra lifa villtar á Íslandi og er tófan eina tegundin sem telst upprunaleg hérlendis á meðan aðrar hafa borist hingað fyrir tilstilli mannsins. Tófa eða heimskautarefur er hánorræn refategund sem hefur verið skilgreind sem svokölluð flaggskipstegund (*e. flagship species*) í rannsóknum á áhrifum hlýnunar á lífríki á norðurslóðum (Foden og Stuart, 2009) og býður landfræðileg einangrun og vistfræði tegundarinnar hér landi upp á mikilvægar samanburðarrannsóknir. Mikill vöxtur var í stofninum á árunum 1980-2008 sem tengdur hefur verið vexti bráðarstofna, sérstaklega heiðagæsar, og hlýnandi loftslagi (Pálsson o.fl., 2016).

Víða á útbreiðslusvæði heimskautarefsins hefur hlýnun haft í för með sér ýmsar ógnir fyrir tegundina og má þar helst nefna aukna samkeppni við rauðref og neikvæð áhrif hlýnunar á læmingjasveiflur (Fuglei og Anker Ims, 2008). Í kjölfar fjölgunarskeiðs tófunnar varð óútskýrð fækkun í íslenska stofninum en hann hefur síðan rétt aftur úr kútnum og virðist stöðugur um þessar mundir (Unnsteinsdóttir, 2021). Á Hornströndum hafa tófur verið friðaðar um árabil. Þar hefur stofninn verið stöðugur en á undanförnum árum hefur þó hlutfall óðala í ábúð lækkað

og gotum fækkað sem getur bent til minnkandi fæðuframboðs (Unnsteinsdóttir, 2021; Ester Rut Unnsteinsdóttir, 2023). Vitað er að mikil hnignun hefur átt sér stað í bjargfuglastofnum, sem er meginfæða refa á vesturhluta landsins, og má líklega rekja hana til áhrifa loftslagsbreytinga á vistkerfi sjávar (sjá kafla 5).



Mynd 4.8: Forvitnir yrðlingar á greni. (Ljósm. Ester Rut Unnsteinsdóttir, birt með leyfi).

Hagamúsin barst til Íslands með mönnum og er hér á útmörkum útbreiðslu sinnar til norðurs og vesturs. Sýnt hefur verið fram á að stofnstærð að hausti stjórnast af veðurfari snemma vetrar árið á undan, þ.e. milt tíðarfar á þeim tíma gerir músunum auðveldara að lifa af veturinn (Unnsteinsdottir og Hersteinsson, 2009). Hækkandi hitastig gæti því hafa leitt til hagstæðari skilyrða fyrir hagamýs hér á landi, m.a. með breytingum á gróðurfari en þéttleiki hagamúsa er meiri í laufskógum en á opnum svæðum með lággróðri (Unnsteinsdottir og Hersteinsson, 2009) og aukið skóg- og kjarrlendi skapa þeim kjöraðstæður. Hagamús hentar vel sem vísitegund loftslagsbreytinga auk þess sem hún er lykiltegund sem fæða fyrir ýmis rándýr. Haustið 2023 munu náttúrustofur víða um land hefja vöktun á hagamúsum undir umsjón Náttúrufræðistofnunar Íslands í tengslum við áðurnefnda vöktun náttúruverndarsvæða (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023b). Hreindýr voru flutt til Íslands við lok 18. aldar en náttúruleg heimkynni þeirra eru umhverfis Norðurheimskautið. Hreindýr hafa frá upphafi gengið villt á Íslandi og eru þau bundin við Austurland og ganga í Austfjarðardölum frá Breiðamerkurlóni norður að Bakkaflóa sem og á hásléttu Austurlands. Íslenska stofninum er stjórnað með veiðum enda eru hér engin rándýr sem leggjast á hreindýr (Skarphéðinn G. Þórisson, 2004).

Veiðar fara fram á öllu Austurlandi nema í Kringilsárrana (Skarphéðinn G. Þórisson o.fl., 2022) og er mikil ásókn í veiðileyfi sem Umhverfisstofnun úthlutar árlega.

Víða erlendis hefur átt sér stað fækkun í stofnum hreindýra sem er talin er tengjast loftslagsbreytingum og er því spáð að áframhaldandi hlýnun muni hafa margvíslegar afleiðingar fyrir tegundina. Möguleg áhrif eru þó breytileg eftir staðbundnum aðstæðum og lífsháttum undirtegunda (Mallory og Boyce, 2018) og hér að neðan verða taldir upp helstu þættir sem munu hafa áhrif á íslenska stofninn.



Mynd 4.9: Hreindýr. (Ljósm. Erling Ólafsson, birt með leyfi).

Í sumarhögum getur hækkandi hitastig leitt til lengri vaxtartíma plantna sem kann að hafa

jákvæð áhrif á líkamsástand og viðkomu hreindýra. Samkeppni við aðrar tegundir (t.d. heiðagæs) í sumarhögum getur aukist, sem og tíðni ýmissa sníkjudýra og sjúkdóma (Mallory og Boyce, 2018; Skarphéðinn G Þórisson, 2018). Má þar nefna að skógarmítill (*Ixodes ricinus*) hefur fundist á hreindýri og með hækkandi hita eykst hættan á því að staðbundnir stofnar mítla nái hér fótfestu (Alfreðsson o.fl., 2017). Annað dæmi sem mögulega má rekja til hlýnandi loftslags er að árið 2016 varð í fyrsta skipti vart við orfsýkingu sem kom upp á einu veiðisvæðanna og sýkti þar júgur hjá stórum hluta kvendýra (Skarphéðinn G. Þórisson og Rán Þórarinsdóttir, 2017). Enn sem komið er hér ekki að finna moskítóflugur eða sníkjuflugur af ættinni Oestridae (svokallaðar brimsur) en þekkt er að álag af þeirra völdum getur haft slæm áhrif á líkamsástand hreindýra og hækkandi hita getur fylgt meira áreiti af völdum þessara skordýra. Að vetri til getur komið til aukinnar tíðni áfrera *(e. rain on snow)* sem takmarka beit og geta leitt til vannæringar og jafnvel sveltis (Mallory og Boyce, 2018; Skarphéðinn G Þórisson, 2018). Sem stendur er staða íslenska hreindýrastofnsins góð en ljóst er að erfðabreytileiki stofnsins er lítill (Roed o.fl., 1985) og gæti hann því átt erfitt með að bregðast við umhverfisbreytingum sem fylgja munu hlýnun (Skarphéðinn G Þórisson, 2018).

4.1.3 Framandi ágengar tegundir

Með hlýnandi loftslagi breytast aðstæður á landinu og geta þær breytingar bætt lífsskilyrði ýmissa tegunda sem lengstum 20. aldarinnar áttu í erfiðleikum með að ná fótfestu. Líkt og bent var á í fyrri skýrslu (V2018) þá benda rannsóknir til þess að ýmsar framandi tegundir sem þegar hafa orðið ílendar (þ.e. með bólfestu) muni dreifa sér víðar og jafnvel falla í flokk framandi ágengra tegunda. Framandi ágengar (*e. invasive alien*) nefnast þær tegundir sem eru framandi (aðfluttar af manna völdum) í viðkomandi vistkerfi og sýna mikla eða hraða útbreiðsluaukningu af eigin rammleik, valda eða eru líklegar til að valda minnkun líffræðilegrar fjölbreytni, efnahagslegu eða umhverfislegu tjóni eða eru skaðlegar heilsu manna. Meðan Ísland hefur tiltölulega strangar reglur er varða innflutning dýra, einkum með hliðsjón af sjúkdómahættu, þá eru reglur um innflutning plantna mun opnari. Þannig má flytja inn ýmsar garðplöntur í gróðurmold (Landbúnaðarráðuneytið, 1990, með síðari breytingum) að uppfylltum ákveðnum skilyrðum eins og að með fylgi vottorð um heilbrigði plöntunnar. Slíkur flutningur á mold milli landa eykur umtalsvert hættuna á að með þeim berist skaðvaldar og bent hefur verið á að bent á að slíkur innflutningur sé líkleg orsök vargsnigils á Íslandi (Erling Ólafsson, 2022).

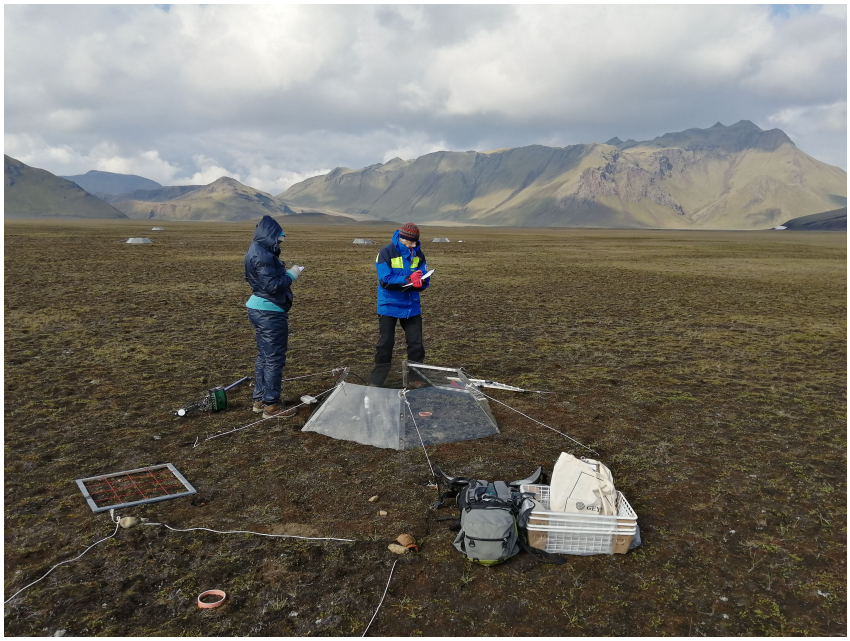
Líklegt er að fjöldi framandi tegunda aukist með hlýnandi loftslagi á norðurhjara líkt og hérlendis. Aukin umsvif og ekki síst aukin ferðamannastraumur kalla eftir bættri vöktun á aðflutningi framandi tegunda og enn fremur að metin sé hættan á að framandi tegundir reynist ágengar. Nýverið var gerð rannsókn á framandi plöntutegundum sem borist hafa til arktískra svæða. Af 341 tegundum sem staðfestar voru reyndust 188 þeirra orðnar ílendar og ellefu flokkast sem framandi ágengar (Wasowicz o.fl., 2020). Hérlendis finnast nýjar framandi æðplöntutegundir annað slagið og dreifast sumar þeirra hratt og líklegt að þar sé um framandi ágengar tegundir að ræða. Sem dæmi má nefna stormþul sem dreifist hratt um strendur landsins (Wasowicz og Alm, 2022) en tegundin var upphaflega flutt inn sem skrautplanta í görðum. Annað dæmi um framandi ágenga tegund sem dreifst hefur hratt við Ísland er grjótkrabbi en Náttúrustofa Suðvesturlands hefur fylgst með útbreiðslu hans (Gíslason o.fl., 2021).

Það er einkenni framandi ágengra tegunda að dreifing þeirra er yfirleitt hæg til að byrja með en með tímanum verður fjölgunin veldisvaxandi og er þá í flestum tilfellum of seint að grípa til aðgerða. Nýverið var lagt gróft mat á kostnað af baráttu við framandi ágengar tegundir á Norðurlöndunum (Kourantidou o.fl., 2022) og þar samanlagður kostnaður vegna minks á Íslandi síðan 1960 áætlaður rúmlega 20 milljónir bandaríkjadala (um 2700 milljónir króna á gengi ársins 2022). Því er afar mikilvægt að varúðarreglunni sé beitt og framandi tegundum ekki dreift í íslenskri náttúru nema að vel ígrunduðu máli.

4.1.4 Stýrðar loftslagsrannsóknir á náttúrulegum landvistkerfum

Í fjórum rannsóknaverkefnum hér á landi er líkt eftir loftslagsbreytingum, annað hvort með beinum hætti (ITEX - sjá t.d. G. H. Henry o.fl. (2022)) og CRUST - sjá Salazar o.fl. (2022)) eða þar sem áhrif jarðhita eru nýtt til að rannsaka áhrif hlýnunar (ForHot - sjá Bjarni D. Sigurðsson o.fl. (2016) og Hengladalir - sjá Robinson o.fl. (2018)). Mikið hefur birst af vísindagreinum um þessi verkefni síðan V2018 kom út og hér verður aðeins drepið á nokkrar af helstu niðurstöðum þeirra.

Elst þessara verkefna er ITEX sem notar sexhyrnd opin plastskjól sem hækka lofthita við yfirborð um 1-2 °C. Verkefnið hófst alþjóðlega árið 1990 (G. H. Henry o.fl., 2022) og á Íslandi um 5-6 árum síðar á mosaþembum á láglendi á Þingvöllum og á hálendinu á fjalldrapasvæði á Auðkúluheiði (Ingibjörg S Jónsdóttir o.fl., 2005). Síðan ITEX hófst hefur ársmeðalhiti hækkað um það sem nemur hlýnuninni í verkefnunum víða á heimskautasvæðum, eða um 1-2 °C, og er því áhugavert að horfa einnig til þeirra breytinga sem hafa átt sér stað í samanburðarreitum án viðbótarhlýnunar. Þetta var meðal annars gert fyrir íslensku samanburðargögnin og 156 önnur köld vistkerfi fyrir tímabilið 1980 til 2010 (S. C. Elmendorf o.fl., 2012). Niðurstöður sýndu að gróska jókst almennt hjá öllum vaxtarformum æðplantna og gróðurhæð hækkaði, m.a. vegna aukinnar hlutdeidar runnagróðurs í mörgum norðlægum vistkerfum. Þessar breytingar ríma vel við þær breytingar sem greint er frá að hafi orðið almennt á Íslandi í kaflanum um gróðurfar hér að framan og í V2018. Nýrri rannsókn á áhrifum hlýnunarinnar í plastskjólunum á 117 rannsóknasvæðum ITEX, þ.m.t. á Íslandi, staðfesti þær breytingar sem orðið höfðu á samanburðarsvæðunum og sýndu að þær munu halda áfram með aukinni hlýnun (Bjorkman o.fl., 2018). Hins vegar sýndu þær einnig að framboð vatns í jarðvegi getur haft mikil áhrif, og jafnvel meiri en hlýnunin, á svæðum þar sem vatn er takmarkandi þáttur. Önnur nýleg rannsókn, sem fram fór á Íslandi og Svalbarða, sýndi að langtíma gróðurbreytingar, sem orðið hafa með hlýnuninni hafa einnig stuðlað að meiri niðurbrotsvirkni í jarðvegi og þar með hraðari hringrás næringarefna (Björnsdóttir o.fl., 2022). Það er því mikilvægt að líta til fleiri þátta en hitabreytinga eingöngu þegar áhrifa loftslagsbreytinga í framtíðinni er spáð fyrir íslenskt lífríki. Margar áhugaverðar greinar um þetta rannsóknaverkefni hafa komið út á síðustu árum (Bjorkman o.fl., 2020; Collins o.fl., 2021; Rixen o.fl., 2022).



Mynd 4.10: Unnið við mælingar á svörun jarðvegsskánar við fjögurra ára hlýnun í verkefninu CRUST. Í skýlum, sem eru opin í toppinn (OTC), hækkar sumarhitinn um 1–2 °C. Gróður og jarðvegur er mældur innan og utan skýlanna til að meta áhrif hlýnunar. (Ljósm. Alejo Salazar, birt með leyfi).

Nýtt rannsóknaverkefni, CRUST, hófst árið 2018 (sjá mynd 4.10) með sömu aðferðafræði og ITEX um áhrif hlýnunar á hálendisvistkerfi við Landmannahelli í um 600 m h.y.s. þar sem yfirborð er vaxið jarðvegsskán (*e. biocrust*) (Gunnlaugsdóttir, 2022). Samhliða hafa farið fram

rannsóknir á svörun þessa einstaka og áhugaverða vistkerfis við stýrðum umhverfisbreytingum á rannsóknastofu (Salazar o.fl., 2022). Áhugaverðra niðurstaðna er að vænta frá þessu verkefni á næstu árum.

Í rannsóknaverkefninu ForHot hafa frá árinu 2013 verið rannsökuð áhrif mislangrar jarðvegshlýnunar á samsetningu og virkni graslendisvistkerfa á láglendi í Ölfusi (Bjarni D. Sigurðsson o.fl., 2016). Alls hafa birst yfir 30 greinar í vísindaritum um þetta verkefni (ForHot, 2022). Helstu niðurstöður sýna að vaxtarferli graslendisgróðurs breytist við hlýnun (Leblans o.fl., 2017). Samfélög jarðvegsgerla og sveppa (Radujkovic o.fl., 2018; Zhang o.fl., 2020; Weedon o.fl., 2023) og smádýra (Thakur o.fl., 2023) breytast og sömuleiðis losun og upptaka metans (CH4) og nituroxíðs (N2O) (Maljanen o.fl., 2017). Þó skortir enn á aðrar rannsóknir á íslenskri náttúru til að vita hvort allar þessar breytingar hafa þegar átt sér stað í kjölfar þeirrar hlýnunar sem hér varð eftir 1990. Rannsóknirnar í ForHot sýna jafnframt að kolefnisforðinn í efri hluta graslendisjarðvegs getur tapast hratt vegna aukinnar örveruvirkni í kjölfar hlýnunar (Poeplau o.fl., 2017). Einna áhugaverðustu niðurstöður þessa verkefnis er að til lengri tíma myndast nýtt jafnvægisástand í losun jarðvegskolefnis frá yfirborðslögum í jarðvegi og að dýpri lög hans eru ekki eins viðkvæm fyrir hlýnun (Verbrigghe o.fl., 2022). Einnig myndast nýtt jafnvægisástand með tímanum í magni og virkni jarðvegsörvera og fleiri vistkerfisþáttum (Walker o.fl., 2018; Walker o.fl., 2020), sem að hluta er drifið áfram af tapi af næringarefnum út úr vistkerfinu þegar vetur hlýna (Marañón-Jiménez o.fl., 2019). Jafnframt sýna rannsóknirnar að ef hlýnunin verður meiri en sem nemur tvöföldum ársmeðalhita á síðustu öld geta afleiðingarnar fyrir starfsemi jarðvegs, örvera, dýralífs og gróðurs orðið mjög miklar (Radujkovic o.fl., 2018; Walker o.fl., 2020; Weedon o.fl., 2023).

Að lokum skal getið rannsóknarinnar í Hengladölum á Hellisheiði sem er á hálendisbrúninni í um 350-420 m h.y.s. Þessi rannsókn hefur einkum beinst að því hvernig heitur berggrunnur, sem hefur hitað upp læki á svæðinu, hefur haft áhrif á lífríki í ferskvatni á þessu svæði (sjá umfjöllun í grein 4.4.1). Á seinni árum hafa einnig hafa komið út nokkrar vísindagreinar um áhrif jarðvegshlýnunar á smádýralíf og gróður á þurrlendi í þessum hálendisvistkerfum. Niðurstöður sýna að úr fræmyndun skordýrafrævaðrar plöntutegundar dró þegar blómgunin varð fyrr að vori vegna hlýnunar, líklega vegna þess að frjóberar voru þá ekki til staðar í eins miklu magni (Valdés o.fl., 2022). Hins vegar leiddi hlýnunin til aukins vaxtar og hlutdeildar æðplantna í gróðurfarinu á kostnað mosa og til aukinnar skordýrabeitar sem lagðist misþungt á mismunandi plöntutegundir (Robinson o.fl., 2018) (Warner o.fl., 2021). Huga þarf vel að slíkum afleiddum áhrifum af hlýnun (aukinni beit og breytingum á æxlunarárangri) þegar spár eru gerðar um áhrif umhverfisbreytinga á gróðurfar framtíðar, þar sem slíkir áhrifaþættir eru líklegir til að tempra vaxtarsvörun gróðurs og ekki síður að hafa áhrif á tegundasamsetningu vistkerfa í framtíðinni.

4A Náttúrleg vistkerfi og mótvægisaðgerðir

Starri Heiðmarsson

Sem viðbrögð við loftslagsbreytingum hefur verið bent á ýmsar leiðir til að vinna gegn aukningu koldíoxíðs í andrúmsloftinu, ýmist með því að draga úr losun eða auka bindingu. Sumar aðgerðirnar fela í sér endurheimt breyttra vistkerfa með það að markmiði að náttúrulegir ferlar, sem ýmist hamla losun eða auka bindingu, eflist. Þar má nefna endurheimt gróðurlenda á þurrlendi með landgræðslu eða skógrækt til að auka bindingu, sem og endurheimt votlendis til að draga úr losun sem verður við framræslu. Aðrar aðgerðir geta valdið umtalsverðum breytingum á núverandi vistkerfum þannig að þau skerðast og rýrna eða breytast að samsetningu og virkni og ný vistkerfi hafa jafnvel komið í þeirra stað. Allajafna er um landnotkunaraðgerðir að ræða, þar sem verið er að taka land undir nýja notkun í nafni loftslagsaðgerða, t.d. vegna nýtingar á grænni orku eins og vatnsafli, jarðvarma eða vindorku, nýtingu auðlinda fyrir tæknilausnir, s.s. málma fyrir orkuskipti, þéttingu byggðar, byggingu samgönguinnviða og þegar náttúruleg gróðurlendi eru tekin undir ræktun í landbúnaði eða skógrækt með framandi tegundum.

Bent hefur verið á mikilvæg tengsl milli loftslagsbreytinga og hnignunar líffræðilegrar fjölbreytni á heimsvísu. Annars vegar eru loftslagsbreytingar einn aðalorsakavaldur hnignunar líffræðilegrar fjölbreytni þar sem þær valda örum breytingum á umhverfi og veðurfari sem viðkvæm vistkerfi þola illa. Þar má nefna áhrif vegna súrnunar sjávar, þurrka, skógarelda, flóða, sjúkdóma, breytinga á útbreiðslu tegunda o.fl. Hins vegar geta mótvægisaðgerðir, sem ætlað er að draga úr loftslagsbreytingum, haft neikvæð áhrif á líffræðilega fjölbreytni. Birtingarmynd þeirra áhrifa felst einkum í því að stuðla að eyðingu búsvæða og/eða auka útbreiðslu framandi ágengra tegunda en búsvæðaeyðing og framandi ágengar tegundir eru meðal stærstu áhrifaþátta sem valda hnignun líffræðilegrar fjölbreytni.

IPCC og IPBES (*e. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*) héldu sameiginlegan vinnufund árið 2019 um þetta fjölþátta samspil loftslagsbreytinga og hnignun líffræðilegrar fjölbreytni og í tengdri skýrslu sem kom út 2021 er áréttað að meta verði mótvægisaðgerðir gegn loftslagsbreytingum út frá áhrifum þeirra á líffræðilega fjölbreytni en ekki einungis ætlaðri bindingu koldíoxíðs (Pörtner o.fl., 2021). Þessu ákalli var fylgt eftir á fimmtánda fundi aðildarþjóða Samnings Sameinuðu þjóðanna um líffræðilega fjölbreytni (CBD COP-15) sem haldinn var í desember 2022 í Kanada. Þar var samþykkt Rammasamkomulag um verndun líffræðilegrar fjölbreytni til ársins 2030 (*e. Global Biodiversity Framework*) og fjallaði eitt af meginmarkmiðunum um samspil aðgerða samningsins við aðgerðir loftslagsmála. Þar kemur m.a. fram að það sé grundvallaratriði að komið verði í veg fyrir að loftslagsaðgerðir hafi neikvæð áhrif á líffræðilega fjölbreytni.

Skógrækt hefur verið nýtt sem leið til bindingar kolefnis en minni athygli hefur verið beint að þeim breytingum sem skógrækt getur valdið á þeim vistkerfum sem fyrir eru. Þannig samþykkti fastanefnd Bernarsamningsins, sem við Íslendingar eigum aðild að, nýlega tilmæli er vara við notkun framandi ágengra trjátegunda við kolefnisbindingu (Standing Committee, 2022). Meðal tilmæla þeirra var að hafðar væru til viðmiðunar tíu gullnar reglur fyrir kolefnisbindingu með endurheimt skóglendis (Di Sacco o.fl., 2021). Hérlendis hefur verið bent á að áhætta fylgi notkun vissra framandi trjátegunda eins og stafafuru sem nú þegar er flokkuð sem ágeng framandi tegund á Nýja-Sjálandi (New Zealand Plant Conservation Network, 2023) og í Noregi (Elven o.fl., 2018) en íslenskar rannsóknir benda til að stafafura sé líkleg til að flokkast sem ágeng framandi tegund hérlendis (Wasowicz o.fl., 2022). Í síðustu skýrslu (V2018) var bent á að framandi ágengar tegundir séu líklegri til að valda breytingum á íslenskum vistkerfum með loftslagsbreytingum (Wasowicz o.fl., 2013).

Í áðurnefndri skýrslu IPBES var áréttað að greinarmun þarf að gera á friðun náttúrulegra skóga og endurheimtar þeirra og síðan nytjaskógrækt með aðfluttum tegundunum. Í þessu samhengi má einnig benda á þann staðbundna erfðafræðilega mun sem íslenskir birkiskógar sýna (Pálsson o.fl., 2022; Thórsson o.fl., 2010) sem ætti að vera hvatning til að nýta staðbundna stofna við endurheimt birkiskóga.
Fjallað er um framandi og ágengar tegundir í grein 4.1.3 og rétt er að ítreka þá niðurstöðu að eðlilegt megi teljast að varúðarreglan sé höfð í huga þegar ákvarðanir eru teknar um dreifingu aðfluttra tegunda sem mótvægi við loftslagsbreytingar og þess gætt að mótvægisaðgerðirnar orsaki ekki hnignun líffræðilegrar fjölbreytni.

4.2 Ræktun á landi

4.2.1 Hefðbundinn landbúnaður

Segja má að hinn hefðbundni íslenski landbúnaður, þar sem byggt var á dýrahaldi sem komst af með lágmarksuppskeru af vetrarfóðri hafi verið aðlögun að kólnandi veðurfari og veðurfarssveiflum fyrri alda. Sauðfjárræktin, sem enn er undirstöðuatvinnuvegur í mörgum dreifðum byggðum, náði sögulegu hámarki í fjölda sauðfjár árið 1978. Árið 2021 var sauðfjárstofninn einungis 43% af því sem mest varð (Hagstofa Íslands, 2022) og enn hallar undan í þessari undirstöðubúgrein (Jóhannes Sveinbjörnsson og Daði Már Kristófersson, 2021). Þessi samdráttur hefur verið drifinn áfram af markaðsaðstæðum en ekki áhrifum loftslagsbreytinga eða aðlögunar að þeim. Svipaða sögu má segja um hrossarækt hérlendis sem getur almennt komist af með lágmarksfóðrun að vetri og áhrif loftslagsbreytinga því takmörkuð á hana. Á Grænlandi, þar sem sauðfjárrækt hefur farið fram með fé af íslenskum uppruna í um 100 ár, hafa aðstæður til slíks búskapar hins vegar verið nær loftslagsmörkum sínum og áhrif hlýnunar frá köldu árunum milli 1960 og 1990 verið greinilegri (Westergaard-Nielsen o.fl., 2015). Til dæmis hefur nú hafist kartöflu- og sauðfjárrækt við Nuukfjörð þar sem Vestribyggð norrænna manna var staðsett á hlýskeiði miðalda (mynd 4.11) og þar skapast á ný umhverfisaðstæður sem gætu staðið undir mun meiri þróun í landbúnaði, eins og nýlega hefur verið sýnt fram á með hjálp hermilíkana (Westergaard-Nielsen o.fl., 2015).

Bein áhrif loftslagsbreytinga á bæði sauðfjárrækt og hrossarækt eru einkum falin í „ótímabærum“ hauststormum með mikilli ofankomu eða óvenjusterkum vetrarstormum. Slíkir hauststormar hafa valdið afföllum í sauðfjárræktinni, eins og til dæmis gerðist á norðanverðu landinu í september 2012 (mynd 4.12) og mikill vetrarstormur í desember 2019 olli talsverðum hrossadauða á norðanverðu landinu (Soffía Helga Valsdóttir, 2022). Svona atburðir munu ekki hverfa í nánustu framtíð samkvæmt reikningum byggðum á losunarsviðsmyndum.



Mynd 4.11: Bóndinn Angutimmarik Hansen býr á eina sauðfjárbýlinu við Nuukfjörð, bænum Neriunaq, þar sem hann hefur einnig nýlega hafið kartöflurækt. (Ljósm. Bjarni Diðrik Sigurðsson, birt með leyfi).

Þetta má sjá á mynd 3.5 og í töflu 3.3 sem sýna að í 5% tilvika á tímabilinu 2046-2055 komu fram ár sem voru kaldari en meðaltal áranna 1986-2015 fyrir allar sviðsmyndir nema þá heitustu. Jafnvel má ætla að svona vandamál gætu aukist þegar tíðarfar hlýnar mest að hausti og vetri (sjá mynd 3.9) sem mun gera það líklegra að búsmali sé utanhúss síðla hausts og að vetrarlagi.



Mynd 4.12: Gimbur sem grafin hafði verið upp úr snjóskafli borin í skjól. (Ljósm. Vikublaðið 11. sept 2012, birt með leyfi).

Mjólkurframleiðsla og nautgriparækt hefur hins vegar alltaf verið háð öruggri og góðri fóðurframleiðslu og því ætíð verið mjög loftslagsháð búgrein. Það er einkum í kringum nautgriparæktina sem t.d. kornræktin er að þróast á Íslandi.

Kalskemmdir á túnum vegna svellalaga að vetri voru löngum eitt helsta vandamálið í fóðurframleiðslu hefðbundna landbúnaðarins en samfara hlýnandi vetrarveðri síðustu 35 árin ber á landsvísu mun minna á þessu vandamáli en áður (V2018). Þó hafa nokkrir kaldari vetur á síðasta áratug, með svellalögum sem lágu lengi á túnum á láglendi norðanlands og austan, valdið talsverðum búsifjum þar (Guðmundur H. Gunnarsson, 2021). Framreikningar á ársmeðalhita, að gefnum forsendum um losun gróðurhúsalofttegunda, hjálpa lítið til að meta kalhættu í túnum, þar skiptir árstíðarsveiflan í hlýnun meginmáli. Hvort niðurstöður kafla 3 um vetrarhita boða breytta tíma hvað varðar svellkal veltur á því hvaða losunarsviðsmynd gengur eftir. Mynd 3.9 sýnir þó að jafnvel í köldustu losunarsviðsmyndinni (SSP1-2.6) hækkar vetrarhiti um 1,5 °C að jafnaði í lok aldarinnar sem gerir það ólíklegra að svellalög verði langlíf á túnum á láglendi. Hins vegar sýna þá 5-20% loftslagslíkananna að enn geti komið kaldari vetur en urðu að meðaltali 1986-2015. Gangi SSP3-7.0 losunarsviðsmynd eftir mun vandamálið í vetrarköldustu innsveitum norðan og austanlands væntanlega nánast hverfa á næstu áratugum og í lok aldarinnar mun vetrarhitinn hafa hækkað um 3,5 °C að jafnaði og spönnin fyrir köldustu líkönin nær ekki lengur meðalhita áranna 1986-2015 (mynd 3.9). Kalhætta getur þó haldist lengur á láglendi ef bændur taka að rækta meira af túngrösum með minna vetrarþol.

Rannsóknir hafa sýnt að heyfengur í túnrækt jókst að jafnaði um 610-770 kg þurrefnis á ha, eftir grastegundum, fyrir hverja gráðu sem vetrar- og vorhiti hækkaði (Guðni Þorvaldsson og Hólmgeir Björnsson, 1990), að talið er m.a. vegna meiri losunar næringarefna þegar jarðvegur frýs ekki að vetri og er hlýrri fram á sumar. Þess má geta í þessu sambandi að jarðvegshiti á 50 og 100 cm dýpi hefur hækkað um 0,4 °C á áratug síðan 1980 á Hveravöllum á Kili (Guðrún Nína Petersen og Derya Berber, 2018) og almennt hefur gróska aukist í úthaga á Íslandi á sama tímabili (V2018). Fleira en hitafar hefur þó áhrif á túnsprettu og hafa rannsóknir sýnt að lengd vaxtartíma, sólarstundir og framboð vatns í jarðvegi eru allt mikilvægir þættir við íslenskar aðstæður (Guðni Thorvaldsson o.fl., 2004). Hvernig heyfengur á hektara þróast í hlýnandi veðurfari framtíðar verður væntanlega fremur fall af fjölda slátta sem lengri vaxtartími leyfir eða með breytingum á tegundum eða yrkjum grasa sem rækta má við breytt veðurfar (Solberg o.fl., 2016). Hins vegar geta einnig nýir umhverfisþættir orðið takmarkandi fyrir uppskeru túngrasa (V2018). Á hlýjustu árunum í kringum 2010 urðu talsverðir vorþurrkar á vestanverðu landinu

sem ollu vandamálum í tún- og kornrækt þar sem ræktunin fer fram í sendnum jarðvegi (Þórdís A Kristjánsdóttir, 2013), svo mjög að nokkrir bændur fjárfestu í búnaði til vökvunar á akurlendi. Einnig má benda á mikla þurrka á Austurlandi sumarið 2021 sem ollu vandamálum í ræktun (Björn Þór Björnsson, 2021; Rúnar Snær Reynisson, 2021). Ef niðurstöður fyrir sviðsmyndir SSP2-4.5 og SSP3-7.0 eru skoðaðar á mynd 3.4 má vænta þess að að ársúrkoma aukist lítillega með hlýnandi veðurfari, eða allt að 3% í lok aldarinnar fyrir hlýrri sviðsmyndina. Hins vegar er líklegt að breytileiki í úrkomu verði áfram mikill og til dæmis má sjá í töflu 3.5 að á tímabilinu 2046–2050 sýna 25% loftslagslíkana að ársúrkoma gæti orðið um 2,4% minni en hún var á árunum 1986–2015. Ef veðurfar hlýnar eykst útgufun og meiri úrkomu þarf til að viðhalda sama rakastigi í jarðvegi og áður, þannig að áhrif á ræktun geta orðið neikvæð ef úrkomuaukningin er ekki næg. Í nýrri bók um íslenskan jarðveg er slík aukin þurrkáhætta einmitt tekin upp sem líklegust neikvæð áhrif loftslagsbreytinga á ræktun nytjajurta hérlendis (Þorsteinn Guðmundsson, 2018). Mikil þörf er á að laga hermilíkön að íslenskri jarðrækt til að skoða sameiginleg áhrif hitafars og úrkomu betur.

Ýmsar nytjategundir eru á mörkum þess að geta vaxið hérlendis og því þarf að endurskoða umtalsvert af ræktunartilraunum sem fram fóru á köldu árunum 1960–1990 (V2008, V2018). Tegundir, sem áður höfðu verið nánast afskrifaðar, sýna nú að þær þrífast með ágætum þar sem nærveður er hagstæðast. Mesta vandamálið hér fyrir margar norðlægar fjölærar nytjajurtir í jarðrækt og matvælaframleiðslu er hins vegar ekki kalt veðurfar, heldur fremur hversu umhleypingasamir veturnir eru og með miklum hitasveiflum. Þetta veldur því að mörgum slíkum fjölærum tegundum hættir til að vakna of snemma úr vetrardvala að vori og vaxa of lengi fram á haustið og hlýnandi veðurfar næstu áratuga mun trauðla breyta þessu vegna þeirra miklu sveiflna í hitafari sem einkenna veðurfarið hérlendis (Solberg o.fl., 2016). Það eru einkum sumareinærar tegundir sem munu geta nýtt sér hlýnandi veðurfar, svo sem korn (bygg; þarf >1100 gráðudaga til að nýtast sem skepnufóður og 1200 til að ná fullum kornþroska; mynd 4.13), hafrar og einær nepja (>1400 gráðudaga), einær repja og sumarhveiti (þurfa >1600 gráðudaga) sem munu aukast í ræktun hérlendis á næstu áratugum.



Mynd 4.13: Kornakur (bygg) í Vallanesi á Fljótsdalshéraði. (Ljósm. Bjarni Diðrik Sigurðsson, birt með leyfi).

Líklegt er að loftslagsbreytingar og aukin eftirspurn eftir fljótandi lífeldsneyti muni hafa jákvæð áhrif á ræktunarmöguleika ýmissa orkuplantna á Íslandi. Í sérgrein 4B er einmitt fjallað um hvernig líklegt er að ræktunarsvæði m.a. vetrarrepju og nepju muni breytast út öldina vegna hlýnunar. Það geta einnig falist tækifæri fyrir landbúnaðinn að nýta alls kyns ónýttan lífmassa til framleiðslu lífolíu. Gerð hefur verið greining á möguleikum og landrými til aukinnar lífmassa- og orkuplöntuframleiðslu á S- og NA-landi (Hólmgeir Björnsson, 2007). Að hluta til má koma slíku fyrir á landbúnaðarlandi sem fallið hefur úr ræktun, en það eru um 7000 ha frá 1984. Meginhluta lífmassans þyrfti samt að afla á landi sem er ræktað sérstaklega til þess.

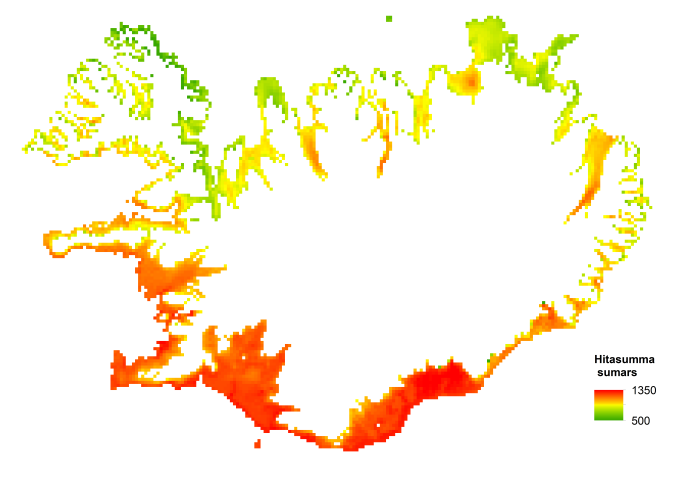
Hlýrri vor og lengri vaxtartími fram á haustið hafa sannarlega nú þegar aukið möguleikana á að rækta margar tegundir í jarð- og garðrækt hér á landi. Í þeirri bylgju nýsköpunar sem nú gengur yfir samfélagið er nú unnið að verkefnum þar sem prófuð er ræktun ýmissa nytjajurta, svo sem á iðnaðarhampi (Vilmundur Hansen og Sigurður Jóhannesson, 2021; Þóroddur Sveinsson, 2022), olíunepju og repju (Sunna Skeggjadóttir o.fl., 2022a), höfrum (Sunna Skeggjadóttir o.fl., 2022b), hunangsberjum (Steinunn Garðarsdóttir o.fl., 2022), vetrarrúgi, og vor- og vetrarhveiti (Þóroddur Sveinsson, 2022), til að nefna nokkrar.

4B Ræktunarskilyrði í dag og í framtíðinni

Bjarni Diðrik Sigurðsson og Halldór Björnsson

Á mynd 4.14 sést gróft mat á meðalræktunarskilyrðum á láglendi landsins (<200 m y.s.) á tímabilinu 1986-2015, metin með gögnum frá Carra endurgreiningunni (Schyberg o.fl., 2020). Landsmeðaltalið á þessu tímabili var 1050 gráðudagar (°C x dag fyrir vaxtartímann 15. maí til 15. september). Að meðaltali var lægri hiti á rúmlega helmingi láglendis Íslands en þarf til að korn mætti rækta til fóðurs á þessu tímabili. Hins vegar hlýnaði umtalsvert á seinni hluta þessa tímabils (mynd 4.15) og ræktunarskilyrði fyrir t.d. kornrækt bötnuðu að sama skapi (V2018). Á hlýjustu svæðunum voru meðalræktunarskilyrði allt að 1300-1350 gráðudagar 1986-2015, sem þýðir að oftar en ekki mátti rækta korn til fulls þroska (>1200 gráðudagar). Hlýjustu svæðin eru á landinu sunnan- og vestanverðu, en þrengri dalir á norðan- og austanverðu landinu koma ekki eins skýrt fram á mynd 4.14 og vænta mætti þar sem margir reiknireitir Carra sem sýndir eru á myndinni eru þar samsettir, bæði dalbotnum og hlíðum fjalla. Einnig er mikilvægt að taka fram hér að hitafar gefur einfaldaða mynd af ræktunarskilyrðum og aðrir þættir, svo sem úrkoma, vindálag og fjöldi sólríkra daga, geta einnig skýrt breytileika milli svæða (Páll Bergþórsson, 1996; Guðni Thorvaldsson o.fl., 2004).

Á mynd 4.15 má sjá líklega mánaðarlega þróun á daggráðum (gróflega áætluðum ræktunarskilyrðum) alls láglendis landsins frá 1986 til 2100 samkvæmt fjórum sviðsmyndum (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SPP3-7.0 og SPP4-8.5) og með 25 líkönum. Kassarit eru sýnd fyrir meðaltöl áratuganna 2046–2055 og 2091–2100. Niðurstöður sýna að fjöldi gráðudaga eykst að jafnaði úr 1050 á láglendi Íslands í 1172, 1192, 1269 og 1269 í sviðsmyndunum fjórum árið 2050, eða um 12%, 14%, 21% og 21%. Það þýðir að í stað þess að rækta megi korn til skepnufóðurs á ríflega helmingi landsins má rækta það til fulls kornþroska til manneldis á um helmingi þess í þremur hlýjari sviðsmyndunum. Samsvarandi meðaltal fyrir 2095 gefur að jafnaði 1186, 1281, 1436 og 1436 gráðudaga, eða um 13%, 22%, 37% og 37% hækkun frá meðalræktunaraðstæðum sem voru 1986-2015, og þá er hægt að rækta t.d. hafra til fulls þroska á um helmingi láglendis að jafnaði í tveimur hæstu sviðsmyndunum. Eins og mynd 4.14 sýnir þá eru hlýjustu sveitir landsins með um 250-300 fleiri daggráður en landsmeðaltalið, sem þýðir að á þeim svæðum verða ræktunarskilyrði orðin gjörbreytt frá því sem nú er, jafnvel þó að tveggja gráðu markmiði Parísarsamningsins verði náð.



Mynd 4.14: Hitasumma sumars frá 15. maí til 15. september á tímabilinu 1986 - 2015. Einingar eru °C × dag. Byggt á ICRA-greiningunni. Meðaltal fyrir landið og tímabilið er 1050 °C × dag.



Mynd 4.15: Breytingar á hitasummum í sviðsmyndunum fjórum. Þær eru reiknaðar fyrir vaxtartímann 15. maí til 15. september og einingin er °C × dag. Gert er ráð fyrir að á viðmiðunartíma sé summan 1050 °C × dag.

4.2.2 Garðyrkja

Ekkert almennt yfirlit hefur enn verið unnið um núverandi loftslagsáhrif á garðyrkju utanhúss frá útkomu V2018. Eftirfarandi eru örfáar nýjar viðbætur við það sem þar kom fram.

Í garðyrkjunni hafa orðið miklar breytingar eftir að tók að hlýna upp úr 1990 sem má rekja til breytinga á veðurfari. Einnig hafa orðið miklar sveiflur í matjurtarækt utanhúss á sama tíma, en þær kunna að hafa verið drifnar af breytingum á markaðsaðstæðum frekar en sveiflum í veðurfari. Þó skortir rannsóknir á því (V2018). Ræktun á vorblómstrandi aldintrjám var lengi á mörkum hins mögulega á Íslandi (mynd 4.16). Segja má að fyrsti vísir að slíkri ræktun hafi hafist á hlýjustu árunum milli 1930 og 1950, en öll sú ræktun þurrkaðist út á kalda tímabilinu milli 1960 og 1990, en hófst svo á ný um síðustu aldamót. Í innlendri rannsókn kom fram sterk jákvæð fylgni milli ársmeðalhita einstakra ára og fjölda ritaðra frétta um eplarækt hérlendis (Hraundís Guðmundsdóttir, 2013). Nokkrir umhleypingasamir vetur og vor á síðasta áratug, m.a. 2023, hafa þó valdið skakkaföllum á ýmsum tegundum fjölærs garðagróðurs. Slíkur breytileiki í veðurfari síðla vetrar og að vori er og verður áfram takmarkandi þáttur fyrir þrif margra garðtegunda hér.

Eins og fram kom í V2018 hafa hlýnuninni síðustu 30 árin einnig fylgt talsverðar áskoranir í garðyrkjugeiranum. Áður voru sumarblóm til dæmis einungis gróðursett einu sinni að sumri í skrautbeð, en nú þarf að endurnýja þau allt að tvisvar sinnum vegna lengri og hlýrri vaxtartíma. Illgresissamkeppni hefur einnig aukist mikið í frjósömu landi sem kallar á stóraukna umhirðuþörf í garðyrkju hérlendis. Einnig hefur aukin gróska og hlýindi valdið því að ýmis meindýr og plöntusjúkdómar hafa sótt í sig veðrið frá því sem var á köldu árunum milli 1960 og 1990 (V2018).

Enn er langt í land þegar kemur að rannsóknum og spám um áhrif loftslagsbreytinga á garðyrkju og ræktun matvæla og annarra nytjajurta utanhúss hérlendis og hvers konar aðlögunar sé þörf.

4.2.3 Viðbrögð landbúnaðar og garðyrkju við loftslagsbreytingum

Frá því að V2018 kom út hefur meðvitund og áhugi landbúnaðar- og garðyrkjugeirans á loftslags- og sjálfbærnimarkmiðum tvímælalaust aukist stórlega. Þannig hafa tvö stærstu búgreinasamböndin, sauðfjár- og nautgriparæktar, látið vinna úttekt á loftslagsáhrifum og greiningu á því hvernig mögulega má draga úr þeim (Björgvin Brynjarsson o.fl., 2020; Sigrún Hallsdóttir og Stefán Gíslason, 2017; ANR, 2020). Þessi vinna hefur fengið marga bændur til að horfa á ýmsa þætti í rekstri búa sinna með nýjum augum, en jafnframt skapað mikla og gagnlega umræðu, jafnt í fræðasamfélaginu sem og meðal bænda, um stöðu þekkingar á kolefnishringrás landsins og áhrif landnýtingar á hana (sjá t.d. (Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson, 2020; Þóroddur Sveinsson o.fl., 2022; Ólafur Arnalds, 2023). Hluti af auknum áhuga á sjálfbærni er einnig nýleg vinna um fæðuöryggi landsins (Erla Sturludóttir o.fl., 2021) og eflingu kornræktar hérlendis (Egill Gautason o.fl., 2023). Hins vegar hefur ekki farið fram almenn úttekt á núverandi og væntanlegum áhrifum loftslagsbreytinga á íslenskan landbúnað síðan á árunum 2004-2007 (Bjarni E. Guðleifsson, 2004; Haraldur Ólafsson o.fl., 2007), ef undan er skilið almennt yfirlit fyrir jarðrækt og plöntukynbætur á norðurslóðum sem kom út árið 2016 (Solberg o.fl., 2016). Einnig vantar greiningu á því hvernig opinber loftslagsmarkmið munu hafa áhrif á landbúnað og garðyrkju hérlendis.

Til að auka skilning á mögulegum afleiðingum loftslagsbreytinga á landbúnað á komandi áratugum er mikilvægt að laga hermilíkön (*e. process based simulation models*) að íslenskum aðstæðum og nýta til þess fyrirliggjandi loftslagsspár (sjá mynd 3.16) til að herma hvaða áhrif þær munu hafa á mismunandi búgreinar. Enn sem komið er hefur slíkt einungis verið unnið að hluta fyrir skógrækt (Bergh o.fl., 2003).

4.2.4 Skógrækt og landgræðsla

4.2.4.1 Skógrækt

Eins og farið var nokkuð ítarlega yfir í V2008 og V2018 eru bæði innlendar og innfluttar trjátegundir hér nálægt norðurmörkum útbreiðslu sinnar og svara því nokkuð sterkt hækkandi hitafari í vexti sínum og útbreiðslumöguleikum, ef aðrir takmarkandi þættir eins og búfjárbeit leyfa. Landsskógaúttekt hófst á Íslandi á 8. áratugnum og eftir 2001 hefur slík úttekt farið fram reglulega, bæði á ræktuðum skógum og á náttúrulega birkiskóginum (Arnór Snorrason og Bjarki Þór Kjartansson, 2004). Samkvæmt þeim hefur skóglendi, bæði náttúrulegt og ræktað, náð 2% af heildarflatarmáli landsins eða um 4% af láglendi undir 400 m y.s. (A. Snorrason, 2020). Þar af eru náttúrulegir skógar og kjarrlendi 3% láglendis, en ræktaðir skógar (skv. skógaskilgreiningu FAO), sem ná a.m.k. 5 m hæð fullvaxnir, þekja nú 1% láglendis, eða um 51 þúsund hektara.



Mynd 4.16: Epli í garði Jóns Guðmundssonar á Akranesi. Ljósm. Jón Þórir Guðmundsson, birt með leyfi

Skóglendisþekja upp á 2% er að minnsta kosti tvöföldun frá því að flatarmál skóglendis hér varð minnst á fyrsta þriðjungi síðustu aldar. Ástæðurnar fyrir þessari aukningu eru fyrst og fremst ákvarðanir stjórnvalda og einkaaðila um stjórnun landnýtingar. Á landsvísu hafa náttúrulegir birkiskógar aukið útbreiðslu sína með sjálfsáningu um 11% frá 1989 (Arnór Snorrason o.fl., 2016; A. Snorrason, 2020), og nú sést slík nýliðun birkis bæði í beitarfriðuðu landi (t.d. Behrend, 2019; Borgþór Magnússon o.fl., 2022a) og einnig í landi þar sem einhver beit búsmala er stunduð (t.d. Friðþór Sófus Sigurmundsson o.fl., 2012; Óskarsdóttir o.fl., 2022). Ekki er að fullu ljóst af hverju mun meira ber á sjálfsáningu birkis á seinni árum utan girðinga. Eru það betri veðurfarsaðstæður sem valda því að fræframleiðsla birkis eykst og þar með líkur á að einhverjar fræplöntur komist upp, eða er það aðallega vegna fækkunar búsmala í högum á sama tíma? Það að birkið hefur tekið mikið við sér vegna þeirra loftslagsbreytinga sem hafa orðið eftir 1990 er hins vegar ekki vafi (A. Snorrason, 2022a). Enn er þó skipulögð skógrækt meginástæðan fyrir því að flatarmál skóglendis eykst hérlendis. Árleg sjálfsáning birkiskóga var um 40 ha á árabilinu 1990-2020, miðað við um 1000 ha árlega nýgróðursetningu ræktaðra skóga (A. Snorrason, 2020). Nýjasta spá um nýskógrækt og náttúrulega útbreiðslu birkis gerir ráð fyrir að þekja allra skóga og kjarrs gæti aukist í 2,8% af heildarflatarmáli landsins árið 2040, eða í um 5,5% af láglendi landsins (A. Snorrason, 2022a).

Á undanförnum misserum hefur talsverð umræða verið um sjálfsáningu innfluttra trjátegunda utan við skipulögð skógræktarsvæði (Sjá einnig box: Náttúruleg vistkerfi og mótvægisaðgerðir) og hvort hún ógni öðru lífríki. Íslensk skógarúttekt (ÍSÚ) hóf árið 2022 sérstaka úttekt á því á landsvísu og það ár var þetta mælt sérstaklega á 89 flötum í jaðri skógræktarsvæða, völdum af tilviljun um allt land (A. Snorrason, 2022b). Þar kom í ljós að sjálfsáning út fyrir kortlögð skógræktarsvæði fannst í 8% tilfella og þar af voru 7% með innlendum tegundum. Þessari úttekt verður haldið áfram og þá fást betri tölulegar upplýsingar um tíðni sjálfsáningar innfluttra trjátegunda á landsvísu, en fyrri úttektir hafa einkum beinst að einum og einum völdum rannsóknastað þar sem sjálfsáningar hefur orðið vart (Eggertsson o.fl., 2022; Brynjólfur Brynjólfsson, 2023).

4.2.4.2 Meindýr og plöntusjúkdómar

Eins og fram kemur í grein 4.1.2.1 hefur nýjum tegundum skordýra, sem leggjast á tré og runna, tekið að fjölga mikið með hlýnandi veðurfari, eftir að fjöldi þeirra stóð nánast í stað á köldu árunum milli 1960 og 1990 (Halldórsson o.fl., 2013b). Þessi þróun hefur haldið áfram og árið 2018 var vitað um 29 tegundir skordýra/liðfætla sem höfðu borist hingað frá þarsíðustu aldamótum en þremur nýjum meindýrategundum hafði tekist að eyða (sjá 4.19). Um þetta var fjallað í nýlegri rannsókn (Guðmundur Halldórsson o.fl., 2019b) sem (mynd 4.19) er fengin úr.

> „*Mikið landnám skógarmeindýra á undanförnum þremur áratugum er áhyggjuefni, einkum þar sem þar á meðal eru tegundir sem þegar hafa valdið verulegu tjóni í skóg- og garðrækt og aðrar sem full ástæða er til að óttast að verði vaxandi vandamál. Hlýnandi loftslag, aukinn innflutningur á ýmsum varningi og mikil fjölgun ferðamanna eykur hættu á að landnám meindýra fari enn vaxandi og gæti haft veruleg áhrif á skógrækt, landgræðslu og landbúnað hér á landi, að ónefndri hættunni sem íslenska birkivistkerfið gæti staðið frammi fyrir.*“ bls. 37.

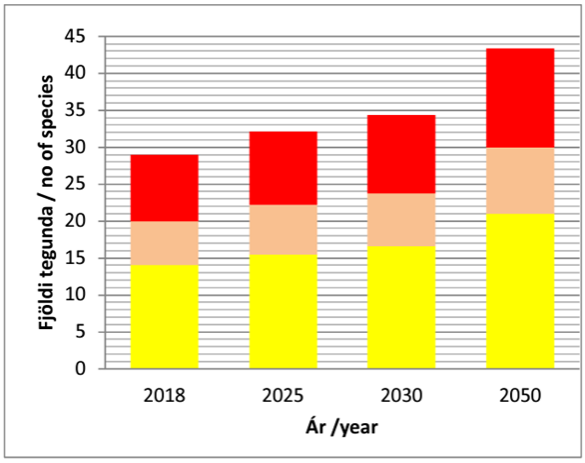
Í sömu samantekt er spáð að fjöldi meindýra á trjám og runnum geti aukist um tæplega 50% til ársins 2050 miðað við áframhaldandi hlýnun og ferðamannastraum (mynd 4.18). Í V2018 kom fram að jákvæð áhrif loftslagsbreytinga á vöxt og útbreiðslu skóga hafi hingað til gert meira en að vega áhrif þessara skaðvalda upp. Guðmundur Halldórsson o.fl. (Guðmundur Halldórsson o.fl., 2019a) benda hins vegar á að áhrif margra þeirra skordýrategunda sem nýlega hafa borist til landsins séu ekki að fullu komin fram og einnig benda þeir á nýleg erlend dæmi þess að loftslagsbreytingar hafi aukið útbreiðslu skaðvalda sem aftur hefur leitt til skógareyðingar á margfalt stærri svæðum en allir skógar Íslands þekja.



Mynd 4.17: Birkiþéla er blaðvesputegund sem fannst hér fyrst árið 2016 og hefur breiðst hratt út um landið. Lirfa hennar holar innan birkiblöð eftir mitt sumar. Birkikemba er lítil fiðrildategund með lirfu sem veldur mjög líkum skemmdum á birki snemmsumars, en sú tegund fannst hér fyrst árið 2005. (Ljósm. Brynja Hrafnkelsdóttir, birt með leyfi).

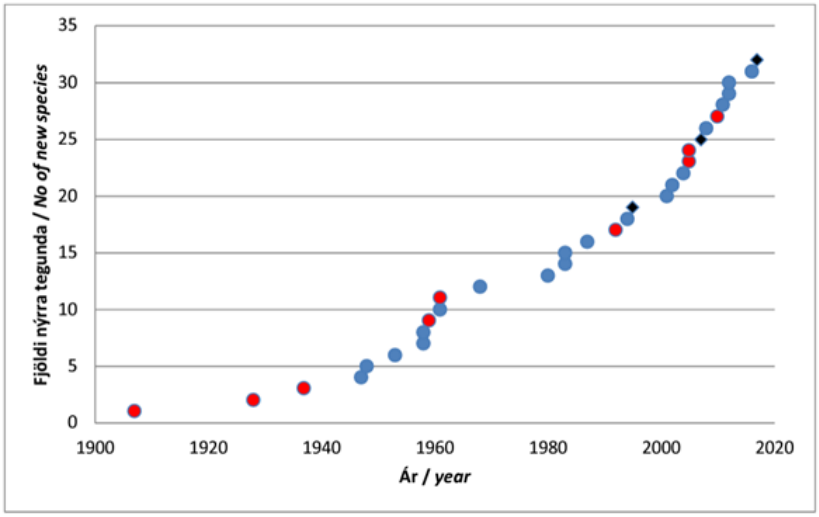
Nýjasta dæmið um slíkar loftslagstengdar hamfarir er yfirstandandi faraldur barkarbjallna í Svíþjóð sem hófst eftir fordæmalausa þurrka sem urðu þar sumarið 2018 og áætlað er að hafi valdið afföllum á rauðgreni sem nam 24% af ársvexti þess í allri Mið- og Suður-Svíþjóð á árinu 2021 (Schroeder og Kärvemo, 2022). Einnig má nefna söguleg dæmi frá Íslandi um ákveðnar trjátegundir eins og skógarfuru, sem hafa nánast þurrkast út hér í kjölfar slíkra faraldra innfluttra meindýra (Heiðarsson o.fl., 2020).

Það er því full ástæða að hafa varann á hvað þetta varðar og mikilvægt að ræktendur geri sér grein fyrir þessari hættu og leiti leiða til að bregðast við henni. Heiðarsson o.fl. (2020) telja mikilvægt að greina helstu áhættuþætti á innflutningi nýrra skaðvalda til að geta dregið úr líkum þess að þeir nemi hér land og gera viðbragðsáætlanir til að útrýma nýjum skaðvöldum á fyrstu stigum landnáms. Guðmundur Halldórsson o.fl. (2019b) nefna dæmi um að slíkt hafi tekist í þremur tilfellum hingað til (mynd 4.19), sem sýnir að það er raunhæf aðgerð.



Mynd 4.18: Ætluð fjölgun nýrra skógarmeindýra fram til ársins 2050. Gult sýnir tegundir sem valda litlu eða engu tjóni, gulbrúnt tegundir sem valda verulegu tjóni og rautt tegundir sem valda miklu tjóni og trjádauða. (Guðmundur Halldórsson o.fl., 2019b, birt með leyfi).

Af þeim tegundum skaðvalda sem nýlega eru komnar til landsins má nefna tvær sem leggjast á birki (Hrafnkelsdóttir og Oddsdóttir, 2019). Það eru birkikemba (*Heringocrania unimaculella*) og birkiþéla (*Scolioneura betuleti*), en báðar hafa lirfustig sem lifir innan í laufblöðum birkis og étur blöðin innan frá og dregur þannig úr vaxtarþrótti birkisins (mynd 4.17). Birkikemban fannst hér fyrst árið 2005 en birkiþélan árið 2016 og báðar þessar tegundir hafa breiðst hratt um landið. Lirfa birkikembunnar veldur skemmdum snemmsumars og reynslan hefur sýnt að trén jafna sig nokkuð vel eftir faraldra hennar einnar. Lirfur birkiþélunnar klekjast hins vegar síðar að sumrinu og valda skemmdum eftir mitt sumar. Enn ríkir óvissa um hver munu verða langtímaáhrif þessara nýju skaðvalda þar sem báðar tegundir verða landlægar og faraldur beggja tegunda verður á sama ári, en það er áhyggjuefni þar sem birki er lykiltegund í íslenskum vistkerfum.

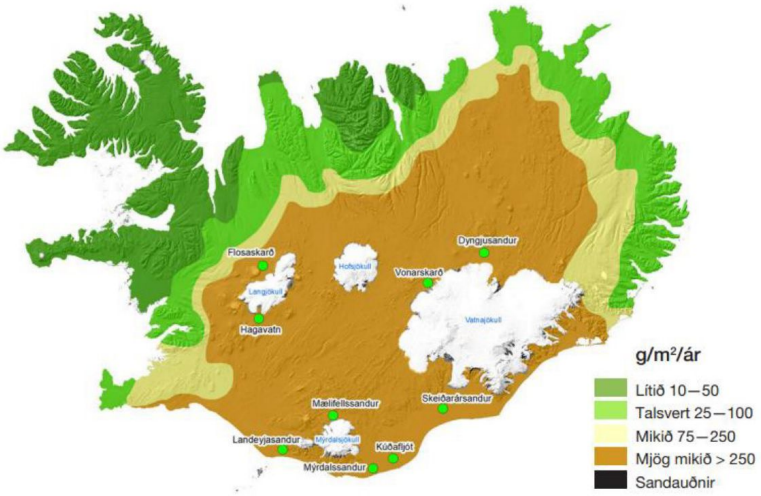


Mynd 4.19: Ný meindýr á trjám og runnum á Íslandi frá 1900. Rauð tákn eru tegundir sem valda miklu tjóni. Blá tákn eru tegundir sem valda töluverðu eða litlu tjóni. Svört tákn eru tegundir sem hafa numið land en hefur tekist að útrýma. (Guðmundur Halldórsson o.fl., 2019b, birt með leyfi).

4.2.4.3 Landgræðsla

Sameinuðu þjóðirnar hafa útnefnt þennan áratug (2021-2030) „Áratug endurheimtar vistkerfa“(*e. UN Decade on Restoration*) sem ætti að efla slíkt starf á Íslandi enn frekar. Frá því að V2018 kom út hóf Landgræðslan nýtt og umfangsmikið vöktunarverkefni á gróðri og jarðvegi á Íslandi, GróLind, sem mun samanstanda af ríflega 1000 vöktunarreitum þegar uppsetningu verður lokið með áherslu á að tengja mæligögn við fjarkönnun og skráningu landeigenda sjálfra um ástand lands í um smáforrit. Samhliða vöktuninni fara fram mælingar á sauðfjárbeit og kortlagning beitilanda í samstarfi við bændur (Marteinsdóttir o.fl., 2021). Þetta, og önnur ný vöktunarverkefni á öðrum stofnunum, munu nýtast vel til að fylgjast með breytingum á gróðri og jarðvegi af völdum loftslagsbreytinga í framtíðinni.

Ýmsar nýjar rannsóknir á áhrifum beitar búsmala á gróðurfar hafa einnig verið unnar á síðustu árum (t.d. Marteinsdóttir o.fl., 2017; Baldvinsdóttir o.fl., 2020) og nú standa yfir rannsóknir á því hvernig samspil búsmala og villtra beitardýra getur haft áhrif á gróðurfar (Barrio o.fl., 2022; Boulanger-Lapointe o.fl., 2022) og á kolefnisforða jarðvegs (Anna Guðrún Þórhallsdóttir, pers. uppl.). Aukinn skilningur á áhrifum beitar gerir okkur kleift að skilja betur áhrif loftslagsbreytinga, þar sem báðir þessir þættir hafa samtímis umtalsverð áhrif á náttúruna, ýmist samvirk eða gagnvirk. Stofnar villtra beitardýra, bæði spendýra og skordýra, stjórnast einnig að hluta af veðurfarsaðstæðum og því skýra loftslagsbreytingar stundum sveiflur í náttúrulegu beitarálagi. Gott dæmi um það er aukin útbreiðsla innlendu fiðrildategundarinnar ertuyglu á síðustu þremur áratugum, en faraldrar hennar geta haft talsverð áhrif á lifun og æxlunarárangur vissra plöntutegunda (Brynja Hrafnkelsdottir o.fl., 2019b). Einnig er hafin vinna við notkun hermilíkana til að skilja betur langtímaáhrif beitar og annarrar landnýtingar (Barrio o.fl., 2018; Mulloy o.fl., 2021). Þörf er á frekar rannsóknum á því.



Mynd 4.20: Dreifing áfoks á Íslandi mælt í g/m2/ári. Grænu punktarnir sýna mikilvirkustu uppblásturssvæðin. Endurgert eftir korti frá 2010 (Ólafur Arnalds, 2010; Ólafur Arnalds o.fl., 2019b).

Umtalsverðar rannsóknir hafa farið fram á síðustu árum á áhrifum uppblásturs á áfok ryks í ólíkum landshlutum, en alls berast árlega um 30-40 milljón tonn af ryki upp í andrúmsloftið frá auðnum Íslands (Olafur Arnalds o.fl., 2016; Ólafur Arnalds o.fl., 2019a; Ólafur Arnalds o.fl., 2019b; Meinander o.fl., 2022). Slíkt áfok leiðir ekki bara til jarðvegsþykknunar þar sem það lendir, heldur hefur margvísleg önnur áhrif á bæði samfélag manna (loftgæði og öryggi) og á náttúruna. Sem dæmi hefur verið sýnt fram á að varpþéttleiki bæði votlendis- og landfugla hérlendis, hefur jákvætt samband við áfokið (T. G. Gunnarsson o.fl., 2015). Eins og sést á mynd 4.20 er upptök áfoks hérlendis einkum að finna á eldvirka beltinu, einkum á sandauðnum við hopandi jökla eða frá hlaupfarvegum stórra jökuláa. Loftslagsbreytingar munu væntanlega auka áfok hérlendis vegna aukinnar jökulbráðnunar og áframhaldandi jökulhopunar, aukinnar tíðni stórviðra, þegar jörð er auð og vegna hlýnandi veðurfars (AMAP, 2021). Áhrif áfoksins á bráðnun jökla hérlendis eru mælanleg (A. Gunnarsson o.fl., 2021) og ná langt út fyrir

Ísland, eða allt að 1000 km, og þar með á t.d. bráðnunarhraða Grænlandsjökuls (Boy o.fl., 2019; Meinander o.fl., 2022).

4.3 Kolefnishringrás Íslands og mótvægisaðgerðir tengdar landi

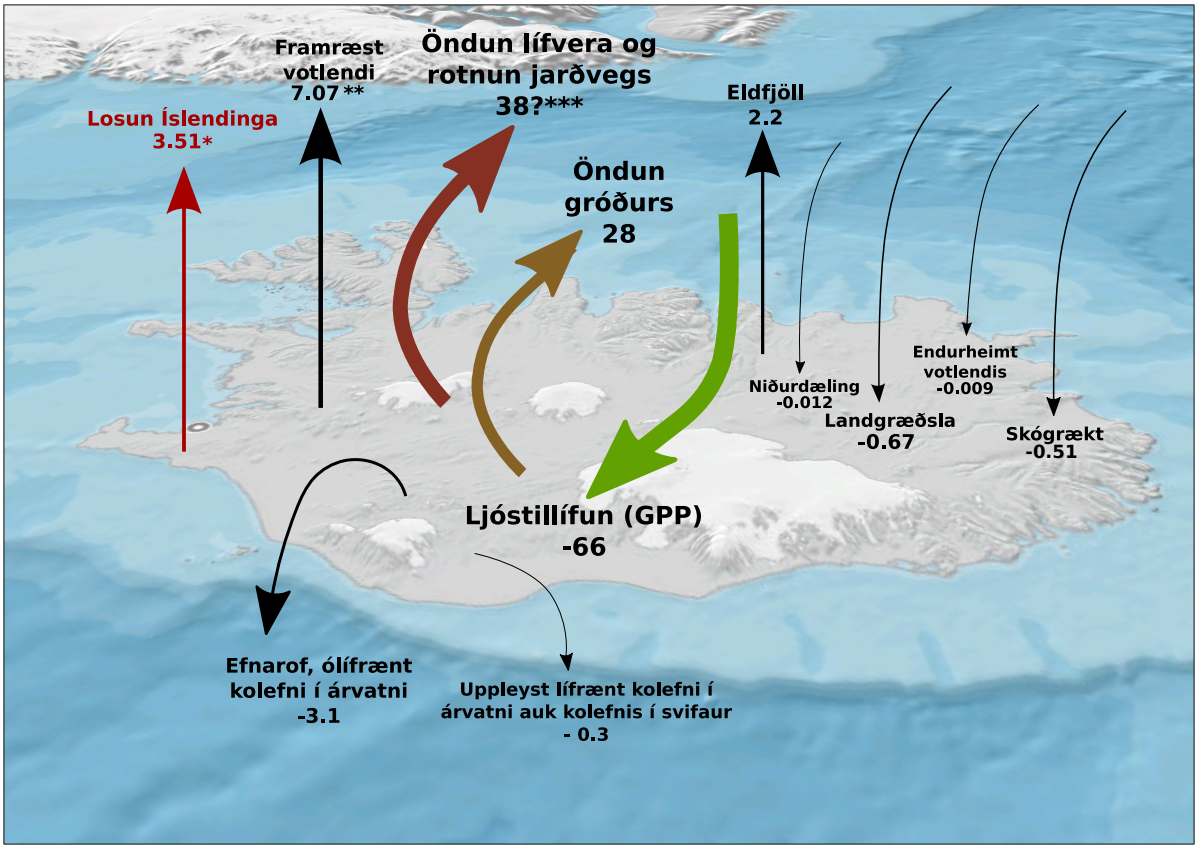
4.3.1 Kolefnishringrás Íslands

Árið 2012 kom út bók um kolefnishringrás Íslands og sýndi hún í fyrsta sinn stöðu þekkingar á ýmsum lífrænum og ólífrænum ferlum sem tengjast hringrásinni (Sigurður Reynir Gíslason, 2012), líkt og IPCC gerir fyrir jörðina alla (IPCC Working Group I, 2021). Í V2018 voru þessar upplýsingar uppfærðar með nýrri stöðu þekkingar á þeim tíma. Mynd 4.21 sýnir aðra uppfærslu á kolefnishringrásinni.

Stærsta talan í kolefnishringrás Íslands er árleg náttúruleg upptaka CO_2 úr andrúmslofti með ljóstillífun gróðurs (GPP; samtals um 66 milljón tonn CO_2; mynd 4.21) og það á einnig við kolefnishringrás landmassa jarðar í heild (IPCC Working Group I, 2021). Matið á GPP Íslands byggist á gervihnattamælingum á blaðgrænustuðli (*e. NDVI*) og grófri flokkun á gróðurlendum þess (Kardjilov, 2008; Sigurður Reynir Gíslason, 2012). Næststærstu tölurnar eru árleg losun CO_2 frá landi sem skiptist í öndun gróðurs (28 milljónir tonna CO_2; *e. autotrophic respiration*), öndun lífvera og rotnun jarðvegs (*e. heterotrophic respiration*). Hér er árleg öndun lífvera og rotnun gróflega áætluð 38 milljónir tonna CO_2 og forsendan er að magnið í náttúrulegu CO_2 hringrásinni inn og út er þá það sama ef vistkerfi landsins væru í „langtímajafnvægi“, eða 66 milljónir tonna af CO_2. Það þýðir að þetta mat á losun nær ekki til t.d. aukinnar losunar vegna framræslu lands eða landhnignunar. Það er einkum þessi síðasti þáttur (öndun/rotnun/tap jarðvegs) sem mikil óvissa ríkir um hver staðan er nákvæmlega núna og mikilvægt er að efla rannsóknir á (Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon, 2019; VSÓ, 2021) Í nýrri bók um íslenskan jarðveg (Ólafur Arnalds, 2023) er tap CO_2 vegna landhnignunar, sem hefur orðið hér frá landnámi, gróflega áætlað um 1300 milljón tonn CO_2, eða um 1,3 milljónir tonna CO_2 á ári síðustu 1000 árin. Hins vegar skortir meiri rannsóknir á því hvernig jöfnuður CO_2 er á slíku þurrlendi í dag og hvaða áhrif núverandi landnýting, svo sem beit búsmala (Ross o.fl., 2016), hefur á hann.

Af öðrum þáttum vegur áætluð losun frá framræstu votlendi þyngst, eða um 7,1 milljónir tonna CO_2 árlega (mynd 4.21). Þetta mat hefur lækkað um 17% frá V2018, aðallega vegna þess að landhalli var tekinn inn í kortlagningu á framræstu landi sem leiddi til minnkunar á kortlögðu flatarmáli þess (Jóhann Þórsson, pers. uppl.). Ennþá eru almennir losunarstuðlar IPCC fyrir Norður-Evrópu (5,7 og 7,9 tonn CO_2/ha/ári fyrir framræst graslendi og akurlendi) notaðir til að meta þessa losun sem mögulega getur valdið skekkju við okkar aðstæður. Rannsóknir á breytingu á kolefnisforða jarðvegs í framræstu landi (Sunna Áskelsdóttir, 2012; Gunnhildur E. Gunnarsdóttir, 2017; Þóroddur Sveinsson o.fl., 2022; Ólafur Arnalds, 2023) og beinar mælingar á árlegum jöfnuði CO_2 flæðis (Brynhildur Bjarnadottir o.fl., 2021) eru enn ekki nægilega margar til að hægt sé að miða slíka landsstuðla fyrir allt framræst gras- eða akurlendi landsins út frá þeim. Því er mikilvægt að slíkar rannsóknir og vöktun verði aukin (Þorsteinn Guðmundsson, 2018; Ólafur Arnalds, 2023; Loftslagsráð, 2023). Jafnvel þó að það komi í ljós að losun frá framræstu akurlendi væri hér helmingi minni á ferkílómetra en nú er áætlað með almennum losunarstuðlum IPCC þá væri hún eftir sem áður stór hluti af heildar-kolefnislosun landsins. Langtímatilraunir Landbúnaðarháskóla Íslands benda til að kolefnisforði jarðvegs breytist lítið við túnrækt á þurrlendi (Sunna Áskelsdóttir, 2012) eða geti jafnvel aukist umtalsvert við ákveðnar aðstæður (sandrækt) (Þorsteinn Guðmundsson o.fl., 2018), en önnur akurræktun, þar sem tíðari jarðvinnslu er beitt en almennt er gert í túnræktinni, hefur ekki verið mikið rannsökuð hér enn.

Eins og Loftslagsráð hefur nýlega bent á (Loftslagsráð, 2023) þá er losun GHL vegna landnotkunar hlutfallslega mikil hér á landi og því mikilvægt að tölur um kolefnisbúskap vistkerfa séu vel undirbyggðar með vönduðum rannsóknum og vöktun (VSÓ, 2021). Einnig bendir ráðið



Mynd 4.21: Einfölduð mynd af kolefnishringrás Íslands sem er nú uppfærð frá því að hún kom út í V2018. Tölur standa fyrir flæði kolefnis í milljónum tonna CO_2 á ári. Jákvæðar tölur sýna losun frá landi út í andrúmsloft en neikvæðar sýna upptöku CO_2 úr andrúmslofti. Tölur um CO_2 losun Íslendinga, losun frá framræstu votlendi og upptöku með skógrækt, landgræðslu, endurheimt votlendis og niðurdælingu í berg eru fyrir árið 2021 (Carbfix og Mannvit, 2022; Keller o.fl., 2023) en tölur fyrir losun frá eldfjöllum, árlega heildarkolefnisupptöku gróðurs (GPP), árlega öndun gróðurs og jarðvegs (losun frá landi), efnarof og flutning kolefnis með árvatni eru áætlaðar fyrir árið 2006 (Sigurður Reynir Gíslason, 2012). Jöfnuður allra þessara ferla er um 8 milljón tonn CO_2 nettó-losun á hverju ári frá Íslandi. Athugið að þessar tölur taka ekki til annarra gróðurhúsaloftegunda (GHL), svo sem metans, og því ekki sambærilegar við svokölluð jafngildistonn GHL sem oft eru notuð um losunartölur. Þó að losun metans sé nokkuð vel þekkt á landsvísu þá sýna nýjar rannsóknir að náttúruleg metanbinding á sér einnig stað í þurrlendi hérlendis (Maljanen o.fl., 2017), en óvissa ríkir enn um stærðargráðuna á landsvísu.

(*)Bein losun CO_2 út í andrúmsloftið af mannavöldum vegna orku, iðnaðar og efnanotkunar, úrgangs og landbúnaðar. Aðrar gróðurhúsalofttegundir eru ekki meðtaldar né losun vegna landnýtingar (t.d. framræsla votlendis). Að auki er alþjóðlegt flug og sigling flutningaskipa ekki talið með.

(**) Losun CO_2 úr framræstu votlendi, sem annaðhvort hefur verið breytt í ræktað land eða er flokkað sem almennt graslendi, var áætlað út frá kortlögðu flatarmáli með losunarstuðlum IPCC fyrir N-Evrópu (Keller o.fl., 2023).

(***) Hvað kolefnisjöfnuð Íslands varðar er mest óvissa í „losun frá landi". Að hluta skarast jöfnuðurinn við það magn CO_2 sem áætlað er að losni árlega frá framræstu votlendi.

á að losun vegna landnotkunar hefur ekki fallið undir skuldbindingar Íslands í loftslagsmálum hingað til og hefur því ekki verið látin sæta bindandi markmiðum um raunsamdrátt í nettólosun, en það muni breytast frá og með árinu 2026.

Árleg áætluð jarðfræðileg losun CO_2 frá möttlinum undir Íslandi er óbreytt frá V2018, eða um 2,2 milljónir tonna árlega að jafnaði (mynd 4.21 (Sigurður Reynir Gíslason, 2012)). Barry et al. 2014 mátu þetta flæði með þremur ólíkum aðferðum og fengu 0,1 til 10,1 milljónir tonna CO_2 á ári, sem sýnir óvissuna sem er á þessari losun. Jarðfræðileg binding með efnarofi (efnaveðrun) í jarðvegi og bergi landsins, sem að mestu berst til hafs með árvatni, er einnig óbreytt frá V2018, eða um 3,2 milljónir tonna CO_2 á ári. Það sama má segja um flutning lífræns kolefnis í árvatni og svifaur, 0,3 milljónir tonna CO_2 á ári (Sigurður Reynir Gíslason, 2012).

Árið 2021 var bein losun manna á CO_2 um 3,5 milljónir tonna (mynd 4.21) og hafði aukist um 4,5% frá 2015 (sjá V2018). Þetta er talsvert áhyggjuefni þar sem markmið Íslands, innan loftslagsmarkmiða Evrópusambandsins, er að ná 29% samdrætti í losun GHL frá árinu 2005 (Keller o.fl., 2023). Það enn og tíminn er orðinn mjög knappur til aðgerða eins og Loftslagsráð hefur nýlega bent á (Loftslagsráð, 2023).

4.3.2 Mótvægisaðgerðir tengdar landi

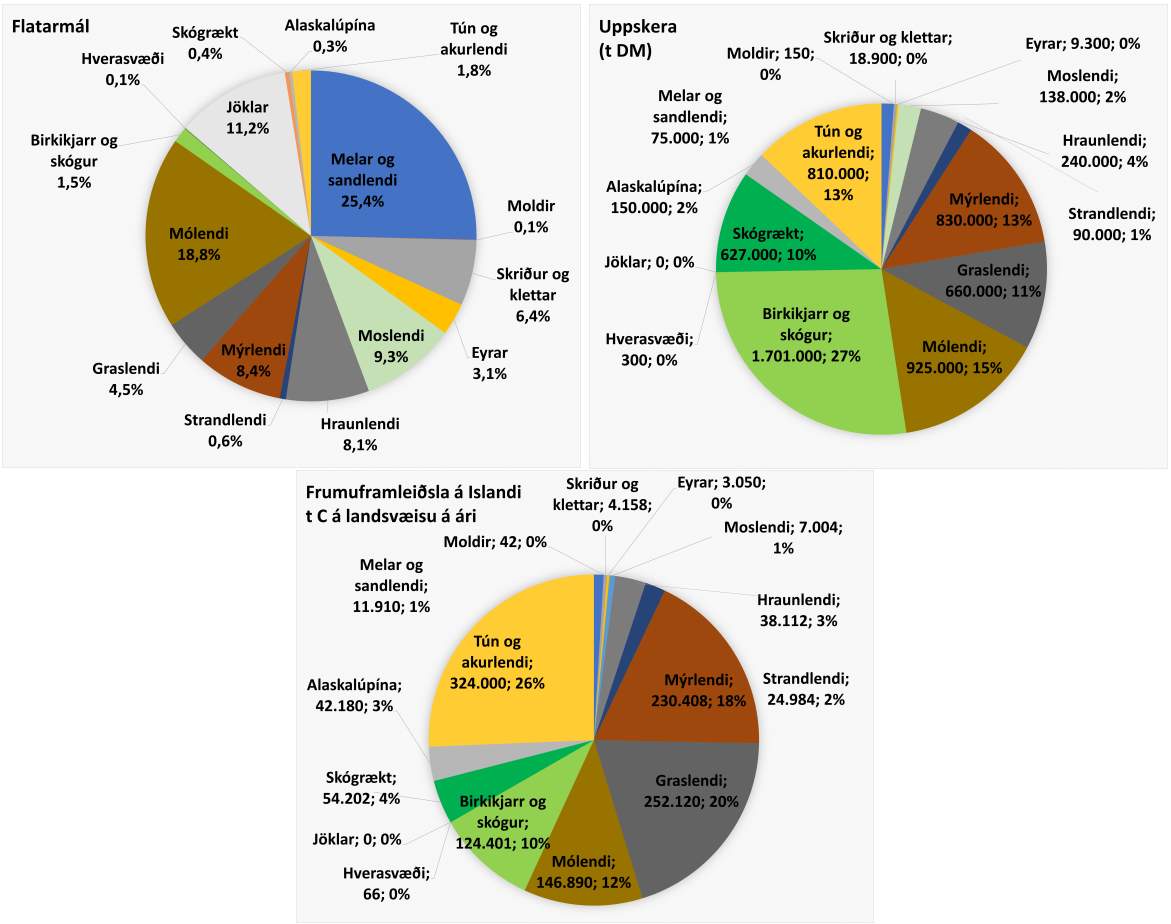
Skipta má þeim mótvægisaðgerðum sem hér eru ræddar í tvo hópa. Annars vegar aðgerðir til að taka upp kolefni úr andrúmslofti og binda það og hins vegar aðgerðir sem draga úr losun frá landi. Aðgerðir í fyrri hópnum binda kolefni til mislangs tíma. Binding í bergi (Snæbjörnsdóttir o.fl., 2020) er varanleg en það fer eftir aðstæðum og aðferðum hvort binding með skógrækt eða landgræðslu er til áratuga eða árhundruða og er nokkur vísindaleg umræða um það hvernig best er að reikna slíka bindingu til lengri tíma (sjá t.d. Parisa o.fl., 2022; Ruseva o.fl., 2020). Aðgerðir til að draga úr losun frá landi, t.d. með endurheimt votlendis, eru í sjálfu sér ekki binding (heldur forðun losunar) en áhrifin geta verið til langs tíma. Til að bera aðgerðir saman má meðhöndla samdrátt í losun á ári og bindingu á ári á sama hátt. Þótt þarna sé um eðlisólíkar aðgerðir að ræða eiga landgræðsla, skógrækt og endurheimt votlendis það sameiginlegt að þeim geta einnig fylgt umtalsverð jákvæð hliðaráhrif.

Á móti beinni losun CO_2 og losun vegna framræslu lands, sem samtals var metin 10,6 milljón tonn CO_2 árið 2021 (mynd 4.21), má telja fjórar gerðir mótvægisaðgerða til að binda kolefni eða draga úr losun þess sem samtals tóku upp 1,2 milljónir tonna CO_2 á því ári (um 11% af samanlagðri CO_2 losun). Hlutdeild mismunandi bindileiða árið 2021 var 65%, 43%, 1% og <1% vegna landgræðslu, skógræktar, niðurdælingar á innlendu CO_2 og endurheimtar votlendis. Þessar tölur byggjast á (Keller o.fl., 2023; Carbfix og Mannvit, 2022), nema hvað samdráttur í losun CO_2 vegna endurheimts votlendis (1180 ha) var metinn með losunarstuðlum IPCC miðað við að það hefði áfram verið framræst graslendi (5,7 tonn CO_2/ha/ári). Árleg metin kolefnisbinding (eða samdráttur losunar vegna endurheimtar) hefur aukist um 33% frá 2015 (sjá V2018). Þessi aukning er bæði vegna meiri mótvægisaðgerða á síðustu árum en einnig að hluta vegna aldursháðrar aukningar í bindihraða skóga sem er tekinn út á landsvísu á fimm ára fresti (A. Snorrason, 2020; A. Snorrason, 2022a).

Nýir hvatar sem stjórnvöld hafa komið á eftir 2020 til að hvetja einkageirann til þátttöku í verkefnum sem snúa að mótvægisaðgerðum gegn loftslagsbreytingum (Alþingi, 2020), svo og stóraukinn áhugi, bæði innlendra og erlendra fyrirtækja og annarra einkaaðila, á að kosta slík verkefni, eru smátt og smátt að auka þunga þeirra.

4.3.3 Ný þekking á kolefnisforða ofanjarðar

Þegar vistgerðaflokkun Íslands var gefin út af Náttúrufræðistofun Íslands (Jón Gunnar Ottósson o.fl., 2017) þá varð mögulegt að áætla gróflega magn standandi lífamassa gróðurs á öllu landinu og þar með kolefnisforða ofanjarðar (Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon, 2019). Eins og sjá má á mynd 4.22 þá þekja náttúruskógar, skógræktarsvæði og tún aðeins 3,7% landsins en á þessum vistgerðum standa um 50% af ofanjarðarlífmassa landsins. Annað vel gróið land, mýrlendi, mólendi og graslendi, þekja samtals um 32% landsins og bera 39% af ofanjarðarlífmassanum. Þar sem standandi lífmassi í skógum samanstendur af uppsöfnuðum vexti margra ára, meðan önnur, svo sem graslendi eða tún, fella allan ofnajarðarlífmassa sinn á hverju hausti, þá gefur þetta ekki rétta mynd af hlutfallslegu mikilvægi þessara vistgerða í árlegri kolefnisupptöku í lífmassa. Þegar tillit hefur verið tekið til þessa fæst ofanjarðarframleiðni (*e. Aboveground Net Primary Production eða ANPP*) og þar sést að árlegur ofanjarðarvöxtur í náttúru Íslands er metinn um 1,3 milljónir tonna C, sem svarar til um 4,8 milljóna tonna CO_2. Þetta er 7% af áætlaðri heildarframleiðni (GPP) landsins (Kardjilov, 2008), sem er í nokkuð góðu samræmi við þær tvær mælingar sem farið hafa fram hérlendis á ANPP:GPP hlutfalli í íslenskum vistkerfum (Brynhildur Bjarnadottir o.fl., 2009; Brynhildur Bjarnadottir o.fl., 2021).



Mynd 4.22: ***Efst til vinstri:*** *Hlutfallslegt flatarmál 14 megingerða vistlendis landsins (samtals 98.510 km^2).* ***Efst til hægri:*** *Standandi lífmassi ofanjarðar í gróðri (tonn þurrefnis; alls 6,3 milljónir tonna).* ***Neðst:*** *Ofanjarðarframleiðni (tonn C/ári; alls 1,26 milljónir tonna C). (Heimild Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon (2019)).*

Það stingur í augun á mynd 4.22, þegar hlutdeild í ANPP er skoðuð, að tún og akurlendi sem aðeins þekja 1,8% landsins, hafa lagmesta árlega nettóframleiðni ofanjarðar, eða 26% af heildar-nettó-framleiðni landsins. Þetta þýðir þó ekki að þessi vistgerð hafi mikla kolefnisbindingu

til lengri tíma litið þar sem allur þessi lífmassi er annaðhvort hirtur eða sölnar og fellur til jarðar og rotnar á hverju hausti. Kolefnisbinding vistkerfa felst í langtímabreytingu á standandi kolefnisforða ofanjarðar eða í jarðvegi, sem er ekki það sama og árleg kolefnisupptaka (GPP) eða nettó-ofanjarðarframleiðni (ANPP). Mikill misskilningur virðist vera meðal margra aðila um hvernig kolefnisbinding vistkerfa er reiknuð og hvernig hún er frábrugðin t.d. GPP eða ANPP. Taka má mörg dæmi um slíkt í nýlegum skrifum á samfélagsmiðlum og í fjölmiðlum hérlendis. Slíkt er að valda óþarfa ruglingi í huga almennings og hagaðila.

4.4 Áhrif loftslagsbreytinga í ferskvatni

4.4.1 Vöktun og rannsóknir á lífríki ferskvatns

Loftslagsbreytingar hafa haft víðtæk áhrif á lífríki í fersku vatni. Þannig eru mörg dæmi um áberandi og stöðuga þróun sem sýnir bein áhrif á útbreiðslu, svipgerð, lífeðlisfræði og lífssögu, ásamt því að hafa almennt áhrif á lífslíkur tegunda yfir álagstíma. Þessi áhrif má einnig rekja til aukinnar tíðni alvarlegra skammtímaveðuröfga (s.s. hitabylgja, þurrka og flóða) á undanförnum árum sem getur fjölgað slíkum álagstímum og lengt þá.

Skammtímaveðuröfgar geta í sumum tilfellum verið meiri áhrifavaldar en meðalbreytingar til lengri tíma litið (sjá t.d. ágrip fyrir stefnumótendur í IPCC, 2022).

Loftslagsbreytingar geta einnig ýtt undir annars konar óbein og neikvæð áhrif, eins og aukna samkeppni milli innlendra og aðfluttra tegunda, eða milli afbrigða innan tegunda, ýkt neikvæð áhrif manngerðra áhrifaþátta, eins og hindrana (s.s. stíflumannvirkja) sem koma í veg fyrir far tegunda, aukið tíðni sjúkdóma, minnkað þol gagnvart sjúkdómum, flýtt fyrir landnámi ágengra tegunda og fjölgað tilfellum ofauðgunar (*e. eutrophication*) með aukinni ákomu næringarefna (IPCC, 2022; Reid o.fl., 2019). Þessi loftslagstengdu áhrif eru þegar farin að sjást í vistkerfum íslenskra ferskvatna.

Vöktun á þáttum sem tengjast loftslagsbreytingum verður sífellt mikilvægari því þekking á áhrifum þeirra er lykilforsenda fyrir skynsamlega nýtingu tegunda og verndun fjölbreytileika, ásamt því að aðlögun með mótvægisaðgerðum verður markvissari ef hún er byggð á þekkingu um hugsanleg viðbrögð náttúrulegra stofna við slíkum breytingum (Pörtner o.fl., 2021). Með langtímavöktun á líffríki fæst mikilvæg þekking í formi gagna um þær líffræðilegu breytingar sem hafa orðið samhliða breytingum á loftslagi. Á Íslandi sinna nokkrir mismunandi aðilar rannsóknum og vöktun á lífríki í ferskvatni með ólíkum áherslum, en vöktun má skilgreina sem kerfisbundnar end-

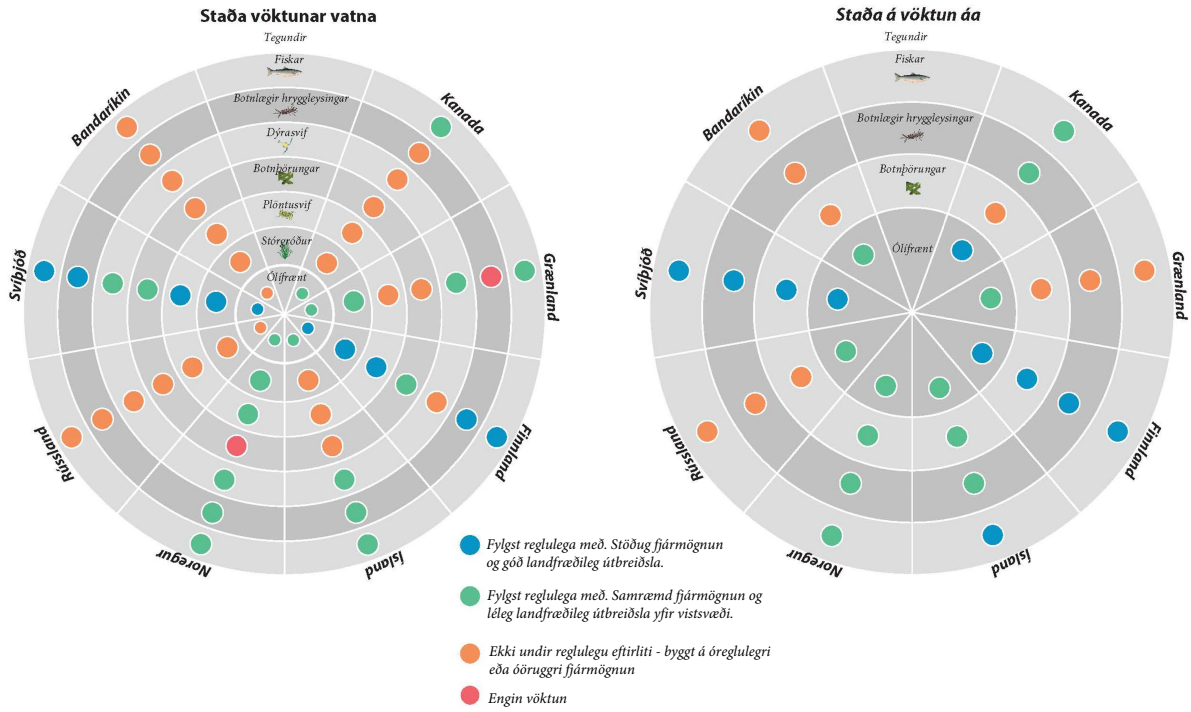


Mynd 4.23: Vatnssýni tekið úr Krossá á Skarðsströnd í tengslum við vöktun vegna Vöktunaráætlunar vatnaáætlunar 2022-2027 (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi)

.

urteknar mælingar. Vöktun á ferskvatni á Íslandi er að mestu leyti framkvæmd af opinberum rannsóknastofnunum og háskólum en einnig af sjálfstæðum rannsóknaraðilum. Í nýlegri skýrslu sem gerð var í tengslum við vinnu CBMP (*e. Circumpolar Biodiversity Monitoring Program*) vinnuhóps Norðurskautsráðsins um verndun lífríkis á Norðurskautinu (*e. Conservation of Artic Flora and Fauna, CAFF*) má finna úttekt á stöðu rannsókna og vöktunar á vistkerfisþáttum í bæði ám og vötnum, í aðildarríkjunum átta sem eiga sæti í Norðurskautsráðinu (CAFF, 2019).

Meginniðurstöðurnar voru þær að öll aðildarríkin hafa góð gögn til að stuðla að grunnþekkingu á stöðu líffræðilegrar fjölbreytni. Eingöngu tvö lönd, Finnland og Svíþjóð, voru með nægjanlega landfræðilega dreifingu. Fá lönd voru með nógu langa tímaröð gagna til að fá góða þekkingu á núverandi stöðu og afleiðingum hugsanlegra breytinga á líffræðilegri fjölbreytni í ferskvatni (mynd 4.24). Í vinnu CAFF hefur verið lögð áhersla á ákveðna lykilþætti og að mælingar séu gerðar með samræmdum hætti til að auðvelda samanburð á milli svæða og landa.



Mynd 4.24: Staða vöktunar í ám (hægri mynd) og vötnum (vinstri mynd) í þeim átta löndum sem eiga sæti í Norðurskautsráðinu. Skoðað var staða vöktunar útfrá mismunandi hópum lífvera sem og útfrá ólífrænum þáttum í vistkerfinu. Mynd íslenskuð úr CAFF 2019

.

Í úttektinni var bent á að gögn fyrir Ísland kæmu aðallega úr þremur áttum, (1) úr skammtímaverkefnum eins og mati á umhverfisáhrifum, (2) úr langtímaverkefnum sem tengjast rannsóknum á svæðum þar sem framleiðni og/eða fjölbreytileiki er mikill og (3) úr vöktunum á ám og/eða vötnum þar sem nytjar á fiski eru stundaðar með veiðum. Hluti af verkum CBMP vinnuhópsins var að taka saman yfirlit (*e. metadata*) yfir þau gögn sem safnað hefur verið hér á landi og eru birt eða aðgengileg á annan hátt. Ennfremur var bent á að þrátt fyrir að vöktunarverkefni á Íslandi væru að stórum hluta fjármögnuð af opinberum aðilum væri ekki til staðar neinn miðlægur gagnagrunnur. Skortur á opnum gagnagrunni er endurómun á einni af þeim fimm tillögum til úrbóta sem verkefnahópur Vísinda- og tækniráðs um rannsóknarinnviði og vöktun lagði til í skýrslu þar sem kortlagning og framtíðarsýn vöktunar á Íslandi var gerð skil (Vísinda- og Tækniráð, 2017). Lagði vinnuhópurinn til að unnið yrði að opnum aðgangi að opinberum gögnum. Taldi hópurinn að með því að gera fleirum kleift að nálgast gögn sem safnað er fyrir opinbert fé mætti auka til muna hagnýtingu þeirra til stenfnumótunar, eftirlits, rannsókna og nýsköpunar og efla þannig ávinning ríkisins af vöktun.

Nýlega var tekið mikilvægt skref til að samræma og auka vöktun á ferskvatnslífríki með vöktunaráætlun vatnatilskipunar. Vatnatilskipun var innleidd árið 2011 með samþykkt laga um stjórn vatnamála í samræmi við vatnatilskipun Evrópusambandsins (*e. Water Framework Directive of the European Union*). Í kjölfarið var vöktunaráætlun stjórnvalda í vatnamálum (Vatnaáætlun Íslands 2022-2027) sett fram árið 2022 og var ætlað að gilda í fimm ár (Umhverfisstofnun, 2022). Í fyrrnefndri úttekt CBMP-vinnuhóps um stöðu rannsókna og vöktunar var tekið fram að innleiðing vatnatilskipunar myndi bæta vöktun og auka við landfræðilega útbreiðslu gagna fyrir Ísland og bæta þannig við mikilvægri þekkingu á lífríki ferskvatns (CAFF, 2019). Vöktun vatnatilskipunar nær yfir grunnvatn og alla flokka yfirborðsvatns, þ.e. straumvötn, stöðuvötn, árósavatn og strandsjó. Vöktunin snýr að tilteknum vistfræðilegum mælibreytum, svo sem varðandi algengustu lífverur, vatnsmagn, straumhraða, efnainnihald og grunnvatnsstöðu. Umhverfisstofnun stýrir vöktuninni og Hafrannsóknastofnun, Veðurstofa Íslands og Náttúrufræðistofnun Íslands munu annast faglega ráðgjöf vegna framkvæmdarinnar. Þessi vöktun mun ekki eingöngu gagnast stjórnvöldum við verndun vatns og vistkerfa þess og stuðla að sjálfbærri nýtingu vatnsauðlinda heldur einnig skila mikilvægri þekkingu með mælingum á breytingum sem verða vegna náttúrulegra og manngerðra áhrifaþátta.

Samhliða vöktun á lífríki ferskvatns þarf stýrðar rannsóknir til að svara spurningum um hvaða umhverfisþættir það eru sem hugsanlega valda þeim breytingum sem verða við hlýnun jarðar. Slíkar upplýsingar gætu komið að gagni við að spá fyrir um aðlögun lífvera að breyttu umhverfi. Þetta er einkum mikilvægt vegna þess að þær sviðsmyndir sem ræddar voru í kafla 3 benda til þess að líkur séu á að fram komi áður óþekkt umhverfisskilyrði fyrir lífverur á Íslandi. Sem dæmi um slíka stýrða rannsókn á líffríki ferskvatns er fjölþjóðlegt samstarfsverkefni á misheitum lækjum í Hengladölum árin 2004-2008 (EURO-LIMPACS). Þar var markmiðið meðal annars að meta áhrif hlýnunar með samanburði á lífríki í lækjum með mismunandi hitastig. Auk þess voru stýrðar rannsóknir gerðar með því að hita vatn í köldum læk og skoða samtímis áhrif vatnshita og næringarefna. Fjallað var um verkefnið í síðustu skýrslu vísindanefndarinnar (V2018) en með rannsóknninni fengust mikilvægar upplýsingar um áhrif hlýnunar á marga mismunandi vistkerfisþætti frá frumframleiðni og lífmassa þörunga, þéttleika, fjölbreytileika og lífsferla hryggleysingja, upp í stofnstærð fiska (sjá samantekt O'Gorman o.fl. (2012)).

Frá síðustu skýrslu vísindanefndarinnar hafa birst nýjar vísindagreinar þar sem tilraunauppsetningin í Hengladölum hefur verið höfð sem fyrirmynd. Þannig sýndu Nyquist og fleiri 2021 fram á að langlífi fullorðinna rykmýsfluga af ættkvíslinni *Diamesa* (kulmý) breytist eftir því við hvaða hitastig þær alast upp. Þannig lifðu fullorðnar flugur, sem klekjast út við 6 °C, í 13-32 daga, meðan rykmýsflugur sem klöktust út við 20 °C lifðu aðeins í 1-5 daga. Tegundir innan *Diamesa*-ættkvíslarinnar eru kuldakærar og getur hlýnun þannig haft töluverð neikvæð áhrif á lífsferil þeirra. Nelson og fleiri 2020 sýndu hins vegar fram á að viðbrögð tegunda við hlýnun geta verið misjöfn og það jafnvel þó að um mjög skyldar tegundir sé að ræða. Tilraunir þeirra í Hengladölum leiddu í ljós að hlýnun um 3,8 °C hafði neikvæð áhrif á fjölda, lífmassa og vöxt tveggja tegunda bitmýs (*Prosimulium ursinum* og *Simulium vernum*) á meðan að önnur bitmýstegund (*Simulium vittatum*) jókst í fjölda og lífmassa, ásamt því að fjöldi kynslóða náði að vera fleiri en eitt yfir árið í upphituðum tilraunalækjum samanborið við eitt klak í viðmiðunarlækjum. Enn fremur hafa vísindagreinar, sem byggjast á rannsóknum í Hengladölum, leitt í ljós að viðbrögð við hlýnun geta verið afar ólík eftir vistkerfum. Þannig eru t.d. kaldir lækir oftar með fjölbreyttari og fjölliðaðri samfélög hryggleysingja á meðan samfélög í heitari lækjum eru einsleitari og oftar einkennast samfélögin af tegundum sem aðlagaðar eru miklum hita og finnast ekki víða (Woodward o.fl., 2010). Vísbendingar eru um að samfélög af fyrri gerðinni séu viðkvæmari gagnvart hlýnun en þau vistkerfi sem eru einfaldari að samsetningu (Nelson o.fl., 2020b).

Ekki er alltaf einhlýtt að tegundum fækki í kjölfar áhrifa hlýnunar. Líkt og fjallað var um í kaflanum 2.4 hér að framan hafa jöklar á Íslandi skroppið saman um 19% af hámarksflatarmáli, auk þess sem nokkrir smáir jöklar hafa horfið alveg. Í rannsókn, sem gerð var á tæplega 500

sýnum sem safnað var á árunum 1978-2013 frá tíu mismunandi svæðum í Bandaríkjunum, Nýja Sjálandi og Evrópu, þar á meðal Íslandi, voru breytingar á samfélagi hryggleysingja skoðaðar í jökulám í kjölfar þess að jöklar rýrna (L. E. Brown o.fl., 2018). Rannsókn Brown o.fl. 2018 náði yfir 1,23 milljón hryggleysingja þvert yfir níu líffræðilega mismunandi svæði í þeim þremur heimsálfum sem safnað var. Eftir að hafa gert grein fyrir kerfis- og svæðisbundnum áhrifum breiddargráðu kom í ljós að sömu ferlar mótuðu virkni fjölbreytileika hryggleysingja í ám á heimsvísu. Greiningar bentu til þess að fjölbreytileiki innan vistkerfa hryggleysingja jókst eftir því sem jökulþekja minnkaði.

Mikilvægt er að rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga taki mið af þessum breytileika sem finnst milli tegunda og umhverfisaðstæðna. Nýlegar rannsóknir á samsetningu samfélaga hryggleysingja í 49 mismunandi lindum á Íslandi benda til þess að fjölbreytileiki og samsetning samfélaga hryggleysingja í lindarvatni ráðist, líkt og í Hengladölum, að miklu leyti af hitastigi. Ákveðnar, sérhæfðar tegundir finnast í heitum uppsprettum meðan lífríki kaldra linda einkennast af tegundum sem hafa víðari dreifingu. Í sömu rannsókn kom auk þess fram að fjölbreytileiki tegunda fór eftir því hvar söfnun á hryggleysingjum fór fram. Þannig var jákvæð fylgni á milli fjölbreytni og hitastigs í yfirborði linda, meðan þetta samband var neikvætt þegar safnað var nálægt uppsprettu lindarvatnsins (Kreiling o.fl., 2022). Niðurstöðurnar benda til þess að huga þurfi vel að söfnunaraðferð við mælingar á tegundafjölbreytni, einkum á svæðum og hjá tegundum þar sem ætla má að breytileiki sé háður umhverfisaðstæðum.

4.4.2 Líffræðilegur fjölbreytileiki - Bleiklax í Norður-Atlantshafi

Fjöldi tegundahópa í ferskvatni á Íslandi er almennt lítill samanborið við nálæg lönd. Meginástæða þess er landfræðileg einangrun ásamt því að tiltölulega stutt er frá síðustu ísöld, um 10.000 ár. Ísland býr hins vegar yfir töluverðum fjölbreytileika þegar kemur að búsvæðum sem mótast meðal annars af jarðskorpuhreyfingum og eldvirki. Þessi fjölbreytileiki, samhliða ólíkum skilyrðum samanborið við meginlandið, svo sem vegna lítillar samkeppni milli tegunda, hefur leitt af sér fjölbreytni svipgerða innan tegunda, ólíkra stofna og mismunandi afbrigða. Sífellt fleiri vísbendingar eru um að erfðafræðilegar breytingar séu að eiga sér stað hjá tegundum sem verða fyrir áhrifum umhverfisbreytinga enda þrýstingur á tegundir að aðlagast breyttum aðstæðum. Í sumum tilfellum gerast breytingarnar í umhverfi tegunda hraðar en svo að þær nái að aðlagast og getur það haft talsvert neikvæð áhrif á líffræðilegan fjölbreytileika þar sem afbrigði eða erfðaeiginleikar tegunda geta tapast vegna breyttra umhverfisskilyrða. Sumar tegundir eru lagaðar að þröngum, sérhæfðum umhverfisskilyrðum, svo sem hvað varðar búsvæði, æxlun eða fæðu, meðan aðrar tegundir geta lifað við breytilegri skilyrði og geta auðveldlega breytt fæðuvali eða fært sig úr óhagstæðum skilyrðum yfir á betri.

Oft eru það tegundir sem lifa við sérhæfð skilyrði sem eru viðkvæmari fyrir umhverfisbreytingum. Þannig hefur útrýming stofna, sem hægt er að tengja við loftlagsbreytingar, verið meiri á hitabeltissvæðum (55 %) en á tempruðum svæðum (39 %), meiri í ferskvatni (74 %) en í sjó (51 %) og á landi (46 %) og einnig meiri hjá dýrategundum (50 %) en plöntum (39 %) (IPCC, 2022; Reid o.fl., 2019). Af þessum ástæðum getur breytileiki innan tegunda leikið lykilhlutverk í aðlögunarhæfni þeirra og mikilvægt að slíkur breytileiki sé einnig varðveittur, enda mögulegt að það geti ráðið úrslitum varðandi viðkomu tegunda til frambúðar. Líkt og fjallað var um hér að framan (sjá umfjöllun í kafla 4.1.3 og sérgrein 4A) hafa aðildarþjóðir samnings Sameinuðu þjóðanna um líffræðilega fjölbreytni (CBD COP-15) samþykkt mikilvægt ákvæði um verndun líffræðilegrar fjölbreytni til ársins 2030 (*e. Global Biodiversity Framework*) og því ljóst að mikil áhersla verður lögð á þennan málaflokk á komandi árum.

Tegundafjöldi fiska í ferskvatni er minni á Íslandi en á meginlandi Evrópu og í Ameríku, þannig eru eingöngu sjö tegundir fiska sem finnast í ferskvatni á Íslandi en eru til dæmis 29 á Írlandi og 42 í Noregi. Tvær af þessum sjö tegundum fiska eru nýlegir landnemar, annars vegar flundra (*Platichthys flesus*) sem er talin hafa komið til landsins frá Færeyjum og hins vegar hnúðlax (*Oncorhynchus gorbuscha*) sem fannst fyrst á Íslandi árið 1960 en hefur síðustu ár

margfaldast í ám á Norður-Atlantshafi. Á Íslandi hefur veiddum hnúðlöxum fjölgað undanfarin ár, frá níu árið 2015 yfir í 339 sumarið 2021. Í nýlegri rannsókn Hafrannsóknastofnunar í samstarfi við erlenda sérfræðinga var í fyrsta skipti staðfest að hnúðlax hefur hrygnt í nokkrum ám sumarið 2021 (Skóra o.fl., 2023). Í vísindaveiðum í maí 2022 fundust meðal annars um 570 hnúðlaxagönguseiði í Botnsá í Hvalfirði og voru þau á leið til sjávar. Gönguseiði hnúðlaxa eru smávakin eða eingöngu um 3,2 cm og um eitt gramm, en til samanburðar er algengt að gönguseiði Atlanshafslaxa séu um 11-15 cm þegar þau ganga til sjávar (mynd 4.25). Umrædd hnúðlaxaseiði í Botnsá eiga uppruna sinn úr hrygningu sumarið 2021, en þau ganga öll til sjávar á fæðuslóð skömmu eftir að þau klekjast út. Hnúðlaxarnir ljúka tveggja ára lífsferli sínum með því að ganga til baka upp í árnar til hrygningar eftir að hafa dvalið eitt ár í sjó. Stofn hnúðlaxa sem hrygnir á sléttum ártölum er talsvert minni í Norður-Atlantshafi en sá stofn sem hrygnir á oddatöluártölum og því má búast við að hnúðlaxar séu einkum að veiðast annað hvert ár.



Mynd 4.25: Hnúðlax (Oncorhynchus gorbuscha) er nýr landnemi í íslenskum ám. Fyrst varð vart við hann 1960 en honum hefur fjölgað undanfarin ár. Á efri mynd til vinstri sést hængur synda gegnum teljara sem staðsettur var í Langá á Mýrum sumarið 2021. Á neðri mynd til vinstri er gönguseiði sem veiddist á leið til sjávar í Botnsá í Hvalfirði í gildrur (fyke-net) sem settar voru upp til að rannsaka hnúðlaxagöngur. Gildrurnar eru sýndar á myndinni til hægri

.

Nýlegar rannsóknir á útbreiðslu tegunda sýna að um helmingur þeirra hafi aukið útbreiðslu ýmist til norðurs eða í meiri hæð yfir sjávarmáli þar sem hitastig er nær því sem tegundirnar hafa áður aðlagast (IPCC, 2022). Margar tegundir, sem eru aðlagaðar lífi í fersku vatni, geta átt erfitt með að færa sig úr stað og samkvæmt mælingum hafa stofnar ferskvatnstegunda minnkað töluvert meira en tegunda í sjó, eða á landi (Jeppesen o.fl., 2012). Hnúðlax er, ólíkt þessu mynstri, að auka útbreiðslu sína frá Barentshafi til suðurs eftir Norður-Atlantshafi allt frá Norður-Noregi suður til áa í Þýskalandi og Frakklandi (ICES, 2022). Ástæðan fyrir því að hnúðlaxar, ólíkt flestum tegundum, leita suður í kjölfar hækkandi hitastigs er að tegundin er aðflutt frá Kyrrhafsströnd Rússlands til Hvítahafs við norðvesturströnd Rússlands þar sem hún náði að aðlagast. Vísbendingar eru um að hækkandi sjávarhiti í Norður-Atlantshafi og Barentshafi, ásamt minni hafís á norðlægum slóðum, eigi þátt í stækkandi stofni hnúðlaxa á þessum norðlægu slóðum (VKM o.fl., 2020; Diaz-Pauli o.fl., 2022). Loftslagsbreytingar voru einnig nefndar sem líkleg ástæða fyrir mikilli fjölgun hnúðlaxa í þeirra náttúrulegu heimkynnum við Kyrrhaf á síðari hluta 20. aldar. Sú mikla aukning sem varð á hnúðlaxi í Kyrrahafi er talin

hafa haft neikvæð áhrif á aðrar tegundir laxa og á stofna sjófugla vegna beinnar samkeppni um fæðu. Til að mynda var hægt að sjá marktæk áhrif á varpárangur og klaktíma hjá tegundum eins og ritu (*Rissa tridactyla*) og heiðmáfum (*Larus glaucescens*) á þann hátt að tegundunum vegnaði betur á sléttum árum miðað við oddatöluárin sem er í öfugum takti við aukna stofnstærð hnúðlaxa (Springer og Vliet, 2014). Það er því rík ástæða til að fylgjast vel með þessari miklu aukningu hnúðlaxa sem er að eiga sér stað í Norður-Atlantshafi. Tegundin er framandi og enn er ekki ljóst hvort hún verður ágeng og þá hvaða afleiðingar það getur haft í för með sér varðandi áhrif á vistkerfið.

Í meistararitgerð Hjörleifs Finnssonar 2021 við Háskólasetur Vestfjarða voru skoðuð stjórnunarleg viðbrögð við skyndilegri fjölgun hnúðlaxa á Íslandi. Niðurstöðurnar bentu til að viðbrögðin hafi takmarkast við skráningu á veiði og móttöku sýna sem bárust frá veiðimönnum. Engar rannsóknir eða ferlar voru virkjaðir og þekking því takmörkuð á grunnþáttum í vistfræði hnúðlaxa og engar áætlanir til um kerfisbundna vöktun. Einnig benti Hjörleifur á að engar áætlanir, verkferlar eða skipulega samhæfðar aðferðir liggja fyrir sem viðbragð við komu framandi tegunda og hvort flokka skuli þær sem ágengar. Mikilvægt er að auka rannsóknir á hnúðlaxi, bæði í ferskvatni og sjó, til að öðlast nauðsynlega þekkingu til að bregðast við með viðeigandi mótvægisaðgerðum, sé þess kostur. Þetta á einnig almennt við um nýjar framandi tegundir sem geta orðið ágengar og, ef ekkert er að gert, orðið ógn við líffræðilega fjölbreytni. Rannsókn Hjörleifs veitir innsýn í vandamál stjórnunar á framandi og ágengum tegundum á Íslandi og í henni eru settar fram tillögur um lausnir á þeim (Hjörleifur Finnsson, 2021).

4.4.3 Hlýnun Þingvallavatns - samspil bleikju og urriða

Í nýlegu þemahefti Náttúrufræðingsins, tímariti Hins íslenska náttúrufræðifélags, sem tileinkað er Dr. Pétri M. Jónassyni, eru birtar margar ítarlegar greinar um vöktun og rannsóknir á lífríki Þingvallavatns. Þar kemur meðal annars fram að á árunum 1962–2017 hefur ársmeðalhiti í útfallinu hækkað um 0,15 °C á áratug. Mest er hlýnunin að sumri með 1,3-1,6 °C hækkun á meðalhita hvers mánaðar í júní, júlí og ágúst, en hlýnunin nær einnig til hausts og fram á vetur en í minna mæli (0,7-1,1 °C). Engin mælanleg breyting hefur hins vegar orðið í febrúar, mars og apríl. Breyting hefur orðið á ísalögum þannig að Þingvallavatn leggur bæði sjaldnar og seinna en áður og ís brotnar fyrr upp (Hilmar J. Malmquist o.fl., 2020). Jóhannes Sturlaugsson líffræðingur hjá rannsóknafyrirtækinu Laxfiskum hefur stundað samfellda vöktun á vatnshita í Öxará frá árinu 2003. Einnig vaktaði Jóhannes vatnshita á ýmsum svæðum í Þingvallavatni frá 2003 til þess tíma að vöktun opinberra aðila á vatnshita komust í fastar skorður 2007. Í því sambandi má nefna vöktun á vatnshita árið um kring á mismunandi dýpi í Sandeyjardjúpi frá yfirborði og niður á 100m dýpi, sem var í fyrsta sinn sem samfelldar mælingar á mismunandi dýpi voru framkvæmdar yfir heilt ár í Þingvallavatni (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson o.fl., 2009; Jóhannes Sturlaugsson, án árs) Auk þessa hefur samfelldum hitagögnum verið safnað úr Þingvallavatni frá árinu 2003 fyrir tilstilli notkunar rafeindafiskmerkja sem mæla vatnshita (mælimerki og hljóðsendimerki) í rannsóknum Jóhannesar Sturlaugssonar á atferlisvistfræði urriða og í samskonar rannsóknum hans á atferlisvistfræði bleikju 2018-2020 (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson, 2016; Jóhannes Sturlaugsson, 2020; Jóhannes Sturlaugsson, 2023b). Í fyrri skýrslu vísindanefndar var fjallað talsvert um Þingvallavatn og þau áhrif sem þessar breytingar hafa haft á vistkerfi vatnsins (V2018). Þannig hafa mælst breytingar á efnasamsetningu vegna ákomu næringarefna (Eydís Eiríksdóttir og Sigurður Reynir Gíslason, 2020), ásamt því að breytingar hafa komið fram í magni og samsetningu sviflægra þörunga (Gunnar Steinn Jónsson, 2022).

Þegar vatnið hlýnar í maí-júní, hlýnar efsta lagið fyrst. Eðlisþyngdarmunur verður á milli hlýs yfirborðsvatns og kaldara dýpra vatns og það dregur úr blöndun. Á sama tíma er orðinn skortur á næringarefnum í vatninu (nitur) og þörungar hætta að fjölga sér og hverfa, sérstaklega af yfirborðinu. Um sumarið eru sokknir þörungar oft í miklu magni í kaldara og þyngra djúpvatni. Hvassviðri að sumri brýtur upp þetta ástand og veldur blöndun, þar sem sokknir þörungar

og næringarefni ná að berast til efri laga og stuðla tímabundið að nývexti þörungasvifs við yfirborðið. Þegar hitaskilin verða sterk, þannig að vindur nær ekki að hræra upp í vatnssúlunni hverfa næringarefni úr efra laginu og hefur það neikvæð áhrif á vöxt svifþörunga sem gæti haft keðjuverkandi áhrif upp fæðukeðjuna í vatnsbolnum. Líklegt er að slík hitaskil verði algengari með hlýnandi loftslagi (Finnur Ingimarsson o.fl., 2020) en óvíst er hvaða áhrif það, ásamt áðurnefndri breytingu á ísalögum að vetri og mögulega aukinni ákomu næringarefna, muni hafa á svifvist vatnsins. Auk þess sem hækkun vatnshita á grunnslóð verður meiri getur hátt hitastig þar varað langt fram á haustið.

Viðamiklar rannsóknir voru gerðar á fiskistofnum Þingvallavatns á árunum 1983-1984 og var byggt á stöðluðum veiðum í öllum búsvæðum. Þessar rannsóknir sýndu að í vatninu var þéttleiki bleikjuafbrigðanna fjögurra; kuðungableikju, dvergbleikju, murtu og sílableikju mjög mikill en urriðinn var í mikilli lægð. Frá þessum tíma hefur verið fylgst með hrygningarstofni murtu með árlegum sýnatökum við Mjóanes, en löng nýtingarhefð var fyrir netaveiðum á murtu, allt frá iðnaðarnýtingu til manneldis á árum áður til nýtingar heimamanna með netaveiðum og stangveiði en stangveiðileyfi eru seld á ákveðnum svæðum í Þingavallavatni. Fyrst byggðist vöktunin á sýnatöku úr afla bænda sem seldur var fyrirtækinu Ora, sem sá um niðursuðu á murtu til útflutnings, en frá því rétt eftir 1990 hefur sýnataka verið gerð á hrygningartíma þar sem veitt er með netum með mismunandi möskvastærð til að fá mat á stærðar- og aldursdreifingu hrygningarstofns murtunar. Fram hefur komið töluverður samdráttur í afla á murtu á hverja sóknareiningu sem gefur vísbendingar um fækkun í hrygningarstofni, auk þess sem breytingar mælast á magni sviflægra þörunga og krabbadýra sem eru ein aðalfæða murtunnar. Mælingar á hrygningarslóð í Mjóanesi haustið 2022 bentu til hruns á kynþroska murtum í Þingvallavatni og áberandi var hve hrognafullar hrygnur voru fáar samanborið við fyrri ár (Haraldur R. Ingvason o.fl., 2021). Vöktunin beinir sjónum að svifvist vatnsins og nær því eingöngu yfir murtuafbrigði bleikjunnar en hin þrjú afbrigðin hafa ekki verið vöktuð með sama hætti og murtan. Þó hafa verið tekin sýni til að áætla þéttleika þeirra árin 1992, 1993, 2001, 2002 og síðast 2020 (Benóný Jónsson og Magnús Jóhannsson, 2021). Þær mælingar sýna að afli á sóknareiningu annarra bleikjuafbrigða hefur minnkað niður í um þriðjung af því sem áður var.



Mynd 4.26: Bleikja (Salvelinus alpinus) hefur verið á undanhaldi í Þingvallavatni og víðar. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, birt með leyfi)

Sumarið 2019 fóru fram rannsóknaveiðar í vatninu og beitt var sömu aðferðum og 1984, þannig að bera mætti saman niðurstöðurnar milli tímabila. Niðurstöður rannsóknaveiðanna sýna að miklar breytingar hafa orðið á silungastofnum í vatninu frá því sem var árið 1984. Þéttleiki urriða hefur vaxið töluvert meðan stofnar murtu, sílableikju og dvergbleikju virðast hafa hrunið. Einnig komu í ljós marktækar breytingar á vaxtarmynstri bleikjuafbrigðanna en árið 2019 var meðallengd kynþroska murtu og sílableikju nokkru meiri en árið 1984 og kynþroska dverg- og kuðungableikjur voru talsvert stærri. Vaxtarhraði ungviðis hefur þannig aukist hjá öllum afbrigðum, þó mest hjá botnlægu afbrigðunum, dverg- og kuðungableikju (*Horta-Lacueya* og fleiri, í undirbúningi). Hafa þarf í huga að áður hafa komið fram breytingar í stofnstærð og kynþroskastærð murtu í Þingvallavatni. Afli murtu í veiðum til manneldis hrundi á níunda áratug síðustu aldar, frá því að vera um 63 tonn árið 1983 niður í enga veiði árið 1987. Ástæðan var rakin til breytinga í lengdardreifingu kynþroska murtu en á sama tíma og veiðin hrundi minnkaði meðallengd kynþroska hænga úr 18 í 13 cm og kynþroska hrygna úr 19 í 15 cm. Veiðar til manneldis voru þannig að eingöngu voru notuð net með einni möskvastærð (22 mm) og

veiddust eingöngu kynþroska fiskar yfir 17,5 cm að lengd þannig að breytingar til lækkunar í meðallengd gerði það að verkum að fiskarnir veiddust ekki í slíkt net (S. S. Snorrason o.fl., 1992).

Í stýrðri rannsókn Tómasar Árnasonar og fleiri 2022 þar sem könnuð voru áhrif mismunandi hitastigs á vaxtarhraða bleikjuungviðis kom í ljós að hærri hiti, frá 7 °C og 10 °C yfir í 12 °C jók vaxtarhraða þannig að eftir 315 daga við 12 °C var meðalþyngd bleikjuseiða 49 % meiri en við 7 °C og 19,2 % meiri en við 10 °C. Eftir að öllum hópum hafði verið komið fyrir á sama hitastigi (7 °C) og þeim fylgt eftir fram að degi 654, kom í ljós að stærðarröðunin á seiðastiginu snerist við á fullorðinsaldri. Lækkandi sláturþyngd stafaði af því að bleikjan varð fyrr kynþroska eftir því sem hitinn var hærri á seiðastiginu. Þó að ofangreind rannsókn hafi farið fram í eldisumhverfi má leiða að því líkur að hitastig geti hafi sambærileg áhrif á villta bleikju. Í þessu samhengi er einnig vert að benda á að sífellt fleiri rannsóknir sýna neikvætt samband milli hitastigs og hámarksstærðar fiska (sjá t.d. Atkinson og Sibly, 1997; Lavin o.fl., 2022). Því gæti hlýnun leitt til þess að hámarksstærð minnki vegna áhrifa sem leiða til þess að fiskar verði fyrr kynþroska.

Niðurstöður mælinga í Þingvallavatni 2019 sýndu sama mynstur í vaxtarhraða og fékkst með stýrðu rannsókninni en hvað kynþroskaaldur varðar voru niðurstöðurnar tvíbentar. Þannig mátti merkja að kynþroskaaldur dvergbleikjuhrygna hafi lækkað úr fjórum árum 1984 niður í tvö ár í mælingum árið 2019 en hjá murtunni hafði kynþroska seinkað um heilt ár að jafnaði (*Horta-Lacueya* og fleiri, í undirbúningi). Erfitt getur reynst að átta sig á áhrifum ofangreindra breytinga á meðalhæfni í stofnum bleikjuafbrigðanna, en þéttleikagögn benda til þess að þrjú afbrigðanna eigi mjög undir högg að sækja.

Sem dæmi um hugsanlegt orsakasamhengi má telja líklegt að aukinn vaxtarhraði og meiri stærð við kynþroska geti haft afgerandi áhrif á búsvæðaval dvergbleikju. Hún er löguð að því að nýta glufur milli steina á hörðum hraunbotni sem einkennir grunnslóð (0-8 m dýpi) víðast hvar í Þingvallavatni. Þetta búsvæði sér þessum smáu fiskum fyrir fæðu auk þess að verja þá fyrir afráni. Gögnin frá 2019 benda eindregið til þess að vegna aukinnar stærðar eigi dvergbleikjan miklu minni möguleika á að nýta sér þetta búsvæði og sé frekar berskjölduð fyrir samkeppni við kuðungableikju. Slíkar breytingar geta þannig haft mjög neikvæð áhrif á svona sérhæft afbrigði og raunveruleg hætta er á því að breytileiki innan tegunda geti tapast í kjölfarið.

Á sama tíma og þessar lífeðlisfræðilegu breytingar eru að eiga sér stað sem valda fækkun hjá bleikju í Þingvallavatni þá hefur verið mikill uppgangur í stofnstærð og þéttleika urriða í vatninu ef frá eru skilin síðustu tvö ár. Gleggstu gögnin um fjölgun urriðans á þessari öld eru frá yfirstandandi árlegum talningum Jóhannesar Sturlaugssonar á fjölda hrygningarurriða á riðstöðvum urriðans í Öxará en sú langtímavöktun hófst 2003 (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson, án árs). Aðrar rannsóknir benda til sömu þróunar hjá urriðanum, bæði talningar hrygningarurriða á undanförnum árum í Ölfusvatnsá frá árinu 2015 sem og í Efra-Sogi frá árinu 2006. Þær talningar sýna að fyrir Öxará og Ölfusvatnsá stækkuðu hrygningarstofnar lengst af en minnkuðu síðan töluvert 2021 og 2022. Í Efra-Sogi hefur hrygning verið fáliðuð, stóð í stað framan af en hefur minnkað nokkuð undangengin ár. Rannsóknirnar hafa staðfest að á öllum þessum svæðum sé urriðinn að hrygna árum saman, ýmist samfellt eða með hléum og um leið sýnt gagnsemi veiða og sleppa fyrirkomulagsins í stangveiði sem stuðlar að endurtekinni hrygningu Þingvallaurriða (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson, 2011; Jóhannes Sturlaugsson, 2016). Þessi uppgangur urriða var einnig staðfestur í vísindaveiðum Hafrannsóknastofnunar 2020 þar sem afli urriða á sóknareiningu hafði aukist miðað við sambærilegar mælingar sem gerðar voru 1992-1993 og 2001-2002, en bleikjuaflinn minnkað á sama tíma (Benóný Jónsson og Magnús Jóhannsson, 2021), sem og í nýlegum rannsóknum vísindamanna við Háskóla Íslands og Háskólans á Hólum (*Horta-Lacueya* og fleiri, í undirbúningi).

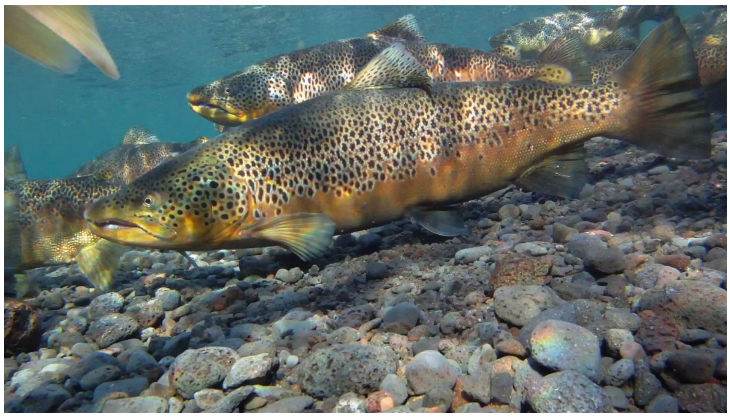
Urriði er afræningi á smáa bleikju og því má ætla að þessi mikla aukning á stofnstærð hans, samhliða breytingum á ætisframboði, vatnshita og lífeðlisfræði bleikjunnar, hafi aukið niðursveiflu í stofnstærð bleikjuafbrigða. Forsendur eru þó ekki til að leggja mat á það hvert vægi urriðans sé í niðursveiflu bleikjunnar fremur en vægi annarra þekktra þátta sem breyst hafa. Orsakasamhengið á breytingum á hitastigi Þingvallavatns, kynþroskaaldri og meðallengd

bleikju, uppgangi urriða, ásamt breytingum í stofnstærð krabbadýra, er ekki að fullu ljóst og því mikilvægt að halda áfram þeirri vöktun sem hefur verið á vatnshita, næringarefnum, svifþörungum en um leið auka vöktun á öllum fiskistofnum Þingvallavatns, hornsíla, urriða og fjórum afbrigðum bleikju og sem flestra lykilþátta í fæðukeðju þeirra. Einnig þarf að gera átak í að bæta veiðiskráningu afla, bæði í netaveiðum og stangveiði. Samhliða vöktun er aðkallandi að gera rannsóknir á því á hvaða lífsskeiðum bleikju áhrifin koma fram og eftir hvaða lífeðlis- og þroskunarfræðilegu ferlum það gerist.

Þingvallavatn hefur verið vaktað skipulega síðan árið 2007 samkvæmt vöktunaráætlun á vegum Umhverfisstofnunar, Landsvirkjunar, Orkuveitu Reykjavíkur, Þjóðgarðsins á Þingvöllum, Grímsness- og Grafningshrepps og Bláskógabyggðar. Vöktunin er byggð á grundvelli reglugerðar um verndun vatnasviðs og lífríkis Þingvallavatns og hafa framkvæmdaraðilar verið Náttúrufræðistofa Kópavogs og Jarðvísindastofnun Háskólans (síðar Hafrannsóknastofnun). Í nýlegri og endurbættri vöktunaráætlun fyrir Þingvallavatn fyrir árin 2019-2024, sem samin var af Umhverfisstofnun í tengslum við lög um stjórn vatnamála, er bætt við fyrri vöktun þannig að hún nær nú utan um fleiri þætti en áður. Sem dæmi verður bætt við sýnatöku á botnhryggleysingjum, vatnaplöntum auk þess sem stundaðar verða rannsóknaveiðar á nokkurra ára fresti á öllum afbrigðum bleikju og urriða. Fyrsta slíka söfnunin, sem framkvæmd var af Hafrannsóknastofnun, fór fram sumarið 2020 og niðurstöðurnar birtar í skýrslu stofnunarinnar (Benóný Jónsson og Magnús Jóhannsson, 2021).

4.4.3.1 Mikilvægi samstarfs vöktunar- og rannsóknaraðila

Auk vöktunar í Þingvallavatni er mikilvægt að stundaðar séu rannsóknir sem geta aukið þekkingu og skilning á þeim breytingum sem eru að eiga sér stað og merkjanlegar eru. Í því ljósi má benda á tvær rannsóknir sem standa yfir í Þingvallavatni. Annars vegar rannsóknir vísindamanna Háskóla Íslands (HÍ) sem hafa síðustu ár verið að rannsaka farhegðun bleikjuafbrigða í Þingvallavatni með hljóðmerkjum sem numin eru af 38 hlustunarduflum sem búið er að koma fyrir í vatninu. Merkin, sem eru sett á bleikjuna, eru einnig með hita- og dýpismælum þannig að hægt er að skoða hvort bleikja haldi sig innan ákveðna hitamarka og þá á hvaða dýpi.



Mynd 4.27: Hrygningarurriðar á riðunum í Öxará. (Ljósm. Jóhannes Sturlaugsson, birt með leyfi)

Hinsvegar eru það rannsóknir Jóhannes Sturlaugssonar hjá Laxfiskum á atferlisvistfræði Þingvallaurriða sem hann hefur stundað óslitið frá árinu 2003 með notkun rafeindafiskmerkja (Jóhannes Sturlaugsson, 2007; Jóhannes Sturlaugsson, 2016; Jóhannes Sturlaugsson, 2023b). Í þessum rannsóknum, sem eiga uppruna sinn í forathugun Jóhannesar Sturlaugssonar og Hilmars Malmquist 2011, hafa verið merktir ríflega 170 urriðar en einnig hafa verið rannsakaðar bleikjur af mismunandi afbrigðum sem gefur möguleika á samanburði á atferli urriðans og murtunnar (Jóhannes Sturlaugsson, 2020). Árið 2007 merkti Jóhannes Sturlaugsson fáeinar bleikjur í Hagavík með slíkum merkjum sem höfðu dýptarnema og síðan aftur 2018 víðsvegar í Þingvallavatni þegar merktar voru 18 bleikjur sem voru 20-62 cm langar (murtur; kuðungableikjur og ránbleikjur), en vöktun þeirra gaf, auk landfræðilegra upplýsinga, gögn um bæði fiskdýpi og vatnshita frá gönguleið bleikjanna og stóð sú skráning fram á árið 2020 (Jóhannes Sturlaugsson, 2020). Þær rannsóknir sýndu að bleikjan fór um allt Þingvallavatn þ.m.t. murtan sem fór meðal annars um allra dýpstu

svæði Þingvallavatns (> 100m botndýpi). Hægt er að tengja niðurstöður þessara rannsókna við hitamælingar sem hafa verið gerðar í vatninu (Hilmar J. Malmquist o.fl., 2020).

Merkingar í vatnakerfi Þingvallavatns, hvort heldur er með rafeindfiskmerkjum eða hefðbundnum merkjum, gefa einnig upplýsingar um vaxtarhraða fiska þegar merktir fiskar endurveiðast. Sem dæmi má nefna mikinn árlegan vaxtarhraða hjá urriða í Þingvallavatni, ekki síst síðasta skeiðið áður en hann gengur í kynþroska. Þannig var um 51 cm ókynþroska urriði sem veiddist 22 mánuðum eftir að hafa verið merktur var árið 2007 þá orðin 78 cm (Jóhannes Sturlaugsson, 2023b). Rannsókn Laxfiska og Matís á magni kvikasilfurs og annarra óæskilegra snefilefna í urriða í Þingvallavatni sýndi að sterk fylgni var milli lengdar urriðans og magns kvikasilfurs í honum (Jóhannes Sturlaugsson o.fl., 2009). Lífmögnun er líklegasta ástæðan fyrir háum styrk kvikasilfurs í urriðum úr Þingvallavatni, sem verða venju fremur stórir og gamlir, þar sem styrkur kvikasilfurs eykst eftir því sem ofar dregur í fæðukeðjunni.

Rannsóknir vísindamanna HÍ og Háskólans á Hólum ná einnig yfir það að reyna staðsetja hrygningarstaði laxfiska í Þingvallavatni með aðstoð fjarkönnunar og skoða hitabreytingar sem hrognin verða fyrir á mismunandi hrygningarstöðum. Þannig er unnt að áætla væntanlegan klaktíma, en fyrstu niðurstöður benda til þess að það geti munað allt að 40 dögum á klaktíma milli svæða sem kuðungableikja nýtir til hrygningar (Horta-Lacueva o.fl., 2022). Það er mikilvægt að þekkja vel hrygningartíma og staðsetningu hrygningar og hjálpa mælimerkjarannsóknir, bæði á urriða (Jóhannes Sturlaugsson, 2023b) og bleikju, til við að öðlast slíka þekkingu. Slíkt væri gagnlegt, bæði til að stýra veiðum í Þingvallavatni en einnig til að gera vöktun markvissari. Sem dæmi hafa hrygningarsvæði við Ólafsdrátt verið lokuð fyrir veiði frá 15. júlí. Þegar hrygningarsvæði verða betur þekkt verður hægt að stýra veiðum og umferð í kringum svæðin á þann hátt að truflun á hrygningu verði sem minnst. Með hækkandi hitastigi verða kaldar uppsprettur Þingvallavatns enn mikilvægari en áður fyrir bleikjuna en kaldara vatn getur seinkað þroska bleikjuseiða um allt að mánuð og getur verið mikilvægt skjól fyrir bleikjuna samhliða hækkandi vatnshita (Horta-Lacueva o.fl., 2022).

Þessu tengt þá benda nýlegar rannsóknir á hornsílum (*Gasterosteus aculeatus*) í vötnum á Íslandi til þess að staðlaður efnaskiptahraði stofna á hlýjum svæðum sé hægari en stofna í köldu vatni. Hlýnun geti því leitt til þess að breytingar verði í efnaskiptahraða hornsíla til að aðlagast breyttum umhverfisskilyrðum. Höfundar benda þó á að samband erfða og umhverfis geti haft áhrif á slíka þróun þar sem líklegt er að einangraðir stofnar hornsíla, sem lifa í vötnum með einsleitu umhverfi með tilliti til hitastigs, geti sýnt slíka þróun fyrr heldur en stofnar hornsíla sem lifa í vötnum með breytilegu hitastigi og opnu genaflæði milli stofna, líkt og til dæmis er að finna í Mývatni (Pilakouta o.fl., 2020). Enn fremur er greinanlegur munur í atferli hjá stofnum hornsíla á þann hátt að einstaklingar, sem komu úr stofnum í heitum, einangruðum vötnum, voru ekki eins félagslyndir og einstaklingar úr kaldari vötnum. Líkt og með efnaskiptahraðann skiptir máli hversu mikið genaflæði er á milli stofna úr mismunandi umhverfi (Pilakouta o.fl., 2020). Þessar hornsílarannsóknir benda enn fremur á mikilvægi samspils milli erfða (genaflæði milli stofna og afbrigða), umhverfis (kaldar uppsprettur í hlýnandi vatni) og þroskunar (aukinn vaxtarhraði afbrigða) og beina þarf sjónum að öllum þessum þáttum við rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga.

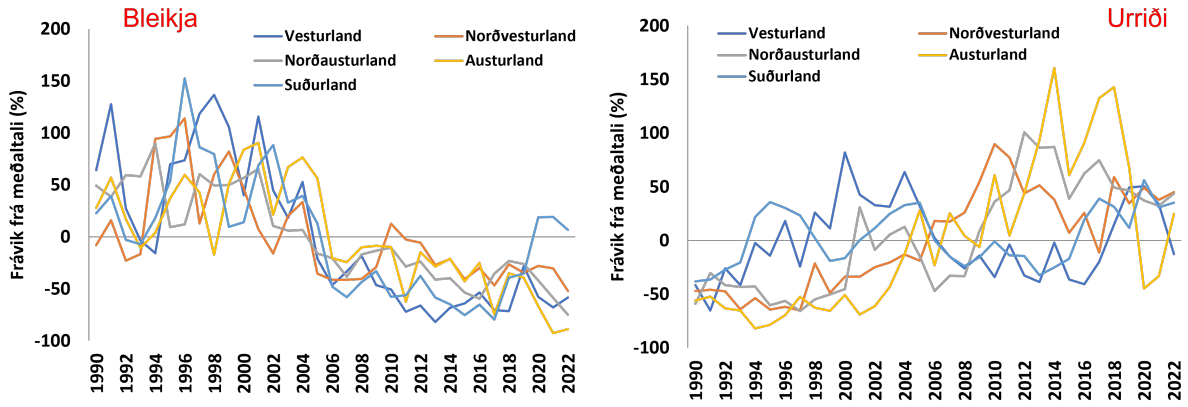
Vísindamenn við HÍ hafa einnig verið í samstarfi við Hafrannsóknastofnun þegar kemur að kortlagningu á skyldleika og stofnbyggingu urriða í Þingvallavatni og annars staðar í vatnakerfi Ölfusár en niðustöður rannsóknar þeirra voru birtar í nýlegri vísindagrein (Lagunas o.fl., 2023). Í rannsókninni var urriði í fjórum vötnum, þar á meðal í Þingvallavatni, og í tólf ám veiddur og erfðaefni úr 300 fiskum greindur. Niðurstöðurnar varpa ljósi á uppbyggingu stofna urriða á vatnasviðinu. Stofnarnir hafa mótast af landslagsbreytingum í kjölfarið á hörfun ís eftir lok ísaldar og þannig hafa staðbundnir stofnar ofan fossa aðgreinst öðrum stofnum. Sem dæmi eru urriðar í Úfljótsvatni og Þingvallavatni, og aðrennslisám þeirra í Öxará og í Efra-Sogi, erfðafræðilega líkir en talsvert fjær í skyldleika við stofna neðar í vatnakerfinu. Með niðurstöðunum er einnig hægt að meta svokallaða *virka* stofnstærð (þ.e. fjölda fiska sem tímgast í hverri kynslóð) og reyndist

hún vera mjög lítil á flestum stöðum nema í Öxará og í Soginu (Lagunas o.fl., 2023).

Þegar litið er til allra þeirra rannsókna á stofnum urriða og bleikju sem framkvæmdar hafa verið af mörgum mismundandi aðilum þá er augljóst að gagnlegar upplýsingar geta fengist með samanburði á þeim gögnum, ekki síst með samráði varðandi útfærslu á þeim vöktunarverkefnum sem framkvæmd eru á sömu tímabilum. Auka þarf einnig samstarf milli rannsóknaraðila og vöktunaraðila og auka við opið aðgengi að gögnum sem safnað er í vöktunum á vegum opinbera aðila líkt og tillögur verkefnahóps Vísinda- og tækniráðs um rannsóknarinnviði og vöktun lagði til í skýrslu sem fjallað var um hér að framan (Vísinda- og Tækniráð, 2017).

4.4.4 Áframhaldandi þróun í stofnstærð laxfiska

Samhliða niðursveiflu, sem er að greinast hjá bleikju í Þingvallavatni, hefur svipað mynstur verið í veiðitölum á bleikju á öllu landinu, bleikju hefur fækkað en urriða fjölgað (Guðmunda Björg Þórðardóttir og Guðni Guðbergsson, 2023). Í nýbirtri grein Martin A. Svenning o.fl. 2021, þar sem bornar eru saman veiðitölur á Íslandi og í Norður-Noregi, kemur fram að hlutfallslegar breytingar eru greinanlegar hjá þremur tegundum laxfiska; laxi, bleikju og urriða í ferskvatni í báðum löndunum, en það eru einu svæðin í heiminum sem þessar þrjár tegundir lifa saman. Frá árinu 1993–2018 hafa verið tiltölulega litlar breytingar í heildarveiði á þessum þremur tegundum en hlutfallið hefur breyst þar sem bleikju fækkar töluvert og urriða fjölgar en veiðitölur á laxi standa í stað (mynd 4.28). Einnig má nefna að sú þróun sem sést hefur á hlutfalli bleikju og urriða í veiðitölum, og fjallað hefur verið um í fyrri skýrslum vísindanefndar (V2008-V2018), heldur áfram (Jeppesen o.fl., 2012; Guðmunda Björg Þórðardóttir og Guðni Guðbergsson, 2023). Í öllum tilfellum eru loftslagsbreytingar nefndar sem mögulegur áhrifavaldur þótt ekki sé hægt að greina orsakasamhengið af nákvæmni.

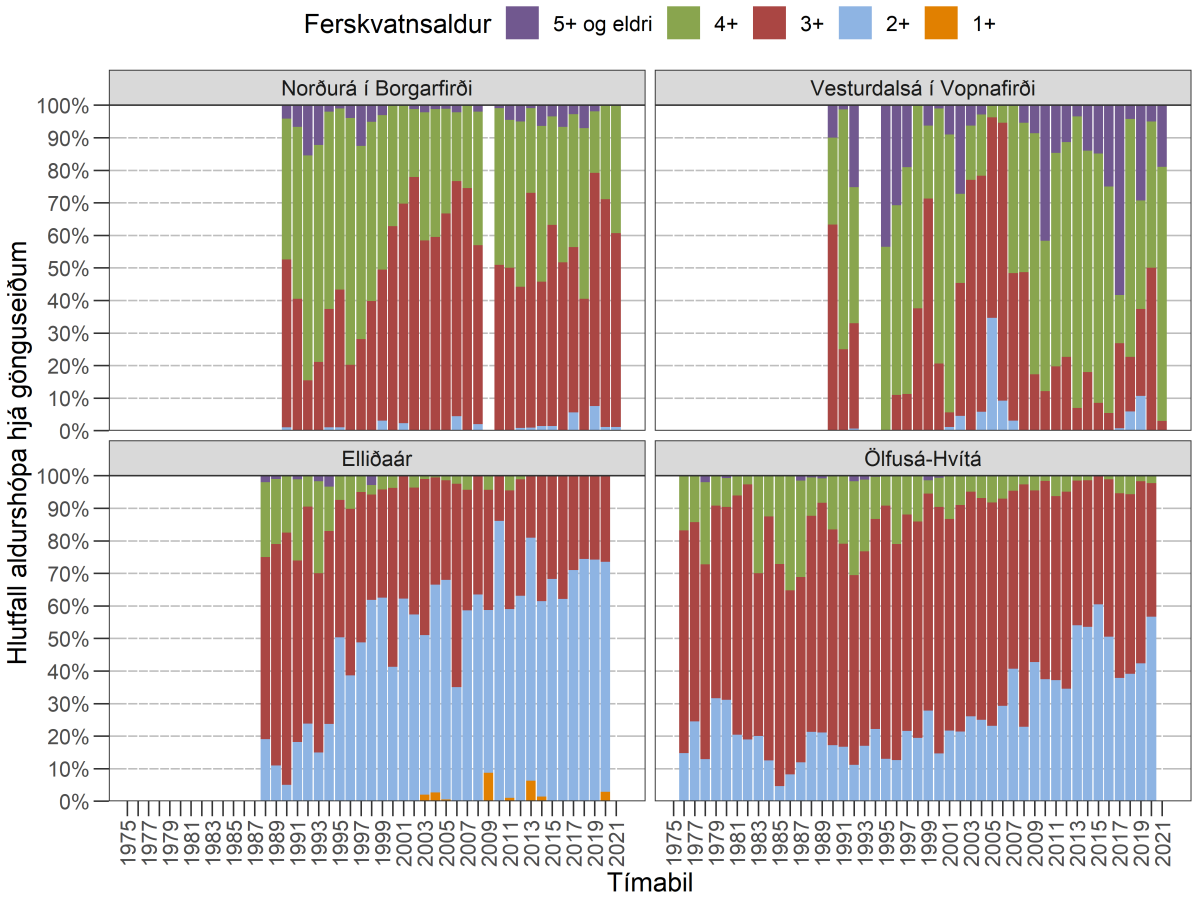


Mynd 4.28: Frávik í meðalveiði milli ára á bleikju og urriða (sjóbirtingi). Byggt á Guðmunda B. Þórðardóttir og Guðni Guðbergsson (2023)

.

Þó að hlutfallslegar breytingar í veiði á laxi séu litlar er hægt að greina ákveðna þróun sem svipar til þess sem er að greinast hjá bleikjuafbrigðum í Þingvallavatni. Lífsferill laxins er tvískiptur, hann elst upp sem seiði í ferskvatni þangað til hann hefur náð nægilegri stærð til að geta gengið til sjávar í fæðuleit áður en hann kemur til baka eftir að hafa verið eitt til tvö ár í sjó. Á Íslandi getur það tekið laxaseiði 2-5 ár að ná gönguseiðastærð. Mælingar Hafrannsóknastofnunar í ám á Norðausturlandi sýna að sterk jákvæð tengsl eru milli vaxtarhraða og hitastigs hjá laxaseiðum, sérstaklega á fyrstu vaxtarárum þeirra (Hlynur Bárðarson o.fl., 2018). Hækkun vatnshita getur því stytt kynslóðatíma og langtímavöktun á aldri gönguseiða laxa og vatnshita í Vesturdalsá í Vopnafirði sýnir samhengi þar sem aldur hækkar á tímum þegar vatnshiti er lágur og lækkar á tímum þegar vatnshiti hækkar. Vöktun á gönguseiðum laxa er aðeins gerð í þremur vatnsföllum á Íslandi; í Vesturdalsá (Hlynur Bárðarson o.fl., 2023), Elliðaám

(Þórólfur Antonsson og Friðþjófur Árnason, 2011; Jóhannes Sturlaugsson, 2023a) og í Kálfá sem er hliðará í Þjórsá (Magnús Jóhannsson og Benóný Jónsson, 2022). Einnig er hægt að greina aldur gönguseiða með því að skoða hreistursýni af fullorðnum fiskum eins og gert hefur verið lengi í Norðurá í Borgarfirði (Ásta Kristín Guðmundsdóttir og Sigurður Már Einarsson, 2022) og í Ölfusár-Hvítár-vatnakerfinu (Magnús Jóhannsson og Hlynur Bárðarson, 2021). Í Vesturdalsá er ekki merkjanleg þróun um lækkun á gönguseiðaaldri en þegar skoðuð eru gögn frá öðrum landshlutum kemur í ljós að aldur gönguseiða hefur lækkað undanfarin ár, sem er svipuð þróun og er að greinast í kynþroskaaldri bleikju í Þingvallavatni. Þannig var algengast að laxaseiði þyrftu þrjú ár til að ná gönguseiðastærð í Elliðaám og í Ölfusá-Hvítá en undanfarin tíu ár hefur verið algengara að sjá tveggja ára gönguseiði í Elliðaám og sama hefur sést í Ölfusá-Hvítá. Á sama tímabili hefur algengasti gönguseiðaaldur laxa í Norðurá í Borgarfirði breyst úr fjórum árum í þrjú (mynd 4.29).



Mynd 4.29: Ferskvatnsaldur gönguseiða lax í fjórum ám á Íslandi.

Svipaða lækkun á gönguseiðaaldri laxaseiða er einnig hægt að greina í ám víða um Norður-Atlantshaf til að mynda í ánni Dee sem rennur um England og Wales þar sem meðalaldur gönguseiða lækkaði úr því að vera um tvö ár að meðaltali fyrir 1980 í að vera um 1,6 ár að meðaltali seinni hluta síðustu aldar (Aprahamian o.fl., 2008). Ekki eru til margar rannsóknir á áhrifum lækkandi aldurs gönguseiða laxa en I. J. J. Moffett og fleiri 2006 greindu jákvætt marktækan mun á hrognastærð hjá laxahrygnum sem voru tvö ár að ná göngustærð samanborið við þær hrygnur sem voru eins árs við útgöngu í ánni Bush á Norður-Írlandi. Einnig voru vísbendingar um að klakárangur hefði verið betri í hrognum hrygna sem voru tveggja ára sem gönguseiði. Ekki er hægt að útiloka að aðrir áhrifaþættir en vatnshiti sé að valda lækkun í meðalaldri gönguseiða, svo sem þéttleikaháð áhrif seiða í ánum sem einnig hefur áhrif á vaxtarhraða (Magnús Jóhannsson o.fl., 2015). Ekki er heldur að fullu ljóst hvaða áhrif styttri

kynslóðatími getur haft á stofnstærðir og veiðinýtingu.

4.4.5 Nýrnasýking (PKD) – áhyggjuefni hlýnunar

Nýrnasýking (*e. Proliferative Kidney Disease; PKD*) er orsakaþáttur sem veldur afföllum hjá laxfiskum, og tengist beint hækkandi vatnshita á þann hátt að sjúkdómurinn nær sér ekki á strik nema vatnshitinn hafi náð 12-15 °C í 1-3 mánuði (J. A. Brown o.fl., 1991). Fiskar geta verið einkennalausir smitberar við lægra hitastig og þannig getur sýkillinn haldist við í vistkerfinu. Rannsóknir Árna Kristmundssonar og fleiri 2010; 2011 á PKD í vötnum á Íslandi, sem framkvæmd var árið 2009, sýndu mjög háa smittíðni PKD í bleikju, eða 97 % í Elliðavatni og 96 % í Vífilsstaðavatni, meðan smittíðnin var mun lægri hjá urriða í sömu vötnum. Í Mývatni var smittíðni í bleikju einnig talsvert há (43 %), en enginn fiskur sýndi einkenni sjúkdómsins. Nýlega birtu Árni Kristmundsson og samstarfsmenn niðurstöður rannsóknar þar sem skoðaðar voru breytingar á útbreiðslu sníkilsins *Tetracapsuloides bryosalmonae*, sem er orsakavaldur PKD-sýkingar (Kristmundsson o.fl., 2023). Rannsóknin náði yfir 34 vötn þar sem sýni af bæði bleikju og urriða voru tekin, annars vegar á tímabilinu 1994–1998 og hins vegar frá 2009–2017, og skoðað hvort PKD-sýking væri sýnileg og hvort sníkilinn *T. bryosalmonae* væri til staðar. Helstu niðurstöðurnar voru að á fyrra tímabilinu voru fiskar í 43 % vatna með sníkilinn og voru það aðallega vötn á láglendi meðan hálendisvötn voru laus við sníkilinn. Af þessum vötnum var hins vegar bara eitt stöðuvatn, Vífilsstaðavatn, þar sem bleikja með PKD-sjúkdómseinkenni fannst. Á síðara tímabilinu var útbreiðslan orðin talsvert meiri með um 89 % stöðuvatna þar sem fiskar sýktir af sníklinum fundust og sjúkdómseinkenni PKD greindist í 61 % af vötnunum. Árni Kristmundsson o.fl 2010; 2011; 2023 bentu á að PKD-nýrnasýki á Íslandi væri að öllum líkindum bein afleiðing af hlýnandi loftslagi. Mikil útbreiðsla smitefnisins í íslenskum vötnum væri einnig áhyggjuefni ef enn frekari hlýnun ætti sér stað. Sem dæmi er smittíðni há í Mývatni en vatnshitinn á mörkum þess að sýking geti þrifist. Mývatn er, líkt og Þingvallavatn, mikið rannsakað vatn og vaktað þegar kemur að öllu lífríki vatns. Til að mynda hefur silungur í vatninu verið vaktaður árlega allt frá árinu 1986 (Guðni Guðbergsson, 2021), en veiðar þar hafa alla tíð verið mjög mikilvæg hlunnindi fyrir samfélagið í Mývatnssveit og því til mikils að vinna að hámarka afla. Tvisvar hefur orðið algjört hrun í bleikjustofninum í Mývatni á þeim tíma sem vöktunin hefur staðið yfir, annars vegar árið 1988 og aftur 1997. Það tók bleikjustofninn þó nokkur ár að ná sér á strik eftir fyrra hrunið en segja má að stofninn sé ennþá að vinna sig upp úr hruninu sem varð 1997, þrátt fyrir að dregið hafi úr sókn og á tímabili beitt veiðibanni (Guðni Guðbergsson, 2021). Í nýlegri vísindagrein, þar sem niðurstöður vöktunar á bleikju í Mývatni eru skoðaðar með tilliti til aldurssamsetningar og veiðiálags, kemur í ljós að þrátt fyrir að veiðitakmörkun hafi haft jákvæð áhrif á stærð hrygningarstofns bleikjunnar þá hefur nýliðun, mæld í fjölda afkvæma eftir hvert foreldri, minnkað (Phillips o.fl., 2022). Þær niðurstöður benda í sömu átt og víðar hér á landi að viðkoma hefur minnkað hjá bleikju og að sama skapi hefur stærð þeirra einstaklinga sem ná að dafna aukist.

Heimildir

Alfreðsson, Matthías, Erling Ólafsson, Matthías Eydal, Ester Rut Unnsteinsdóttir, Kayleigh Hansford, William Wint, Neil Alexander og Jolyon M. Medlock (okt. 2017). „Surveillance of Ixodes ricinus ticks (Acari: Ixodidae) in Iceland“. Í: *Parasites and Vectors* 10.1, bls. 1–11. DOI: 10.1186/S13071-017-2375-2/FIGURES/5.

Alþingi (2020). *Lög um breytingu á lögum um tekjuskatt, nr. 90/2003, með síðari breytingum (frádráttur vegna kolefnisjöfnunar)*. Legal Rule or Regulation. URL: https://www.althingi.is/altext/150/s/1981.html.

AMAP (2021). *AMAP Assessment 2021: Impacts of Short-lived Climate Forcers on Arctic Climate, Air Quality, and Human Health*. Report. Arctic Monitoring og Assessment Programme (AMAP). URL: https://www.amap.no/documents/download/6927/inline.

ANR (2020). *Loftslagsmál í nautgriparækt*. Tæknileg skýrsla. Atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið.

Aprahamian, Miran W., Ian C. Davidson og Richard J. Cove (maí 2008). „Life history changes in Atlantic salmon from the River Dee, Wales“. en. Í: *Hydrobiologia* 602.1, bls. 61–78. ISSN: 1573-5117. DOI: 10.1007/s10750-008-9286-3. URL: https://doi.org/10.1007/s10750-008-9286-3 (skoðað 19.01.2023).

Arnór Snorrason og Bjarki Þór Kjartansson (2004). „Íslensk skógarúttekt“. Í: *Skógræktarritið (Icelandic Forestry)* 2004.2, bls. 101–108.

Arnór Snorrason, Björn Traustason, Bjarki Þór Kjartansson, Lárus Heiðarsson, Rúnar Ísleifsson og Ólafur Eggertsson (2016). „Náttúrulegt birki á Íslandi - Ný úttekt á útbreiðslu þess og ástandi“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 86.3-4, bls. 97–111.

Atkinson, David og Richard M Sibly (1997). „Why are organisms usually bigger in colder environments? Making sense of a life history puzzle“. Í: *Trends in ecology & evolution* 12.6, bls. 235–239.

Árnason, Tómas, Heiðdís Smáradóttir, Helgi Thorarensen og Agnar Steinarsson (2022). „Effects of Early Thermal Environment on Growth, Age at Maturity, and Sexual Size Dimorphism in Arctic Charr“. Í: *Journal of Marine Science and Engineering* 10.2, bls. 167. ISSN: 2077-1312. DOI: 10.3390/jmse10020167.

Árni Kristmundsson, Þórólfur Antonsson og Friðþjófur Árnason (2011). „PKD- nýrnasýki í laxfiskastofnum á Íslandi með áherslu á vatnasvið Elliðaáa -þróun, áhrif og útbreiðsla sjúkdómsins og tengsl við breyttar umhverfisaðstæður“. Í: (VMST/11048), bls. 17. URL: https://www.hafogvatn.is/static/research/files/skra_0074067.pdf (skoðað 11.08.2023).

Ásta Kristín Guðmundsdóttir og Sigurður Már Einarsson (2022). „Vöktun laxastofna á vatnasvæði Norðurár í Borgarfirði 2021“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2022-08).

Baldvinsdóttir, Guðridur, Sigþrúður Jónsdóttir og Bjarni D. Sigurðsson (2020). „Impact of different stocking densities of sheep on establishing stands of Larix sibirica in Iceland“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 33.8, bls. 89–101.

Barrio, Isabel C., Laura Barbero-Palacios, Elina Kaarlejärvi, James D. M. Speed, Starri Heiðmarsson, David S. Hik og Eeva M. Soininen (2022). „What are the effects of herbivore diversity on tundra ecosystems? A systematic review protocol“. Í: *Environmental Evidence* 11.1, bls. 1. DOI: 10.1186/s13750-022-00257-z.

Barrio, Isabel C., David S. Hik, Jóhann Thórsson, Kristín Svavarsdóttir, Bryndís Marteinsdóttir og Ingibjörg Svala Jónsdóttir (2018). „The sheep in wolf's clothing? Recognizing threats for land degradation in Iceland using state-and-transition models“. Í: *Land Degradation & Development* 29.6, bls. 1714–1725. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.2978.

Barry, P. H., D. R. Hilton, E. Füri, S. A. Halldórsson og K. Grönvold (2014). „Carbon isotope and abundance systematics of Icelandic geothermal gases, fluids and subglacial basalts with

implications for mantle plume-related CO2 fluxes“. Í: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 134, bls. 74–99. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gca.2014.02.038.

Behrend, Anna Mariager (2019). „Natural succession after heavy grazing pressure - A case study of the birch forests of Þórsmörk and Goðaland, southern Iceland“. MSc thesis.

Benóný Jónsson og Magnús Jóhannsson (2021). „Vöktun laxfiska í Þingvallavatni 2020“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (KV 2021-5).

Bergh, J, M Freeman, B D Sigurdsson, S Kellomäki, K Laitinen, S Niinistö, H Peltola og S Linder (2003). „Modelling the short-term effects of climate change on the productivity of selected tree species in Nordic countries“. Í: *Forest Ecology and Management* 183, bls. 327–340. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(03)00117-8.

Bjarni D. Sigurðsson, N. I. W. Leblans, Steven Dauwe, Elín Guðmundsdóttir, Per Gundersen, Gunnihildur E. Gunnarsdóttir, Martin Holmstrup, Krassimira Ilieva-Makulec, Thomas Kätterer, Bryndís Marteinsdóttir, Marja Maljanen, Edda S. Oddsdóttir, Ivika Ostonen, Josep Peñuelas, Christopher Poeplau, Andreas Richter, Páll Sigurðsson, Peter M. Van Bodegom, Håkan Wallander, James Weedon og Ivan Janssens (2016). „Geothermal ecosystems as natural climate change experiments: the ForHot research site in Iceland as a case study“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 29, bls. 53–71.

Bjarni Diðrik Sigurðsson og Borgþór Magnússon (2019). „Kolefnishringrás Íslands“. Í: *Rit Mógilsár* 37, bls. 17–24.

Bjarni E. Guðleifsson (2004). „Áhrif væntanlegra loftslagsbreytinga á landbúnað á Íslandi“. Í: *Rit Fræðaþings landbúnaðarins* 2004, bls. 17–25.

Bjorkman, Anne D., Mariana García Criado, Isla H. Myers-Smith, Virve Ravolainen, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Kristine Bakke Westergaard, James P. Lawler, Mora Aronsson, Bruce Bennett, Hans Gardfjell, Starri Heiðmarsson, Laerke Stewart og Signe Normand (2020). „Status and trends in Arctic vegetation: Evidence from experimental warming and long-term monitoring“. Í: *Ambio* 49.3, bls. 678–692. DOI: 10.1007/s13280-019-01161-6.

Bjorkman, Anne D. o.fl. (2018). „Plant functional trait change across a warming tundra biome“. Í: *Nature* 562.7725, bls. 57–62. DOI: 10.1038/s41586-018-0563-7.

Björgvin Brynjarsson, Börkur Smári Kristinsson og Eva Yngvadóttir (2020). *Kolefnisspor nautgriparæktar á Íslandi 2018*. Report. EFLA Verkfræðistofa.

Björn Þór Björnsson (2021). *Vatnsskortur í Múlaþingi vegna þurrka*. Newspaper Article. URL: https://austurfrett.is/frettir/vatnsskortur-i-mulathingi-vegna-thurrka.

Björnsdóttir, Katrín, Isabel C. Barrio og Ingibjörg S. Jónsdóttir (2022). „Long-term warming manipulations reveal complex decomposition responses across different tundra vegetation types“. Í: *Arctic Science* 8.3, bls. 979–991. DOI: 10.1139/as-2020-0046.

Borgþór Magnússon, Sigurður H. Magnússon, Kristbjörn Egilsson, Rannveig Thoroddsen, Járngerður Grétarsdóttir, Ingibjörg Eyþórsdóttir og Eyþór Einarsson (nóv. 2022a). *Gróðurbreytingar í Skaftafelli í kjölfar friðunar og hlýnandi veðurfars [Vegetation changes in Skaftafell during 1979–2018]*. Report. Náttúrufræðistofnun Íslands.

Borgþór Magnússon, Sigurður H. Magnússon, Kristbjörn Egilsson, Rannveig Thoroddsen, Járngerður Grétarsdóttir, Ingibjörg Eyþórsdóttir og Eyþór Einarsson (2022b). *Gróðurbreytingar í Skaftafelli í kjölfar friðunar og hlýnandi veðurfars*. Tæknileg skýrsla NI-22007. Garðabæ: Náttúrfræðistofnun Íslands.

Boulanger-Lapointe, Noémie, Kristín Ágústsdóttir, Isabel C. Barrio, Mathilde Defourneaux, Rán Finnsdóttir, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Bryndís Marteinsdóttir, Carl Mitchell, Marteinn Möller, Ólafur Karl Nielsen, Arnór Þórir Sigfússon, Skarphéðinn G. Þórisson og Falk Huettmann (2022). „Herbivore species coexistence in changing rangeland ecosystems: First high resolution national open-source and open-access ensemble models for Iceland“. Í: *Science of The Total Environment* 845, bls. 157140. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157140.

Boy, M., E. S. Thomson, J. C. Acosta Navarro, O. Arnalds, E. Batchvarova, J. Bäck, F. Berninger, M. Bilde, Z. Brasseur, P. Dagsson-Waldhauserova, D. Castarède, M. Dalirian, G. de Leeuw, M. Dragosics, E. M. Duplissy, J. Duplissy, A. M. L. Ekman, K. Fang, J. C. Gallet, M. Glasius, S. E. Gryning, H. Grythe, H. C. Hansson, M. Hansson, E. Isaksson, T. Iversen, I. Jonsdottir, V. Kasurinen, A. Kirkevåg, A. Korhola, R. Krejci, J. E. Kristjansson, H. K. Lappalainen, A. Lauri, M. Leppäranta, H. Lihavainen, R. Makkonen, A. Massling, O. Meinander, E. D. Nilsson, H. Olafsson, J. B. C. Pettersson, N. L. Prisle, I. Riipinen, P. Roldin, M. Ruppel, M. Salter, M. Sand, Ø Seland, H. Seppä, H. Skov, J. Soares, A. Stohl, J. Ström, J. Svensson, E. Swietlicki, K. Tabakova, T. Thorsteinsson, A. Virkkula, G. A. Weyhenmeyer, Y. Wu, P. Zieger og M. Kulmala (2019). „Interactions between the atmosphere, cryosphere, and ecosystems at northern high latitudes“. Í: *Atmos. Chem. Phys.* 19.3, bls. 2015–2061. DOI: 10.5194/acp-19-2015-2019.

Brown, Joseph A, Jean-Pierre Thonney, Darrin Holwell og W Ross Wilson (1991). „A comparison of the susceptibility of Salvelinus alpinus and Salmo salar ouananiche to proliferative kidney disease“. Í: *Aquaculture* 96.1, bls. 1–6.

Brown, Lee E, Kieran Khamis, Martin Wilkes, Phillip Blaen, John E Brittain, Jonathan L Carrivick, Sarah Fell, Nikolai Friberg, Leopold Füreder, Gisli M Gislason, Sarah Hainie, David M Hannah, William H M James, Valeria Lencioni, Jon S Olafsson, Christopher T Robinson, Svein J Saltveit, Craig Thompson og Alexander M Milner (2018). „Functional diversity and community assembly of river invertebrates show globally consistent responses to decreasing glacier cover“. en. Í: bls. 26.

Brynhildur Bjarnadottir, Guler Aslan Sungur, Bjarni D. Sigurdsson, Bjarnki T. Kjartansson, Hlynur Oskarsson, Edda S. Oddsdottir, Gunnhildur E. Gunnarsdottir og Andrew Black (2021). „Carbon and water balance of an afforested shallow drained peatland in Iceland“. Í: *Forest Ecology and Management* 482, bls. 118861. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118861.

Brynhildur Bjarnadottir, Bjarni D. Sigurdsson og Anders Lindroth (2009). „A young afforestation area in Iceland was a moderate sink to CO2 only a decade after scarification and establishment“. Í: *Biogeosciences* 6, bls. 2895–2906.

Brynja Hrafnkelsdottir, Bjarni D Sigurdsson, Edda S Oddsdottir, Halldor Sverrisson og Gudmundur Halldorsson (maí 2019a). „Winter survival of Ceramica pisi (Lepidoptera: Noctuidae) in Iceland.“ Í: *cabdirect.orgB Hrafnkelsdottir, BD Sigurdsson, ES Oddsdottir, H Sverrisson, G HalldorssonAgricultural and Forest Entomology, 2019 • cabdirect.org* 21 (2), bls. 219–226. DOI: 10.1111/afe.12323.

— (2019b). „Winter survival of Ceramica pisi (Lepidoptera: Noctuidae) in Iceland“. Í: *Agricultural and Forest Entomology* 21, bls. 219–226. DOI: 10.1111/afe.12323.

Brynjólfur Brynjólfsson (2023). *Sjálfsáin stafafura (Pinus contorta) í Öxnadal og Hörgárdal*. Tæknileg skýrsla. Nýsköpunarsjóður námsmanna.

CAFF (2013). *Arctic Biodiversity Assessment. Status and trends in Arctic biodiversity*. Tæknileg skýrsla. Akureyri.

— (2019). „State of the Arctic Freshwater Biodiversity: Key Findings and Advice for Monitoring“. Í.

Carbfix og Mannvit (2022). *Niðurdæling CO2 á Hellisheiði. Matsáætlun*. Tæknileg skýrsla. Skipulagsstofnun.

CAVM (2003). *Circumpolar Arctic Vegetation Map*. Tæknileg skýrsla. (1:7,500,000 scale). Anchorage, Alaska.

Collins, Courtney G., Sarah C. Elmendorf, Robert D. Hollister, Greg H. R. Henry, Karin Clark, Anne D. Bjorkman, Isla H. Myers-Smith, Janet S. Prevéy, Isabel W. Ashton, Jakob J. Assmann, Juha M. Alatalo, Michele Carbognani, Chelsea Chisholm, Elisabeth J. Cooper, Chiara Forrester, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Kari Klanderud, Christopher W. Kopp, Carolyn Livensperger, Marguerite Mauritz, Jeremy L. May, Ulf Molau, Steven F. Oberbauer, Emily

Ogburn, Zoe A. Panchen, Alessandro Petraglia, Eric Post, Christian Rixen, Heidi Rodenhizer, Edward A. G. Schuur, Philipp Semenchuk, Jane G. Smith, Heidi Steltzer, Ørjan Totland, Marilyn D. Walker, Jeffrey M. Welker og Katharine N. Suding (2021). „Experimental warming differentially affects vegetative and reproductive phenology of tundra plants“. Í: *Nature Communications* 12.1, bls. 3442. DOI: 10.1038/s41467-021-23841-2.

Di Sacco, Alice, Kate A. Hardwick, David Blakesley, Pedro H. S. Brancalion, Elinor Breman, Lidio Cecilio Rebola, Susan Chomba, Kingsley Dixon, Steve Elliott, Godfrey Ruyonga, Katrina Shaw, Pete Smith, Rognvald J. Smith og Alexandre Antonelli (2021). „Ten golden rules for reforestation to optimize carbon sequestration, biodiversity recovery and livelihood benefits“. Í: *Global Change Biology* 27.6, bls. 1328–1348. DOI: 10.1111/gcb.15498.

Diaz-Pauli, Beatriz, Henrik H Berntsen, Eva B Thorstad, Eydna ì Homrum, Susan Mærsk Lusseau, Vidar Wennevik og Kjell Rong Utne (2022). „Geographic distribution, abundance, diet, and body size of invasive pink salmon (Oncorhynchus gorbuscha) in the Norwegian and Barents Seas, and in Norwegian rivers“. Í: *ICES Journal of Marine Science*, fsac224. ISSN: 1054-3139. DOI: 10.1093/icesjms/fsac224.

Eggertsson, Ólafur, Delfina Andrea Castiglia og Marco Carrer (2022). „Natural Regeneration of Lodgepole pine (Pinus contorta) in Steinadalur, SE-Iceland“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 35, bls. 27–32.

Egill Gautason, Helgi Eyleifur Þorvaldsson og Hrannar Smári Hilmarsson (2023). *Bleikir akrar - Aðgerðaáætlun um aukna kornrækt*. Report. Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://www.lbhi.is/images/pdf/rit%5C%20lbhi/rit_lbhi_nr162_bleikir_akrar.pdf.

Elmendorf, S. C., G. H. Henry, R. D. Hollister, R. G. Bjork, A. D. Bjorkman, T. V. Callaghan, L. S. Collier, E. J. Cooper, J. H. Cornelissen, T. A. Day, A. M. Fosaa, W. A. Gould, J. Gretarsdottir, J. Harte, L. Hermanutz, D. S. Hik, A. Hofgaard, F. Jarrad, I. S. Jonsdottir, F. Keuper, K. Klanderud, J. A. Klein, S. Koh, G. Kudo, S. I. Lang, V. Loewen, J. L. May, J. Mercado, A. Michelsen, U. Molau, I. H. Myers-Smith, S. F. Oberbauer, S. Pieper, E. Post, C. Rixen, C. H. Robinson, N. M. Schmidt, G. R. Shaver, A. Stenstrom, A. Tolvanen, O. Totland, T. Troxler, C. H. Wahren, P. J. Webber, J. M. Welker og P. A. Wookey (2012). „Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time“. Í: *Ecol Lett* 15.2. 1461-0248 Elmendorf, Sarah C Henry, Gregory H R Hollister, Robert D Bjork, Robert G Bjorkman, Anne D Callaghan, Terry V Collier, Laura Siegwart Cooper, Elisabeth J Cornelissen, Johannes H C Day, Thomas A Fosaa, Anna Maria Gould, William A Gretarsdottir, Jarngerethur Harte, John Hermanutz, Luise Hik, David S Hofgaard, Annika Jarrad, Frith Jonsdottir, Ingibjorg Svala Keuper, Frida Klanderud, Kari Klein, Julia A Koh, Saewan Kudo, Gaku Lang, Simone I Loewen, Val May, Jeremy L Mercado, Joel Michelsen, Anders Molau, Ulf Myers-Smith, Isla H Oberbauer, Steven F Pieper, Sara Post, Eric Rixen, Christian Robinson, Clare H Schmidt, Niels Martin Shaver, Gaius R Stenstrom, Anna Tolvanen, Anne Totland, Orjan Troxler, Tiffany Wahren, Carl-Henrik Webber, Patrick J Welker, Jeffery M Wookey, Philip A Journal Article Research Support, Non-U.S. Gov't Research Support, U.S. Gov't, Non-P.H.S. England Ecol Lett. 2012 Feb;15(2):164-75. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01716.x. Epub 2011 Dec 5., bls. 164–75. DOI: 10.1111/j.1461-0248.2011.01716.x.

Elven, Reidar, Håvard Hegre, Hans Solstad, Ove Pedersen, Per A. Pedersen, Per A. Åsen og Vigdis Vandvik (2018). *Pinus contorta, vurdering av økologisk risiko*. URL: https://www.artsdatabanken.no/Fab2018/N/538.

Erla Sturludóttir, Guðni Þorvaldsson, Guðríður Helgadóttir, Ingólfur Guðnason, Jóhannes Sveinbjörnsson, Ólafur Ingi Sigurgeirsson og Þóroddur Sveinsson (2021). *Fæðuöryggi á Íslandi. Skýrsla unnin fyrir atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið*. Report. Landbúnaðarháskóli Íslands Háskólinn á Hólum.

Erling Ólafsson (2022). *Vargsnigill (Arion vulgaris)*. URL: www.ni.is/is/biota/animalia/mollusca/gastropoda/pulmonata/arionidae/vargsnigill-arion-vulgaris.

Ester Rut Unnsteinsdóttir (2023). „Íslenski melrakkinn - annar hluti. Takmarkandi og stýrandi áhrifaþættir íslenska refastofnsins, fæða og tímgun“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 93.1-2, bls. 47–58.

Eydís Eiríksdóttir og Sigurður Reynir Gíslason (2020). „Efnabúskapur Þingvallavatns“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 90 (1), bls. 65–79.

Ferrarini, Matteo (2022). „Population index for the rock ptarmigan (Lagopus muta) in Iceland: analysis of road transect data“. University of Iceland, bls. 1–56.

Finnur Ingimarsson, Haraldur R. Ingvason, Þóra Hrafnsdóttir, Stefán Már Stefánsson og Kristín Harðardóttir (2020). „Vöktun svifdýra í Þingvallavatni 2007-2016“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 90 (1), bls. 23–35.

Foden, Wendy B. og S. N. Stuart (2009). *Species and climate change : more than just the polar bear*. Tæknileg skýrsla. Gland, Switzerland: IUCN Species Survival Commission (SSC). URL: https://policycommons.net/artifacts/1375379/species-and-climate-change/1989639/.

ForHot (2022). *Publications*. URL: https://forhot.is/publications/.

Frédéric, B. og Ó. K. Nielsen (des. 2018). „Predator-prey feedback in a gyrfalcon-ptarmigan system?“ Í: *Ecology and Evolution* 8 (24), bls. 12425–12434. ISSN: 2045-7758. DOI: 10.1002/ECE3.4563.

Friðþór Sófus Sigurmundsson, Höskuldur Þorbjarnarson, Guðrún Gísladóttir og Hreinn Óskarsson (2012). „Breytingar á útbreiðslu og þéttleika birkiskóglendis á jörðum í nágrenni Heklu 1987–2012“. Í: *Landabréfið* 26, bls. 27–39.

Frost, G. V., M. J. Macander, U. S. Bhatt, L. T. Berner, J. W. Bjerke, H. E. Epstein, B. C. Forbes, S. J. Goetz, M. J. Lara, T. Park, G. K. Phoenix, S. P. Serbin, H. Tømmervik, D. A. Walker og D. Yang (2021). *Arctic Report Card 2021: Tundra Greenness*. Tæknileg skýrsla. Global Ocean Monitoring, Observing (GOMO) Program, Office of Oceanic og Atmospheric Research NOAA. DOI: 10.25923/8n78-wp73.

Fuglei, Eva og Rolf Anker Ims (2008). „Global warming and effects on the arctic fox“. Í: *Science Progress* 91.2, bls. 175–191. DOI: 10.3184/003685008X327468.

Fuglei, Eva, John André Henden, Chris T. Callahan, Olivier Gilg, Jannik Hansen, Rolf A. Ims, Arkady P. Isaev, Johannes Lang, Carol L. McIntyre, Richard A. Merizon, Oleg Y. Mineev, Yuri N. Mineev, Dave Mossop, Olafur K. Nielsen, Erlend B. Nilsen, Åshild Ønvik Pedersen, Niels Martin Schmidt, Benoît Sittler, Maria Hørnell Willebrand og Kathy Martin (mar. 2020). „Circumpolar status of Arctic ptarmigan: Population dynamics and trends“. Í: *Ambio* 49 (3), bls. 749–761. DOI: 10.1007/S13280-019-01191-0/FIGURES/4.

Gardarsson, Arnthor (1988). „Cyclic population changes and some related events in Rock Ptarmigan in Iceland“. Í: gefið út af A. T. Bergerud og M. W. Gratson. University of Minnesota Press, bls. 300–329.

Geir Sigurðsson (2016). „Náttúra, menning og manneðli í vestrænni og kínverskri hugsun“. Í: *Náttúran í ljósaskiptunum: mannvera og náttúra í austrænni og vestrænni hugsun*. Gefið út af Björn Þorsteinsson. Heimspekistofnun, bls. 35–53.

Gíslason, Sindri, Pálsson Snæbjörn, Jónasson Jónas P., Guls Hermann D., Svavarsson Jörundur og Halldórsson Halldór P. (2021). „Population dynamics of three brachyuran crab species (Decapoda) in Icelandic waters: impact of recent colonization of the Atlantic rock crab (Cancer irroratus)“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 78.2, bls. 534–544. DOI: 10.1093/icesjms/fsaa059. URL: https://doi.org/10.1093/icesjms/fsaa059.

Gray, J. S., H. Dautel, A. Estrada-Peña, O. Kahl og E. Lindgren (2009). „Effects of Climate Change on Ticks and Tick-Borne Diseases in Europe“. Í: *Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases* 2009, bls. 1–12. DOI: 10.1155/2009/593232.

Guðmunda Björg Þórðardóttir og Guðni Guðbergsson (2023). „Lax- og silungsveiðin 2022“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2023-22).

Guðmundur H. Gunnarsson (2021). *Ísáning í tún eftir kal með sérhæfðum ísáningarvélum*. Web Page. URL: https://bugardur.is/greinar/isaning-i-tun-eftir-kal-med-serhaefdum-isaningarvelum/.

Invasive forest pests in Iceland (2019a). Future Forest Health: NordGen conference. Hótel Örk, 17-18 sept. 2019, bls. 13–15.

Guðmundur Halldórsson, Brynja Hrafnkelsdóttir og Edda S. Oddsdóttir (2019b). „Loftslagsbreytingar og pöddur framtíðarinnar“. Í: *Rit Mógilsár* 37/2019, bls. 33–38.

Guðni Guðbergsson (2021). „Silungurinn í Mývatni - Yfirlit yfir rannsóknir og veiðitölur 1986 - 2020“. Í: (HV 2021-30). URL: https://www.hafogvatn.is/static/research/files/hv2021-30.pdf (skoðað 11.08.2023).

Guðni Thorvaldsson, Hólmgeir Björnsson og Jónatan Hermannsson (2004). „The influence of weather on early growth rate of grasses“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 16-17, bls. 65–73. URL: https://ias.is/wp-content/uploads/Icelandic_Agricultural_Sciences_16_17_2004/The-influence-of-weather-on-early.pdf.

Guðni Þorvaldsson og Hólmgeir Björnsson (1990). „The effects of weather on growth, crude protein and digestibility of some grass species in Iceland [Áhrif veðurþátta á sprettu, hráprótein og meltanleika nokkurra grasa á Íslandi]“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 4, bls. 19–36.

Guðrún Nína Petersen og Derya Berber (2018). *Jarðvegshitamælingar á Íslandi. Staða núverandi kerfis og framtíðarsýn*. Report. Veðurstofa Íslands. URL: www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2018/VI_2018_009_rs.pdf.

Gunnar Steinn Jónsson (2022). *Vöktun á svifþörungum í Þingvallavatni 2015 til 2021*. Rorum. URL: https://natkop.kopavogur.is/wp-content/uploads/2023/03/22.1.gsj_svifthor_thing_2015-2021.pdf.pdf (skoðað 11.08.2023).

Gunnarsson, Andri, Sigurdur M. Gardarsson, Tómas Jóhannesson, Óli G.B. Sveinsson og Finnur Pálsson (feb. 2021). „Annual and inter-annual variability and trends of albedo of Icelandic glaciers“. English. Í: *Cryosphere* 15.2. Publisher Copyright: © 2021 Author(s)., bls. 547–570. DOI: 10.5194/tc-15-547-2021.

Gunnarsson, Tómas, J. A. Gill, G. F. Appleton, H. Gíslason, A. Gardarsson, A. R. Watkinson og W. J. Sutherland (mar. 2006). „Large-scale habitat associations of birds in lowland Iceland: Implications for conservation“. Í: *Biological Conservation* 128 (2), bls. 265–275. DOI: 10.1016/J.BIOCON.2005.09.034.

Gunnarsson, Tómas Grétar, Ólafur Arnalds, Graham Appleton, Verónica Méndez og Jennifer A. Gill (2015). „Ecosystem recharge by volcanic dust drives broad-scale variation in bird abundance“. Í: *Ecology and Evolution* 5.12, bls. 2386–2396. DOI: https://doi.org/10.1002/ece3.1523.

Gunnhildur E. Gunnarsdóttir (2017). „A novel approach to estimate carbon loss from drained peatlands in Iceland“. M.Sc. Thesis.

Gunnlaugsdóttir, Eyrún Gyða (2022). „Experimental warming of subarctic biocrust: Temporal responses of soil respiration and plant community“. Thesis. URL: skemman.is/bitstream/1946/42598/1/EyrunG_MSc_2022.pdf.

Hagstofa Íslands (2022). *Búfé og uppskera*.

Halldórsson, Gudmundur, Brynja Hrafnkelsdóttir, Bjarni D. SigurðSsson, Edda S. Oddsdóttir, Ólafur Eggertsson og Erling Ólafsson (2013a). „New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 26, bls. 69–84.

Halldórsson, Gudmundur, Bjarni D. Sigurdsson, Brynja Hrafnkelsdóttir, Edda S. Oddsdóttir, Ólafur Eggertsson og Erling Ólafsson (2013b). „New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 26, bls. 69–84.

Haraldur Ólafsson, Áslaug Helgadóttir, Aðalsteinn Sigurgeirsson, Jónatan Hermannsson og Ólafur Rögnvaldsson (2007). „Líkleg þróun veðurfars á Íslandi með tilliti til ræktunar“. Í: *Rit Fræðaþings landbúnaðarins* 4, bls. 29–36.

Haraldur R. Ingvason, Finnur Ingimarsson og Stefán Már Stefánsson (2021). „Vöktun á líffríki og vatnsgæðum Þingvallavatns, gagnaskýrsla fyrir árið 2021“. Í: (3-2022). URL: https://natkop.kopavogur.is/wp-content/uploads/2023/03/22-3-thingvallavatn.pdf (skoðað 11.08.2023).

Heiðarsson, Lárus, Bjarni D. Sigurdsson, Benjamín Ö. Davíðsson, Brynja Hrafnkelsdóttir, Aðalsteinn Sigurgeirsson, Brynjar Skúlason, María D. Vest og Guðmundur Halldorsson (2020). „The effect of the pine woolly aphid (Pineus pini) on survival, growth and natural selection in Scots pine (Pinus sylvestris) in Iceland“. Í: *Agricultural and Forest Entomology* 22.2, bls. 146–156. DOI: https://doi.org/10.1111/afe.12369.

Helgi Guðjónsson, Jón Einar Jónsson, Walter Stefánsson, Aðalsteinn Örn, Tómas Snæþórsson og Grétar Gunnarsson (án árs). „Bird Study Annual and large-scale variation in breeding output of Greylag geese Anser anser in Iceland“. Í: (). ISSN: 1944-6705. DOI: 10.1080/00063657.2015.1034655.

Henry, Greg H.R., Robert D. Hollister, Kari Klanderud, Robert G. Björk, Anne D. Bjorkman, Cassandra Elphinstone, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Ulf Molau, Alessandro Petraglia, Steven F. Oberbauer, Christian Rixen og Philip A. Wookey (2022). „The International Tundra Experiment (ITEX): 30 years of research on tundra ecosystems“. Í: *Arctic Science* 8.3, bls. 550–571. DOI: 10.1139/as-2022-0041.

Hilmar J. Malmquist, Finnur Ingimarsson, Haraldur R. Ingvason, Stefán Már Stefánsson og Þóra Hrafnsdóttir (2020). „Hlýnun Þingvallavatns og hitaferlar í vatninu“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 90 (1), bls. 80–99.

Hjörleifur Finnsson (2021). *Hnúðlax á Íslandi: Vágestur eða velkominn?: um stjórnun ágengra tegunda á Íslandi*. Meistararitgerð við Háskólasetur Vestfjarða. URL: http://hdl.handle.net/1946/39165.

Hlynur Bárðarson, Ingi Rúnar Jónsson, Eydís Njarðardóttir og Sigurður Óskar Helgason (2018). „Rannsóknir á fiskistofnum nokkurra áa á Norðausturlandi 2017“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2018-23).

Hlynur Bárðarson, Sigurður Óskar Helgason og Eydís Njarðardóttir (2023). „Rannsóknir á fiskistofnum nokkurra áa á Norðausturlandi 2022“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2023-14).

Horta-Lacueva, Quentin J.-B., Jónína H. Ólafsdóttir, Fia Finn, Edite Fiskoviča, Lieke Ponsioen, Marina de la Cámara og Kalina H. Kapralova (2022). „From drones to bones: Assessing the importance of abiotic factors for salmonid spawning behaviour and embryonic development through a multidisciplinary approach“. Í: *Ecology of Freshwater Fish* 31.3, bls. 596–606. ISSN: 1600-0633. DOI: 10.1111/eff.12654.

Hólmgeir Björnsson (2007). *Framleiðsla lífmassa á Suðurlandi og Norðausturlandi - skýrslur til Íslenska lífmassafélagsins*. Fjölrit LbhÍ nr. 13. Hvanneyri: Landbúnaðarháskóli Íslands.

Susceptibility of different provenances of birch in Iceland to Heringocrania unimaculella (2019), bls. 21–22.

Hraundís Guðmundsdóttir (2013). „Ræktun ávaxtatrjáa á Íslandi“. Thesis.

ICES (2022). *Working Group on North Atlantic Salmon (WGNAS)*. Bd. 4:39. ICES Scientific Reports, bls. 39. DOI: 10.17895/ices.pub.19697368.

IPCC (2022). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001.

IPCC Working Group I (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896.

Jenný Brynjarsdóttir, Sigrún H. Lund, Kjartan G. Magnússon og Ólafur K., Nielsen (2003). *Analysis of time series for rock ptarmigan and gyrfalcon populations in north-east Iceland*. Tæknileg skýrsla RH-18-2003.

Jeppesen, Erik, Thomas Mehner, Ian J. Winfield, Külli Kangur, Jouko Sarvala, Daniel Gerdeaux, Martti Rask, Hilmar J. Malmquist, Kerstin Holmgren, Pietro Volta, Susana Romo, Reiner Eckmann, Alfred Sandström, Saúl Blanco, Andu Kangur, Henrik Ragnarsson Stabo, Marjo Tarvainen, Anne-Mari Ventelä, Martin Søndergaard, Torben L. Lauridsen og Mariana Meerhoff (2012). „Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes“. Í: *Hydrobiologia* 694.1, bls. 1–39. ISSN: 1573-5117. DOI: 10.1007/s10750-012-1182-1. (Skoðað 07.09.2022).

Jóhann Óli Hilmarsson, Einar Ó. Þorleifssonand (2002). „Íslenskir skógarfuglar“. Í: *Skógræktarritið* (1), bls. 67–76.

Jóhannes Sturlaugsson (2007). *Rannsóknir á atferlisvistfræði Þingvallaurriða - Dæmi um niðurstöður*. Laxfiskar, bls. 17.

— (2011). *Gönguhegðun urriða í Efra-Sogi og Úlfljótsvatni - Framvinda 2010*. Laxfiskar, bls. 25.

— (2016). *Rannsóknir á lífsháttum Þingvallaurriða í sunnanverðu Þingvallavatni 2015-2016*. Laxfiskar, bls. 17.

— (2020). *Atferli bleikju í Þingvallavatni skráð árið um kring.* Laxfiskar. URL: http://laxfiskar.is/index.php?option=com_content&view=article&id=189%3Aatferli-bleikju-i-thingvallavatni-skrad-arid-um-kring (skoðað 11.08.2023).

— (2023a). *Elliðaár 2022. Rannsóknir á fiskistofnum vatnakerfisins*. Laxfiskar. URL: http://laxfiskar.is/images/stories/skyrslur/Ellidaar_2022-Fiskirannsoknir-Johannes_Sturlaugsson-Laxfiskar_april2023.pdf (skoðað 11.08.2023).

— (2023b). *Þingvallaurriði - Upplýsingar um lífshætti og rannsóknir frá Jóhannesi Sturlaugssyni líffræðingi*. Laxfiskar. URL: http://laxfiskar.is/index.php?option=com_content&view=article&id=130&Itemid=145&lang=is (skoðað 11.08.2023).

— (án árs). „Hrygningagöngur Urriðans í Öxará-göngumynstrið og stærð hrygningarstofns með hliðssjón af umhverfisþáttum í 20 ár (2003-2022)“.

Jóhannes Sturlaugsson og Hilmar Malmquist (2011). „Brown trout in Lake Thingvallavatn“. Í: *Thingvallavatn - a unique world of evolving*. Opna bókaútgáfan, Reykjavík.

Jóhannes Sturlaugsson, Hrönn Ólína Jörundsdóttir, Franklín Georgsson og Helga Gunnlaugsson (2009). *Kvikasilfur og önnur óæskileg snefilefni í urriða úr Þingvallavatni*. Matís ohf og Laxfiskar ehf. URL: http://laxfiskar.is/images/stories/skyrslur/Kvikasilfur_i_urrida_i_Thingvallavatni-des2009.pdf (skoðað 11.08.2023).

Jóhannes Sveinbjörnsson og Daði Már Kristófersson (2021). „Afkoma sauðfjárbænda á Íslandi og leiðir til að bæta hana. Skýrsla unnin fyrir atvinnuvega- og nýsköpunarráðuneytið“. Í: *Rit LbhÍ* 142, bls. 95. URL: www.lbhi.is/images/pdf/utgefid%5C%20efni/fjolrit%5C%20rannsoknastofnunar%5C%20landbunadarins/rit_lbhi_nr_142-2.pdf.

Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir (2017). *Vistgerðir á Íslandi*. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54. Reykjavik: Náttúrufræðistofnun Íslands.

Jónsdóttir, Ingibjörg S, Borgthor Magnússon, Jón Gudmundsson, Ásrún Elmarsdóttir og Hreinn Hjartarson (2005). „Variable sensitivity of plant communities in Iceland to experimental warming“. Í: *Global Change Biology* 11, bls. 553–563. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.00928.x.

Kardjilov, Marin Ivanov (2008). „Riverine and terrestrial carbon fluxes in Iceland“. PhD Thesis. Department of Geography og Tourism, Faculty of Science, Inst. of Earth Sciences, University of Iceland: University of Iceland.

Keller, Nicole, Ásta Karen Helgadóttir, Sigríður Rós Einarsdóttir, Rafn Helgason, Brian Charles Barr, Birgir Urbancic Ásgeirsson, Diljá Helgadóttir, Inga Rún Helgadóttir, Chanee Jónsdóttir Thianthong, Kristinn Már Hilmarsson, Leone Tinganelli, Arnór Snorrason, Sigmundur Helgi Brink og Jóhann Þórsson (2023). *National Inventory Report. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2021*. Report. Umhverfisstofnun. URL: https://ust.is/library/Skrar/loft/NIR/ISL_NIR%5C%202023_15%5C%20april_on_web.pdf.

Kourantidou, Melina, Laura N. H. Verbrugge, Phillip J. Haubrock, Ross N. Cuthbert, Elena Angulo, Inkeri Ahonen, Michelle Cleary, Jannike Falk-Andersson, Lena Granhag, Sindri Gíslason, Brooks Kaiser, Anna-Kaisa Kosenius, Henrik Lange, Maiju Lehtiniemi, Kristin Magnussen, Ståle Navrud, Petri Nummi, Francisco J. Oficialdegui, Satu Ramula, Terhi Ryttäri, Menja von Schmalensee, Robert A. Stefansson, Christophe Diagne og Franck Courchamp (2022). „The economic costs, management and regulation of biological invasions in the Nordic countries“. Í: *Journal of Environmental Management* 324, bls. 116374. ISSN: 0301-4797. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116374. URL: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116374.

Kreiling, Agnes-Katharina, Daniel P Govoni, Snæbjörn Pálsson, Jón S Ólafsson og Bjarni K Kristjánsson (2022). „Invertebrate communities in springs across a gradient in thermal regimes“. Í: *Plos one* 17.5, e0264501. URL: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264501.

Kristmundsson, Árni, Th Antonsson, F Árnason o.fl. (2010). „First record of proliferative kidney disease in Iceland“. Í: *Bulletin of the European Association of Fish Pathologists* 30.1, bls. 35–40.

Kristmundsson, Árni, Fjóla Rut Svavarsdóttir, Friðþjófur Árnason, Þórólfur Antonsson, Guðni Guðbergsson, Hildur Magnúsdóttir og Mark Andrew Freeman (2023). „Tetracapsuloides bryosalmonae and proliferative kidney disease in Icelandic salmonids–Comparative data from two different time periods“. Í: *International Journal for Parasitology* 53.4, bls. 207–220.

Lagunas, Marcos, Arnar Pálsson, Benóný Jónsson, Magnús Jóhannsson, Zophonías O. Jónsson og Sigurður S. Snorrason (2023). „Genetic structure and relatedness of brown trout (Salmo trutta) populations in the drainage basin of the Ölfusá river, South-Western Iceland“. Í: *PeerJ* 11, e15985. DOI: 10.7717/peerj.15985.

Landbúnaðarráðuneytið (1990). *Reglugerð um innflutning og útflutning á plöntum og plöntuafurðum*. Reglugerðarsafn. URL: https://www.reglugerd.is/reglugerdir/allar/nr/189-1990.

Lavin, Charles P, Cesc Gordo-Vilaseca, Fabrice Stephenson, Zhiyuan Shi og Mark John Costello (2022). „Warmer temperature decreases the maximum length of six species of marine fishes, crustacean, and squid in New Zealand“. Í: *Environmental Biology of Fishes* 105.10, bls. 1431–1446.

Leblans, Niki I. W., Bjarni D. Sigurdsson, Sara Vicca, Yongshuo Fu, Josep Penuelas og Ivan A. Janssens (2017). „Phenological responses of Icelandic subarctic grasslands to short-term and long-term natural soil warming“. Í: *Global Change Biology* 23.11, bls. 4932–4945. DOI: 10.1111/gcb.13749.

Lilja Jóhannesdóttir, Aldís Erna Pálsdóttir, Jennifer A. Gill, José A. Alves, Böðvar Þórisson og Tómas Grétar Gunnarsson (án árs). *Móa – vefur um líffræði og vernd mófugla á Íslandi*. URL: moi.hi.is.

Loftslagsráð (2023). *Uppgjör Loftslagsráðs*. Electronic Article. URL: www.loftslagsrad.is/library/alit/Uppgj%C3%B6r%5C%20Loftslagsr%C3%A1%C3%B0s%5C%202019-2023_Loka.pdf.

Magnús Jóhannsson og Benóný Jónsson (2022). „Fiskirannsóknir á vatnasvæði Þjórsár. Samantekt fyrir árin 2013-2021“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2022-28).

Magnús Jóhannsson, Benóný Jónsson, Ragnhildur Magnúsdóttir og Jón S. Ólafsson (2015). „Stóra-Laxá í Hreppum. Vatnalíf, veiðinytjar og virkjun“. Í: (VMST/15005, LV-2015-128), bls. 81.

Magnús Jóhannsson og Hlynur Bárðarson (2021). „Fiskstofnar á vatnasvæði Ölfusár-Hvítár. Ástand stofna og veiðinýting“. Í: *Haf- og vatnarannsóknir* (HV 2021-17).

Maljanen, Marja, Heli Yli-Moijala, Christina Biasi, Niki I. W. Leblans, Hans J. De Boeck, Brynhildur Bjarnadóttir og Bjarni D. Sigurdsson (2017). „The emissions of N2O and CH4 from natural soil temperature gradients in a volcanic area in southwest Iceland“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 109, bls. 70–80.

Mallory, Conor D og Mark S Boyce (2018). „Observed and predicted effects of climate change on Arctic caribou and reindeer“. Í: *Environ. Rev.* 26, bls. 13–25. DOI: 10.1139/er-2017-0032.

Marañón-Jiménez, S., J. Peñuelas, A. Richter, B. D. Sigurdsson, L. Fuchslueger, N. I. W. Leblans og I. A. Janssens (2019). „Coupled carbon and nitrogen losses in response to seven years of chronic warming in subarctic soils“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 134, bls. 152–161. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.03.028.

Marteinsdóttir, Bryndís, Isabel C. Barrio og Ingibjörg Svala Jónsdóttir (2017). „Assessing the ecological impacts of extensive sheep grazing in Iceland“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 30, bls. 55–72.

Marteinsdóttir, Bryndís, Jóhann Helgi Stefánsson og Rán Finnsdóttir (2021). *GróLind – Mat og vöktun á gróður- og jarðvegsauðlindum Íslands. Ársskýrsla 2021*. Report. Landgræðslan.

Meinander, O., P. Dagsson-Waldhauserova, P. Amosov, E. Aseyeva, C. Atkins, A. Baklanov, C. Baldo, S. L. Barr, B. Barzycka, L. G. Benning, B. Cvetkovic, P. Enchilik, D. Frolov, S. Gassó, K. Kandler, N. Kasimov, J. Kavan, J. King, T. Koroleva, V. Krupskaya, M. Kulmala, M. Kusiak, H. K. Lappalainen, M. Laska, J. Lasne, M. Lewandowski, B. Luks, J. B. McQuaid, B. Moroni, B. Murray, O. Möhler, A. Nawrot, S. Nickovic, N. T. O'Neill, G. Pejanovic, O. Popovicheva, K. Ranjbar, M. Romanias, O. Samonova, A. Sanchez-Marroquin, K. Schepanski, I. Semenkov, A. Sharapova, E. Shevnina, Z. Shi, M. Sofiev, F. Thevenet, T. Thorsteinsson, M. Timofeev, N. S. Umo, A. Uppstu, D. Urupina, G. Varga, T. Werner, O. Arnalds og A. Vukovic Vimic (2022). „Newly identified climatically and environmentally significant high-latitude dust sources“. Í: *Atmos. Chem. Phys.* 22.17, bls. 11889–11930. DOI: 10.5194/acp-22-11889-2022.

Moffett, I. J. J., M. Allen, C. Flanagan, W. W. Crozier og G. J. A. Kennedy (2006). „Fecundity, egg size and early hatchery survival for wild Atlantic salmon, from the River Bush“. en. Í: *Fisheries Management and Ecology* 13.2, bls. 73–79. DOI: 10.1111/j.1365-2400.2006.00478.x.

Mulloy, Tara A., Isabel C. Barrio, Ingibjörg S. Jónsdóttir og David S. Hik (2021). „The effects of different management interventions on degraded rangelands in Iceland“. Í: *Land Degradation & Development* 32.16, bls. 4583–4594. DOI: https://doi.org/10.1002/ldr.4057.

Náttúrufræðistofnun Íslands (2018). *Válisti fugla*. URL: https://www.ni.is/is/midlun/utgafa/valistar/fuglar/valisti-fugla.

— (2022). „Óbirt gögn“.

— (2023a). *Fuglar*. URL: https://www.ni.is/is/dyr/fuglar.

— (2023b). *Vöktun náttúruverndarsvæða*. URL: https://www.ni.is/is/rannsoknir/voktun-og-rannsoknir/voktun-natturuverndarsvaeda.

— (2023c). *Vöktun skógarmítla*. URL: https://www.ni.is/is/voktun-skogarmitla.

— (2023d). *Pöddur*. URL: https://www.ni.is/is/dyr/poddur (skoðað 08.08.2023).

— (2023e). *Vöktun fiðrilda*. URL: https://www.ni.is/is/rannsoknir/voktun-og-rannsoknir/voktun-fidrilda (skoðað 08.08.2023).

— (2023f). *Vöktun mófugla*. URL: https://www.ni.is/is/rannsoknir/voktun-og-rannsoknir/voktun-mofugla (skoðað 08.08.2023).

Nelson, Daniel, Jonathan P. Benstead, Alexander D. Huryn, Wyatt F. Cross, James M. Hood, Philip W. Johnson, James R. Junker, Gísli M. Gíslason og Jón S. Ólafsson (2020a). „Contrasting responses of black fly species (Diptera: Simuliidae) to experimental whole-stream warming“. Í: *Freshwater Biology* 65.10, bls. 1793–1805. ISSN: 1365-2427. DOI: 10.1111/fwb.13583. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/fwb.13583 (skoðað 21.09.2022).

— (2020b). „Thermal niche diversity and trophic redundancy drive neutral effects of warming on energy flux through a stream food web“. Í: *Ecology* 101.4. DOI: 10.1002/ecy.2952. (Skoðað 22.09.2022).

New Zealand Plant Conservation Network (2023). *Pinus contorta*. URL: https://www.nzpcn.org.nz/flora/species/pinus-contorta/.

Nyquist, Corrie, Gísli Már Gíslason, Bruce Vondracek og Leonard Charles Ferrington (2021). „Longevities of Adult Chironomidae (Diptera) from Two Streams in Iceland“. Í: *CHIRONOMUS Journal of Chironomidae Research* 34. Number: 34. ISSN: 2387-5372. DOI: 10.5324/cjcr.v0i34.3431.

O'Gorman, Eoin J., Doris E. Pichler, Georgina Adams, Jonathan P. Benstead, Haley Cohen, Nicola Craig, Wyatt F. Cross, Benoît O. L. Demars, Nikolai Friberg, Gísli Már Gíslason, Rakel Gudmundsdóttir, Adrianna Hawczak, James M. Hood, Lawrence N. Hudson, Liselotte Johansson, Magnus P. Johansson, James R. Junker, Anssi Laurila, J. Russell Manson, Efpraxia Mavromati, Daniel Nelson, Jón S. Ólafsson, Daniel M. Perkins, Owen L. Petchey, Marco Plebani, Daniel C. Reuman, Björn C. Rall, Rebecca Stewart, Murray S. A. Thompson og Guy Woodward (jan. 2012). „Chapter 2 - Impacts of Warming on the Structure and Functioning of Aquatic Communities: Individual- to Ecosystem-Level Responses“. Í: *Advances in Ecological Research*. Gefið út af Guy Woodward, Ute Jacob og Eoin J. O'Gorman. Bd. 47. Global Change in Multispecies Systems Part 2. Academic Press. DOI: 10.1016/B978-0-12-398315-2.00002-8.

Olafsson, Haraldur og Iman Rousta (2021). „Influence of atmospheric patterns and North Atlantic Oscillation (NAO) on vegetation dynamics in Iceland using Remote Sensing“. Í: *European Journal of Remote Sensing* 54.1, bls. 351–363. DOI: 10.1080/22797254.2021.1931462.

Olafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserova og Haraldur Olafsson (2016). „The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts — A review“. Í: *Aeolian Research* 20, bls. 176–195. DOI: https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.01.004.

Ólafur Arnalds (2010). „Dust sources and deposition of aeolian material“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 23, bls. 3–21.

— (2023). *Mold ert þú. Jarðvegur og íslensk nattúra*. IÐNÚ útgáfa.

Ólafur Arnalds, Elín Þóra Þórarinsdóttir og Fanney Ósk Gísladóttir (2019a). „Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi - I. Sandar og fok“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 89.1-2, bls. 34–47.

Ólafur Arnalds og Jón Guðmundsson (2020). „Loftslag, kolefni og mold“. Í: *Rit LbhÍ* 133, bls. 49. URL: www.lbhi.is/images/pdf/utgefid%5C%20efni/fjolrit%5C%20rannsoknastofnunar%5C%20landbunadarins/rit_lbhi_nr_133_ok.pdf.

Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová og Sigmundur Helgi Brink (2019b). „Sandauðnir, sandfok og ryk á Íslandi - II. Áfok og ryk“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 89.3-4, bls. 130–143.

Ólafur K Nielsen, Jenný Brynjarsdóttir og Kjartan Magnússon (2004). *Vöktun rjúpnastofnsins 1999–2003*. Náttúrufræðistofnun Íslands. URL: http://www.ni.is.

Ólafur K Nielssen (ágú. 2023). *Viðkoma rjúpu 2023*. URL: https://www.ni.is/sites/default/files/2023-08/Vidkoma-rjupu-2023-2.pdf.

Ólafur K. Nielsen (sep. 1999). „Gyrfalcon predation on ptarmigan: Numerical and functional responses“. Í: *Journal of Animal Ecology* 68 (5), bls. 1034–1050. DOI: 10.1046/J.1365-2656.1999.00351.X.

— (2003). „The impact of food availability on Gyrfalcon (Falco rusticolus) diet and timing of breeding“. Í: gefið út af D. B. A. Thompson, S. M. Redpath, A. H. Fielding, M. Marquiss og C. A. Galbraith. Scottish Natural Heritage, bls. 283–302.

Ólafur K. Nielsen (2011). „Gyrfalcon population and reproduction in relation to Rock Ptarmigan numbers in Iceland“. Í: gefið út af R.T. Watson, T.J. Cade, M. Fuller, G. Hunt og E. Potapov. The Peregrine Fund., bls. 21–48.

Ólafur K. Nielsen og Guðmundur A. Guðmundsson (2020). „Body condition of Ptarmigan and population change“. Í: *Veggspjald á OIKOS ráðstefnunni í Reykjavík 3.-5. mars 2020*. Reykjavík.

Óskarsdóttir, Guðrún, Thóra Ellen Thórhallsdóttir, Anna Helga Jónsdóttir, Hulda Margrét Birkisdóttir og Kristín Svavarsdóttir (2022). „Establishment of mountain birch (Betula pubescens ssp. tortuosa) on a glacial outwash plain: Spatial patterns and decadal processes“. Í: *Ecology and Evolution* 12.10, e9430. DOI: https://doi.org/10.1002/ece3.9430.

Parisa, Zack, Eric Marland, Brent Sohngen, Gregg Marland og Jennifer Jenkins (2022). „The time value of carbon storage“. Í: *Forest Policy and Economics* 144, bls. 102840. DOI: https://doi.org/10.1016/j.forpol.2022.102840.

Páll Bergþórsson (1996). „Hitafar og gróður“. Í: *Icelandic Agricultural Sciences* 10, bls. 141–164.

Pálsdóttir, Aldís E., Jennifer A. Gill, José A. Alves, Snæbjörn Pálsson, Verónica Méndez, Harry Ewing og Tómas G. Gunnarsson (okt. 2022). „Subarctic afforestation: Effects of forest plantations on ground-nesting birds in lowland Iceland“. Í: *Journal of Applied Ecology* 59 (10), bls. 2456–2467. DOI: 10.1111/1365-2664.14238.

Pálsson, Snæbjörn, Páll Hersteinsson, Ester R. Unnsteinsdóttir og Ólafur K. Nielsen (apr. 2016). „Population limitation in a non-cyclic arctic fox population in a changing climate“. Í: *Oecologia* 180.4, bls. 1147–1157. DOI: 10.1007/S00442-015-3536-7/TABLES/2.

Pálsson, Snæbjörn, Pawel Wasowicz, Starri Heiðmarsson og Kristinn Pétur Magnússon (nóv. 2022). „Population structure and genetic variation of fragmented mountain birch forests in Iceland“. Í: *Journal of Heredity* 114, bls. 165–174. DOI: 10.1093/jhered/esac062.

Phillips, Joseph S, Guðni Guðbergsson og Anthony R Ives (2022). „Opposing trends in survival and recruitment slow the recovery of a historically overexploited fishery“. Í: *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 79.7, bls. 1138–1144.

Pilakouta, Natalie, Shaun S. Killen, Bjarni K. Kristjánsson, Skúli Skúlason, Jan Lindström, Neil B. Metcalfe og Kevin J. Parsons (2020). „Multigenerational exposure to elevated temperatures leads to a reduction in standard metabolic rate in the wild“. Í: *Functional Ecology* 34.6, bls. 1205–1214. ISSN: 1365-2435. DOI: 10.1111/1365-2435.13538.

Poeplau, Christopher, Thomas Kätterer, Niki I. W. Leblans og Bjarni D. Sigurdsson (2017). „Sensitivity of soil carbon fractions and their specific stabilisation mechanisms to extreme soil warming in a subarctic grassland“. Í: *Global Change Biology* 23, bls. 1316–1327. DOI: 10.1111/gcb.13491.

Przedpelska-Wasowicz, Ewa Maria, Pawel Wasowicz, Aníta Ósk Áskelsdóttir, Ellý Renée Guðjohnsen og Margrét Hallsdóttir (2021). „Characterisation of pollen seasons in Iceland based on long-term observations: 1988–2018“. Í: *Aerobiologia* 37.3, bls. 507–524. DOI: 10.1007/s10453-021-09701-y.

Pörtner, H.O., R.J. Scholes, J. Agard, E. Archer, A. Arneth, X. Bai, D. Barnes, M. Burrows, L. Chan, W.L. Cheung, S. Diamond, C. Donatti, C. Duarte, N. Eisenhauer, W. Foden, M. A. Gasalla, T. Handa C. amd Hickler, O. Hoegh-Guldberg, K. Ichii, U. Jacob, G. Insarov, W. Kiessling, P. Leadley, R. Leemans, L. Levin, M. Lim, S. Maharaj, S. Managi, P. A. Marquet, P. McElwee, G. Midgley, T. Oberdorff, D. Obura, E. Osman, R. Pandit, U. Pascual, A. P. F. Pires, A. Popp, V. Reyes- García, M. Sankaran, J. Settele, Y. J. Shin, D. W. Sintayehu, P. Smith, N. Steiner, B. Strassburg, R. Sukumar, C. Trisos, A.L. Val, J. Wu, E. Aldrian, C. Parmesan, R. Pichs- Madruga, D.C. Roberts, A.D. Rogers, S. Díaz, M. Fischer, S. Hashimoto, S. Lavorel, N. Wu og H.T. Ngo (2021). *Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change*. Útg. 5. DOI: 10.5281/zenodo.5101125. URL: https://doi.org/10.5281/zenodo.5101125.

Radujkovic, Dajana, Erik Verbruggen, Bjarni D. Sigurdsson, Niki I. W. Leblans, Ivan A. Janssens, Sara Vicca og James T. Weedon (2018). „Prolonged exposure does not increase soil microbial community compositional response to warming along geothermal gradients“. Í: *FEMS Microbiology Ecology* 94, fix17. DOI: doi:10.1093/femsec/fix174.

Raynolds, Martha, Borgþór Magnússon, Sigmar Metúsalemsson og Sigurður Magnússon (júl. 2015). „Warming, Sheep and Volcanoes: Land Cover Changes in Iceland Evident in Satellite NDVI Trends“. Í: *Remote Sensing* 7 (8), bls. 9492–9506. DOI: 10.3390/rs70809492.

Reid, Andrea J., Andrew K. Carlson, Irena F. Creed, Erika J. Eliason, Peter A. Gell, Pieter T. J. Johnson, Karen A. Kidd, Tyson J. MacCormack, Julian D. Olden, Steve J. Ormerod, John P. Smol, William W. Taylor, Klement Tockner, Jesse C. Vermaire, David Dudgeon og Steven J. Cooke (2019). „Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity“. Í: *Biological Reviews* 94, bls. 849–873. DOI: 10.1111/brv.12480.

Richter, Sigurdur H, Matthías Eydal, Karl Skírnisson og Erling Ólafsson (2013). „Tick species (Ixodida) identified in Iceland“. Í: *ICEL. AGRIC. SCI* 26, bls. 3–10.

Rixen, Christian, Toke Thomas Høye, Petr Macek, Rien Aerts, Juha M Alatalo, Jill T Anderson, Pieter A Arnold, Isabel C Barrio, Jarle W Bjerke og Mats P og fleiri Björkman (2022). „Winters are changing: snow effects on Arctic and alpine tundra ecosystems“. Í: *Arctic Science* 8.3, bls. 572–608.

Robinson, Sinikka I., Órla B. McLaughlin, Bryndís Marteinsdóttir og Eoin J. O'Gorman (2018). „Soil temperature effects on the structure and diversity of plant and invertebrate communities in a natural warming experiment“. Í: *Journal of Animal Ecology* 87.3, bls. 634–646. DOI: 10.1111/1365-2656.12798.

Roed, Knut H, A V Soldal og Skarphéðinn Þórisson (des. 1985). „Transferrin variability and founder effect in Iceland reindeer, Rangifer tarandus L“. Í: *Hereditas* 103 (2), bls. 161–164. DOI: 10.1111/J.1601-5223.1985.TB00496.X.

Ross, Louise C., Gunnar Austrheim, Leif-Jarle Asheim, Gunnar Bjarnason, Jon Feilberg, Anna Maria Fosaa, Alison J. Hester, Øystein Holand, Ingibjörg S. Jónsdóttir, Lis E. Mortensen, Atle Mysterud, Erla Olsen, Anders Skonhoft, James D. M. Speed, Geir Steinheim, Des B. A. Thompson og Anna Gudrún Thórhallsdóttir (2016). „Sheep grazing in the North Atlantic region: A long-term perspective on environmental sustainability“. Í: *Ambio* 45.5, bls. 551–566. DOI: 10.1007/s13280-016-0771-z.

Ruseva, Tatyana, James Hedrick, Gregg Marland, Henning Tovar, Carina Sabou og Elia Besombes (2020). „Rethinking standards of permanence for terrestrial and coastal carbon: implications for governance and sustainability“. Í: *Current Opinion in Environmental Sustainability* 45. Open Issue 2020 Part A: Technology Innovations and Environmental Sustainability in the Anthropocene, bls. 69–77. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cosust.2020.09.009.

Rúnar Snær Reynisson (2021). *Ekkert lát á þurrkum - vara bændur við yfirborðsvatni*. Newspaper Article. URL: https://www.ruv.is/frett/2021/08/31/ekkert-lat-a-thurrkum-vara-baendur-vid-yfirbordsvatni.

Saino, Nicola, Roberto Ambrosini, Diego Rubolini, Jost Von Hardenberg, Antonello Provenzale, Kathrin Hüppop, Ommo Hüppop, Aleksi Lehikoinen, Esa Lehikoinen, Kalle Rainio, Maria Romano og Leonid Sokolov (mar. 2011). „Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds“. Í: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 278 (1707), bls. 835–842. ISSN: 14712970. DOI: 10.1098/RSPB.2010.1778. URL: https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2010.1778.

Salazar, Alejandro, Denis Warshan, Clara Vasquez-Mejia og Ólafur S. Andrésson (2022). „Environmental change alters nitrogen fixation rates and microbial parameters in a subarctic biological soil crust“. Í: *Oikos* 2022.11, e09239. DOI: https://doi.org/10.1111/oik.09239.

Schroeder, Martin og Simon Kärvemo (2022). „Rokordstort utbrott av granbarkborre - orsaker och vad man skal göra“. Í: *Kungl. skogs- och lantbruksakademiens tidskrift* 161.7, bls. 16–19.

URL: https://www.ksla.se/wp-content/uploads/2022/11/KSLAT-7-2022-Friska-skogar-%E2%80%93-sa-nar-vi-dit_hr.pdf.

Schyberg, Harald, Xiaohua Yang, Morten A.Ø. Køltzow, Bjørn Amstrup, Åsmund Bakketun, Eric Bazile, Jana Bojarova, Jason E. Box, Per Dahlgren, Sverre Hagelin, Maria Homleid, András Horányi, Jacob Høyer, Åke Johansson, Mari Anne Killie, Heiner Körnich, Patrick Le Moigne, Magnus Lindskog, Terhikki Manninen, Poul Nielsen Englyst, Klaus P. Nielsen, Erik Olsson, Bjorn Palmason, Carlos Peralta Aros, Roger Randriamampianina, Patrick Samuelsson, Robert Stappers, Eyvind Støylen, Steinþór Thorsteinsson, Teresa Valkonen og Zhen-Qing Wang (2020). „Arctic regional reanalysis on height levels from 1991 to present“. Í: *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.8679900d.

Sigrún Hallsdóttir og Stefán Gíslason (2017). *Losun gróðurhúsalofttegunda frá sauðfjárbúum á Íslandi og aðgerðir til að draga úr losun. Unnið fyrir Landssamtök sauðfjárbænda*. Report. Umhverfisráðgjöf Íslands ehf. (Environice).

Sigurður Björn Alfreðsson (2018). „The effects of shrub encroachment on avian communities in lowland Iceland“. University of Iceland, bls. 1–56. URL: http://hdl.handle.net/1946/31883.

Sigurður Reynir Gíslason (2012). *Kolefnishringrásin*. Hið íslenska bókmenntafélag. ISBN: 9789979663034.

Skarphéðinn G Þórisson (2018). „Population dynamics and demography of reindeer (Rangifer tarandus L.) on the East Iceland highland plateau 1940–2015. A comparative study of two herds.“ Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: http://hdl.handle.net/1946/30920.

— (2004). „Hreindýr“. Í: *Íslensk spendýr*. Gefið út af Páll Hersteinsson. Reykjavík: Vaka-Helgafell, bls. 232–243.

Skarphéðinn G. Þórisson og Rán Þórarinsdóttir (2017). *Vöktun Náttúrustofu Austurlands 2016 og tillaga um veiðikvóta og ágangssvæði 2017*. Náttúrustofa Austurlands NA-170167, bls. 1–87. URL: https://drive.google.com/file/d/1TJ2ZHINETPa8vDKx-Y-gKsWv10y5vow3/view.

Skarphéðinn G. Þórisson, Rán Þórarinsdóttir og Fríða Jóhannesdóttir (2022). *Vöktun hreindýra 2022 og tillaga um veiðikvóta og ágangssvæði 2023*. Náttúrustofa Austurlands, NA-220236.

Skóra, Michal E., Guðni Guðbergsson, Gordon H. Copp og J. Iwan Jones (2023). „Evidence of successful recruitment of non-native pink salmon Oncorhynchus gorbuscha in Iceland“. Í: *Journal of Fish Biology*. DOI: https://doi.org/10.1111/jfb.15556.

Snorrason, Arnór (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020. Report. Iceland*. Report. UN Food and Agriculture Organization (FAO). URL: https://www.fao.org/3/cb0010en/cb0010en.pdf.

— (2022a). „Binding og losun gróðurhúsalofttegunda í fortíð, nútíð og framtíð“. Í: *Rit Mógilsár* 47, bls. 8–9. URL: https://www.skogur.is/static/files/rit-mogilsar/47-2022_fagradstefna-skograektar-2022-utdraettir_vefur.pdf.

— (2022b). *Úttekt á landnámi trjátegunda á jaðarsvæðum ræktaðs skóglendis á Íslandi*. Web Page.

Snorrason, Sigurdur S, Pétur M Jónasson, Bror Jonsson, Torfinn Lindem, Hilmar J Malmquist, Odd Terje Sandlund og Skúli Skúlason (1992). „Population dynamics of the planktivorous arctic charr Salvelinus alpinus ("murta") in Thingvallavatn“. Í: *Oikos*, bls. 352–364.

Snæbjörnsdóttir, Sandra Ó., Bergur Sigfússon, Chiara Marieni, David Goldberg, Sigurður R. Gislason og Eric H. Oelkers (feb. 2020). „Carbon dioxide storage through mineral carbonation“. Í: *Nature Reviews Earth & Environment* 1.2, bls. 90–102. DOI: 10.1038/s43017-019-0011-8.

Soffía Helga Valsdóttir (2022). „Að standa af sér storminn. Upplifun og líðan Skagfirðinga í óveðrinu í desember 2019“. Thesis. URL: https://skemman.is/handle/1946/42879.

Solberg, S. Ø., A. Diederichsen, Áslaug Helgadóttir, Sigríður Dalmannsdóttir, R. Djurhuus, A. Frederiksen, G. Poulsen og F. Yndgaard (2016). „Plant genetic resources and climate change. Stakeholder perspectives from the Nordic and Arctic regions“. Í: *Applied Mathematics and Omics to Assess Crop Genetic Resources for Climate Change Adaptive Traits*. Gefið út af

A. Bari, A. B. Damania, M. Mackay og S. Dayanandan. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press, bls. 13–24. ISBN: 978-1-4987-3013-6. DOI: 10.1201/b19518-4.

Springer, Alan M og Gus B van Vliet (2014). „Climate change, pink salmon, and the nexus between bottom-up and top-down forcing in the subarctic Pacific Ocean and Bering Sea“. Í: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111.18, E1880–E1888.

Standing Committee (2022). *Recommendation No. 216 (2022) of the Standing Committee, adopted on 2nd December 2022, on Risks associated with the use of invasive alien tree species as a Nature-based Solution to mitigate climate change.* https://rm.coe.int/2022-rec-216e-invasive-alien-trees-and-ias/1680a94961.

Steinunn Garðarsdóttir, Jónína Svavarsdóttir og Hrannar Smári Hilmarsson (2022). „Hunangsber“. Í: *Jarðræktarrannsóknir 2020*. Gefið út af Þóroddur Sveinsson, Erla Sturludóttir og Margrét Jónsdóttir. Rit LbhÍ 153, Landbúnaðarháskóli Íslands, bls. 84. URL: www.lbhi.is/images/pdf/rit%5C%20lbhi/rit%5C%20lbhi%5C%20nr%5C%20153.pdf.

Sunna Áskelsdóttir (2012). „Changes in soil organic carbon in four long-term hayfield fertilisation experiments in Iceland: Monitoring and modelling“. M.Sc. thesis.

Sunna Skeggjadóttir, Egill Gunnarsson og Hrannar Smári Hilmarsson (2022a). *Orkujurt: Bættar aðferðir til olíuræktunar*. Report. Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://www.lbhi.is/images/pdf/rit%5C%20lbhi/rit%5C%20lbhi%5C%20nr%5C%20160-orkujurt.pdf.

Sunna Skeggjadóttir, Jónína Svavarsdóttir og Hrannar Smári Hilmarsson (2022b). *Akurhafri. Áburðartilraunir á höfrum til þroska á tveimur mismunandi jarðvegsgerðum á Hvanneyri 2020*. Report. Rit LbhÍ 160, Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://www.lbhi.is/images/pdf/rit%5C%20lbhi/rit_lbhi_nr_156_akurhafri.pdf.

Svenning, Martin-A., Morten Falkegård, J. Brian Dempson, Michael Power, Bård-Jørgen Bårdsen, Guðni Guðbergsson og Per Fauchald (2021). „Temporal changes in the relative abundance of anadromous Arctic charr, brown trout, and Atlantic salmon in northern Europe: Do they reflect changing climates?“ Í: *Freshwater Biology* 67.1, bls. 64–77. ISSN: 1365-2427. DOI: 10.1111/fwb.13693.

Thakur, Madhav P., Bjarni D. Sigurðsson, Páll Sigurðsson og Martin Holmstrup (2023). „Warming shifts the biomass distribution of soil microarthropod communities“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 177, bls. 108894. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108894.

Thórsson, AE. Th., S. Pálsson, M. Lascoux og K. Anamthawat-Jónsson (nóv. 2010). „Introgression and phylogeography of Betula nana (diploid), B. pubescens (tetraploid) and their triploid hybrids in Iceland inferred from cpDNA haplotype variation“. Í: *Journal of Biogeography* 37 (11), bls. 2098–2110. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2010.02353.x.

Tómas G. Gunnarsson og Gunnar Tómasson (feb. 2011). „Flexibility in spring arrival of migratory birds at northern latitudes under rapid temperature changes“. Í: *Bird Study* 58 (1), bls. 1–12. ISSN: 00063657. DOI: 10.1080/00063657.2010.526999. URL: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00063657.2010.526999.

Tómas Grétar Gunnarsson, Lilja Jóhannesdóttir, José A. Alves, Böðvar Þórisson og Jennifer A. Gill (apr. 2017). „Effects of spring temperature and volcanic eruptions on wader productivity“. Í: *Ibis* 159 (2), bls. 467–471. ISSN: 1474-919X. DOI: 10.1111/IBI.12449. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ibi.12449%20https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ibi.12449%20https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ibi.12449.

Tómas Gunnarsson (2020). „Búsvæði og vernd íslenskra vaðfugla“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 90 (2-3), bls. 145–162.

Umhverfisstofnun (2022). *Vöktunaráætlun vatnaáætlunar 2022-2027*. Umhverfisstofnun, Reykjavík.

Unnsteinsdottir, E. R. og P. Hersteinsson (mar. 2009). „Surviving north of the natural range: The importance of density independence in determining population size“. Í: *Journal of Zoology* 277 (3), bls. 232–240. DOI: 10.1111/J.1469-7998.2008.00532.X.

Unnsteinsdóttir, Ester Rut (2021). „Íslenski melrakkinn – fyrsti hluti. Stofnbreytingar, veiðar og verndun“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 91.3-4, bls. 97–111.

Valdés, Alicia, Vigdís F. Helmutsdóttir, Bryndís Marteinsdottir og Johan Ehrlén (2022). „Selection against early flowering in geothermally heated soils is associated with pollen but not prey availability in a carnivorous plant“. Í: *American Journal of Botany* 109.11, bls. 1693–1701. DOI: https://doi.org/10.1002/ajb2.16047.

Verbrigghe, N., N. I. W. Leblans, B. D. Sigurdsson, S. Vicca, C. Fang, L. Fuchslueger, J. L. Soong, J. T. Weedon, C. Poeplau, C. Ariza-Carricondo, M. Bahn, B. Guenet, P. Gundersen, G. E. Gunnarsdóttir, T. Kätterer, Z. Liu, M. Maljanen, S. Marañón-Jiménez, K. Meeran, E. S. Oddsdóttir, I. Ostonen, J. Peñuelas, A. Richter, J. Sardans, P. Sigurðsson, M. S. Torn, P. M. Van Bodegom, E. Verbruggen, T. W. N. Walker, H. Wallander og I. A. Janssens (2022). „Soil carbon loss in warmed subarctic grasslands is rapid and restricted to topsoil“. Í: *Biogeosciences* 19.14. BG, bls. 3381–3393. DOI: 10.5194/bg-19-3381-2022.

Vilmundur Hansen og Sigurður Jóhannesson (2021). „Hampbyltingin á Íslandi“. Í: *Tímarit Bændablaðsins* 2021, bls. 16–23. URL: https://issuu.com/bbl.is/docs/timarit_baendabladsins_2021_hq/s/11936469.

Vísinda- og Tækniráð (2017). *Vöktun á Íslandi: kortlagning og framtíðarsýn - skýrsla verkefnahóps Vísinda- og tækniráðs um rannsóknarinnviði og vöktun*. Mennta- og menningarmálaráðuneytið, Reykjavík. ISBN: 978-9935-436-66-5.

VKM, Kjetil Hindar, Lars Robert Hole, Kyrre Kausrud, Martin Malmstrøm, Espen Rimstad, Lucy Robertson, Odd Terje Sandlund, Eva B. Thorstad, Knut Wiik Vollset, Hugo de Boer, Katrine Eldegard, Johanna Järnegren, Lawrence Kirkendall, Inger Måren, Anders Nielsen, Erlend B. Nilsen abd Eli Rueness og Gaute Velle (2020). „Assessment of the risk to Norwegian biodiversity and aquaculture from pink salmon (Oncorhynchus gorbuscha). Scientific Opinion of the Panel on Alien Organisms and Trade in Endangered Species of the Norwegian Scientific Committee for Food and Environment CITES“. Í: *VKM Report 2020:01*. ISSN: 2535-4019.

VSÓ (2021). *Losun gróðurhúsalofttegunda frá landi. Samantekt á rannsóknum og vöktun og samræmi við kröfur í losunarbókhaldi Íslands*. Tæknileg skýrsla. VSÓ Ráðgjöf.

Walker, Tom W. N., Ivan A. Janssens, James T. Weedon, Bjarni D. Sigurdsson, Andreas Richter, Josep Peñuelas, Niki I. W. Leblans, Michael Bahn, Mireia Bartrons, Cindy De Jonge, Lucia Fuchslueger, Albert Gargallo-Garriga, Gunnhildur E. Gunnarsdóttir, Sara Marañón-Jiménez, Edda S. Oddsdóttir, Ivika Ostonen, Christopher Poeplau, Judith Prommer, Dajana Radujković, Jordi Sardans, Páll Sigurðsson, Jennifer L. Soong, Sara Vicca, Håkan Wallander, Krassimira Ilieva-Makulec og Erik Verbruggen (2020). „A systemic overreaction to years versus decades of warming in a subarctic grassland ecosystem“. Í: *Nature Ecology & Evolution*, bls. 101–108. DOI: 10.1038/s41559-019-1055-3.

Walker, Tom W. N., Christina Kaiser, Florian Strasser, Craig W. Herbold, Niki I. W. Leblans, Dagmar Woebken, Ivan A. Janssens, Bjarni D. Sigurdsson og Andreas Richter (2018). „Microbial temperature sensitivity and biomass change explain soil carbon loss with warming“. Í: *Nature Climate Change* 8.10, bls. 885–889. DOI: 10.1038/s41558-018-0259-x.

Warner, Emily, Bryndís Marteinsdóttir, Vigdís F Helmutsdóttir, Johan Ehrlén, Sinikka I Robinson og Eoin J O'Gorman (2021). „Impacts of soil temperature, phenology and plant community composition on invertebrate herbivory in a natural warming experiment“. Í: *Oikos* 130.9, bls. 1572–1582.

Wasowicz, Pawel og Torbjörn Alm (2022). „Senecio pseudoarnica Less. (Asteraceae): a new non-native species invading coastal areas in arctic and subarctic Europe“. Í: *Biological Invasions* 24, bls. 1575–1583. DOI: 10.1007/s10530-022-02759-w.

Wasowicz, Pawel, Guðrún Óskarsdóttir, Guðrún Gísladóttir og Þóra Ellen Þórhallsdóttir (mar. 2022). *Stafafura (Pinus contorta) í Steinadal - mat á ágengni*. Icelandic Institute of Natural History, bls. 1–35.

Wasowicz, Pawel, Ewa Maria Przedpelska-Wasowicz og Hörður Kristinsson (des. 2013). „Alien vascular plants in Iceland: Diversity, spatial patterns, temporal trends, and the impact of climate change“. Í: *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 208 (10-12), bls. 648–673. DOI: 10.1016/j.flora.2013.09.009.

Wasowicz, Pawel, Andrey N. Sennikov, Kurt B. Westergaard, Kristine Spellman, Michael Carlson, Lyndsey J. Gillespie, Jaakko M. Saarela, Steven S. Seefeldt, Brian Bennett og Christian Bay (2020). „Non-native vascular flora of the Arctic: Taxonomic richness, distribution and pathways“. Í: *Ambio* 49.3, bls. 693–703. DOI: 10.1007/s13280-019-01296-6.

Weedon, James T., Erland Bååth, Ruud Rijkers, Stephanie Reischke, Bjarni D. Sigurdsson, Edda Oddsdottir, Jurgen van Hal, Rien Aerts, Ivan A. Janssens og Peter M. van Bodegom (2023). „Community adaptation to temperature explains abrupt soil bacterial community shift along a geothermal gradient on Iceland“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 177, bls. 108914. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108914.

Westergaard-Nielsen, Andreas, Anders Boding Bjørnsson, Martin Rudbeck Jepsen, Martin Stendel, Birger Ulf Hansen og Bo Elberling (2015). „Greenlandic sheep farming controlled by vegetation response today and at the end of the 21st Century“. Í: *Science of The Total Environment* 512-513, bls. 672–681. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.039.

Woodward, Guy, John B. Dybkjær, Jón S. Ólafsson, Gísli M. Gíslason, Elísabet R. Hannesdóttir og Nikolai Friberg (2010). „Sentinel systems on the razor's edge: effects of warming on Arctic geothermal stream ecosystems“. Í: *Global Change Biology* 16.7, bls. 1979–1991. ISSN: 1365-2486. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02052.x. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2486.2009.02052.x (skoðað 22.09.2022).

Zhang, Jing, Alf Ekblad, Bjarni D. Sigurdsson og Håkan Wallander (2020). „The influence of soil warming on organic carbon sequestration of arbuscular mycorrhizal fungi in a sub-arctic grassland“. Í: *Soil Biology and Biochemistry* 147, bls. 107826. DOI: https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107826.

Þorsteinn Guðmundsson (2018). *Jarðvegur – Myndun, vist og nýting*. Háskólaútgáfa.

Þorsteinn Guðmundsson, Hólmgeir Björnsson og Guðni Þorvaldsson (2018). „Langtímaáhrif nituráburðar á kolefni, nitur og auðleyst næringarefni í snauðri sandjörð“. Í: *Skrína* 4, nr. 2. URL: https://skrina.is/wp-content/uploads/2018/05/Langt%C3%ADma%C3%A1hrif-nitur%C3%A1bur%C3%B0ar-%C3%A1-kolefni-nitur-og-au%C3%B0leystn%C3%A6ringarefni-%C3%AD-snau%C3%B0ri-sandj%C3%B6r%C3%B0.pdf.

Þórdís A Kristjánsdóttir (2013). *Jarðræktarrannsóknir 2012*. Bd. nr. 44. Rit LbhÍ. Hvanneyri: Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://lbhi.is/images/pdf/utgefid%5C%20efni/fjolrit%5C%20rannsoknastofnunar%5C%20landbunadarins/rit_lbhi_nr44.pdf.

Þóroddur Sveinsson (2022). *Nytjaplöntur á Íslandi 2022. Yrki, sem mælt er með fyrir landbúnað, gras- og golfflatir, landgræðslu og garðrækt*. Rit LbhÍ 148, Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: https://www.lbhi.is/images/pdf/rit_lbhi_nr_148.pdf.

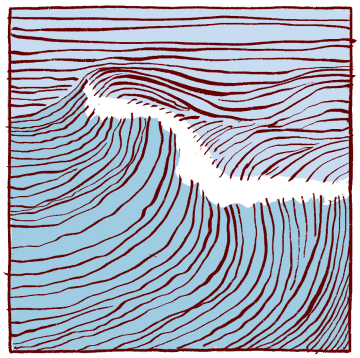
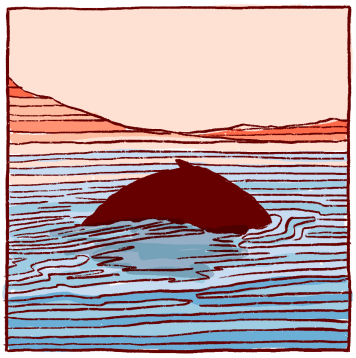
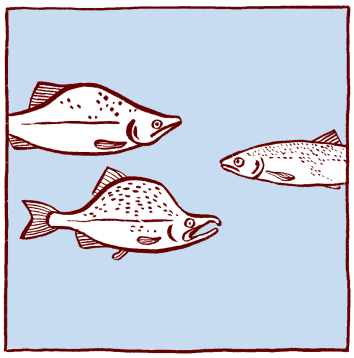
Þóroddur Sveinsson, Teitur Sævarsson, María Svavarsdóttir, Bergrún Arna Óladóttir, Þorbjörg Helga Sigurðardóttir, Eiríkur Loftsson og Þórarinn Leifsson (2022). „Langtímatap kolefnis í framræstu ræktarlandi“. Í: *Rit LbhÍ* 149, bls. 69.

Þórólfur Antonsson og Friðþjófur Árnason (2011). „Elliðaár 2010. Rannsóknir á fiskistofnum vatnakerfisins“. Í: *Veiðimálastofnun* (VMST/11030).

KAFLI

5

ÁSTAND OG LÍFRÍKI SJÁVAR

Efnisyfirlit kafla

5.1 Inngangur 166
5.2 Umhverfisbreytingar 166
5.2.1 Hitastig, selta 166
5.2.2 Súrnun sjávar og líffræðilegar afleiðingar 170
5.3 Lífríki sjávar 172
5.3.1 Plöntu- og dýrasvif 172
5.3.2 Breytingar á útbreiðslu fisktegunda við landið 174
5.3.3 Einstaka tegundir 175
5.3.4 Botnfiskar 175
5.3.5 Uppsjávarfiskar 177
5.3.6 Sjávarhryggleysingjar 179
5.3.7 Sjávarspendýr 180
5.3.8 Sjófuglar 183

Samantekt

1. Erfitt er að greina áhrif hnattrænnar hlýnunar í breytingum á ástandi sjávar (hita og seltu) við Ísland. Þær breytingar sem orðið hafa á hita og seltu á hafsvæðinu kringum Ísland síðan 1995 fara ekki út fyrir mörk náttúrlegs breytileika.

2. Frá upphafi mælinga fyrir norðan land er hægt er að greina fjögur mismunandi tímabil, byggð á ástandi sjávar. Frá 1995 hefur Atlantssjór verið ráðandi fyrir norðan land og hitastigið og seltan verið tiltölulega há.

3. Talið er líklegt að við landið verði áframhaldandi hlýindaskeið eins og tvo síðustu áratugi.

4. Vegna aðstæðna í hafinu við Ísland, og almennt í norðurhöfum, hefur súrnun sjávar orðið örari hér við land en að jafnaði í heimshöfunum. Súrnunin við Ísland endurspeglast í lækkuðu pH-gildi sem nemur 0,14 frá iðnbyltingu við Ísland.

5. Reikningar sýna að einungis við róttæka minnkun á losun gróðurhúsalofttegunda tekst að snúa súrnun sjávar við. Þó fer pH-gildi sjávar ekki að hækka á ný fyrr en í fyrsta lagi á síðari hluta aldarinnar.

6. Almennt eru áhrif súrnunar á lífverur neikvæðar þótt undantekninga gæti. Kalkmyndandi lífríki er talið einkar viðkvæmt, en einnig getur súrnun sjávar haft áhrif á aðrar lífverur, eins og t.d. fiska.

7. Aukning hefur orðið á magni svifþörunga, bæði á Íslandsmiðum og á stóru svæði suður af Íslandi. Ekki hefur mælst viðvarandi lækkun á magni dýrasvifs á Íslandsmiðum, eins og á stóru svæði í Norður-Atlantshafi, en talsverðar sveiflur eru þó milli ára.

8. Meðalmagn plöntu- og dýrasvifs að vorlagi á norðurmiðum er meira á hlýrri en kaldari árum.

9. Fyrir norðan land hafa orðið breytingar á magni og útbreiðslu mikilvægra dýrasvifstegunda með hækkandi hitastigi sjávar þar sem hlutur rauðátu (atlantísk tegund) hefur aukist en pólátu (kaldsjávartegund) minnkað.

10. Hækkandi hitastig á íslenska landgrunninu hefur leitt til breytinga á útbreiðslu margra botnfisktegunda. Tegundir, sem hafa verið við nyrðri mörk útbreiðslu sinnar á Íslandsmiðum og fundist að mestu í hlýja sjónum sunnan og vestan við landið, hafa stækkað útbreiðslusvæði sitt í norðaustur. Á sama tíma hefur stofnstærð og útbreiðsla kaldsjávartegunda minnkað.

11. Frá árinu 2006 hefur fæðuslóð makríls breiðst út frá Noregshafi á Íslandsmið, á sama tíma hefur sumarbeitarsvæði loðnu færst í vestur frá Íslandshafi upp að landgrunnskantinum við Austur-Grænland.

12. Nýliðun margra hlýsjávartegunda hefur minnkað mikið á undanförnum árum og líklega má rekja þessa neikvæðu þróun til breyttra umhverfisskilyrða í hafinu síðastliðin 20 ár. Um er að ræða tegundir sem halda sig aðallega í hlýjum sjó við suður- og vesturströndina.

13. Tilfærsla hefur orðið í útbreiðslu margra tegunda hvala við landið samhliða aukningu í stofnstærð. Þannig hefur hrefnu fækkað á landgrunninu en finnst nú aðallega lengra frá landi fyrir norðan land. Stofnstærð flestra tegunda skíðishvala hefur aukist undanfarin 20-30 ár.

14. Stofnar helstu sjófugla við landið hafa farið minnkandi á síðustu árum, sem í sumum tilfellum má rekja með óbeinum hætti til umhverfisbreytinga í hafinu við landið. Þannig hafa breytingar í stofnum fæðutegunda, eins og sandsílis og loðnu, leitt til lélegrar afkomu sjófugla.

5.1 Inngangur

Umfjöllun um ástand og lífríki sjávar er að miklu leyti byggð á skýrslu Hafrannsóknastofnunar *Staða umhverfis og vistkerfa í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga* (Guðmundur J. Óskarsson o.fl., 2021). Viðbótarupplýsingum hefur þó verið bætt við þar sem nýjar rannsóknir hafa komið fram og um efni sem ekki var farið yfir. Í þeirri skýrslu var meðal annars gerð grein fyrir breytingum á ástandi sjávar ásamt útbreiðslu, lífmassa, framleiðni og líffræði sjávarlífvera við Ísland sem tengja má við umhverfisbreytingar undanfarinna áratuga (Guðmundur J. Óskarsson o.fl., 2021).

5.2 Umhverfisbreytingar

5.2.1 Hitastig, selta

Lengi hefur verið vitað að hiti við Ísland er almennt þó nokkuð hærri en annars staðar á sömu breiddargráðu (Þorvaldur Thoroddsen, 1911) sem skýrist að miklu leyti af varmaflutningi með Golfstraumnum úr suðri sem flytur með sér hlýjan og selturíkan sjó (sjá t.d. mynd 4.3 í V2018 og Rahmstorf og Ganopolski, 1999). Lofthitinn við Ísland er að jafnaði lægri en sjávarhitinn og því flæðir varmi frá sjónum upp í andrúmsloftið og við það hækkar lofthitinn og sjórinn kólnar.

Sjórinn tapar því varma til andrúmsloftsins þegar hann berst með Golfstraumnum og hefur varmatapið í norðurhöfum verið áætlað 115 TW (Smedsrud o.fl., 2022). Eftir því sem sami sjórinn er lengur við landið því kaldari verður hann. Hins vegar getur hitastigið í sjónum við Ísland hækkað þegar heitari sjór berst að landinu með hafstraumum, eins og rætt verður síðar í kaflanum. Loftslagsbreytingar hafa m.a. áhrif á ýmiss ferli tengd náttúrulegum breytileika í sjónum, og erfitt getur reynst að greina áhrif hnattrænnar hlýnunar frá náttúrulegum breytileika. Mikilvægt er því að vakta náttúrufar og reyna að greina jafnharðan þær breytingar sem eru að verða á ástandi sjávar og meta hvaða þróun sé líkleg.

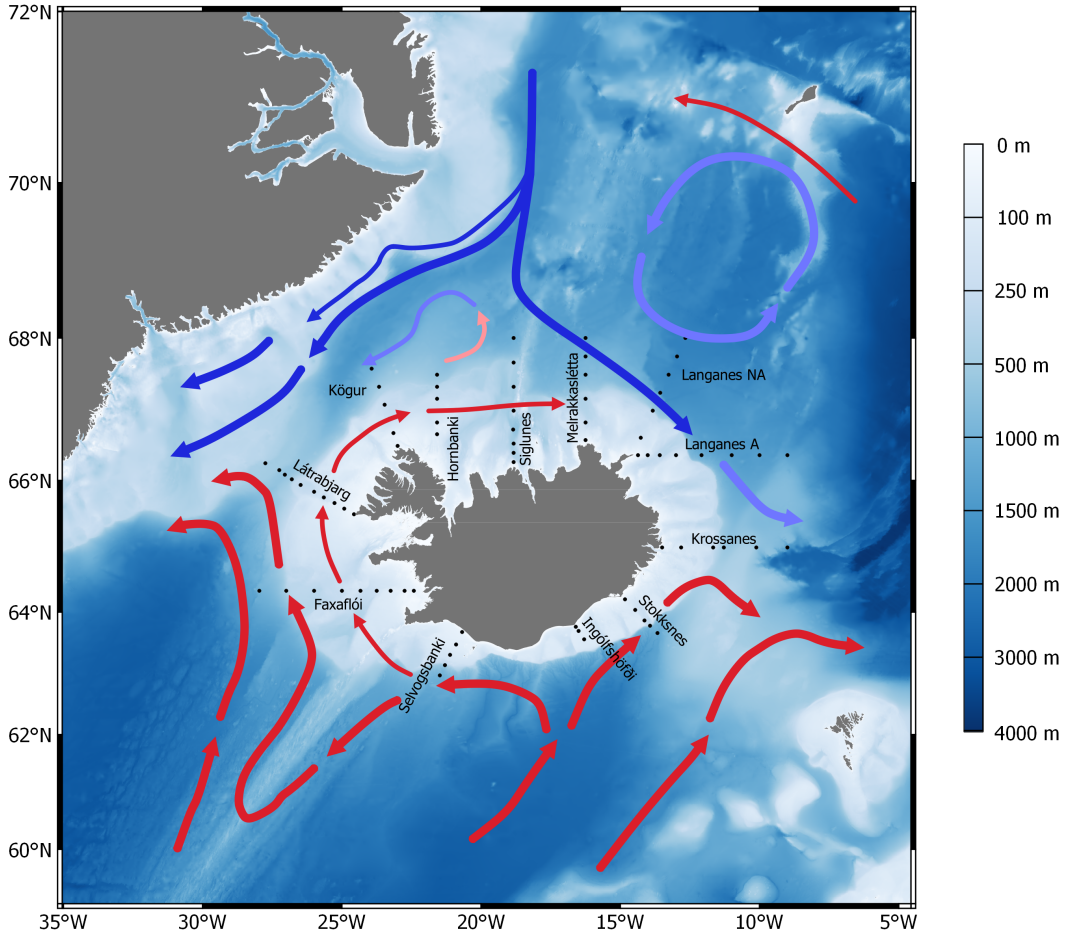


Mynd 5.1: Hópur æðarfugla. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

5.2.1.1 Straumar og sjógerðir

Ísland er á straumamótum og kemur sjórinn við Ísland aðallega frá Atlantshafinu sunnan Íslands en norðan Íslands gætir einnig áhrifa sjávar frá Norður-Íshafinu (mynd 5.2).

Styrkur strauma og samsetning sjávar sem berst að landinu er breytileg (Steingrímur Jónsson og Sólveig Ólafsdóttir, 2021). Irmingerstraumurinn ber að landinu heitan og saltan Atlantssjó úr suðri og er hann ríkjandi við sunnan- og vestanvert landið allt að Látrabjargi. Í Grænlandssundi mætir Atlantssjórinn Austur-Grænlandsstraumnum sem ber með sér mjög kaldan og seltulágan pólsjó norðan úr Norður-Íshafinu. Lítill, en þó mismikill hluti Irmingerstraumsins, streymir norður um Grænlandssund og síðan austur yfir landgrunnið norðanlands en þar er yfirborðssjórinn blanda af Atlantssjó og pólsjó. Svalsjór, sem myndast við blöndun á Atlantssjó og pólsjó ásamt kælingu, er kaldur og tiltölulega seltulágur sjór í efri lögum Íslandshafs (norður af Íslandi) og



Mynd 5.2: Meginhafstraumar í yfirborðslögum umhverfis Ísland og lögun hafsbotnsins. Sýndar eru þær stöðvar þar sem reglubundnar umhverfisrannsóknir eru gerðar, ásamt nöfnun sniðanna. Rauðar örvar tákna heitan og saltan Atlantssjó, bláleitar örvar seltuminni pólsjó eða svalsjó. Mynd úr Steingrímur Jónsson og Sólveig Ólafsdóttir (2021).

Norður-Grænlandshafs. Svalsjórinn berst til austurs yfir og utan við landgrunnshlíðina norðan Íslands með Austur-Íslandsstraumnum og er hitastigið og seltan hærri en í pólsjónum en lægri en í Atlantssjónum (mynd 5.2). Djúpt suður og vestur af landinu eru tvö hringstreymi sem hafa mikil áhrif á samsetningu Atlantssjávarins sem berst úr suðri að landinu. Svokallaður kaldtempraður hvirfill (*e. subpolar gyre*) er rangsælis hringstreymi í Labrador- og Grænlandshafi og nær áhrifasvæði hans mislangt til austurs. Fyrir sunnan hann er annað hringstreymi, þ.e. heittempraður hvirfill (*e. subtropical gyre*) sem fer réttsælis en sjórinn í honum er bæði heitari og saltari en í þeim kaldtempraða. Það fer eftir styrkleika og stærð áhrifasvæðis kaldtempraða hvirfilsins til austurs hversu mikið berst af heitari og saltari sjó úr heittempraða hvirflinum til landsins (Hátún o.fl., 2005).

5.2.1.2 Langtímarannsóknir

Langtímarannsóknir Hafrannsóknastofnunar sýna mismikinn breytileika í hita og seltu á landgrunninu umhverfis Ísland (Steingrímur Jónsson og Sólveig Ólafsdóttir, 2021). Sveiflur á svæðinu norðan við landið eru yfirleitt mun meiri en fyrir sunnan landið og eru margir þættir sem hafa þar áhrif. Á norðursvæðinu eru t.d. sterk en mjög breytileg áhrif pól- og svalsjávar úr norðri. Einnig eru miklar breytingar á innflæði hlýsjávar úr suðri inn á norðurmið.



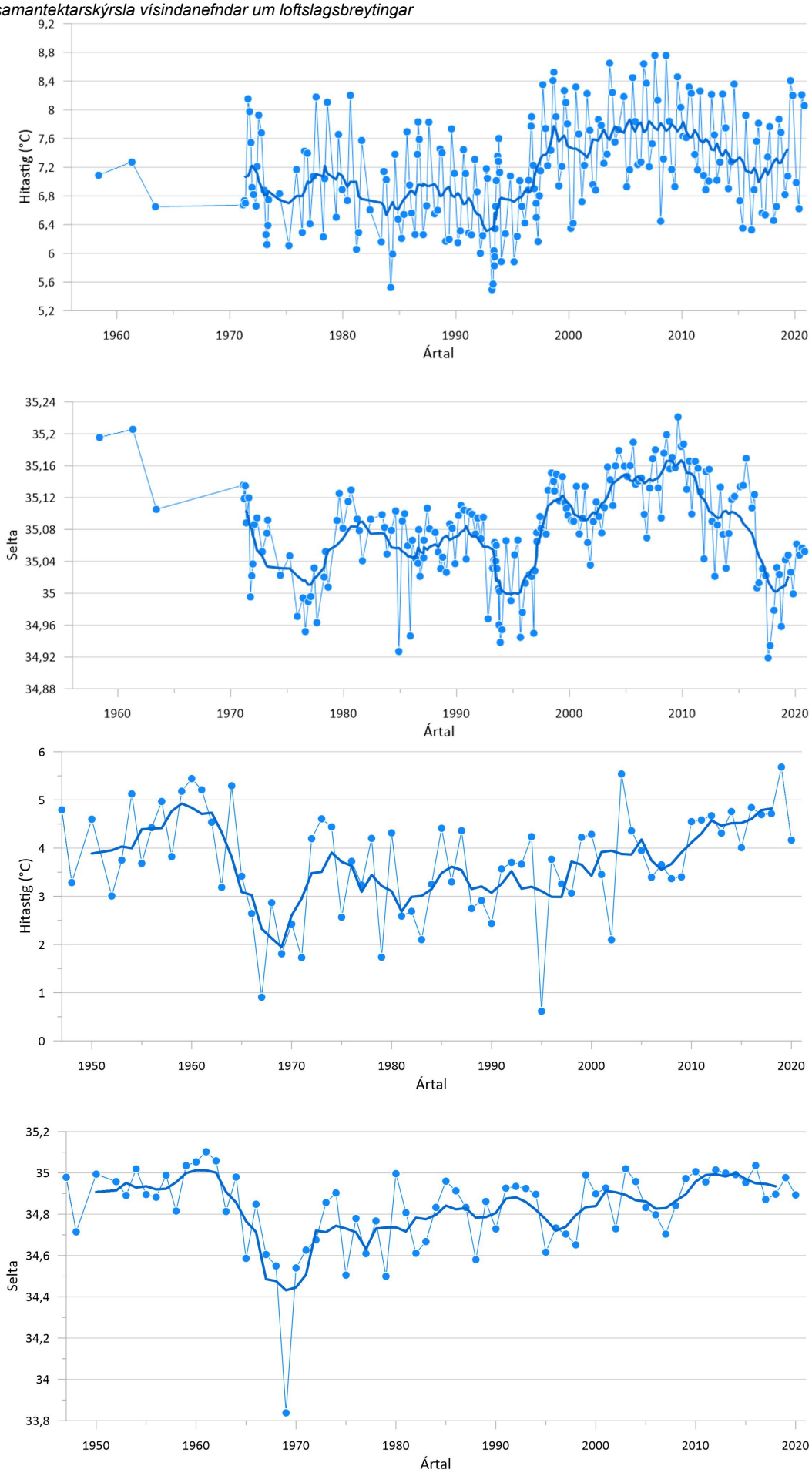
Mynd 5.3: Úrvinnsla sjósýnis. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

Á tímabilinu 1947-2020 hefur meðalhiti og meðalselta breyst mikið á föstum athugunastöðvum á Siglunessniði að vorlagi, stöðvum 2-5 á 0-200 m dýpi (mynd 5.4). Á norðursvæðinu er hægt að greina fjögur mismunandi tímabil frá upphafi mælinga hér við land. Fyrsta tímabilið, frá 1947-1962, einkenndist af tiltölulega heitum (5-6 °C) og selturíkum sjó (selta í kringum 35) og var Atlantssjór ráðandi. Síðan tók við tímabil frá 1963-1970 þar sem bæði hitastig og selta minnkaði mjög ört og eru þessi ár gjarnan kölluð hafísárin, en ískaldur og seltulítill pólsjór úr norðri streymdi yfir landgrunnið norðanlands og bar með sér hafís. Tímabilið frá 1971-1994 var mun kaldara en fyrsta tímabilið en þó ekki eins kalt og á hafísárunum. Á fjórða tímabilinu, 1995-2020 hefur Atlantssjór verið ráðandi fyrir norðan land og hitastigið og seltan verið tiltölulega há.

Hiti og selta breyttist heldur minna á tveimur föstum stöðvum suðvestan við landið en á norðursvæðinu (mynd 5.4.) Fyrir sunnan land er einungis Atlantssjór og engin blöndun við kaldari sjógerðir eins og fyrir norðan. Hitastig og selta eru þar af leiðandi mun meiri en fyrir norðan og breytileikinn mun minni. Þó skiptast á svipuð tímabil og í sjónum fyrir norðan land. Áhrif stóra seltufráviksins komu fram um miðjan áttunda áratuginn fyrir sunnan land, nokkuð seinna en fyrir norðan en þá er sjórinn búinn að ferðast með hringrás kaldtempraða hvirfilsins um Grænlands- og Labradorhaf að suðurströndinni. Upp úr 1995 hækkaði bæði hitastig og selta fyrir sunnan land sem skilaði sér einnig norður fyrir land. Þessi hækkun hefur verið tengd við veikingu á kaldtempraða hvirflinum á þessu tímabili og gat því heitari og saltari Atlantssjór borist að sunnan úr heittempraða hvirflinum austan við kaldtempraða hvirfilinn og að landinu (Hátún o.fl., 2005). Á árunum 2012-2017 lækkaði einnig hitastig og selta fyrir sunnan land og er það talið hafa stafað af óvenjulegum vetrarvindum sem leiddu til streymis á ferskvatni frá Labradorstraumnum inn á svæðið (Holliday o.fl., 2020). Hitastig og selta hafa síðan aukist aftur.

Að meðaltali var varmaflutningur inn í norðurhöf yfir hryggina milli Grænlands og Skotlands á árunum 2002-2016 21 TW meiri en fyrir tímabilið 1993-2000 (Tsubouchi o.fl., 2021). Þessi varmaaukning átti sér stað vegna aukins flutnings á Atlantssjó inn á svæðið, bæði vegna sterkari strauma og hærri sjávarhita. Þær breytingar, sem orðið hafa á hita og seltu á hafsvæðinu kringum Ísland síðan 1995, eru ekki meiri en áður hafa sést hér við land (myndi 5.4.

Texti með mynd 5.4: Efstu tvær myndirnar sýna mælingar að vori frá stöð 9 á Faxaflóasniði og stöð 8 á Reykjanessniði frá 0-200 m dýpi, ásamt 5 ára keðjumeðaltali (þykka línan).
Efsta mynd: *Meðaltal hitastigis.* ***Önnur mynd að ofan****: meðaltal seltu.*
Neðstu tvær myndirnar sýna mælingar að vori frá stöðvum 2-5 á Siglunessniði frá 0-200 m dýpi, ásamt 5 ára keðjumeðaltali (þykka línan).
Þriðja mynd að ofan*: Meðaltal af hitastigi.* ***Neðsta myndin:*** *Meðaltal af seltu.*
Allar myndirnar eru úr skýrslu Hafrannsóknarstofnunar Steingrímur Jónsson og Sólveig Ólafsdóttir, 2021.



Mynd 5.4: Myndatexti á síðunni á undan

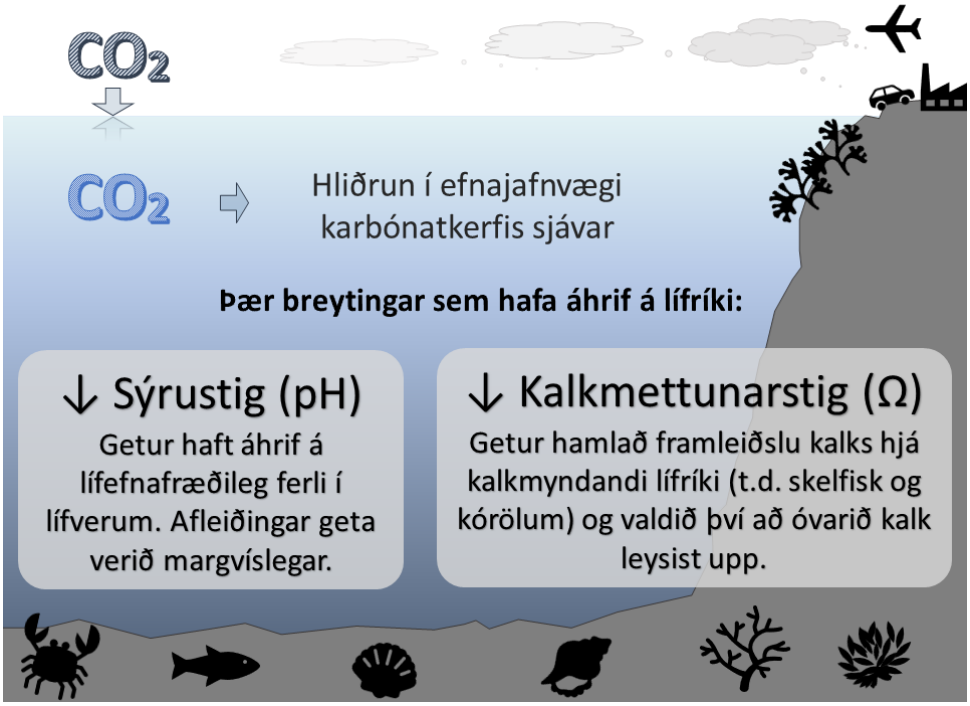
5.2.1.3 Möguleg framvinda

Talið er líklegt að við landið verði áframhaldandi hlýindaskeið eins og tvo síðustu áratugi þar sem engin sérstök teikn eru á lofti um að ástandið sé að fara að breytast á næstu árum (Steingrímur Jónsson og Sólveig R. Ólafsdóttir, 2021). Annar möguleiki er kólnun, aðallega norðanlands, eins og átti sér stað á hafísárunum 1965-1970. Mikil uppsöfnun ferskvatns hefur átt sér stað í Norður-Íshafinu í svokölluðum Beaufort-hvirfli og hefur safnast svipað magn og talið er hafa valdið stóra seltufrávikinu sem hófst með hafísárunum (Proshutinsky o.fl., 2019). Ef hæðin yfir Norður-Íshafinu gæfi eftir er möguleiki á aukinni útbreiðslu pólsjávar með Austur-Grænlandsstraumnum en ólíklegt er að því myndi fylgja jafnmikill hafís og á hafísárunum.

5.2.2 Súrnun sjávar og líffræðilegar afleiðingar

Í kafla 6 í V2018 er all ítarlegur kafli um efnafræðihlið súrnunar sjávar. Frá iðnbyltingu hefur sýrustig yfirborðssjávar heimshafanna fallið um að meðaltali 0,1 pH-einingu, þ.e. úr 8,2 í 8,1 (Gattuso og Hansson, 2011). Vegna aðstæðna í hafinu við Ísland og almennt í norðurhöfum hefur súrnun sjávar orðið örari hér við land en að jafnaði í heimshöfunum og er lækkunin um 0,14 pH-einingar við Ísland.

Súrnun sjávar er skilgreind sem lækkun á pH-stigi vegna athafna manna, og þá einkum vegna bruna jarðefnaeldsneytis og iðnaðar og landnotkunar (Rhein et al 2013). Heimshöfin hafa tekið upp um fjórðung af því koldíoxíði (CO_2) sem mannkynið hefur losað út í andrúmslofið og hefur þróunin verið hröð (Schlunegger o.fl., 2019). Þegar koldíoxíð leysist upp í sjó veldur það breytingu á karbónatkerfi sjávar. Hugtakið súrnun sjávar er almennt notað yfir þær breytingar sem verða á karbónatkerfi sjávar, þ.á m. lækkun á pH (aukinn styrkur H^+) og lækkun á kalkmettunarstigi (mynd 5.5).

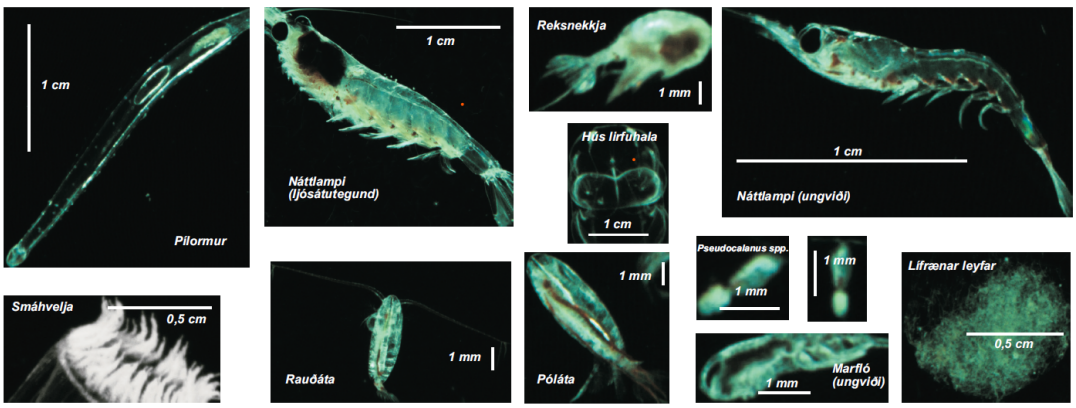


Mynd 5.5: Þegar styrkur koldíoxíðs eykst í sjó og sjór súrnar þá eiga sér stað breytingar á sýru-(pH) og kalkmettunarstigi (Ω), þættir sem geta haft óbein áhrif á sumar lífverur sjávar. Aukning á styrk koldíoxíðs getur einnig haft bein áhrif á sumar lífverur, s.s. frumframleiðendur. (Mynd úr grein Hrannar Egilsdóttur (2021)).

Hafrannsóknastofnun heldur úti einna lengstu tímaröðum af eiginleikum karbónatskerfisins í heiminum og hafa þær verið notaðar til að meta hraða súrnunar sjávar (Sólveig Ólafsdóttir, 2021). Frá 1983 hefur karbónatskerfið verið rannsakað að vetri til, annars vegar í hlýjum Atlantssjó, suðvestur af landinu, og hins vegar í kaldari sjó, norðan landsins í Íslandshafi. Sýrustig (pH) yfirborðssjávar við Ísland hefur fallið hratt frá upphafi mælinga. Sýrustig í hlýja sjónum sunnanlands að vetri til er lægra en í Íslandshafi en á móti fellur sýrustigið hraðar í Íslandshafi vegna aðstæðna í sjónum þar (Sólveig Ólafsdóttir, 2021). Í V2018 kom fram að hnattræn súrnun sjávar myndi halda áfram nema dregið yrði hratt úr losun gróðurhúsalofttegunda (sjá mynd 6.1 í V2018). Sambærilegar niðurstöður fengust nýlega í rannsókn þar sem gögnin úr Íslandshafi voru m.a. notuð, ásamt gögnum frá nærliggjandi hafsvæðum, til að reikna súrnun sjávar í norðurhöfum til ársins 2100 miðað við þrjár mismunandi losunarsviðsmyndir: RCP2.6, RCP4.5 og RCP8.5 (Fransner o.fl., 2022). Einungis við róttæka takmörkun á losun (RCP2.6) tekst að snúa þróuninni við og ekki fyrr en upp úr miðri öldinni færi pH að hækka á ný. Ef gert er ráð fyrir óheftri losun (RCP8.5) verður gríðarleg lækkun á pH og líklegt að pH yfirborðssjávar nái 7,7 árið 2100.

Súrnun sjávar getur haft verulegar breytingar á lífríki sjávar (mynd 5.5). Lífverur sjávar eru misjafnlega viðkvæmar fyrir súrnun og eru áhrifin almennt neikvæð þó að undantekninga gæti (Hrönn Egilsdóttir, 2021). Til skamms tíma var talið að súrnun sjávar hefði ekki bein áhrif á fiska en komið hefur í ljós að hún getur valdið röskun á innra jafnvægi sýrubasa og takmörkun á vexti og lifun lirfa. Súrnun sjávar getur einnig haft mikil áhrif á kalkmyndandi lífverur hafsins þegar styrkur karbónats (CO_3^{2-}) lækkar og leysni kalks ($CaCO_3$) eykst en karbónat er annað byggingarefni kalks. Talið er að t.d. lindýr, kóraldýr, skrápdýr og rauðþörungar séu sérstaklega viðkvæm fyrir súrnun sjávar (Andersson o.fl., 2008). Leysni koldíoxíðs er meiri í köldum sjó en heitum og upptaka á koldíoxíði á köldum svæðum því hraðari. Í kaldari sjó er kalkmettunarstig sjávar einnig náttúrulega lágt, og því er talið að afleiðingar súrnunar sjávar gætu orðið mestar á köldum svæðum eins og við Ísland og þá sérstaklega í kaldari sjó fyrir norðan land.

Engar beinar rannsóknir hafa verið gerðar á líffræðilegum áhrifum súrnunar sjávar við Ísland og er þörf á rannsóknum þar sem tekið er tillit til staðbundins umhverfisbreytileika og vistkerfa (Hrönn Egilsdóttir, 2021). Það stendur þó til bóta þar sem Hafrannsóknastofnun er að setja upp tilraunaaðstöðu í eldisstöð sinni á Stað við Grindavík. Aðstaðan mun bjóða upp á fjölþáttatilraunir (*e. multiple stressor experiments*) í 45 kerjum og áherslan verður í byrjun á hita- og sýrustigstilraunir til að rannsaka hvernig ýmsum lífverum muni vegna við breytingar á þessum þáttum.



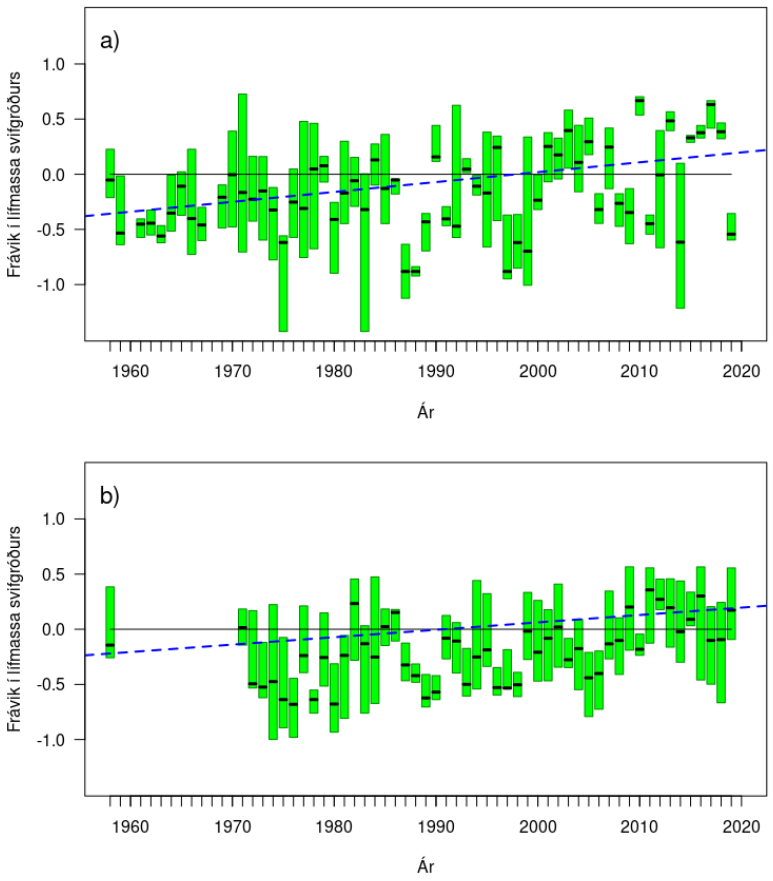
Mynd 5.6: Ýmsar tegundir svifdýra. Myndir eru teknar með svifsjá (e. Video Plankton Recorder) Hafrannsóknastofnunar. Svifsjáin en neðansjávarsmásjá sem tekur myndir af svifi og lífrænu reki í sjónum.

5.3 Lífríki sjávar

5.3.1 Plöntu- og dýrasvif

Svifþörungar nýta sér sólarljós og ólífræn næringarefni til orkuframleiðslu og eru undirstaða alls lífríkis í sjó. Þegar vorar og sjór verður lagskiptur skapast kjöraðstæður fyrir vöxt svifþörunga. Almennt verður mestur blómi svifþörunga á vorin eftir uppblöndun sjávar á undangengnum vetri.

Dýrasvif er fjölbreyttur hópur lífvera (mynd 5.6) sem étur þörungana og gegnir því lykilhlutverki við að gera frumframleiðsluna aðgengilega dýrum ofar í fæðukeðjunni. Tveir hópar krabbadýra, þ.e. krabbaflær (*Copepoda*) og ljósáta (*Euphausiacea*), eru mikilvægastir þeirra dýra sem að staðaldri finnast í dýrasvifinu á norðlægum hafsvæðum. Krabbaflóin rauðáta (*Calanus finmarchicus*) (mynd 5.6) er langalgengasta svifdýrið í sjónum við landið og er hún að meðaltali um 40-80 prósent lífmassa allra svifdýra í yfirborðslögum að vorlagi (Gíslason o.fl., 2009). Rauðátan er því gríðarlega mikilvæg í vistkerfi Íslandsmiða sem aðalfæða lirfa og seiða nær allra botnfiska og uppsjávarfiska og einnig flestra uppsjávarfiska síðar á lífsskeiðinu. Ljósáta (mynd 5.6) er einnig mikilvægur hópur svifdýra við Ísland og lifir á plöntusvifi og smáum svifdýrum og er svo sjálf mikilvæg fæða fyrir fiska og hvali.



Mynd 5.7: Árlegur breytileiki í lífmassa svifþörunga (a-blaðgrænu) sýndur sem frávik frá vegnu meðaltali mælinga í maí/júní á dýptarbilinu 0 - 20 metrar árin 1958 - 2019. Niðurstöður eru sýndar fyrir stöðvar á landgrunninu sem teknar eru annars vegar (a) fyrir norðan land milli Húnaflóa og Siglunes og hins vegar (b) fyrir sunnan land á Selvogsbanka (Mynd: Hildur Pétursdóttir o.fl. (2021).

Almennt er heildarlífmassi og fjöldi dýrasvifs lítill að vetri til, þegar margar tegundir, m.a. rauðáta, halda sig tiltölulega djúpt en fjöldinn nær hámarki í efstu lögum sjávar á vorin.

5.3.1.1 Breytingar á magni plöntusvifs

Aukning hefur orðið á lífmassa svifþörunga, bæði fyrir norðan og sunnan land (mynd 5.7). Langtímarannsóknir á svokölluðum átuvísagögnum (CPR), sem ná yfir sex áratugi á stóru svæði í Norður- Atlantshafi, sýna svipaða aukningu (O'Brien, 2023). Sunnanlands mælast að jafnaði hærri gildi og minni árlegur breytileiki en fyrir norðan land (mynd 5.7).

Sveiflur á magni svifþörunga fyrir norðan land hafa verið skýrðar með breytilegu ástandi sjávar, en meðalfrumframleiðni þörunga að vorlagi á norðurmiðum er allt að tvisvar sinnum meiri

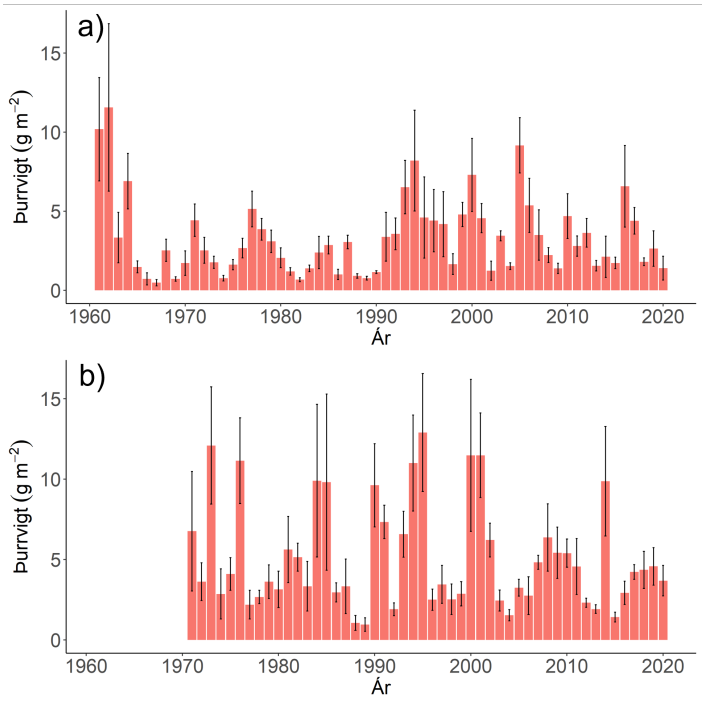
þegar hlýr, selturíkur Atlantssjór er ríkjandi heldur en þegar kaldur og seltulítill pólsjór er þar í meira mæli (Gudmundsson, 1998). Breytileikann sunnanlands má að einhverju leyti rekja til mismunandi afrennslis frá landi og vindstyrks, en hvort tveggja getur haft áhrif á vaxtarskilyrði svifþörunga (Þórunn Þórðardóttir, 1986). Skýringar á þeirri almennu aukningu, sem kemur fram bæði fyrir norðan og sunnan land þegar til langs tíma er litið, eru ekki augljósar.

5.3.1.2 Breytingar á lífmassa dýrasvifs

Langtímarannsóknir á lífmassa dýrasvifs að vorlagi við Ísland sýna að magn dýrasvifs hefur verið nokkuð stöðugt, þ.e. hvorki merkjanleg viðvarandi aukning né rýrnun (mynd 5.8).

Hins vegar mælist viðvarandi fall í magni dýrasvifs á viðamiklu svæði í norðanverðu Atlantshafi samkvæmt átuvísagögnum sem spanna sex áratugi (Fromentin og Planque, 1996, Silva o.fl., 2014, 13,20). Það er vísbending um að staðbundin áhrif séu mikilvæg við Ísland (Gislason o.fl., 2014, Espinasse o.fl., 2017). Miklar og reglubundnar sveiflur í magni dýrasvifs eru merkjanlegar, bæði fyrir norðan (Siglunessnið) og sunnan land (Selvogsbankasnið) (mynd 5.8). Skýra má sveiflur í magni dýrasvifs fyrir norðan land m.a. af meiri breytileika í ástandi sjávar fyrir norðan en fyrir sunnan land. Sambærilegt við frumframleiðni þörunga reynist meðalmagn dýrasvifs að vorlagi á norðurmiðum meiri í hlýrri en kaldari árum (Gudmundsson, 1998, Olafur S Astthorsson o.fl., 2007,Olafur S Astthorsson og Gislason, 1995).

5.3.1.3 Breytingar á tegundasamsetningu dýrasvifs



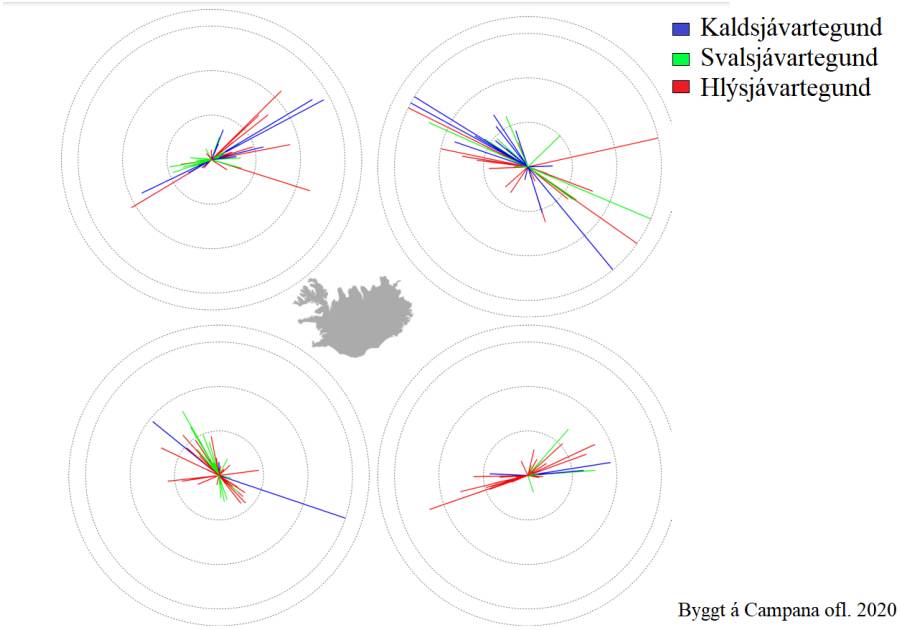
Mynd 5.8: Breytingar á magni dýrasvifs (g þurrvigt m-2, 0-50 m) að vorlagi (a) fyrir norðan (á Siglunessniði) árin 1961-2020 og (b) fyrir sunnan land (á Selvogsbankasniði) árin 1971-2020. Súlurnar sýna meðaltöl allra stöðva á sniðinu. Staðalskekkja er sýnd með lóðréttum strikum. Mynd úr Hildur Pétursdóttir o.fl. (2021).

Mikill munur er á tegundasamsetningu dýrasvifs milli ára, bæði fyrir norðan og sunnan land, og ræður ástand sjávar þar mestu um (Gíslason o.fl., 2009). Á norðurmiðum sést hlutfallslega meira magn af rauðátu og ljósátu í hlýju árferði en hlutfallslega meira af pólátu og marflóm í köldu árferði (Gíslason o.fl., 2009). Hægt er að gera ráð fyrir að við áframhaldandi hlýnun sjávar gæti ástandið í hlýju árferði orðið viðvarandi. Miklar breytingar á magni dýrasvifs og samfélagsgerð í Norður-Atlantshafi hafa verið tengdar hækkandi hitastigi sjávar, þar sem bæði kaldsjávartegundir og tegundir sem fremur tengjast tiltölulega hlýjum sjó hafa færst norðar (Gregory Beaugrand o.fl., 2002, Grégory Beaugrand, 2005, Grégory Beaugrand, 2009). Nýlegar rannsóknir á breytingum á magni rauð- og pólátu fyrir norðan Ísland á tímabilinu 1990-2020 leiða í ljós að með hlýnandi árferði í hafinu, sést aukning á Atlantísku tegundinni rauðátu djúpt norður af landinu en magn kaldsjávar systurtegundarinnar pólátu minnkar bæði yfir landgrunninu og utan þess

(Gislason o.fl., 2021).

5.3.2 Breytingar á útbreiðslu fisktegunda við landið

Á síðustu tveimur áratugum hefur útbreiðsla margra fisktegunda á Íslandsmiðum verið að færast til (sjá mynd 5.9). Viðamiklar samantektir, byggðar á gögnum úr stofnmælingum Hafrannsóknastofnunar að hausti, sýndu tilfærslu til norðausturs (Campana o.fl., 2020). Þar var skoðuð útbreiðsla 82 tegunda fiska að haustlagi í hafinu kringum landið á árunum 1995-2019 og kom í ljós að útbreiðsla yfir helmings tegundanna hafði breyst. Langflestar tegundirnar höfðu sýnt tilfærslu til vesturs, norðvesturs eða norðurs og voru breytingarnar mest áberandi hjá hlýsjávartegundum á grunnslóð og þeim tegundum sem kjósa tiltölulega þröngt hitabil. Rannsóknin sýndi að kjörsvæði 7% tegundanna færðist um 100 km við 1 °C hækkun hitastigs sjávar. Önnur vísindagrein byggist einnig á gögnum úr stofnmælingaleiðöngrum, auk gagna úr fimm hnattrænum loftslagslíkönum, til að spá fyrir um breytingar á stærð búsvæða fisktegunda á Íslandsmiðum 80 ár fram í tímann (Mason o.fl., 2021). Í henni kom í ljós bætt skilyrði fyrir flestar hlýsjávartegundir, ásamt aukinni útbreiðslu í norðurátt, á meðan skilyrði fyrir flestar kaldsjávartegundir versnuðu (Mason o.fl., 2021). Í þessum tveim greinum er gert ráð fyrir töluverðum og almennum breytingum á útbreiðslu tegunda við landið að gefnum forsendum um áframhaldandi hlýnun sjávar við Ísland.

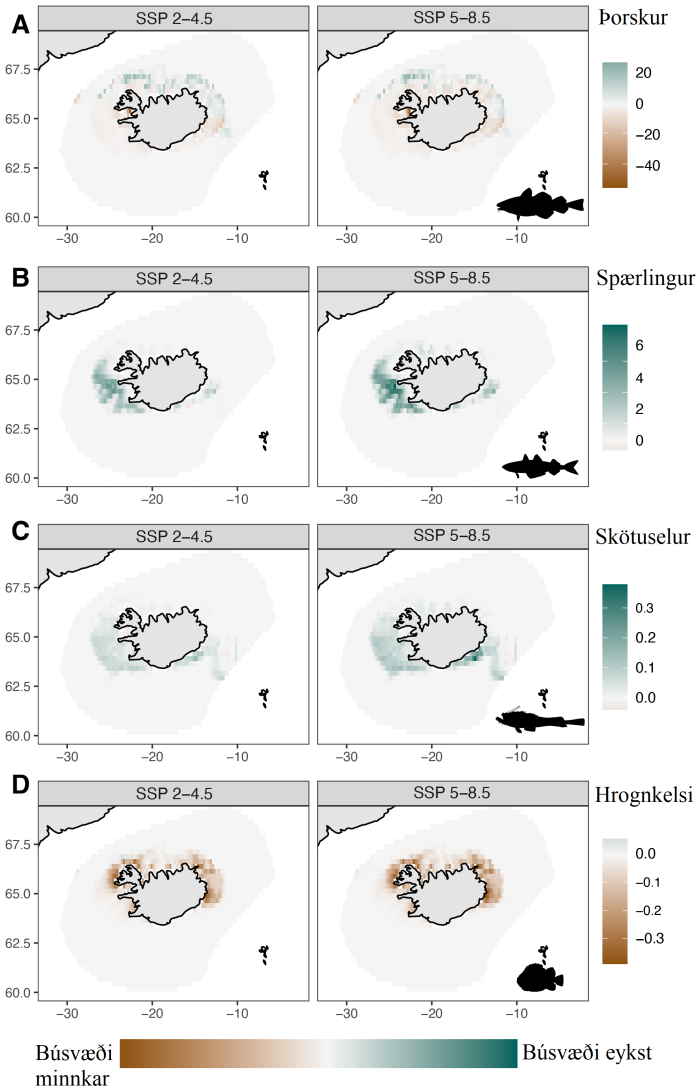


Mynd 5.9: Skífurit sem sýnir tilfærslu 59 tegunda í haustralli Hafrannsóknastofnunar yfir 22 ára tímabil. Hringirnir sýna tilfærslu tegunda frá hverjum landshluta (SV, NV, NA, SA) eftir hitaþoli (rautt, grænt, eða blátt). Rauðar tegundir eru svokallaðar hlýsjávartegundir sem þýðir að þær kjósa búsvæði þar sem hitastig er hærra en meðalhiti á rannsóknasvæðinu, grænar tegundir kjósa búsvæði þar sem hitastig er í kringum meðaltalið og bláar kjósa kaldari búsvæði en meðaltalið. Myndin er byggð á Campana o.fl. (2020)

.

5.3.3 Einstaka tegundir

Umfjöllunin um einstaka tegundir hér að neðan er að miklu leyti byggð á skýrslu Hafrannsóknastofnunar *Staða umhverfis og vistkerfa í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga* (Guðmundur J. Óskarsson o.fl., 2021), en viðbótarupplýsingum hefur þó verið bætt við þar sem nýjar rannsóknir hafa komið fram. Í þeirri skýrslu var gerð grein fyrir breytingum á meðal annars útbreiðslu, lífmassa, framleiðni og líffræði sjávarlífvera við Ísland sem tengja má við umhverfisbreytingar undanfarinna áratuga sem eru raktar til náttúrulegra sveiflna frekar en loftslagsbreytinga (Steingrímur Jónsson og Sólveig Ólafsdóttir, 2021).



Mynd 5.10: Breytingar á útbreiðslu þorsks, spærlings, skötusels og hrognkelsis við landið 2060-2081 samkvæmt tveimur sviðsmyndum (SSP2-4.5 og SSP5-8.5) í samanburði við árin 2000-2018. Grænn litur merkir aukningu meðan brúnn merkir minnkun á kjörbúsvæði. (Byggt á Mason o.fl., 2021).

5.3.4 Botnfiskar

5.3.4.1 Þorskur

Þorsk þarf vart að kynna, en hann er algengur víða í Norður-Atlantshafi, frá Bretlandseyjum í suðri allt norður í Barentshaf. Tegundin finnst á nokkuð víðu hitabili, eða frá -1,5 °C til 20 °C,

en kýs svæði þar sem meðalárshiti er 0-12 °C (I. Jón Sólmundsson E., 2021). Ef litið er langt aftur (áratugir eða aldir jafnvel) má segja að tímabil hlýinda hafi haft jákvæð áhrif á stærð og framleiðni þorskstofnisins við Ísland. Að einhverju leyti hafa áhrif komið fram við þær hlýju aðstæður sem nú ríkja, þar sem lífmassi og langlífi einstaklinga hefur aukist, þó að það tengist einnig litlu veiðiálagi.

Stærri hrygningarstofn og víðari aldursdreifing en áður olli aukinni þorskgengd á helstu hrygningarsvæðum við landið og aukningu í fjölda 1 árs þorsks í stofnmælingum undanfarin 15 ár. Þessi aukning hefur þó ekki skilað sér í stórum árgöngum í veiðistofni. Hækkandi sjávarhiti á Íslandsmiðum getur haft jákvæð áhrif á vaxtarhraða og nýliðun, en neikvæð áhrif geta einnig komið fram ef magn helstu fæðu þorsks, þ.e. kaldsjávartegundanna loðnu og rækju, minnkar í kjölfar hlýnunar. Undanfarin 15 ár hafa aðstæður á Íslandsmiðum verið þannig að hlutfallslega mikil náttúruleg afföll hafa verið á ungþorski. Þar skiptir máli stærð seiða, sem hafa verið smá á þessum tíma, aukin orkuþörf helsta afræningjans (stærri þorskar) og stór þorskstofn. Aukið sjálfsrán stærri þorska getur því takmarkað nýliðun á stofninum. Þrátt fyrir góð skilyrði í hafinu, vaxandi stofnstærð og breiðari aldurssamsetningu hrygningarstofnsins við Ísland hafa ekki komið fram vísbendingar um aukna þorksgengd við vesturströnd Grænlands, en mjög stórir árgangar, sem ólust að hluta til upp við strendur Grænlands, voru undirstaða góðrar þorskveiði við Ísland og Grænland fyrir miðbik síðustu aldar.



Mynd 5.11: Þorskur merktur. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

5.3.4.2 Ýsa

Ýsa er talin vera á norðurmörkum útbreiðslu sinnar við Ísland, en kjörhitastig hennar hefur verið metið milli 4-8 °C á nærliggjandi hafsvæðum, þó svo að hér við land hafi ýsu verið að finna við hitastig um eða undir þessum mörkum (Ingibjörg G. Jónsdóttir og Jón Sólmundsson, 2021). Meginhluti lífmassa hennar hefur yfirleitt verið í hlýsjó fyrir sunnan land. Um síðustu aldamót jókst stærð ýsustofnsins á sama tíma og sjávarhiti hækkaði, en við það jókst magn ýsu fyrir norðan land. Á árunum 2009-2017 var lífmassi hennar orðinn meiri fyrir norðan en sunnan landið. Hlýnun hefur einnig áhrif á vöxt og kynþroska við landið, en ýsa vex hraðar og verður kynþroska fyrr í hlýrri sjó. Stofnstærðir og útbreiðsla mikilvægara fæðutegunda ýsu, eins og loðnu og sandsílis, getur haft óbein áhrif á bæði lífmassa og útbreiðslu ýsu við landið.

5.3.4.3 Aðrir botnfiskar



Mynd 5.12: Ýsa. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi)

.

Tegundir af suðrænum uppruna, eins og geirnyt, svartgóma, urrari, litla brosma og loðháfur, hafa aukið útbreiðslu sína og finnast nú í töluverðu magni við sunnanvert landið. Í kjölfar hlýnunar sem hófst fyrir aldamót hafa stofnvísitölur margra kaldsjávartegunda í farið lækkandi í árlegum mælingum. Þessar tegundir, sem eru t.d. krækill, áttstrendingur og ýmsar mjórategundir, finnast helst fyrir norðan og austan land á landgrunninu og með landgrunnsbrúninni. Samhliða þessari fækkun hefur útbreiðsla sumra þeirra færst norðar í kaldari sjó (Mason o.fl., 2021). Nýliðun ýmissa hlýsjávartegunda, sem eru með aðalútbreiðslu sína við suður- og suðvesturland, hefur verið lítil á undanförnum árum. Þar á

meðal eru tegundir eins og langa, blálanga, gullkarfi, djúpkarfi, skötuselur, langlúra, stórkjafta og humar. Ástæður þessarar neikvæðu þróunar eru enn óþekktar en nærtækast er að horfa á breytingar sem orðið hafa á umhverfisskilyrðum í hafinu við landið síðastliðin 10-20 ár (Klara Jakobsdóttir o.fl., 2021).

Stofnstærð og útbreiðsla hlýsjávartegundarinnar skötusels jókst mikið í kjölfar hlýnunar á tíunda áratugnum. Í kjölfarið jókst bæði afli og nýliðun tegundarinnar við landið, sem hafði áður verið tiltölulega sjaldgæf tegund (Jón Sólmundsson o.fl., 2010). Eftir góða nýliðun á árunum 2005-2008 minnkaði stofnstærðin hratt og hefur verið lítil sem engin undanfarinn áratug. Ef hitastig hækkar má búast við aukinni nýliðun skötusels við landið eins og gerðist á tíunda áratugnum. Kaldsjávartegundin hlýri (sjá mynd 5.13) á undir högg að sækja og hefur nýliðun verið með allra minnsta móti. Talið er að hrygning og klak sé háð þröngu hitabili og því er nýliðun hlýra viðkvæm fyrir hækkandi hitastigi sjávar (A. Gunnarsson o.fl., 2006).



Mynd 5.13: Hlýri. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

5.3.5 Uppsjávarfiskar

5.3.5.1 Loðna

Loðna (sjá mynd 5.14) er smávaxinn og skammlífur uppsjávarfiskur sem finnst víða í köldum sjó á norðurhveli jarðar. Kjörhitastig loðnu á fæðuslóð er 1-3 °C, þó að hún leiti í hlýrri sjó til hrygningar (Carscadden o.fl., 2013). Loðna er mikilvægur nytjastofn auk þess sem hún er lykiltegund í vistkerfinu við landið. Loðna tók að breyta útbreiðslu sinni umtalsvert í kringum síðustu aldamót.



Mynd 5.14: Loðna, hængur (efri) og hrygna (neðri). (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi.)

Uppeldisstöðvar ungloðnu hafa þannig færst vestar og finnast nú aðallega á grænlenska landgrunninu á meðan fæðuslóð fullorðinnar loðnu hefur færst bæði vestar og norðar meðfram strönd Grænlands. Auk þess hefur loðan skilað sér seinna að landgrunninu í hrygningargöngu, nýliðun oft verið léleg og þar af leiðandi hefur hrygningarstofninn minnkað frá því sem hann var fyrir aldamót. Þessar breytingar má líklega rekja til breytinga á ástandi sjávar, útbreiðslu hafíss og fæðuframboði. Þó varð viðsnúningur árin 2021-2022 þegar mikið mældist af bæði ungloðnu og kynþroska loðnu, og útgefið aflamark var hærra en síðustu 15 ár (Birkir Bárðarson o.fl., 2021).

5.3.5.2 Makríll

Makríll er hlýsjávartegund, með víða útbreiðslu beggja vegna Norður-Atlantshafsins. Í Norðaustur-Atlantshafi finnst hann frá Spáni í suðri til Svalbarða í norðri og allt frá ströndum Eystrasalts í austri til austurstrandar Grænlands í vestri (Trenkel o.fl., 2014).



Mynd 5.15: Makríll. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

Á síðustu öld var makríll frekar sjaldséður í íslenskri landhelgi, en það breyttist um síðustu aldamót þegar hann fór að sjást bæði suðaustan og austan við land. Eins fór svo að bera á honum í vaxandi mæli í afla uppsjávarskipa á sumarveiðum á norsk-íslenskri síld milli 2000 og 2006 (Anna Heiða Ólafsdóttir og Sigurður Þór Jónsson, 2021). Eiginlegar makrílveiðar hófust síðan í íslenskri landhelgi sumarið 2007. Hrygningarsvæði makríls stækkaði mikið frá landgrunni vestan við Írland til suðurhluta Noregshafs í norður og síðan inn í Íslandsdjúp í norðvestur. Breytingar á sumarútbreiðslu urðu enn meiri, þar sem hluti stofnins hóf að ganga í vesturátt inn á Íslandsmið og allt að strönd Grænlands á árunum eftir aldamótin, og náðu þessar göngur hámarki árin 2014-2017. Þessar göngur hafa minnkað mikið síðan þá, og aðeins náð að suðausturströnd Íslands undanfarin ár. Sögulega hefur magn og útbreiðsla makríls við landið tengst hlýindum (Olafur S. Astthorsson o.fl., 2012), en þó virðist hitastig eitt og sér ekki vera nægilegt til að útskýra þessar vesturgöngur. Líklega er um marga samverkandi þætti að ræða eins og stofnstærð, nýliðun, fæðuframboð, þekkingu á gönguleiðum og umhverfisaðstæður.

5.3.5.3 Síld

Síld er mikilvæg nytjategund, sem finnst beggja vegna Atlantshafsins. Þrír síldarstofnar finnast við Ísland, en stofnar eru skilgreindir út frá hrygningarsvæðum og tímabilum. Hlýrri sjór norðan við landið, auk stórs hrygningarstofns, hefur haft í för með sér aukningu á nýliðun hjá sumargotssíld. Á móti kemur að skæður *Ichthyophonus* sýkingarfaraldur hefur haft neikvæð áhrif á þróun stofnstærðar. Samfara hlýnun síðustu áratuga stækkaði norsk-íslenski síldarstofninn og jókst sumarútbreiðsla hans á íslensku hafsvæði. Betri nýliðun í stofninum hefur einnig verið rakin til hlýnunar en þó á óbeinni hátt þar sem útbreiðsla yngri síldar í Barentshafi skarast síður við afræningja í hlýrri árum (Lísa Libungan, 2021).



Mynd 5.16: Síld. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

5.3.5.4 Aðrir uppsjávarfiskar

Kolmunni er efnahagslega mikilvæg tegund og ein þeirra sem mest er veidd í heiminum. Kolmunni er hlýsjávartegund sem kýs ekki sjó kaldari en 3 °C. Því er ljóst að hentugt búsvæði hans við Ísland mun stækka við hækkun hitastigs sjávar, þó svo að nýliðun og stofnstærð virðist hafa meiri áhrif á magn kolmunna við landið en bein umhverfisáhrif (Sigurvin Bjarnason o.fl., 2021).

Sandsíli er ein af undirstöðutegundum vistkerfisins fyrir sunnan land og mikilvæg fæðutegund ýmissa nytjastofna, sjávarspendýra og sjófugla. Magn sílis sunnan- og vestanlands, bæði í mögum botnfiska í stofnmælingaleiðöngrum sem og í sérstakri könnun með sandsílaplógi, minnkaði hratt

frá síðustu aldamótum og var nálægt lágmarki allt til ársins 2019 þegar sambærilegt magn við fyrri ár fór að sjást aftur.



Mynd 5.17: Brislingur, nýlegur landnemi við Íslandsstrendur. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

Þessa miklu lægð, sem hafði mikil áhrif á vistkerfið, má að öllum líkindum rekja til umhverfisbreytinga í hafinu þó að ekki hafi enn tekist að tengja eina ákveðna breytu við þetta ástand. Hugsanlegt er að hækkun hitastigs hafi flýtt fyrir vorblóma í hafinu og framleiðslutopp þess að vori og hrygning og klak sandsílis hafi ekki fylgt því eftir með þeim afleiðingum að fæðuframboð sandsílaseiða hafi verið verulega skert. Auk þess gæti hærra hitastig að vetrarlagi einnig minnkað lífslíkur síla yfir veturinn þegar það nærist lítið (Sigurvin Bjarnason o.fl., 2021).

Spærlingur er mikilvægur liður í vistkerfinu við Ísland og mikilvæg fæða fyrir stærri fisktegundir og sjávarspendýr. Með breytingum í hafinu kringum Ísland síðustu ár hefur útbreiðslusvæði hans stækkað og má gera ráð fyrir frekari aukningu í útbreiðslu hans ef sviðsmyndir ganga eftir (mynd 5.10) (Mason o.fl., 2021). Árið 2017 veiddist uppsjávartegundin brislingur í fyrsta skipti við landið og hefur síðan fundist á ýmsum stöðum við sunnan- og vestanvert landið í auknu magni. Má því telja að útbreiðsla og magn þessarar tegundar, sem hingað til hefur haft meginútbreiðslu í Eystrasalti og Norðursjó, muni aukast á næstu árum (Jónbjörn Pálsson o.fl., 2021).

5.3.6 Sjávarhryggleysingjar

5.3.6.1 Rækja

Rækja er kaldsjávartegund, algengust í köldum sjó fyrir vestan og norðan land. Stofnstærð rækju minnkaði töluvert um síðustu aldamót sökum afráns frá stækkandi stofnum þorskfiska, eins og þorsks og ýsu. Hækkandi hiti sjávar hefur líklega stuðlað að aukum lífmassa þorskfiska á grunnsævi og þannig haft óbein áhrif á stofnstærð, auk þess sem hærri yfirborðshiti hefur neikvæð áhrif á nýliðun rækju, þar sem lirfustigið er viðkvæmt fyrir hita (Ingibjörg G. Jónsdóttir og Jónas P. Jónasson, 2021).



Mynd 5.18: Rannsóknir á rækju. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

5.3.6.2 Humar



Mynd 5.19: Humar. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

Humar er hlýsjávartegund og eru norðurmörk útbreiðslu hans við strendur Íslands. Stofnstærð hans stækkaði upp úr síðustu aldamótum, þegar bæði nýliðun og og útbreiðsla jókst. Nýliðun hrundi í kringum árið 2005 og hefur þessi nýliðunarbrestur verið viðvarandi síðan, sem hefur leitt til hruns í stofnstærð (Ingibjörg G. Jónsdóttir og Jónas P. Jónasson, 2021). Veiðibanni á humri var því komið á árið 2022. Líklega má rekja nýliðunarbrestinn til umhverfisbreytinga að einhverju leyti, þar sem álíka nýliðunarbrestur hefur sést hjá fisktegundum og fuglum á sama svæði. Auk þess hefur verið sýnt fram á að framleiðni humars hér við land er minni en á hafsvæðum sunnar í álfunni.

5.3.7 Sjávarspendýr

Sjávarspendýr eru almennt talin vera góðir vísar um breytingar í vistkerfum heimshafanna. Ættu sjávarspendýr hér við land ekki að vera undantekning þar á (Moore og E, 2008). Áhrifin eru líklega misjöfn eftir tegundum og því er umfjölluninni hér að neðan skipt upp að mestu leyti eftir tegundum. Við Ísland finnast 24 tegundir hvala, en af þeim eru 15 algengir. Einnig eru tvær selategundir algengar, auk fjögurra flækinga. Helstu gögn sem þessi umfjöllun byggist á eru reglulegar, fjölþjóðlegar hvalatalningar sem farið hafa fram á 6-8 ára fresti frá 1987 (Pike o.fl., 2019) auk reglulegra talninga á land- og útsel, sem hófust 1980 og 1982. Mikilvægt er að hafa veiðisöguna í huga þegar breytingar á útbreiðslu og fjölda eru skoðaðar, en bæði hval- og selategundir við landið voru mikið veiddar fyrr á árum. Á árunum 1883-1915 var t.d. stunduð ofveiði á steypireyði og langreyði og á áttunda áratug síðustu aldar stóð Hringormanefnd fyrir stórfelldu drápi á sel við landið.

5.3.7.1 Hvalir



Mynd 5.20: Sporðblaðka hnúfubaks. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

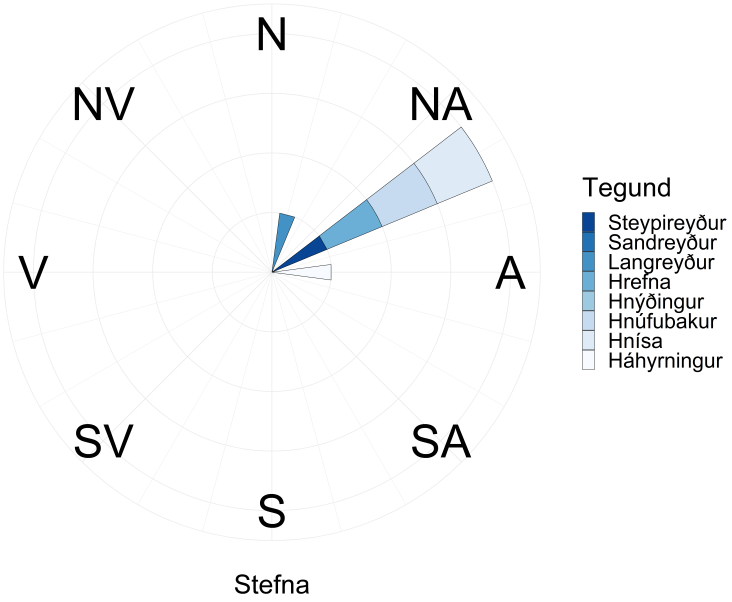
Nokkrar breytingar hafa orðið á bæði magni og útbreiðslu skíðishvala við landið. Hrefnan, sem lengst af var talin algengasti skíðishvalurinn á grunnsvæði við Ísland, náði hámarki á landgrunninu í talningu sumarið 2001. Þá var stofninn metinn um 44 þúsund dýr, en hefur síðan farið minnkandi á landgrunninu. Útbreiðsla hrefnu hefur á sama tíma færst í norður og vestur frá Faxaflóa og Suðausturlandi í kaldari sjó fyrir norðan land, en hrefnum hefur fjölgað við Austur-Grænland og Jan Mayen. Á sama tíma hefur fjöldi hnúfubaka við landið aukist mikið. Hefur hnúfubakur því velt hrefnu úr sessi sem ráðandi tegund skíðishvala á landgrunni Íslands. Tafla 5.1 sýnir að svipaða hliðrun og hjá hrefnunni má sjá í útbreiðslu steypireyðar við landið (Pike o.fl., 2019), en tegundin var algengust sunnan og vestan

við landið, c.a. frá Vestmannaeyjum til Breiðafjarðar, en finnast nú í meira mæli fyrir norðaustan land, allt norður til Jan Mayen. Langreyðum hefur fjölgað mikið síðan talningar hófust árið 1987, líklega vegna bæði breytinga á útbreiðslu og líffræðilegs vaxtar í stofninum. Erfitt er að tengja þessar breytingar við umhverfisþætti, en þó er hægt að tengja töluverða hlýnun sjávar milli 1994 og 2003 við aukningu í stofninum á því svæði sem mest aukning í þéttleika hefur orðið. Erfitt er að sjá breytingar á útbreiðslu annara tegunda skíðishvala við landið, í flestum tilfellum vegna skorts á gögnum (Gísli Víkingsson, 2021). Á hafsvæðinu við suðaustur Grænland, sem er að mörgu leyti sama hafsvæði og liggur norðvestur af Íslandi, er talað um að ástandsbreyting (*e. regime shift*) hafi átt sér stað á síðustu 20 árum vegna hækkandi hitastigs sjávar og minnkandi hafíss á svæðinu. Á sama tíma hefur orðið mikil aukning í fjölda langreyða, hnúfubaka, grindhvala, háhyrninga og höfrunga. Tegunda sem margar hverjar voru sjaldséðar á þessum slóðum. Á sama tíma hefur norðlægum tegundum, eins og náhval og rostungi, fækkað á sama svæði (Heide-Jørgensen o.fl., 2022).

Tafla 5.1: Breytingar á fjölda helstu tegunda hvala við Ísland á tímabilinu 1987-2015. Fjöldi tákna (+/-) gefur til kynna umfang breytinga, () í kringum tákn merkir veikari vísbendingar og 0 að gögn bendi ekki til breytinga. Byggt á samantekt úr grein Gísla Víkingssonar (2021).

Tegund	**Stofnstærð (fjöldi)**	**Breytingar á fjölda**
Steypireyður	3 000	(++)
Langreyður	36 773	++
Sandreyður	10 300	0
Hrefna	42 515	-
Hnúfubakur	9 867	++
Grindhvalur	344 148	0
Hnísa	43 179	(+)
Hnýðingur	159 000	++
Leiftur	131 022	0
Búrhvalur	23 166	0
Andarnefja	19 974	0
Háhyrningur	14 611	0

Almennt er minna vitað um breytingar á fjölda og útbreiðslu tannhvala og tengsl við umhverfisbreytingar heldur en hjá skíðishvölum hér við land. Hér því aðeins fjallað stuttlega um þrjár tegundir; háhyrning, hnýðing og hnísu. Háhyrningur er stærsta tegund höfrungaættar og er algeng við strendur Íslands. Útbreiðsla háhyrninga við landið hefur færst frá Austurlandi til Vesturlands, en líklega vegna breytinga á útbreiðslu síldar við landið frekar en vegna umhverfisbreytinga. Ekki er hægt að segja hvort stofninn hafi stækkað frá því talningar hófust þar sem mikill óvissa er í stofnstærðarmati. Hnýðingur er algengasta höfrungategundin við Ísland og finnst í mestum þéttleika á landgrunninu, þó að hann finnist einnig í úthafinu. Fjöldi hnýðinga hefur aukist töluvert við landið síðan talningar hófust 1987, og þá sérstaklega fyrir norðan land.



Mynd 5.21: Breytingar á útbreiðslu helstu tegunda hvala við Ísland á tímabilinu 1987-2015. Á myndinni sést átt breytingar á útbreiðslu helstu hvala. Byggt á grein Gísla Víkingssonar (2021).

Hnísa er langminnsta hvalategundin við landið og er erfitt að meta stofnstærð hennar með hefðbundnum mælingum og óvissa því mikil í stofnstærðarmati. Ekki hafa orðið marktækar breytingar á fjölda hnísa við landið á tímabilinu 1986-2016. Þó benda stöðluð gögn um tíðni hnísu sem meðafla, í stofnmælingu Hafrannsóknastofnunar með netum, til hliðrunar í útbreiðslu tegundarinnar við landið, frá hlýsjónum sunnan- og vestanlands í kaldari sjó fyrir norðaustan land. Auk hefðbundinna hvalatalninga gefa hvalrekar við landið upplýsingar um útbreiðslu tegunda hvala við landið. Aukinnar komu suðrænna flækinga hefur orðið vart síðustu 30 ár eða svo. Má þar helst nefna rákahöfrung (*Stenella coeruleoalba*), nokkrar tegundir svínhvala (*Ziphiidae*), auk rispuhöfrungs (*Grampus griseus*), sem fannst í fyrsta sinn við landið sumarið 2022. Í heildina litið hefur fjöldi hvala á Íslandsmiðum aukist í flestum tilfellum (sjá töflu 5.1), auk þess sem segja má að tilfærsla meginútbreiðslu í norðaustur hafi orðið hjá flestum tegundum (sjá mynd 5.21).

5.3.7.2 Selir



Mynd 5.22: Landselur. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun, birt með leyfi).

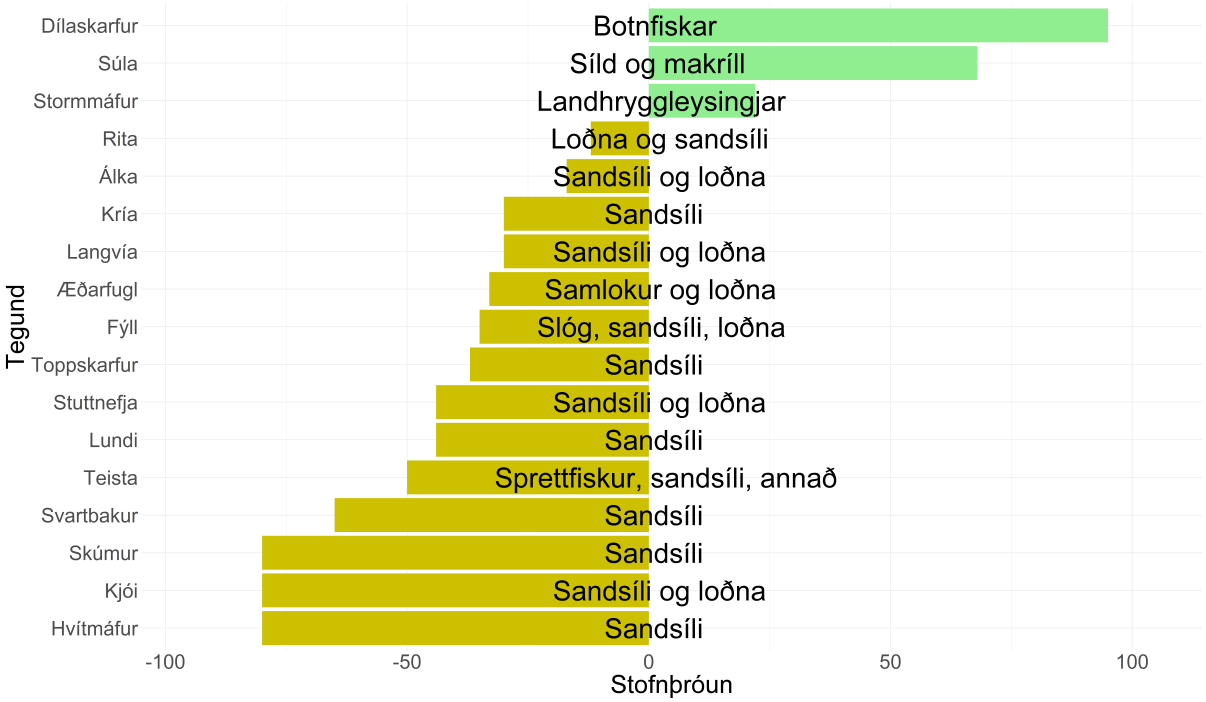
Útbreiðsla landsels og útsels hefur lítið breyst, en stofnstærðir þessara tegunda hafa rýrnað töluvert frá fyrstu talningum kringum 1980. Þó að ekki sé hægt að útiloka að umhverfisbreytingar hafi haft áhrif á rýrnun þessara stofna eru engar rannsóknir sem sýna að slíkt hafi átt sér stað. Þar sem þessar tegundir eru tækifærissinnar í fæðuvali er líklegra að kerfisbundin veiði á vegum Hringormanefndar hafi þar verið aðalástæðan, ásamt meðafla í fiskveiðum, frekar en breytingar á umhverfinu (Sandra Granquist, 2021). Aðrar tegundir sela, sem finnast hér við land; vöðuselur, kampselur, hringanóri, og blöðruselur, eru norðlægir flækingar, með kæpingu á hafís. Því er líklegt að stofnstærðir þeirra og komum til landsins muni fækka.

5.3.8 Sjófuglar

Stofnar helstu sjófugla við landið hafa farið minnkandi á síðustu árum og má í sumum tilfellum rekja það með með óbeinum hætti til umhverfisbreytinga í hafinu við landið. Þannig hafa breytingar í stofnum fæðutegunda, eins og sandsílis og loðnu, leitt til lélegrar afkomu sjófugla (mynd 5.24). Á meðan þessir fæðustofnar eru í lægð má búast við áframhaldandi lélegri afkomu sem einkennist af varpbresti og þar með minnkun stofnstærða (Freydís Vigfúsdóttir, 2021).



Mynd 5.23: Lundi með síli í goggi. (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Hafrannsóknastofnun).



Mynd 5.24: Tengsl stofnþróunar og meginætis tegunda sjófugla við Ísland með jákvæða stofnþróun (grænt) og neikvæða stofnþróun (gult). Byggt á grein Freydísar Vigfúsdóttur (2021).

Heimildir

A. Gunnarsson, E. Hjörleifsson, K. Thórarinsson og G. Marteinsdóttir (2006). „Growth, maturity and fecundity of wolffish Anarhichas lupus L. in Icelandic waters“. Í: *Journal of fish biology* 68.4, bls. 1158–1176.

Andersson, Andreas J, Fred T Mackenzie og Nicholas R Bates (2008). „Life on the margin: implications of ocean acidification on Mg-calcite, high latitude and cold-water marine calcifiers“. Í: *Marine Ecology Progress Series* 373, bls. 265–273.

Anna Heiða Ólafsdóttir og Sigurður Þór Jónsson (2021). „Makríll“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Astthorsson, Olafur S og Astthor Gislason (1995). „Long-term changes in zooplankton biomass in Icelandic waters in spring“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 52.3-4, bls. 657–668.

Astthorsson, Olafur S, Astthor Gislason og Steingrimur Jonsson (2007). „Climate variability and the Icelandic marine ecosystem“. Í: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 54.23-26, bls. 2456–2477.

Astthorsson, Olafur S., Héðinn Valdimarsson, Ásta Gudmundsdóttir og Guðmundur J. Óskarsson (jún. 2012). „Climate-related variations in the occurrence and distribution of mackerel (Scomber scombrus) in Icelandic waters“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 69.7, bls. 1289–1297. DOI: 10.1093/icesjms/fss084.

Beaugrand, Gregory, Philip C Reid, Frédéric Ibanez, J Alistair Lindley og Martin Edwards (2002). „Reorganization of North Atlantic marine copepod biodiversity and climate“. Í: *Science* 296.5573, bls. 1692–1694.

Beaugrand, Grégory (2005). „Monitoring pelagic ecosystems using plankton indicators“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 62.3, bls. 333–338.

— (2009). „Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas“. Í: *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56.8-10, bls. 656–673.

Birkir Bárðarson, Kristinn Gudnason, Singh Warsha, Hildur Petursdóttir og Sigurdur Þór Jónsson (2021). „Loðna“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Campana, Steven E, Ragnhildur B Stefánsdóttir, Klara Jakobsdóttir og Jón Sólmundsson (2020). „Shifting fish distributions in warming sub-Arctic oceans“. Í: *Scientific Reports* 10.1, bls. 1–14.

Carscadden, James E., Harald Gjøsæter og Hjálmar Vilhjálmsson (2013). „A comparison of recent changes in distribution of capelin (Mallotus villosus) in the Barents Sea, around Iceland and in the Northwest Atlantic“. Í: *Progress in Oceanography* 114. Norway-Canada Comparison of Marine Ecosystems (NORCAN), bls. 64–83. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pocean.2013.05.005.

Espinasse, Marina, Claudia Halsband, Øystein Varpe, Astthor Gislason, Kristinn Gudmundsson, Stig Falk-Petersen og Ketil Eiane (2017). „The role of local and regional environmental factors for Calanus finmarchicus and C. hyperboreus abundances in the Nordic Seas“. Í: *Polar Biology* 40.12, bls. 2363–2380.

Fransner, Filippa, Friederike Fröb, Jerry Tjiputra, Nadine Goris, Siv K Lauvset, Ingunn Skjelvan, Emil Jeansson, Abdirahman Omar, Melissa Chierici, Elizabeth Jones o.fl. (2022). „Acidification of the Nordic Seas“. Í: *Biogeosciences* 19.3, bls. 979–1012.

Freydís Vigfúsdóttir (2021). „Sjófuglar“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Fromentin, Jean-Marc og Benjamin Planque (1996). „Calanus and environment in the eastern North Atlantic. II. Influence of the North Atlantic Oscillation on C. finmarchicus and C. helgolandicus“. Í: *Marine Ecology Progress Series* 134, bls. 111–118.

Gattuso, Jean-Pierre og Lina Hansson (2011). *Ocean acidification*. Oxford University Press, USA.

Gislason, Astthor, Kristinn Gudmundsson, Solveig R Olafsdottir og Hildur Petursdottir (2021). „Inter-annual and decadal variability of Calanus finmarchicus and C. hyperboreus in Subarctic waters north of Iceland 1990–2020“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 78.10, bls. 3735–3747.

Gislason, Astthor, Hildur Petursdottir og Kristinn Gudmundsson (2014). „Long-term changes in abundance of Calanus finmarchicus south and north of Iceland in relation to environmental conditions and regional diversity in spring 1990–2013“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 71.9, bls. 2539–2549.

Gíslason, Astthor, Hildur Petursdottir, Olafur S Astthorsson, Kristinn Gudmundsson og Hedinn Valdimarsson (2009). „Inter-annual variability in abundance and community structure of zooplankton south and north of Iceland in relation to environmental conditions in spring 1990–2007“. Í: *Journal of Plankton Research* 31.5, bls. 541–551.

Gísli Víkingsson (2021). „Hvalir“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Gudmundsson, Kristinn (1998). „Long-term variation in phytoplankton productivity during spring in Icelandic waters“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 55.4, bls. 635–643.

Guðmundur J. Óskarsson, Guðmundur Þórðarsson, Guðni Guðbergsson, Ingibjörg G. Jónsdóttir, Sigurður Guðjónsson og Sólveig R. Ólafsdóttir (2021). *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafnarfjörður: Hafrannsóknastofnun. URL: `https://www.hafogvatn.is/is/midlun/utgafa/haf-og-vatnarannsoknir/stada-umhverfis-og-vistkerfa-i-hafinu-vid-island-og-horfur-naestu-aratuga-hv-2021-14`.

Guðni Guðbergsson, Hlynur Bárðarson, Ingi Rúnar Jónsson, Sigurður Már Einarsson og Magnús Jóhannson (2021). „Göngufiskar“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Hátún, Hjálmar, Anne Britt Sandø, Helge Drange, Bogi Hansen og Heðinn Valdimarsson (2005). „Influence of the Atlantic subpolar gyre on the thermohaline circulation“. Í: *Science* 309.5742, bls. 1841–1844.

Heide-Jørgensen, Mads Peter, Philippine Chambault, Teunis Jansen, Caroline VB Gjelstrup, Aqqalu Rosing-Asvid, Andreas Macrander, Gı´sli Vı´kingsson, Xiangdong Zhang, Camilla S Andresen og Brian R MacKenzie (2023). „A regime shift in the Southeast Greenland marine ecosystem“. Í: *Global Change Biology* 29.3, bls. 668–685.

Hildur Pétursdóttir, Kristinn Guðmundsson og Ástþór Gíslason (2021). „Plöntu- og dýrasvif“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Holliday, N Penny, Manfred Bersch, Barbara Berx, Léon Chafik, Stuart Cunningham, Cristian Florindo-López, Hjálmar Hátún, William Johns, Simon A Josey, Karin Margretha H Larsen o.fl. (2020). „Ocean circulation causes the largest freshening event for 120 years in eastern subpolar North Atlantic“. Í: *Nature communications* 11.1, bls. 585.

Hrönn Egilsdóttir (2021). „Líffræðilegar afleiðingar súrnunar sjávar“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Ingibjörg G. Jónsdóttir og Jón Sólmundsson (2021). „Ýsa“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Ingibjörg G. Jónsdóttir og Jónas P. Jónasson (2021). „Sjávarhryggleysingjar“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Jón Sólmundsson, Einar Jónsson og Höskuldur Björnsson (2010). „Phase transition in recruitment and distribution of monkfish (Lophius piscatorius) in Icelandic waters“. Í: *Marine biology* 157, bls. 295–305.

Jón Sólmundsson Einar Hjörleifsson, Ingibjörg G. Jónsdóttir (2021). „Þorskur“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Jónbjörn Pálsson, Guðjón Már Sigurðsson, Ingibjörg G. Jónsdóttir, Klara B. Jakobsdóttir, Nicholas Hoad, Valur Bogason og Jón Sólmundsson (2021). „Brislingur, Sprattus sprattus (Linnaeus, 1758), ný fisktegund við Íslandsstrendur“. Í: *Náttúrufræðingurinn* 91, bls. 122–131.

Klara Jakobsdóttir, Ásgeir Gunnarsson, Guðjón Már Sigurðsson, Kristján Kristinsson og Magnús Thorlacius (2021). „Aðrir botnfiskar“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Lísa Libungan (2021). „Síld“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Mason, Julia G, Pamela J Woods, Magnús Thorlacius, Kristinn Guðnason, Vincent S Saba, Patrick J Sullivan og Kristin M Kleisner (nóv. 2021). „Projecting climate-driven shifts in demersal fish thermal habitat in Iceland's waters“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 78.10, bls. 3793–3804. DOI: 10.1093/icesjms/fsab230.

Moore og Sue E (2008). „Marine mammals as ecosystem sentinels“. Í: *Journal of Mammalogy* 89.3, bls. 534–540.

O'Brien, T. ofl (2023). *ICES Zooplankton Status Report 2023: Upgrade on O'Brien et al. 2013*. Handrit í vinnslu. Uppfærsla á O'Brien, Todd D.; Wiebe, Peter H.; Falkenhaug, Tone (2013). ICES Zooplankton Status Report 2010/2011. ICES Cooperative Research Reports (CRR). Report. https://doi.org/10.17895/ices.pub.5487.

Pike, Daniel G, Thorvaldur Gunnlaugsson, Bjarni Mikkelsen, Sverrir Daniel Halldórsson, Gísli Víkingsson, Mario Acquarone og Genevieve Desportes (2019). „Estimates of the abundance of cetaceans in the Central North Atlantic from the T-NASS Icelandic and Faroese ship surveys conducted in 2007“. Í: *NAMMCO Scientific Publications* 11.

Proshutinsky, A, R Krishfield, JM Toole, M-L Timmermans, W Williams, S Zimmermann, M Yamamoto-Kawai, TWK Armitage, D Dukhovskoy, E Golubeva o.fl. (2019). „Analysis of the Beaufort Gyre freshwater content in 2003–2018“. Í: *Journal of Geophysical Research: Oceans* 124.12, bls. 9658–9689.

Rahmstorf, Stefan og Andrey Ganopolski (1999). „Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model“. Í: *Climatic change* 43.2, bls. 353–367.

Sandra Granquist (2021). „Selir“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Schlunegger, Sarah, Keith B Rodgers, Jorge L Sarmiento, Thomas L Frölicher, John P Dunne, Masao Ishii og Richard Slater (2019). „Emergence of anthropogenic signals in the ocean carbon cycle“. Í: *Nature climate change* 9.9, bls. 719–725.

Sigurvin Bjarnason, James Kennedy og Valur Bogason (2021). „Aðrar uppsjávartegundir“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Silva, Teresa, Astthor Gislason, Priscilla Licandro, Gudrún Marteinsdóttir, Ana Sofia A Ferreira, Kristinn Gudmundsson og Olafur S Astthorsson (2014). „Long-term changes of euphausiids in shelf and oceanic habitats southwest, south and southeast of Iceland“. Í: *Journal of plankton research* 36.5, bls. 1262–1278.

Smedsrud, Lars H, Morven Muilwijk, Ailin Brakstad, Erica Madonna, Siv K Lauvset, Clemens Spensberger, Andreas Born, Tor Eldevik, Helge Drange, Emil Jeansson o.fl. (2022). „Nordic

Seas heat loss, Atlantic inflow, and Arctic sea ice cover over the last century“. Í: *Reviews of Geophysics* 60.1, e2020RG000725.

Sólveig Ólafsdóttir (2021). „Breytingar á styrk næringarefna og sýrustigi undanfarin ár“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Steingrímur Jónsson og Sólveig Ólafsdóttir (2021). „Umhverfisbreytingar í hafinu við Ísland“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Steingrímur Jónsson og Sólveig R. Ólafsdóttir (2021). „Möguleg framvinda loftslagsbreytinga og áhrif á hafið við Ísland í náinni framtíð“. Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Trenkel, V.M., G. Huse, B.R. MacKenzie, P. Alvarez, H. Arrizabalaga, M. Castonguay, N. Goñi, F. Grégoire, H. Hátún, T. Jansen, J.A. Jacobsen, P. Lehodey, M. Lutcavage, P. Mariani, G.D. Melvin, J.D. Neilson, L. Nøttestad, G.J. Óskarsson, M.R. Payne, D.E. Richardson, I. Senina og D.C. Speirs (2014). „Comparative ecology of widely distributed pelagic fish species in the North Atlantic: Implications for modelling climate and fisheries impacts“. Í: *Progress in Oceanography* 129. North Atlantic Ecosystems, the role of climate and anthropogenic forcing on their structure and function, bls. 219–243. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pocean.2014.04.030.

Tsubouchi, Takamasa, Kjetil Våge, Bogi Hansen, Karin Margretha H Larsen, Svein Østerhus, Clare Johnson, Steingrímur Jónsson og Héðinn Valdimarsson (2021). „Increased ocean heat transport into the Nordic Seas and Arctic Ocean over the period 1993–2016“. Í: *Nature Climate Change* 11.1, bls. 21–26.

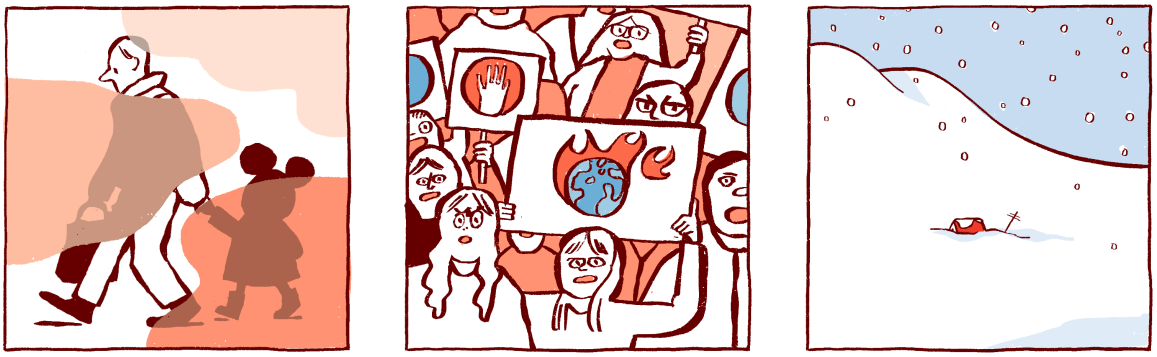
Þorvaldur Thoroddsen (1911). *Lýsing Íslands*. Kaupmannahöfn: Hið Íslenska Bókmenntafélag.

Þórunn Þórðardóttir (1986). *The timing and duration of spring blooming south and southwest of Iceland*. Gefið út af S. Skreslet. 453 pages.

KAFLI

6

SAMFÉLAG, MENNING OG FÉLAGSLEGIR INNVIÐIR



Efnisyfirlit kafla

6.1 Inngangur 192
6.2 Viðhorf Íslendinga 193
6.2.1 Viðhorf Íslendinga til loftslagsbreytinga 193
6.2.2 Viðhorf Íslendinga til aðgerða í loftslagsmálum 194
6.3 Loftslagsbreytingar: upplýsingaóreiða, samsæriskenningar og falsfréttir 195
6.4 Loftslagsbreytingar og siðfræði 197
6.4.1 Losun bitnar á þeim sem lítið losa 197
6.4.2 Losun í nútíma og dauðsföll í framtíðinni 198
6.4.3 Loftslagsbreytingar og umhverfissiðfræði 199
Sérgrein 6A: Umhverfisviðhorf og siðfræði 200
6.4.4 Siðfræðileg álitamál og umskipti 201
6.5 Réttlát umskipti og aðlögun 201
6.5.1 Birtingarmyndir réttlátra umskipta og aðlögunar á Íslandi 202
6.5.2 Áhrif loftslagsbreytinga á konur og aðstæður þeirra 203
6.6 Samfélagslegir innviðir 204
6.6.1 Menntun og menntastofnanir 204
6.6.2 Trúarbrögð og guðfræði 205
6.6.3 Listir, menning og ímynd þjóðar 208
6.6.4 Lagalegar hliðar loftslagsvandans 209

Samantekt

1. Viðhorf Íslendinga til loftslagsbreytinga hefur tekið miklum breytingum á síðustu árum. Mikill meirihluti landsmanna (86%) telur að loftslagsbreytingar eigi sér stað og að þær séu vandamál.

2. Meirihluti landsmanna (60%) telur að þeir beri ábyrgð á að draga úr loftslagsbreytingum og að aðgerðir muni skapa komandi kynslóðum betra líf (81%). Færri telja að framfærslukostnaður muni aukast (28%) og að orkuverð muni hækka (35%). Munur er á svörum eftir aldri, kyni og menntun. Loftslagsmálin eru því ofarlega í hugum fólks sem umhverfisvandamál sem þarf að takast á við.

3. Almenningur er hlynntari notkun ívilnana (69%) en hækkun skatta á jarðefnaeldsneyti (43%) sem loftslagsaðgerð. Um 70% vilja tryggja réttlát umskipti. Stofnanatraust er mikilvægt til að tryggja stuðning almennings við loftslagsaðgerðir. Því er mikilvægt að stofnanastrúktúr og stjórnsýsla loftslagsmála sé vel skipulögð og skilvirk. Þannig er unnt að viðhalda trausti og stuðningi almennings við aðgerðir í loftslagsmálum.

4. Miðlun upplýsinga um loftslagsmál er mikilvæg, en falsfréttir, upplýsingaóreiða og samsæriskenningar geta haft áhrif á viðhorf til vísindalegrar þekkingar og aðgerða í loftslagsmálum. Stjórnvöld þurfa að bregðast við slíku en standa á sama tíma vörð um lýðræðislega umræðu.

5. Siðferðislegar áskoranir í loftslagsmálum eru af ýmsum toga en hverfast meðal annars um réttlæti og óréttlæti. Efnameira fólk, bæði innanlands og á alþjóðavísu, losar meira en þeir sem minna hafa á milli handanna. Afleiðingar loftslagsbreytinga bitna auk þess meira á þeim sem fátækari eru. Félags- og efnahagslegar aðstæður, sem og ójöfnuður, hefur áhrif á aðlögunargetu. Ljóst er að loftslagsbreytingar munu auka áþján og hafa dauðsföll í för með sér. Siðferðisleg ábyrgð þeirra sem mest losa er því veruleg.

6. Losun fyrri og núverandi kynslóða mun bitna á kynslóðum framtíðarinnar. Áhersla á kynslóðatengt réttlæti hefur leitt ungt fólk til þess að stofna samtök sem berjast gegn loftslagsvá. Eru samtökin afar gagnrýnin á hugtakið loftslagsbreytingar og telja það ekki ná að lýsa þeim hörmungum sem ganga yfir heimsbyggðina vegna þeirra. Vilja þau frekar nota hugtakið loftslagshamfarir.

7. Loftslagsbreytingar velta upp spurningum um stöðu mannsins í náttúrunni og þeim djúpu gildismats- og viðhorfsbreytingum sem þurfa að eiga sér stað til að vinna á loftslagsvánni. Ljóst er að gildismat, viðhorf og sambúð fólks við náttúruna þarf að breytast til þess að hægt sé að bregðast við loftslagsvandanum.

8. Samofin menningu tiltekins hóps eða samfélags er kjarni hennar – hin sameiginlega sjálfsmynd. Hún er ávallt í endurskoðun og endursköpun, oft mótsagnakennd og alltaf í samhengi og samspili við aðra þætti, eins og landið sem hópurinn býr í, söguna og umheiminn sem mótuðu hana. Segja má að svo róttækar breytingar, sem loftslagsbreytingar hafa í för með sér, séu og muni verða ákveðin ógn við bæði sjálfsmynd og menningu þjóðarinnar. Til að mæta óljósri framtíð þarf að gera öllum kleift að vera með í endurskoðun og endursköpun sjálfsmyndar, menningar og samfélags á sem réttlátastan hátt.

9. Réttlát umskipti fela í sér að byrðum og ávinningi af viðbrögðum við loftslagsbreytingum sé dreift með sanngjörnum hætti á milli hópa þjóðfélagsins. Þetta felur meðal annars í sér að þeir sem missa atvinnu fái ný tækifæri, að mótun aðgerða sé lýðræðisleg og að þátttaka og réttindi allra hópa samfélagsins séu tryggð. Einnig þarf að tryggja að mótvægisaðgerðir

bitni ekki meira á þeim efnaminni eða minnihlutahópum. Birtingarmyndir óréttlátra umskipta á Íslandi og aðgerðir gegn þeim hafa lítið verið rannsakaðar. Þó má færa rök fyrir því að aðgerðir sem miða að því að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda í samgöngum hafi haft mismunandi áhrif á ólíka þjóðfélagshópa.

10. Samband kyns og loftslagsbreytinga er einnig þáttur sem þarf að skoða vel þegar gripið er til aðgerða gegn loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra. Þannig eru afleiðingar loftslagsbreytinga oft alvarlegri fyrir konur en karla þar sem þær standa oft hallari fæti í samfélaginu; félagslega og efnahagslega.

11. Samfélagslegir innviðir, svo sem mennta-, menningar- og trúarstofnanir, auk heilbrigðisstofnana, skipta miklu máli þegar kemur að áhrifum loftslagsbreytinga og viðbrögðum við þeim.

12. Menntun er ekki síst mikilvæg til að stuðla að breytingum á gildismati og hegðun fólks í átt til sjálfbærari framtíðar. Menntastofnanir gegna mikilvægu hlutverki í viðbrögðum samfélagsins við loftslagsbreytingum í vinnu sinni með nýjum kynslóðum sem þurfa að takast á við og aðlagast breyttum heimi.

13. Trúarbrögð, leiðtogar þeirra og stofnanir, t.d. kirkjan, eru mikilvægt afl í félags- og menningarlífi margra, hérlendis og erlendis. Þau hafa, og munu í auknum mæli, sinna sínu hlutverki við að fá fylgjendur sína til að breyta rétt gagnvart náttúrunni og vekja von hjá almenningi í baráttunni við þá vá sem felst í loftslagsbreytingum. Guðfræðingar víða um heim hafa kallað eftir endurskoðun á kristinni guðfræði í ljósi loftslagsvandans. Trú- og lífsskoðunarfélög hér á landi og erlendis hafa ályktað um loftslagsvána þar sem lögð er áhersla á vitundarvakningu og aðgerðir.

14. Listafólk, hönnuðir og arkitektar sinna rannsóknum á sambandi manneskju og umhverfis. Er framlag þeirra afar mikilvægt til að varpa ljósi á afleiðingar loftslagsbreytinga og aðgerða gegn þeim, enda eru aðferðir þeirra og nálgun á viðfangsefnin skapandi, spennandi og aðgengileg almenningi.

15. Loftslagsbreytingar og viðbrögð við þeim hafa þegar haft umtalsverð áhrif á lög, reglur og dómsmál víða um heim. Hérlendar reglur hafa þróast frá því að vera brotakenndar í að vera heilsteyptari og markvissari og eru evrópskar reglugerðir á sviði loftslagsréttar burðarásinn í íslenskum loftslagsrétti.

16. Fjöldi dómsmála tengd loftslagsrétti hefur verið höfðaður erlendis og hérlendis. Í Landsrétti féll m.a. úrskurður um meðferð losunarheimilda WOW air.

17. Afleiðingar loftslagsbreytinga, svo sem hækkun yfirborðs sjávar, getur haft áhrif á hafrétt. Hærra sjávarborð og landrof getur breytt tilkalli ríkja til hafsvæða, fiskimiða og haft áhrif á efnahagslögsögu. Nokkrir grunnlínupunktar, sem marka íslensk hafsvæði, geta verið í hættu. Mikilvægt er að hafa betra eftirlit með grunnlínupunktum sem marka íslensk hafsvæði og ráðast í viðeigandi aðgerðir til að koma í veg fyrir breytingar á mörkun hafsvæða.

6.1 Inngangur

Afleiðingar loftslagsbreytinga hafa margvísleg áhrif á hið náttúrulega umhverfi, svo sem á tíðni óveðra, bráðnun jökla, hækkun á yfirborði sjávar og breytingar á lífríki. Þessi áhrif hafa síðan fjölþættar samfélagslegar afleiðingar og ná m.a. til atvinnustigs og atvinnuvega, allt frá frumatvinnuvegum til fjármálafyrirtækja (sjá kafla 8), harðra innviða, svo sem hinna byggðu innviða samgangna, vatns og orku (sjá kafla 9), náttúruvár og kerfisislægrar áhættu sem og áhættu þvert á landamæri (sjá kafla 11.4). Áhrifin, og viðbrögð við þeim, ná einnig

til samfélagslegra innviða, sem t.d. tengjast vinnumarkaði, menntun, heilbrigði, menningu og trú. Viðbrögð stjórnvalda eru nauðsynleg og getur viðhorf almennings haft áhrif á getu og vilja stjórnvalda til að bregðast við. Fjölmörg siðfræðileg og lagaleg álitamál hafa komið fram, en mikilvægt er að stórnvöld hafi í huga ólíkar þarfir og aðstæður mismunandi þjóðfélagshópa við mótun viðbragða með réttlæti að leiðarljósi.

Þessi kafli byggist að miklu leyti á upplýsingum sem fram komu á málstofum sem vísindanefndin hélt árið 2022. Einstakar greinar byggjast verulega á fyrirlestrum sem þar voru fluttir. Sérstaklega má nefna að grein 6.2.1 byggist á erindum Sóllilju Bjarnadóttir og Sigrúnar Ólafsdóttur, grein 6.3 á erindi Eiríks Bergmann, grein 6.4 á erindum Ólafs Páls Jónssonar, Sigríðar Þorgeirsdóttur og Finns Ricarts Andrasonar, grein 6.5 á erindi Söru Öldudóttur og Auðar Ölfu Ólafsdóttur, grein 6.5.2 á erindi Þorgerðar J. Einarsdóttur, grein 6.6.1 á erindi Ólafs Páls Jónssonar og Allyson Macdonald, grein 6.6.2 á erindum Sólveigar Önnu Bóasdóttur og Arnfríðar Guðmundsdóttur, grein 6.6.3 á erindum Huldu Stefánsdóttur og Kristins Schram og grein 6.6.4 á erindi Snjólaugar Árnadóttur.

6.2 Viðhorf Íslendinga

6.2.1 Viðhorf Íslendinga til loftslagsbreytinga

Viðhorf Íslendinga til loftslagsbreytinga hefur tekið miklum breytingum á síðustu árum, ekki síst vegna síaukinna og sýnilegra áhrifa loftslagsbreytinga. Í viðhorfskönnun tengdri *International Social Survey Programme (ISSP)* frá 2020, þar sem safnað var upplýsingum um viðhorf Íslendinga til umhverfismála, svöruðu 1152 einstaklingar m.a. spurningum um viðhorf sín til loftslagsmála (Sóllilja Bjarnadóttir o.fl., 2023b).



Niðurstöðurnar voru bornar saman við sambærilega ISSP-könnun frá árinu 2010 og samanburður sýnir viðhorfsbreytingar á þessum áratug. Í heildina sýna niðurstöðurnar að mikill meirihluti landsmanna telur að loftslagsbreytingar séu að eiga sér stað og að þær séu af mannavöldum. Landsmenn hafa þó meiri áhyggjur á áhrifum á heimsvísu heldur en á Íslandi. Stuðningur við réttlát umskipti er mikill, þó svo að einstaklingar telji atvinnu sína ekki í hættu.

Þegar rýnt er nánar í kafla könnunarinnar um *viðhorf til umhverfisvandamála og loftslagsbreytinga* kemur í ljós að árið 2010 töldu 17% umhverfismál vera mikilvægasta eða næst mikilvægasta málefni þjóðarinnar. Árið 2020 var sú tala komin upp í rétt rúmlega 25%, eða um fjórðungur þjóðarinnar. Árið 2020 voru loftslagsmál það umhverfisvandamál sem landsmenn töldu mikilvægast, eða rétt rúmlega 43%. Sú tala var 13% árið 2010 svo þeim sem telja loftslagsmálin mikilvægust hefur fjölgað verulega. Í samanburði við aðrar Evrópuþjóðir eru Íslendingar í fimmta sæti hvað varðar áhyggjur af loftslagsbreytingum (Sóllilja Bjarnadóttir o.fl., 2023b).

Yfirgnæfandi meirihluti þjóðarinnar, 85,6% landsmanna, segir að loftslagsbreytingar eigi sér stað og séu vandamál. Um 13,4% landsmanna telja að loftslagsbreytingar eigi sér stað en að þær breytingar séu ekki vandamál. Rétt tæp 60% (59,6%) Íslendinga telja að loftslag jarðar sé að breytast og að það sé fyrst og fremst af mannavöldum, en rétt rúm 35% (35,3%) telja að þessar breytingar séu jafnt vegna náttúrulegra breytinga og breytinga af mannavöldum. Þannig er örlítið brot (0,3%) af þjóðinni sem telur að loftslagsbreytingar eigi sér alls ekki stað og lítill hluti að þær breytingar sem eigi sér stað séu eingöngu náttúrulegar (4,9%). Í heild sinni má túlka þessar niðurstöður á þann veg að loftslagsmál séu mjög ofarlega í huga fólks sem

umhverfisvandamál sem þarf að takast á við (Sóllilja Bjarnadóttir o.fl., 2023b).

Hvað varðar viðhorf landsmanna til *áhrifa okkar og ábyrgðar á loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra* eru eftirfarandi niðurstöður lýsandi. Þegar Íslendingar eru spurðir um það hvort þeir telji að loftslagsbreytingar muni hafa góð eða slæm áhrif á allan heiminn er yfirgnæfandi meirihluti sem telur þau áhrif verða slæm, eða alls 78,2%, og af þeim segja 27,9% að þau verði gífurlega slæm. Á hinn bóginn segja 12,7% að áhrifin séu hvorki slæm né góð og rétt rúm 9% segja að þau verði á einhvern hátt góð eða jákvæð fyrir heiminn. Þegar spurt er um góð eða slæm áhrif á Ísland sérstaklega færist þunginn aðeins í átt til góðu áhrifanna, þannig að ívið fleiri landsmenn telja loftslagsbreytingar betri fyrir Ísland en heiminn í heild sinni. Þetta rímar við flestar slíkar kannanir (Sóllilja Bjarnadóttir o.fl., 2023b) sem sýna að tilhneigingin sé sú að fólk telji loftslagsbreytingar vera meira vandamál annarra þjóða en þeirra sjálfra. Þannig telja 64,7% landsmanna áhrifin verða á einhvern hátt slæm á Íslandi (þar af 14,7% gífurlega slæm), 19,6% hvorki góð né slæm og 15,6% góð á einhvern hátt.

Þegar fólk er spurt að hvaða marki það beri persónulega ábyrgð á því að draga úr loftslagsbreytingum segja 60% að þau beri á einhvern hátt ábyrgð og þar af telja 13,8% sig bera mjög mikla ábyrgð. Meirihluti landsmanna finnur því til ábyrgðar til að grípa til aðgerða gegn loftslagsbreytingum. Þegar hinn póllinn er skoðaður, þ.e. að finnast eigin ábyrgð lítil eða engin, eru það 22,7% sem taka undir það. Þarna á milli eru þeir sem segja sína persónulegu ábyrgð á loftslagsbreytingum vera hvorki-né en í þeim hópi eru eru 17,3% landsmanna. Viðhorf landsmanna *gagnvart aðgerðum í loftslagsmálum* sýna að aðeins 8,4% landsmanna eru sammála eða mjög sammála því að aðgerðir stofni eigin atvinnu í hættu og 12,6% telja að störf muni tapast og að efnahagslífi verði stefnt í hættu. Um 28,2% telja að aðgerðir muni auka framfærslukostnað og 35,1% telja að aðgerðir muni leiða til hærra orkuverðs. 81,4% telja að aðgerðir muni skapa komandi kynslóðum betra líf, 80,2% landsmanna telja að aðgerðirnar muni stuðla að betri heilsu og 64,2% telja að aðgerðir komi í veg fyrir útdauða tegunda. Mismunandi hópar samfélagsins upplifa þó áhrif aðgerða á mismunandi hátt. Þau sem eru eldri eru ólíklegri til að sjá jákvæð áhrif aðgerða, konur eru á hinn bóginn líklegri til að sjá jákvæðu áhrifin, sem og þau sem eru með háskólapróf og hærri tekjur. Þau sem eru ekki með háskólapróf, sem og karlar, eru líklegri til að hafa áhyggjur af því að aðgerðir í loftslagsmálum hafi neikvæð áhrif á framfærslukostnað og efnahagslífið. Að auki hafa þeir sem ekki hafa háskólamenntun meiri áhyggjur af því að aðgerðir geti stofnað þeirra eigin atvinnu í hættu (Sóllilja Bjarnadóttir o.fl., 2023b).

6.2.2 Viðhorf Íslendinga til aðgerða í loftslagsmálum

Erlendar rannsóknir sýna að mikilvægt er að stefnum og aðgerðum stjórnvalda í loftslagsmálum verður að fylgja stuðningur borgaranna (Rhodes o.fl., 2014). Hér skipta viðhorf almennings til loftslagsbreytinga miklu máli og var fjallað um viðhorf íslensku þjóðarinnar hér að ofan. Aðgerðir stjórnvalda í loftslagsmálum, geta falið í sér notkun hagrænna stjórntækja. Aðgerðum, sem byggjast á hagrænum stjórntækjum, má skipta í aðgerðir sem annars vegar gefa neikvæða hvata til breytinga á hegðun, svo sem skatta, og aðgerðir sem veita jákvæða hvata til breytinga, svo sem ívilnanir. Rannsóknir sýna að aðgerðir sem byggjast á neikvæðum hvötum, svo sem skattlagning, fá oftast lítinn stuðning frá einstaklingum (Attari o.fl., 2009; Dietz o.fl., 2007; Lam, 2015; Rhodes o.fl., 2014). Hins vegar, ef pólitískt traust er til staðar, eykur það vilja til að styðja við hækkun skatta á jarðefnaeldsneyti (Fairbrother o.fl., 2019; Hammar og Jagers, 2006).

Hefur slíkur vilji verið staðfestur á Íslandi ef einstaklingar eru vissir um að skatttekjur séu notaðar til að koma í veg fyrir umhverfismengun (Sóllilja Bjarnadóttir, 2020). Ekki hefur verið rannsakað eins ítarlega hvort pólitískt traust hefur áhrif á aðrar stefnur stjórnvalda. Vitað er að traust á stofnunum hefur áhrif á stuðning við velferðarkerfið (Edlund, 2006; Edlund og Lindh, 2013) og rannsóknir hafa sýnt að stofnanatraust getur haft áhrif á stuðning einststaklinga við mismunandi stefnur stjórnvalda sem tengjast umhverfismálum (Harring, 2018).

Viðhorf Íslendinga til aðgerða stjórnvalda í loftslagsmálum og áhrif stofnanastrausts annars vegar og hins vegar pólitísks trausts á þau viðhorf hafa verið skoðuð í samhengi hagrænna

stjórntækja og réttlætis (Sóllilja Bjarnadóttir o.fl., 2023a). Þrjú mismunandi stjórntæki, sem öll eru í opinberri umræðu, voru borin saman, þó svo að aðeins tvö þeirra hafi komið til framkvæmda:

- Skattar: Að hækka skatta á jarðefnaeldsneyti til að stuðla að aukinni eftirspurn eftir umhverfisvænum orkugjöfum.
- Ívilnanir: Að nota ívilnanir til að styðja við fjárfestingu í nýtingu endurnýjanlegra orkugjafa.
- Réttlát umskipti: Að tryggja að umskipti yfir í lágkolefnahagkerfi verði réttlát fyrir alla. Hér er lögð áhersla á að réttlæti sé tryggt í samhengi atvinnuöryggis, það er að aðstoða og endurmennta starfsfólk sem missir vinnuna vegna áhrifa eða aðgerða í loftslagsmálum.

Spurt var hvernig pólitískt traust og stofnanatraust hefur áhrif á stuðning einstaklinga við mismunandi stefnur í loftslagsmálum. Til að svara þessari spurningu var byggt á lagskiptu slembiúrtaki frá íslensku þýði *International Social Survey Programme* frá 2020.

Niðurstöður benda til þess að þegar kemur að vali á mismunandi loftslagsaðgerðum, tengdum orku og eldsneyti, og sem miða að því að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, þá eru 43% fylgjandi því að hækka eigi skatta á jarðefnaeldsneyti en mun fleiri, eða 69%, telja að styrkja eigi með opinberri fjármögnun nýtingu endurnýjanlegra orkugjafa. Mikill meirihluti landsmanna (70%) vill einnig að tryggt sé að umskiptin verði réttlát (*e. just transition*), svo sem með því að styðja fólk sem missir vinnuna vegna loftslagsaðgerða til t.d. færniþjálfunar eða endurmenntunar. Pólitískt traust eykur vilja til að styðja við skattahækkanir, sem er í samræmi við erlendar rannsóknir, en stofnanatraust hefur áhrif á vilja gagnvart öllum aðgerðunum þremur.

Þessar niðurstöður gefa til kynna að ef stofnanatraust er til staðar þá getur það aukið stuðning almennings við mismunandi stefnur og aðgerðir stjórnvalda í loftslagsmálum. Að sama skapi tengist pólitískt traust meira sýn einstaklinga á ríkið og hlutverk þess þar sem það hefur jákvæð áhrif á stuðning við skattlagningu á jarðefnaeldsneyti. Stjórnvöld og stærri stofnanir samfélagsins eru í lykilhlutverki þegar kemur að stefnu og aðgerðum í loftslagsmálum, en farvegur fyrir samskipti og tengingar mismunandi eininga þarf að vera til staðar (Sóllilja Bjarnadóttir o.fl., 2023a).

Í heild sýna niðurstöðurnar að vegna hins mikla stofnanatrausts hér á landi er líklegt að stjórnvöld hafi stuðning almennings til aðgerða í loftslagsmálum, en í því ljósi er afar mikilvægt að stofnanastrúktúr og stjórnsýsla loftslagsmála sé vel skipulögð og skilvirk og uppfylli þannig slíkt traust. Það er einnig mikilvægt að stjórnvöld taki alvarlega réttlætisvídd loftslagsmála, það er að loftslagsstefna og aðgerðir í loftslagsmálum hafi réttlæti og jafnrétti að leiðarljósi. Í ljósi þessarar niðurstöðu, sem og að landsmenn hafi áhyggjur af loftslagsmálum og almenna trú á mikilvægi aðgerða til framtíðar, þá virðist jarðvegurinn vera frjór fyrir aðgerðir í loftslagsmálum.

6.3 Loftslagsbreytingar: upplýsingaóreiða, samsæriskenningar og falsfréttir

Segja má að umræða um loftslagsbreytingar og afleiðingar þeirra snúist, í einfaldaðri mynd, annars vegar um þær staðreyndir sem náttúruvísindin geta mælt og lagt fram og hins vegar um hvernig fólk skilur þessar staðreyndir, túlkar og ræðir, bæði innan þeirra hópa sem það myndar og hnattrænt, í heimi sem er að miklu leyti sítengdur gegnum netið og samfélagsmiðla. Eins og kemur víða fram í nýjustu skýrslu IPCC um hnattrænar loftslagsbreytingar hafa aðgerðir stjórnvalda, stofnana, fyrirtækja og samtaka, til að minnka útblástur gróðurhúsalofttegunda og bregðast við afleiðingum loftslagsbreytinga, vaxið síðustu ár (Shukla o.fl., 2022). Jafnframt hefur öflum, sem berjast gegn slíkum aðgerðum, vaxið fiskur um hrygg, t.d. með því að breiða út efasemdir og upplýsingaóreiðu til almennings um staðreyndir vísindanna og aðgerðir yfirvalda (Treen o.fl., 2020).

Samsæriskenningar og falsfréttir um loftslagsbreytingar draga úr líkum á því að almenningur breyti gildismati sínu og þjóðfélög þróist í átt til sjálfbærari lífsháttа. Upplýsingaóreiða af þessu tagi dregur einnig úr virkni lýðræðis, ógnar mannréttindum og eykur möguleika popúlískra afla að hasla sér völl á mikilvægum vettvangi eins og á þjóðþingum og í meginstraumi stjórnmála almennt. Þetta á ekkert síður við um íslenskt samfélag en önnur og verður að hafa í huga þegar samfélags- og menningarlegar hliðar loftslagsbreytinga á Íslandi eru kannaðar (Van Prooijen o.fl., 2015; Uscinski og Parent, 2014; Jolley og K. M. Douglas, 2014; Barkun, 2013).

Hér á eftir verður farið stuttlega yfir hvernig samsæriskenningar og upplýsingaóreiða um loftslagsbreytingar og sá popúlismi og valdboðshyggja sem þessu tengjast geta haft áhrif á lýðræðið og þá ákvarðanatöku og aðgerðir sem nauðsynleg eru til að sporna gegn loftslagsbreytingum, sem og bregðast við afleiðingum þeirra á samfélagið.

Uppgangur stjórnmálaskoðana og margs konar orðræðu víða um heim, sem gjarnan andæfa stefnu meginstraumsstjórnmála og ríkisvalds, ekki síst á Vesturlöndum, og sem einkennast af upplýsingamengun, upplýsingaóreiðu og samsæriskenningum, er nokkuð sem fylgjast þarf vel með. Umferð upplýsinga, hvort sem þær eru réttar eða rangar, virðir engin landamæri og Ísland er, sem sítengt svæði, jafn viðkvæmt fyrir upplýsingaóreiðu utan landamæranna – sem kemur annars staðar frá – og þeirri sem verður til innanlands. Það er því sannkölluð áskorun þvert á landamæri að fjalla um og svara samsæriskenningum og upplýsingaóreiðu af öllu tagi. Þetta snertir loftslagsmál á marga vegu því meðal erfiðustu hindrana í viðleitni samfélaga og ríkja til að gera þær grundvallarbreytingar sem þarf til að minnka útblástur gróðurhúsalofttegunda er tortryggni í garð stjórnvalda og vísindafólks og þekkingarskortur almennings á loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra (Bergmann, 2018).

Undanfarin ár hafa legið saman hugmyndafræðilegir straumar sem hafa orðið að nýþjóðernishyggju okkar tíma, þegar samsæriskenningar, samhliða tæknibreytingum í miðlun, verða að flóði upplýsingaóreiðu. Í falsfréttum, upplýsingaóreiðu og popúlisma eru sömu grunnefnin sameiginleg: einföld, tvískipt heimsmynd (tvíhyggja), þar sem heiminum er skipt í „okkur“, góða fólkið, og „hin“, þau sem okkur stendur ógn af; með öðrum orðum; almenningi er stillt upp gegn elítunni. Úr verður samfélag þar sem almenningur getur ekki lengur treyst þeim upplýsingum sem flæða um og sem einkennist af tortryggni milli ólíkra hópa. Upplýsingaflóðið verður þannig til þess að samfélagið tvístrast (Bergmann, 2020).

Þessi gerð pólitíkur, oft kölluð popúlismi, hefur færst af jaðri samfélagsins og inn í sjálfan meginstraum stjórnmálanna og þannig hafa popúlistar komist til valda í fjölmörgum ríkjum. Popúlismi einkennist mest af einhvers konar óttaprangi því grunnur hans er að ótta og tortryggni sé prangað inn á almenning með falsfréttum sem flæða um samfélagið, innan um réttar upplýsingar, í síauknum mæli. Beiting rangra upplýsinga hefur alltaf verið til, t.d. flökkusögur og orðrómur um ýmislegt, en með nýjum miðlum, nú síðast samfélagsmiðlum, hefur magnið margfaldast og stjórnun á því hvað fer út til almennings, sem kalla má „hliðvörslu“ upplýsinga, er horfin nú á 21. öldinni. Sem dæmi má nefna að ungt fólk fær mikinn meirihluta upplýsinga sinna af samfélagsmiðlum og af því sést hvað rangar upplýsingar ná til margra, bæði ungra og þeirra sem eldri eru. Þessar upplýsingar eru órýndar og þótt einnig flæði yfir okkur rýndar upplýsingar er magnið af upplýsingum þvílíkt að almenningur hefur ekki forsendur, tækifæri né færni til að meta hvað er rétt og hvað er rangt. Þetta hefur svo aftur þær afleiðingar að það er ekki sátt í samfélaginu um hvað er rétt og hvað er rangt; fólk deilir ekki bara um það sem því finnst um veruleikann heldur deilir það um hver veruleikinn er. Þarna sjá ýmsir óprúttnir aðilar tækifæri til að beita röngum upplýsingum fyrir sig sem vopni og úr verður upplýsingastríð (Eiríkur Bergmann, 2021).

Eitt af því sem á sér einnig stað eru nokkurs konar snjóboltaáhrif falsfrétta frá jaðrinum inn í meginstraum, þegar fréttir, sem verða til hjá jaðarmiðlum og jaðarhópum, dreifast og eru teknar upp af meginstraumsmiðlum og magnast þannig upp vegna mikillar dreifingar hjá þessum stóru miðlum. Þegar meginstraumsmiðill tekur upp falska fregn og sendir svo frá sér frétt um að þessar röngu upplýsingar séu í umferð veitir það jaðarhópum rétt til að taka þá frétt

og dreifa falsfréttunum enn víðar og úr verða snjóboltaáhrif rangra upplýsinga. Þessar röngu upplýsingar hefðu ekkert endilega orðið skaðlegar hefðu þær haldist á jaðrinum. Þannig verða til „handan-sannleiks-stjórnmál“ (*e. post-truth politics*), sem lýsa sér í því t.d. að álit áhugamanna (*e. amateurs*) er álitið jafngilt vísindalegri þekkingu; skoðanir mínar verða jafngildar þekkingu þinni. Jafnvel afsannanlegar staðhæfingar eru teknar gildar í umræðunni og þegar þannig er komið hafa tilfinningar oftast vinninginn en ekki staðreyndir.

Dreifing rangra upplýsinga er ekki eitthvað sem gerist bara á jaðrinum, í „skringilegum“ jaðarsettum hópum, heldur líka í valdamiðjunni sjálfri og eru stjórnunaraðferðir Trump og Pútin dæmi um það. Það sem einkennir samsæriskenningar er í stuttu máli það að voldugir illvirkjar blekkja almenning í eigin þágu, til að græða meira fé, öðlast meiri völd, klekkja á almúganum. Eitt af því sem skiptir einna mestu máli, þegar samsæriskenningar um loftslagsbreytingar eru til umræðu, er að slíkar kenningar eru smitandi og að fólk sem efast um viðtekna þekkingu í einu máli er mjög gjarnt á að gera það líka í öðrum málum. Þannig leiðir mikill átrúnaður á eina samsæriskenningu til mikils átrúnaðar á aðra. Þetta getur leitt til andrúmslofts samsærishyggju og tortryggni sem grefur um sig í samfélaginu og meira er um slíkt í sumum samfélögum en öðrum. Hópar sem aðhyllast þessar samsæriskenningar halda því gjarnan fram að tilgangurinn með dreifingu þessara hugmynda og skoðana, t.d. að það þurfi að bólusetja fólk gegn covid, að innrásin í Úkraínu sé röng og að loftslagsbreytingar af mannavöldum eigi sér stað, sé til þess að yfirvöld og aðrir valdamiklir hópar geti þrengt að frelsi almennings. Samsæriskenningar gegn loftslagsbreytingum ganga út á að vísindin bak við þær séu uppspuni og afbökun og sett fram í þeim tilgangi að ná (meiri) hugmyndafræðilegum eða pólitískum völdum eða til að hagnast fjárhagslega á kostnað venjulegs fólks (K. Douglas o.fl., 2017).

Yfirvöld á Íslandi, sem og aðrir sem láta loftslagsbreytingar og afleiðingar þeirra sig varða, þurfa að skilja þessa hugmyndafræðilegu strauma falsfrétta, upplýsingaóreiðu og samsæriskenninga til þess að geta staðið vörð um lýðræðisleg skoðanaskipti, byggð á staðreyndum.

6.4 Loftslagsbreytingar og siðfræði

Áhrif losunar gróðurhúsalofttegunda á loftslag, náttúru og samfélög vekja upp siðferðilegar spurningar sem hafa fengið vaxandi athygli (Gardiner o.fl., 2010). Gardiner 2011 lýsir loftslagsbreytingum sem gjörningaveðri sem tengi saman þrjár stórar, siðferðilegar áskoranir (Gardiner og Hartzell-Nichols, 2012). Í fyrsta lagi skapi þær ójafnvægi þar sem ríkar þjóðir valdi vanda sem bitnar verst á fátækum þjóðum, í öðru lagi séu loftslagsbreytingar til komnar vegna losunar núverandi og fyrri kynslóða eða að þær muni bitna harðast á komandi kynslóðum og í þriðja lagi varði loftslagsbreytingar samskipti og stöðu mannkyns í náttúrunni og gildi náttúrunnar í sjálfri sér. Síðastnefnda áskorunin er einnig miðlæg í umhverfissiðfræði, og siðferðilegar spurningar, tengdar henni, eru víðtækari en loftslagsmál (O'Neill o.fl., 2012).

6.4.1 Losun bitnar á þeim sem lítið losa

Fyrsta áskorunin, sú að lífskjör fólks í efnameiri löndum heims valdi hörmungum meðal þeirra fátækari (Ólafur Páll Jónsson, 2020), hefur fengið nokkra umfjöllun á vegum Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsmál (IPCC). Í skýrslum vinnuhóps 2 hjá IPCC er fjallað um afleiðingar loftslagsbreytinga, aðlögun og þá hópa sem eru útsettari en aðrir fyrir loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra (IPCC, 2007; IPCC, 2014a; IPCC, 2014b; IPCC Working Group II, 2022). Í úttektum IPCC hefur komið fram að fátækari samfélög eru oftast viðkvæmari fyrir áhrifum loftslagsbreytinga, hafa minni möguleika til aðlögunar og eru gjarnan háð loftslagstengdum auðlindum (sjá t.d. umfjöllun í grein 1.9 í V2008). Mismunandi er þó hversu berskjölduð samfélög eru, og það ræðst einnig af þáttum sem ekki eru beintengdir loftslagi, en almennt gildir að hópar, sem eru efnahags- eða félagslega illa settir, búa við ótryggt stjórnarfar og slaka innviði eru sérstaklega viðkvæmir fyrir afleiðingum loftslagsbreytinga (V2018). Ljóst er

að þótt afleiðingarnar bitni verr á slíkum samfélögum þá bera þau minnsta ábyrgð á útblæstri gróðurhúsalofttegunda (Althor o.fl., 2016).

Þetta óréttlæti er siðferðilegt álitamál sem ekki er hægt að líta framhjá þegar rætt er um menningar- og félagslegar hliðar loftslagsbreytinga. Hætta er á að umskipti frá kolefnisfreku heimshagkerfi til kolefnislágs hagkerfis gagnist helst þeim efnahagslega sterku hópum og samfélögum en viðhaldi ofangreindri misskiptingu og óréttlæti (Newell o.fl., 2020). Til að forðast það þarf að taka viðkvæma hópa og samfélög, sem standa höllum fæti sérstaklega, inn í áætlanir og aðgerðir stjórnvalda, stofnana og fyrirtækja (sjá einnig umfjöllun í grein 6.5). Þessir hópar eru reyndar mjög fjölbreyttir. Hér er t.d. um að ræða frumbyggjaþjóðir, konur, fátækt fólk, fólk með fötlun, börn og ungt fólk, svo nokkrir hópar séu nefndir.

6.4.2 Losun í nútíma og dauðsföll í framtíðinni

Önnur áskorunin er sú að losun gróðurhúsalofttegunda frá upphafi iðnbyltingar muni bitna mest á komandi kynslóðum sem ekki bera ábyrgð á losuninni (Gardiner, 2011; Halldór Björnsson, 2008). Þessi siðferðilega spurning, sem snýr að réttlæti frá einni kynslóð til annarrar (Ólafur Páll Jónsson, 2012), tekur meðal annars á því hversu alvarlegar afleiðingarnar verða og hversu kostnaðarsamt getur reynst að forðast þær og hver ber kostnaðinn (sjá t.d. nýlega umfjöllun í Bridge, 2022; Méjean o.fl., 2023). Tölulegt mat hefur nýlega verið lagt á það manntjón sem loftslagsbreytingar kunna að hafa í för með sér. Matið hefur mjög ríflegt óvissubil og er umdeilt (Bressler og Heal, 2022), en til að setja það í samhengi bendir Bressler (2021) á að hver milljón tonna samdráttur í hnattrænni losun geti bjargað yfir 200 mannslífum á öldinni. Hlynur Orri Stefánsson (2022) bendir á að það sama eigi við um losun Íslendinga (sjá grein 4.3.1). Óháð tölulegri óvissu í mati Bressler (2021) er lykilatriðið að sú áþján sem loftslagsbreytingar valda mun hafa dauðsföll í för með sér. Eins og kemur fram í grein 6.4.1 má gera ráð fyrir að megnið af þeim dauðsföllum verði í löndum sem lítið losa. Niðurstaðan er að siðferðileg ábyrgð þeirra sem mest losa sé veruleg.

6.4.2.1 Loftslagsbreytingar frá sjónarhóli ungs fólks



Mynd 6.1: Mótmæli á COP26 (Mynd: Anna Hulda Ólafsdóttir, birt með leyfi)

Spurningin um réttlæti frá einni kynslóð til annarrar hefur orðið til þess að ungt fólk víða um heim hefur stofnað samtök sem berjast gegn loftslagsbreytingum og annarri umhverfisvá (sjá dæmi um mótmæli gegn loftslagsbreytingum á mynd 6.1 og krafist þátttöku íákvörðunum og aðgerðum til að stemma stigu við loftslagsbreytingum, sjá t.d. *Fridays for Future* (2023) samtökin sem urðu til upp úr mótmælum Gretu Thunberg.

Hér á landi eru það einkum félagasamtökin Ungir umhverfissinnar sem eru rödd unga fólksins á opinberum vettvangi. Þeir

leggja áherslu á hina siðfræðilegu hlið loftslagsbreytinga og telja hana grundvöll þeirra aðgerða sem samtökin styðjast við vekja athygli á loftslagsvánni og til að hvetja til samfélagslegra breytinga til að bregðast við henni (sjá t.d. umfjöllun samtakanna: Ungir Umhverfissinnar (2022) og Ungir Umhverfissinnar (2023b)).

Samtökin telja hugtakið „loftslagsbreytingar"grunnt, fjarstæðukennt, hlutlaust og bitlaust og þótt það lýsi þeim efnislegu breytingum sem eiga sér stað nái það alls ekki að lýsa þeim hörmulegu afleiðingum sem þær hafa fyrir vistkerfi jarðar og mannleg samfélög. Þau benda á að það sem blasi við séu ekki einungis breytingar heldur hamfarir, sem hafi víðtækar afleiðingar fyrir réttlæti, jöfnuð og efnahagslega og pólitíska stöðu fólks innan og milli samfélaga jarðar. Samtökin leggja því til að í stað þess að tala á hlutlausan hátt um loftslagsbreytingar ætti að tala um **loftslagshamfarir** og eðlilegt væri að stjórnvöld lýstu yfir neyðarástandi í loftslagsmálum (sjá t.d. umfjöllun samtakanna: Ungir Umhverfissinnar (2023a)). Samtökin eru mjög gagnrýnin á stefnu stjórnvalda og telja hana ekki siðlega í ljósi þeirra stóru siðferðisspurninga sem loftslagsmál vekja upp.

Auk þess að taka undir og skýra nánar þær tvær siðferðilegu spurningar sem minnst var á hér að framan benda samtökin á það óréttlæti sem er fólgið í því viðhorfi að manneskjan sé æðri náttúrunni. Í þessu samhengi má benda á að loftslagsbreytingar valda tjóni á vistkerfum og stefna ótal dýrategundum í hættu og hafa víðtækar afleiðingar á líffræðilegan fjölbreytileika (sjá kafla 4 og sérgrein 4A).

6.4.3 Loftslagsbreytingar og umhverfissiðfræði

Þriðja álitamálið sem nefnt var að framan varðar samband manns og náttúru. Íslenskir fræðimenn, bæði innan heimspeki og raungreina, hafa skrifað töluvert um þetta álitamál undanfarna þrjá áratugi (Róbert H. Haraldsson og Þorvarður Árnason, 1994; Páll Skúlason og Guðmundur Ingólfsson, 2005; Ólafur Páll Jónsson, 2007; Sólveig Anna Bóasdóttir, 2017; Guðbjörg Rannveig Jóhannesdóttir, 2020). Umhverfissiðfræði fjallar um stöðu manneskjunnar í náttúrunni og samband hennar við hana. Náttúrusiðfræðingar halda því fram að viðtekin viðhorf til og aðgerðir gegn loftslagsbreytingum hafi margar alvarlegar takmarkanir vegna þess að þau byggist á úreltum skilningi á manneskjunni og stöðu hennar í heiminum, bæði sem siðferðisveru og sem þekkingarveru. Til að ráða bót á þessu dugir ekki framþróun vísinda og þekkingar ein og sér heldur þarf mun dýpri viðhorfsbreytingar. Breyttur skilningur á manninum sé forsenda þess að við getum farið að hugsa öðruvísi og það eina sem dugir til að nauðsynlegar breytingar eigi sér stað í átt til lausnar á loftslagsvandanum er sjálfsumbreytandi hugsun (Ólafur Páll Jónsson, 2007; Sigríður Þorgeirsdóttir og Donata Schöller, 2019).

Greina má nokkra megindrætti í afstöðu fólks til loftslagsbreytinga. Þegar horft er á stóru myndina, veruleikann sem við blasir og hin stóru pólitísku og hagrænu kerfi sem móta líf fólks, eru eftirfarandi ferns konar meginlínur áberandi. Fyrst mætti nefna afneitun, þá afstöðu að loftslagsbreytingar af mannavöldum séu engar eða að minnsta kosti óverulegar. Þótt þessi afstaða sé ekki eins áberandi í pólitískri umræðu og hún var fyrir um áratug þá er hún enn greinileg. Í öðru lagi mætti nefna afstöðu sem kalla mætti tæknilega aðlögun, en þá samþykkir fólk að loftslagsbreytingar séu raunverulegar og af mannavöldum, en líta svo á að bregðast beri við afleiðingunum, eftir því sem þær koma fram með tæknilegum lausnum. Ýktasta útgáfan af þessari afstöðu er „björgunarbátasiðfræði"sem boðar að manneskjan muni á endanum bjarga sér með að flytja til annarra hnatta (Tuana, 2020). Í þriðja lagi má nefna hagræna afstöðu sem einkennir m.a. loftslagsráðstefnur SÞ og heimsmarkmiðin. Þá er horft til lausna innan ríkjandi hagkerfa en þessi afstaða byggist í grunninn á þeirri hugmynd að ríkjandi kerfi megi laga að breyttum veruleika. Þessi afstaða tekur stundum á sig skrifræðislegt (*e. bueaucratic*) mót sem lýsir sér í því að reynt er að milda áhrif loftslagsbreytinga á sem flestum sviðum með margvíslegum loftslagsiðnaði innan hins kapítalíska markaðshagkerfis.

Þegar afstaða fólks til loftslagsbreytinga er skoðuð á minni skala, þ.e. einstaklinga og smærri

hópa, má einnig sjá ólík viðhorf og hugmyndir. Hér mætti nefna hið værukæra viðhorf þar sem fólk lætur gjarnan reka á reiðanum og telur vandamálið of stórt til að eitthvað sé hægt að gera með eigin hegðun, þetta sé vandamál sem stjórnmálin eigi að leysa. Örvæntingarviðhorfið er líklega jafnútbreitt og værukæra viðhorfið, einkum meðal ungs fólks (sbr. hreyfingin *Fridays for future*) sem líður eins og það eigi enga framtíð. Ýktasta mynd þessa er viðhorf þar sem hvatt er til róttækra aðgerða og jafnvel skemmdarverka (Malm, 2021). Enduróm af slíkum viðhorfum má sjá í kvikmynd Benedikts Erlingssonar *Kona fer í stríð*. Að lokum má nefna viðhorf sem kallað hefur verið djúpaðlögun (Bendell, 2018), en það lýsir viðhorfi sem í hnotskurn gengur út á að það sé orðið of seint að gera eitthvað í málinu. Hópar sem aðhyllast þetta viðhorf búa sig undir samfélagslegt hrun og náttúruhamfarir af völdum loftslagsbreytinga með t.d. sjálfsþurftarbúskap og um leið er lögð áhersla á manneskjulegra samskiptamynstur og kærleika.

Þau viðhorf sem nefnd hafa verið hér að framan geta aukið meðvitund fólks um loftslagsvandann en þau hafa líka öll sínar takmarkanir, einkum ef þau hreyfa ekki við ofnýtingu auðlinda sem rökstyðja má að sé rót vandans. Þessi rányrkja versnar ár frá ári og birtist kannski skýrast í því að þurrðardagur jarðar (*e. earth overshoot day*), þ.e. sá dagur þegar mannkynið fer að lifa umfram það sem jörðin gefur af sér, færist framar ár hvert (Ólafur Páll Jónsson, 2021). Þess vegna þarf mun dýpri viðhorfsbreytingu og þótt hún muni ekki breyta öllu er hún grundvöllur þess að við getum tekist á við hinar stórfelldu breytingar sem eru fram undan – afleiðingar loftslagsbreytinga.

6A Umhverfisviðhorf og siðfræði

Sigríður Þorgeirsdóttir

Í umhverfissiðfræði er gerður greinarmunur á tvenns konar viðhorfum til umhverfisins, þau eru ýmist mannhverf *(e. anthropocentric*) og lífhverf (*e. biocentric*) eða visthverf (*e. ecocentric*). Samkvæmt mannhverfa viðhorfinu eru hagsmunir og staða mannsins útgangsforsendan og grunnur siðferðilegra gilda. Samkvæmt lífhverfa og visthverfa viðhorfinu er litið á manninn sem hluta af náttúrunni og afkoma hans ævinlega álitin samofin öðrum lífverum. Vissulega ber maðurinn sem tegund með sérstöðu meiri ábyrgð en aðrar lífverur svo hann getur ekki hafið sig alfarið upp fyrir mannhverfa viðhorfið. Engu að síður er það grundvallarspurning hvernig sinnaskipti mannkyns yfir í lífhverfara viðhorf geti átt sér stað. Það er ljóst að við vitum betur, að við vitum að við eru hluti af lífríki jarðar og órofa tengd og háð öllu sem lifir. En það er ekki nóg að vita þetta. Manneskjan þarf líka að skynja, finna og upplifa þessi tengsl á dýpri hátt því svo virðist sem við séum á einhvern hátt aftengd upplifun okkar og náttúrunni. Þess vegna hefur meðal annarra Antonio Gutteres aðalritari Sameinuðu þjóðanna kallað eftir nýrri og öðruvísi hugsun á tímum umhverfisvár og umhverfisheimspekingar tala um við ræktum með okkur meira næmi og eflum með okkur skynfinningu fyrir stöðu okkar á jörðinni. Skynfinning (*e. felt-sense* (Guðbjörg R. Jóhannesdóttir o.fl., 2021)) gerir okkur kleift að finna að sjálf okkar er ekki bara afmarkað sjálf sem býr í huga okkar heldur er það tengt öðrum og heiminum öllum. Þannig er ljóst að hugur og líkami eru samofin, tilfinningar og vitsmunir samtvinnuð og hugurinn reikar um allt, langt út fyrir líkamann. Og síðast en ekki síst eru maður og umhverfi eitt – við öndum inn og út loftinu sem er í kringum okkur og erum þannig eitt með því umhverfi sem við erum í.

Milli okkar og annarra lífvera og umhverfisins alls er stöðugt samspil og við erum hluti af vef sem tengir allt líf jarðar. Við þurfum að rækta betur skynjun okkar á og upplifun af þessu meiri en okkur er kennt og við erum meðvituð um. Það er ein mikilvæg forsenda þess að hafa kraft og ímyndunarafl til að breyta þeim stóru kerfum sem þurfa breytinga við – til þess að við sem tegund getum haldið velli í umróti breytinga sem við þurfum að takast á við.

6.4.4 Siðfræðileg álitamál og umskipti

Þau siðfræðilegu álitamál sem rakin hafa verið hér beinast að afleiðingum loftslagsbreytinga en enduróma einnig þegar rætt er um aðgerðir til þess að bregðast við loftslagsbreytingum. Í grein 4.0 í skýrslu vísindanefndar 2008 er bent á að hvað siðfræðileg álitamál varðar sé loftslagsvandinn að eiga sér stað í hnattrænu samhengi við fólksfjölgun, iðnvæðingu og breytta landnotkun og snertifletir séu milli aðgerða gegn loftslagsvánni og möguleikum sumra ríkja til sjálfbærrar þróunar. Heildarsýn þarf því einnig að taka tillit til þeirra umskipta sem munu eiga sér stað og réttlætismála þeim tengd. Þetta er umfjöllunarefni næstu greinar.

6.5 Réttlát umskipti og aðlögun

Allt frá upphafi nútímaumhverfishreyfinga upp úr 1960 í Bandaríkjunum vaknaði spurningin um möguleg áhrif umhverfisverndar á atvinnuöryggi. Hugmyndafræði réttlátra umskipta á rætur sínar að rekja í þá umræðu en hugmyndin um réttlát umskipti (*e. just transition*) kemur fram í Bandaríkjunum á níunda áratug 20. aldarinnar. Þar var krafist stuðnings fyrir verkafólk vegna atvinnumissis vegna umhverfisaðgerða. Það er, að þegar umhverfisaðgerðir leiða til atvinnumissis þá er stuðnings krafist fyrir það verkafólk sem verður fyrir neikvæðum áhrifum vegna þessa. Að þeim sem missa vinnuna sé bættur atvinnumissirinn og að atvinnuþróun fari fram á viðkomandi svæði. Hugtakið á því ekki rætur sínar að rekja til loftslagsvandans og viðbragða við honum en hefur þó náð aukinni fótfestu nýlega í samhengi loftslagsmála, ekki síst vegna aukins þunga í nauðsynlegum loftslagsaðgerðum og viðbrögðum almennings við þeim (D. McCauley og Heffron, 2019; Wang og Lo, 2021). Til dæmis voru Gulu vestin fjöldahreyfing í Frakklandi sem reis upp gegn óréttlátum áhrifum loftslagsaðgerða á lágtekjuhópa. Í dag þykir skýrt að til að ná breiðri samstöðu um loftslagsaðgerðir, bæði í samhengi mótvægisaðgerða og aðlögunar, þarf réttlætisvíddin að vera sýnileg og ávörpuð með skýrum hætti (Sigríður Ingibjörg Ingadóttir o.fl., 2021).

Horfa verður á réttlæti tengt loftslagsbreytingum frá fjölmörgum sjónarhornum. Loftslagsbreytingar hafa mismikil áhrif á fólk og núverandi félagslegur og efnahagslegur ójöfnuður, bæði innan og milli landa, ákvarðar hversu útsett fólk er fyrir áhrifum af þeim. Afleiðingar loftslagsbreytinga, bæði afleiðingar stórra atburða en ekki síður sívaxandi fjöldi minni atburða, geta ýtt undir ójöfnuð, aukið varnarleysi félagslega og efnahagslega viðkvæmra hópa og eru líklegar til að koma ójafnt niður á hópum eftir stétt og stöðu. Þetta er ekki síst vegna þess að hópar samfélagsins hafa mismikla aðlögunargetu þar sem sú geta tengist m.a. félagslegum og efnahagslegum aðstæðum. Hópar samfélagsins eru því misvel í stakk búnir til að takast á við afleiðingar loftslagsbreytinga og ef ekki er að gætt er líklegt að viðkvæmari hópar verði fyrir meiri áhrifum (Sigríður Ingibjörg Ingadóttir o.fl., 2021).

Viðbrögð stjórnvalda við loftslagsbreytingum skipta ekki síður máli fyrir réttlæti tengt loftslagsbreytingum. Hópar samfélagsins eru í misgóðri stöðu til að hafa áhrif á stefnumótun og ákvarðanatöku stjórnvalda. Þetta á jafnt við um mótvægisaðgerðir til að draga úr losun, sem og aðlögunaraðgerðir. Rannsóknir erlendis frá sýna þetta glöggt þar sem efnahagsleg staða, félagsleg staða, menntun og búseta hefur áhrif á rödd einstaklinga og möguleika viðkomandi til að hafa áhrif á stefnumótun og aðgerðir stjórnvalda.

Í ljósi þessa má flokka réttlát umskipti og aðlögun í fimm víddir (Darren McCauley o.fl., 2019; Robinson og Carlson, 2021):

Réttlát málsmeðferð *(e. procedural justice)*: felur í sér að tryggja lýðræðislega þátttöku í stefnumótun og samráð við almenning þegar kemur að loftslagsaðgerðum. Hér skiptir máli, bæði upplýsingaöflun og ákvarðanataka, hvernig hún fer fram og hvaða aðgengi mismunandi þjóðfélagshópar hafa. Spyrja þarf hvort þeir starfshættir sem eru við lýði hafi útilokandi áhrif á suma hópa sem gæti skapað óánægju og óréttlæti.

Efnahagslegt réttlæti *(e. distributive justice):* felur í sér að byrðum og ávinningi af

áhrifum loftlagsbreytinga og aðgerðum vegna þeirra sé skipt á réttlátan hátt. Hér þarf að meta hverjir verða fyrir neikvæðum (eða jákvæðum) áhrifum af loftslagsbreytingum og hverjir verða fyrir neikvæðum eða jákvæðum áhrifum af aðgerðum tengdum loftslagsbreytingum. Gagnast mótvægisaðgerðir eða aðlögunaraðgerðir sumum þjóðfélagshópum betur á kostnað annarra? Hvernig er hægt að dreifa á réttlátan hátt bæði kostnaði og ábata?

Viðurkenning á félagslegu óréttlæti *(e. recognition justice):* grundvöllur þess að uppfylla efnahagslegt réttlæti og til að tryggja réttláta málsmeðferð er að viðurkenna að félagslegt óréttlæti sé til staðar og að misskipting sé raunveruleg. Að auki þarf skilningur að vera fyrir hendi á því hverjar séu orsakir misskiptingar og óréttlætis.

Endurheimt réttlætis *(e. restorative justice):* felur í sér að sá skaði sem orðinn er sé bættur og að reynt sé að koma í veg fyrir ósanngjarnan skaða til framtíðar.

Alþjóðlegt réttlæti *(e. cosmopolitan justice):* felur í sér að réttlæti eigi að vera til staðar fyrir alla, burtséð frá uppruna eða landfræðilegri staðsetningu.

Alþjóðlegar birtingarmyndir óréttlætis í samhengi loftslagsmála eru fjölmargar og er samhengi loftslagsáhrifa og ójöfnuðar vel þekkt. Til dæmis er ríkasta 1% heimsins ábyrgt fyrir tvöfalt meiri losun GHL en fátækustu 50% jarðarbúa og íbúar í fátækum eða lægri millitekjuríkjum eru fimm sinnum líklegri til að missa heimili sín vegna loftslagsvár en íbúar efnaðari ríkja. Að auki eru þeir sem hafa minnst mun berskjaldaðri fyrir allri náttúruvá sem t.d. hefur áhrif á fæðuöryggi og matvælaverð (OXFAM, 2020). Það eru því ólíkir hópar sem bera annars vegar ábyrgð á loftslagsvandanum eða þeir hins vegar sem eru berskjaldaðir fyrir afleiðingunum.

6.5.1 Birtingarmyndir réttlátra umskipta og aðlögunar á Íslandi

Þekking á réttlætisvíddum loftslagsbreytinga er fremur lítil enn sem komið er á Íslandi og eru rannsóknaráherslur enn í mótun. Þó er ljóst að allar fimm víddir réttlátra umskipta skipta máli í íslenskum veruleika. Krafan er að byrðum og og ávinningi vegna loftslagsbreytinga verði deilt með sanngjörnum hætti (Sigríður Ingibjörg Ingadóttir o.fl., 2021). Hér verður stuttlega fjallað um tvær víddanna í íslensku samhengi: réttlát málsmeðferð og efnahagslegt réttlæti.

Réttlát málsmeðferð felur í sér að mikilvægt er að tryggja breiða og lýðræðislega aðkomu að stefnumótun í loftslagsmálum þar sem mismunandi þjóðfélagshópum er gert mögulegt að taka þátt. Án slíkrar þátttöku getur mat og val á mögulegum aðgerðum vegna mótvægisaðgerða eða aðlögunar að loftslagsbreytingum skapað átök milli þjóðfélagshópa og hætta er á að stefnumótun og aðgerðir gagnist síður þöglum og valdaminni hópum í samfélaginu.

Efnahagslegt réttlæti. Þegar kemur að því að greina efnahagslegt réttlæti og loftslagsbreytingar þarf að tryggja að kostnaði og ávinningi af aðlögun og mótvægisaðgerðum sé dreift með sanngjörnum hætti. Meta þarf því:

- Áhrif loftslagsbreytinga á mismunandi landsvæði og tekjuhópa, en áhrif verða misalvarleg eftir búsetu og möguleg búseturöskun því ólík milli svæða.
- Áhrif loftslagsbreytinga á atvinnuvegi, en áhrif í sumum tilfellum gætu verið jákvæð til skamms tíma en neikvæð til lengri tíma, svo sem í ferðaþjónustu (sjá grein 8.5). Í öðrum tilvikum gætu áhrifin orðið jákvæð, svo sem við ræktun nytjaplantna (sjá grein 4.2).
- Áhrif aðlögunaraðgerða á mismunandi landsvæði og þjóðfélagshópa. Í ljósi breytilegra áhrifa loftslagsbreytinga er mikilvægt að tryggja að aðgerðir auki ekki á misskiptingu. Ef til dæmis er ráðist í aðgerðir til að laga þéttbýli/hverfi/húsnæði að loftslagsbreytingum þá getur það þrýst verði húsnæðis upp og það gerir efnaminna fólki erfiðara að búa/kaupa þar. Þetta gæti leitt til þess að þeir sem eru tekjulægri flytja á svæði þar sem aðlögunaraðgerðum hefur ekki verið beitt. Einnig gæti verið að aðgerðum yrði frekar beitt þar sem hátekjuhópar búa, sem myndi auka enn frekar á misskiptingu. Engar rannsóknir hafa þó verið gerðar á þessu möguleikum hérlendis.

- Áhrif mótvægisaðgerða á mismunandi landsvæði og atvinnuvegi. Ljóst er að krafan um samdrátt í losun GHL mun hafa ólík áhrif á atvinnuvegi landsins vegna mismikillar losunar og möguleika á mótvægisaðgerðum. T.d. er um helmingur losunar frá landbúnaði vegna búfjárræktar og fáar leiðir til að draga úr losun aðrar en fækka búfénaði. Einnig er líklegt að breytingar á neyslumynstri hafi áhrif. Mikilvægt er að þeir sem verða fyrir atvinnumissi fái ný atvinnutækifæri.

- Mótvægisaðgerðir, sem miða að því að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, hafa ólík áhrif á mismunandi þjóðfélagshópa. Samgöngur eru stærsti hluti losunar sem er á beinni ábyrgð stjórnvalda og eru einnig annar stærsti útgjaldaliður heimilanna – á eftir húsnæði. Samgöngur gegna mikilvægu hlutverki í daglegu lífi fólks, svo sem til að gera atvinnuþátttöku mögulega. Skipulag samfélagsins miðast þó fremur við bílaeign en almenningssamgöngur (Dillman o.fl., 2023). Helstu mótvægisaðgerðum í samgöngum er því beint að notkun einkabílsins, þar sem t.d. kolefnisgjöldum hefur annars vegar verið bætt við verð á bensíni og dísilolíu og hins vegar veittar ívilnanir til kaupa á hreinorkubifreiðum (Verkefnisstjórn aðgerðaráætlunar í loftslagsmálum, 2020). Færa má rök fyrir því að líklegt sé að slikar aðgerðir hafi þyngri efnahagsleg áhrif á þá efnaminni, sem ekki geta nýtt sér ívilnanir til kaupa á hreinorkubifreiðum og nota því áfram bensín- eða dísilknúnar bifreiðar. Mikilvægt er að mótvægisaðgerðir séu hannaðar til að koma í veg fyrir slíkt óréttlæti.

6.5.2 Áhrif loftslagsbreytinga á konur og aðstæður þeirra

Eins og komið hefur fram eru ýmsir minnihlutahópar og hópar sem standa höllum fæti, t.d. konur, að öllu jöfnu viðkvæmari fyrir afleiðingum loftslagsbreytinga og sem hluti af réttlátum umskiptum verður að taka tillit til aðstæðna þeirra og þarfa, sem og að hafa þær með í ákvarðanatöku og aðgerðum gegn loftslagsbreytingum. Þetta er ekki einfalt mál að takast á við, enda konur um helmingur mannkyns, en hægt er að taka dæmi um hvernig loftslagsmál og kyn tengjast og þarf hvert tilfelli – samfélag, svæði, hópur – að skoðast út frá sögulegu, menningarlegu og pólitísku samhengi. Hér verður tekið dæmi um hvernig hægt er að skoða og skilja samhengi kyns og loftslagsmála í ljósi textílframleiðslu þar sem samfélög eins og það íslenska tengist textílframleiðslu annars staðar í heiminum sterkum böndum sem neytandi þeirrar vöru sem þar verður til.

Tengsl kyns og loftslagsmála er málefni sem þarf að gefa meiri gaum en hingað til hefur verið raunin í rannsóknum á samfélagslegum hliðum loftslagsbreytinga. Kynjavíddin kemur alls staðar við sögu, bæði hvað varðar orsakir loftslagsbreytinga og afleiðingar, og hægt er að skoða t.d. textíliðnað heimsins til að skilja þetta betur. Verður hér fjallað um tvö kyn, konur og karla, þótt ljóst sé að kynin eru mun fleiri.



Konur eru svo að segja á báðum endum textílframleiðslu, svo tekið sé dæmi um framleiðsluvöru sem hefur miklar og neikvæðar afleiðingar fyrir umhverfið og tengsl þess við stöðu kynjanna og kynjaðar ímyndir. Þær eru meirihluti þeirra sem starfar við framleiðslu og sem kaupendur og notendur textíls. Iðnaðurinn er mjög kynjaður því talið er að um eða yfir 70% þeirra sem vinna við framleiðsluna séu konur (Better Work programme, 2013),

sem þar að auki eru yfirleitt í fátækari löndum
heims þar sem regluverkið er lítið í umhverfis- og vinnuvernd. Þær verða fyrir kynferðislegri áreitni og mismunun, fá léleg laun og eru útsettar fyrir eiturefnum og öðrum skaða í framleiðslunni (Matsuura og Teng, 2020). Á hinum endanum eru konur í ríkari löndum heimsins sem eru helstu kaupendur textíls því þær sjá frekar en karlmenn um innkaup á fatnaði fyrir fjölskylduna (Umhverfisstofnun, 2023), auk þess sem markaðsöflin ota frekar tísku að þeim, t.d. í auglýsingum, og áhugi á textíl er í hefðbundu samhengi álitinn tilheyra áhugasviði kvenna.

Þessi mynd sem tengsl kyns og textíliðnaðarins dregur upp er aftur endurspeglun á því kynjabili sem þekkist í umhverfisvitund almennt. Þannig sýna rannsóknir að þótt konur séu mun frekar kaupendur og neytendur textíls eru þær líka mun líklegri til að huga að umhverfisáhrifum en karlar, svo sem að láta gera við föt, svo eitthvað sé nefnt (Umhverfisstofnun, 2023). Kynjabilið sést einkar vel þegar athyglin beinist að því hver ber ábyrgð á nærumhverfinu, ekki síst að orðræðum um hver beri ábyrgð á útblæstri gróðurhúsalofttegunda. Aukin einstaklingsvæðing og áhersla á ábyrgð einstaklinga í umhverfismálum eykur kynjaða verkaskiptingu. Þetta kemur t.d. fram í lykilhlutverki kvenna í heimilishaldi sem felur í sér að það eru þær sem bera meginábyrgð á því að innkaup séu umhverfisvænni, á aukinni flokkun á rusli og úrgangi, meiri nýtni, orkusparnaði, notkun almenningssamgangna í stað einkabíls o.s.frv. Þá eru konur viðkvæmari fyrir markaðsvæðingu umhverfismála og þættir eins og meðganga, brjóstagjöf, bleyjunotkun, barnamatur, dömubindi, sem meira og minna eru á herðum kvenna, hafa verið tengdir við umhverfisáhrif, t.d. mengun og úrgang, og höfðað til ábyrgðar kvenna (Dzialo, 2017; Cousins, 2021).

Þegar horft er á stóru myndina í umhverfis- og náttúruvernd almennt hefur verið hefð fyrir því að konur taki forystu þar í mörgum tilfellum, enda konur og ímyndir um kvenleika oft álitin tengdari náttúrunni á einhvern hátt. Þannig er hinn svokallaði græni lífstíll meira tengdur kvenleika og konum en körlum, t.d. í markaðssetningu á umhverfisvænum vörum (Kennedy og Dzialo, 2015). Þannig er neysla grænmetis og veganismi mun frekar tengd konum og ímynd þeirra en körlum, meðan kjötneysla er t.d. álitin karlmannleg. Þessu þarf að breyta og karlmennskuímyndir þurfa að tengjast meira umhverfisvænum lífsstíl, þ.e. ýta undir vistvæna karlmennsku (Hultman og P. M. Pulé, 2018; P. Pulé og Hultman, 2019). Nú eru ríkjandi þær ímyndir karlmennsku sem tengjast tæknivæðingu, framþróun og valdi og t.d. eru það karlmenn frekar en konur sem afneita loftslagsbreytingum & (P. Pulé og Hultman, 2019). Þessar ímyndir endurspegla valdamisræmið sem þegar er milli kynjanna og áherslan á ábyrgð einstaklinga á að minnka losun ýtir undir valdamisvægið þannig að enn frekar hallar á konur. Þetta misvægi hefur augljósa skírskotun til hinna fimm vídda réttlátra umskipta sem ræddar eru í grein 6.5.

6.6 Samfélagslegir innviðir

Samfélagslegir innviðir eru þeir innviðir sem veita umgjörð um félagslegar þarfir og auka félagslega velsæld, svo sem mennta-, menningar- og trúarstofnanir, auk heilbrigðisstofnana (sjá umfjöllun um áhrif loftslagsbreytinga á heilsu í kafla 7).

6.6.1 Menntun og menntastofnanir

Til að stuðla að þeim djúpstæðu breytingum sem þurfa að eiga sér stað á gildum okkar, viðhorfum, hegðun, stofnunum, kerfum og lífsháttum yfirleitt, hefur verið horft til menntunar og menntakerfa heimsins. Menntakerfi Vesturlanda, hugmyndafræðin sem þau byggja á og aðferðirnar sem þar eru mest áberandi, hafa lengst af frekar verið hluti af umhverfis- og loftslagsvandanum en innlegg í lausn hans. Þær þjóðir heims, sem státa af „bestu menntakerfunum“eru jafnframt þær þjóðir heims sem menga mest og ganga hvað freklegast á gæði jarðar (Nordic Council of Ministers, 2021; Ólafur Páll Jónsson o.fl., 2021).

Menntun barna og ungmenna hefur ekki falið í sér þær breytingar á gildum og viðhorfum til

náttúru og umhverfis sem nauðsynlegar eru að verði til að fólk hætti ofnýtingu og skeytingarleysi um umhverfið. Þess í stað viðheldur menntakerfið, frá leikskóla til háskóla, þeim gildum og viðhorfum sem eru rót umhverfisvanda eins og loftslagsbreytinga (Ólafur Páll Jónsson og Allyson Macdonald, 2021). Í nýlegri rannsókn er skoðað nánar hvernig sjálfbærnimenntun rataði inn í háskólanám á Íslandi. Niðurstöðurnar varpa ljósi á þetta. Til að styðja við Heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna um sjálfbæra þróun (UN, 2015) lagði UNESCO til átta viðmið um lykilhæfni fyrir sjálfbærnikennslu (UNESCO, 2017, sjá Box 1.1). Skoðun á því hversu vel námsefni Háskóla Íslands endurspeglaði þessi viðmið sýndi ólíkar niðurstöður eftir deildum og dró fram hvernig togstreita getur myndast milli annarra alþjóðlegra gæðaviðmiða (THE, 2020) og hæfniviðmiða UNESCO (Auður Pálsdóttir og Lára Jóhannsdóttir, 2021).

Í menntunarfræðum sem fjalla um menntun til sjálfbærni hefur fræðafólk komist að þeirri niðurstöðu að sú þekking sem sérfræðingar hafa byggt upp undanfarna áratugi um hver staðan sé og hvað þurfi að gera hefur ekki breytt viðhorfum og hegðun fólks að neinu marki, heldur nánast þvert á móti. Þau gildi og nálganir sem kennd eru í flestum tilfellum eru þau sömu og fyrri tíma sem hafa einmitt leitt okkur út í þá ósjálfbæru lifnaðarhætti sem ríkja og þarf nauðsynlega að gjörbreyta (Ólafur Páll Jónsson og Allyson Macdonald, 2021).

Sú staðreynd að menntun er ferli þar sem kynslóðirnar þurfa saman að vera virkar í að rannsaka og skapa þekkingu hefur ekki verið höfð í heiðri í þeirri viðteknu nálgun að sérfræðingar séu handhafar þekkingarinnar sem segja svo öðrum – hinum ungu – hvað gera skuli. Þetta æskilega einkenni menntunar, þ.e. sem skapandi ferli og samvinna kynslóðanna, er ekki síst greinilegt í sjálfbærnimenntun þar sem leiðin til sjálfbærni er markmið í sjálfu sér.

Menntun til sjálfbærni – sjálfbærnimenntun – er könnun, í samfélagi við aðra, ekki síst á þolmörkum vistkerfa jarðar og samspili núverandi og komandi kynslóða innan þessara þolmarka. Hún hefur að leiðarljósi sterkan siðferðilegan undirtón, virkjar getu þeirra sem njóta hennar til athafna, gengur út á uppreisn hinna yngri gegn ósjálfbærum lifnaðarháttum hinna eldri og hvetur til róttækrar endurskoðunar samfélagsins og gilda þess. Markmiðið er endurmótun samfélagsins til sjálfbærra gilda og lífshátta þar sem langtímahugsun tekur við af þeirri mannhverfu skammtímahugsun sem ríkir í heiminum í dag.

6.6.2 Trúarbrögð og guðfræði

Í ljósi þess hve trúarbrögð eru mikilvægt félags- og menningarlegt afl í lífi milljarða manna er mikilvægt að beina athyglinni að því hvaða augum trúarbrögð, trúarhópar og leiðtogar þeirra líta loftslagsbreytingar og hvaða hlutverki þessir aðilar gegna og geta gegnt í aðgerðum gegn þeim (Calhoun o.fl., 2013; Santmire, 1985; Nash, 1991; Gottlieb, 1996; Hessel og Ruether, 2000).

Siðfræði kristinnar trúar skipar grundvallarsess í rannsóknum guðfræðinga á loftslagsbreytingum hérlendis enda ljóst að hún hefur lengi mótað gildismat og breytni Íslendinga gagnvart umhverfinu (Sólveig Anna Bóasdóttir, 2017). Verður forsendum þessa, byggðum á rannsóknum trúarbragða- og guðfræðinga á sambandi kristinnar siðfræði, guðsskilningsins og loftslagsbreytinga, lýst hér á eftir. Einnig kemur femínísk guðfræði við sögu og þau siðferðislegu álitamál sem skoðuð eru þegar trú og loftslagsbreytingar ber á góma og tengist því eftirfarandi texti kaflanum á undan, en hann fjallaði um hvernig kynjafræðin skoðar samband kyns og loftslagsbreytinga (Ruether, 1992; Ruether, 1993; Ruether, 1996)

Um það bil 30 ár eru síðan guðfræðingar hófu að ræða hlýnun jarðar og alvarlegar afleiðingar loftslagsbreytinga. Nálgun guðfræðinnar er fjölbreytileg og algengt að leitað sé til gyðing-kristinna hefða nútímans og miðalda þar sem skyldan að varðveita sköpunarverk guðs – jörðina alla og lífríki hennar – er lögð okkur manneskjunum á herðar (Gebara, 1999; Sallie. McFague, 2008).

Helsta gagnrýni guðfræðinnar í þessum málaflokki beinist gegn kapítalisma og markaðshyggju þar sem fólki er talin trú um að hið góða líf byggist fyrst og fremst á neyslu og því meiri neysla, þeim mun betra og hamingjusamara líf (Sallie McFague, 1993; Sallie McFague, 2001; Sallie McFague, 2013). Undir þessa gagnrýni hefur Frans páfi tekið, eins og sjá má í páfabréfinu 2015, þar sem finna má mikla gagnrýni á vestræna menningu (Francis, 2015). Í skrifum hans

og fleiri sem láta sig trú og siðferði manneskjunnar gagnvart náttúrunni varða eru settar fram vangaveltur um breytni og siðferði mannanna og sú spurning áleitin hvort manneskjan geti yfirleitt breytt hegðun sinni og þá breytt rétt, viti hún á annað borð hvað sé rétt að gera (Sólveig Anna Bóasdóttir, 2018).

Miðaldasagnfræðingurinn Lynn White fjallaði um framkomu mannsins gagnvart náttúrunni í frægri grein 1967 en þar hélt hann því fram að kristin trú sé mannmiðlægustu trúarbrögð í heimi og eigi sinn þátt í að ástandið í umhverfismálum sé eins slæmt og raun ber vitni (White, 1967). Sú fullyrðing hefur orðið guðfræðingum- og trúarbragðafræðingum uppspretta fræðilegra hugmynda og texta um loftslagsbreytingar og umhverfismál almennt, þar sem ýmsir taka undir skoðanir hans en einnig er bent á að málið sé ekki svo einfalt. Einnig verði að líta til mikilvægra þátta í hugmyndafræði nútímans þar sem því er haldið fram að manneskjan geti skapað paradís á jörðu með endalausum vexti sem byggist á notkun tækni og vísinda. Sams konar mannmiðlægni og kristnin er sökuð um megi því finna í hugmyndafræði nútímans (Johnson, 2014).

Önnur mikilvæg hugtök, sem notuð eru í umfjöllun guðfræðinga- og trúarbragðafræðinga um loftslagsbreytingar, eru ótti og von og tengjast oft dómsdagsspám þeim sem dynja á okkur um þessar mundir. Þar kemur vonin til sögunnar og hefur fræðafólk á þessu sviði einkum fjallað um hvernig og hvar vonin getur hjálpað sem mótvægi við óttann (Moltmann, 2012; Rasmussen, 2013). Þá hefur fræðafólk á þessu fræðasviði fjallað um náttúrusýn og náttúruskilning trúarhefða heims sem framlag til umhverfis- og loftslagsmála (Sólveig Anna Bóasdóttir, 2016).

Þegar kemur að siðferðilegum málefnum sem varða manneskjurnar og umhverfið hafa guðfræðingar og trúarbragðafræðingar lagt ýmislegt til, einkum hvað varðar réttlæti og ábyrgð, sem og samstöðu (*e. solidarity*) með bæði öðru fólki og lífríkinu sjálfu (Mescher, 2020). Þarna eru mikilvægir þættir eins og t.d. það að rétt siðferðileg breytni okkar nær ekki bara til mannvera nálægt okkur heldur nær hún til allra lífvera (Kim og Koster, 2017). Í boðandi siðfræði guðfræðinnar eru það eiginleikarnir nægjusemi, hógværð og auðmýkt sem lögð er áhersla á í fari okkar mannanna, sem og sjálfbærni í lífsháttum. Tegundahyggja og einstaklingshyggja eru gagnrýndar og ágæti og velferð mannsins tekin niður af stalli sínum. Hugmyndin um manninn sem synduga veru tekst á við hugmyndina um okkur sem skynsama veru og þarna verða til fræðileg stef þar sem lögð er áhersla á að trúin og skynsemin geti í sameiningu hjálpað mannkyninu að komast yfir þá erfiðleika sem við glímum nú við og beint okkur inn á farsælli vegferð þar sem við berum umhyggju fyrir því lífríki sem við erum hluti af (Bauman, 2014). Að lokum er vert að nefna hugmyndir guðfræðinnar um tímann þar sem áhersla er lögð á að við séum komin að ákveðnum brotpunkti; tíminn er fullnaður, sbr. hvernig mannkynið þarf að gjörbreyta hugarfari og hegðun sinni sem nauðsynlegan undanfara þess að réttlætið nái fram að ganga og aðeins þá getum við lifað í heimi þar sem áníðsla mannkyns á lífríkinu á sér ekki lengur stað. Vonin er sú að mannkynið snúi af villu síns vegar og breyti sér þannig að það kjósi veginn til lífsins (Wirzba, 2021).

Enginn getur verið stikkfrí núna þegar sá risavaxni vandi steðjar að okkur sem hlýnun jarðar er og þess vegna er mikilvægt að guðfræðingar taki þátt í samtalinu og veki fólk til meðvitundar um vandann og ábyrgð okkar allra á að bregðast við honum. Hlutverk guðfræðinga er alltaf að túlka boðskap kristinnar trúar fyrir samtíma sinn. Kjarni kristinnar trúar er trúin á Guð sem skapara alls hins sýnilega og ósýnilega og þannig er allt frá Guði komið og ekkert honum óviðkomandi (Robb, 2010). Þannig hlýtur guðfræðin að láta þá hættu sig varða sem sköpunarverkið stendur frammi fyrir, sem og framtíð komandi kynslóða. Það er margt sem bendir til þess að guðfræðin þurfi sérstaklega að láta sig konur varða vegna stöðu þeirra í heimi loftslagsbreytinga. Þær rannsóknir, sem gerðar hafa verið á stöðu kvenna í þessu samhengi, sem reyndar eru enn af skornum skammti, sýna að loftslagsbreytingar hafa oft önnur og verri áhrif á konur en karla. Kynjafræðingar hafa gagnrýnt hvernig kynjaslagsíða og kynjablinda hafa haft áhrif á túlkun þeirra rannsókna sem þó hafa verið gerðar á afdrifum kvenna í heimi loftslagsbreytinga (Glazebrook, 2011; Prior og Heinämäki, 2017; Guðmundsdóttir, 2019). Þannig hefur t.d. verið sýnt fram á að páfabréfið frá 2015 sýni slíka kynjablindu (Gebara, 2017). Vegna

þessa hafa margir guðfræðingar lagt áherslu á það að skoða sérstaklega stöðu kvenna á þeim svæðum heims sem verða í meira mæli fyrir áhrifum loftslagsbreytinga, t.d. vegna vatnsskorts, uppskerubrests eða aukins vinnuálags. Á þessum svæðum er það oft á ábyrgð kvenna að sjá um fjölskylduna af því að eiginmenn þeirra þurfa, vegna breyttra aðstæðna, að fara annað til að leita að atvinnu.

Femínískir guðfræðingar, eins og Sallie McFague (1933–2019), hafa fjallað um umhverfisógnina og guðfræðilega ábyrgð á henni og hefur hún meðal annars lagt áherslu á að málfar guðfræðinnar sé líkingamál. Þess vegna er mikilvægt að velja vel þær líkingar og myndir sem notaðar eru til að lýsa Guði og sambandi hans við heiminn. Áherslan, sem hefur verið á valdi Guðs og handanveru, þurfi að víkja fyrir áherslu á kærleikann og nærveru hans. Einnig leggur McFague áherslu á tengslin innan heildarinnar, því allt er tengt öllu öðru – heimurinn er þannig eins og einn líkami, líkami Guðs. Spyrja þarf hvar við erum í heiminum og hvert hlutverk okkar sé, ekki bara af hverju við erum hér. Athygli okkar mannanna beinist óneitanlega að þeim hluta líkama Guðs sem við búum á, jörðinni, og garðinum sem við eigum að annast um, en líkaminn er jú allur alheimurinn og ekkert undanskilið. Innan þessa líkama er allt tengt og háð hvert öðru og heildin fær aðeins þrifist ef hugað er að þörfum hins einstaka. Þess vegna þurfum við að annast þetta allt og tileinka okkur reglur sem snúast um nægjusemi, tillitssemi og umhyggju fyrir komandi kynslóðum. Einnig er í þessari guðfræði lögð áhersla á að við mætum Guði í öllu því sem er hér og nú, ekki bara þegar lífi okkar lýkur, því við mætum honum í garðinum sem okkur er ætlað að annast, jörðinni – heimili okkar sem Guð gaf. Þriðja áhersluatriðið er að Guð hefur ákveðið að deila með okkur ábyrgð á öllu sköpunarverkinu þannig að við berum líka ábyrgð á því. Þegar við sjáum hið illa sem á sér stað í heiminum er það ekki vegna þess að Guð hefur sett það í heiminn heldur vegna þess að það er skortur á hinu góða og á því berum við ábyrgð.

Guðfræðingar víða um heim hafa kallað eftir endurskoðun á kristinni guðfræði í ljósi loftslagsvandans, ekki síst femínískir guðfræðingar sem leggja sérstaka áherslu á afleiðingar hlýnunar jarðar á líf kvenna (Kim og Koster, 2017). Útgangspunktur þessarar guðfræðilegu endurskoðunar í heimi loftslagsbreytinga er að þarna sé um að ræða réttlætismál og er loftslagsréttlæti (sjá grein 6.5) grundvallarhugtak. Loftslagsmál eru þannig siðferðislegt, pólitískt, félagslegt og trúarlegt viðfangsefni, fyrir utan að vera umhverfismál. Loftslagsréttlæti er mannréttindamál vegna þess að afleiðingar loftslagsbreytinga eru alvarlegastar fyrir fólk sem fyrir hefur lakasta pólitíska og efnahagslega stöðu en það eru jafnframt þeir íbúar jarðar sem minnsta ábyrgð bera á þeirri loftslagsvá sem við blasir. Vert er að nefna í þessu samhengi mikilvægi páfabréfs, ekki aðeins innan rómversk-kaþólsku kirkjunnar og í öðru trúarlegu samhengi heldur einnig utan þess, en eins og áður sagði hefur það verið gagnrýnt vegna kynjablindu þar sem páfi talar fyrir hönd kvenna en gefur þeim ekki rými til að tjá sig sjálfar. Hann viðheldur þannig því kynjamisrétti sem ríkt hefur um aldir þar sem undirskipuð staða kvenna er ekki viðurkennd, hvað þá sú staðreynd að þær verða víða mun harðar úti vegna afleiðinga loftslagsbreytinga en karlmenn almennt. Svar femínískra guðfræðinga, í rannsóknum þeirra á loftslagsóréttlæti, við þessari þöggun á röddum kvenna er sérstök áhersla á stöðu þeirra, sem og annarra jaðarhópa, þar sem raddir þeirra sem verst verða úti fá að heyrast (Gebara, 2017). Hnattrænar loftslagsbreytingar er nýtt, sögulegt samhengi sem kallar á endurskoðun kristinnar guðfræði á klassískum hugtökum og túlkunum. Femínísk, kristin loftslagsguðfræði tekst einmitt á við slíka endurskoðun með loftslagsréttlæti að leiðarljósi.

Trúaryfirvöld hafa ályktað um loftslagsbreytingar frá því að vísindasamfélagð dró athygli að þeim. Alkirkjuráðið hafði þegar sett á laggirnar verkefni tengt loftslagsbreytingum þegar IPCC var stofnað árið 1988, og Dalaí Lama varaði fyrst við loftslagsbreytingum árið 1990 (Jenkins o.fl., 2018). Áður var minnst á Laudato Si, umburðarbréf Frans páfa sem hann sendi frá sér vorið 2015, en það hefur haft mikil áhrif á loftslagsumræðuna með áherslu á umhverfismál sem siðferðismál. Íslensk trú- og lífsskoðunarfélög hafa einnig ályktað um loftslags- og umhverfismál. Sem dæmi má nefna að á Kirkjuþingi 2017 samþykkti Íslenska þjóðkirkjan umhverfisstefnu þar sem lögð er áhersla á vitundarvakningu um umhverfismál og nauðsyn þess að lífshættir stuðli að

því að markmið í loftslagsmálum og náttúruvernd náist (*Þjóðkirkja Íslands* 2023) og á aðalfundi Alþjóðasamtaka Húmanista í Reykjavík 2019 var samþykkt ályktun um loftslagsvána þar sem lögð var áhersla á aðgerðir til að draga úr losun og afla fylgis við aðgerðir (*Siðmennt* 2019). Samráðsvettvangur trúfélaga og lífsskoðunarfélaga var stofnaður árið 2006. Meðal sameiginlegra verkefna er samtal um og þátttaka í verkefnum er varða umhverfismál. Samráðsvettvangurinn átti virkan þátt í ráðstefnunni Faith For Nature sem þjóðkirkjan og Félag Sameinuðu þjóðanna á Íslandi stóðu að ásamt Umhverfisstofnun Sameinuðu þjóðanna (UNEP) og friðarhreyfingar trúarbragða (Religions for Peace), en ráðstefnan var haldin í Skálholti haustið 2020. Í ályktun ráðstefnunnar kemur fram hvatning til þess að stefnur séu byggðar á bestu fyrirliggjandi vísindum, hnignun umhverfis. Loftslagsbreytingar og tap líffræðilegs fjölbreytileika séu verulegt áhyggjuefni og það sé sameiginleg siðferðileg ábyrgð allra trúarbragða, trúfélaga og lífsskoðunarfélaga að vinna saman til að vernda jörðina (*Faith for Nature* 2020).

6.6.3 Listir, menning og ímynd þjóðar

Framlag fagfólks í listum, hönnun og arkitektúr, til vitundarvakningar í samfélaginu um áskoranir loftslagsbreytinga, er ekki síður mikilvægt en miðlun rannsókna annarra fræðasviða. Eitt af því sem einkennir rannsóknir á fræðasviði lista er að niðurstöðum er ætíð miðlað á opinberum vettvangi. Þetta beina og millilliðalausa samband sem listirnar hafa við samfélagið er mikill styrkur þegar kemur að mati á ávinningi. Á Íslandi er það einkum Listaháskóli Íslands sem er vettvangur athugana og rannsókna listamanna, hönnuða og arkitekta á viðbrögðum samfélags og menningar við loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra. Þar er m.a. um að ræða rannsóknir á ástæðum og afleiðingum þeirra en ekki síður því hvernig manneskjur skynja og takast á við þær breytingar sem eru að eiga sér stað. Inn í rannsóknir listafólks sem beinast að loftslagsbreytingum og öllu því sem þeim fylgir fléttast nær alltaf og óhjákvæmilega rannsóknir á sambandi manneskju og náttúru, í víðu samhengi, þar sem margvíslegar umhverfisbreytingar og -ógnir kallast á við loftslagsvána (Anna María Bogadóttir, 2022; Bryndís Snæbjörnsdóttir og M. Wilson, 2020; Pausz, 2021; Thomas Pausz, 2017; Thomas Pausz, 2018; Hanna Styrmisdóttir og Stefánsdóttir, 2021; Katrín María Káradóttir, 2019; Palomino og Káradóttir, 2021; Bjarki Bragason, 2019)

Það sem einkennir einkum athuganir og rannsóknir listamanna og hönnuða á loftslagsbreytingum (og umhverfistengdum viðfangsefnum almennt) er í fyrsta lagi þverfræðileg nálgun, þar sem listamenn vinna með fólki úr ýmsum vísinda- og fræðigreinum. Í öðru lagi er um að ræða alþjóðlega samvinnu, yfir landamæri ríkja og menningarheima, þar sem allur heimurinn er undir. Í þriðja lagi eru þarna kynnt sjónarhorn fleiri tegunda lífvera en manneskjunnar og sjónum þannig beint að t.d. öðrum dýrum m.t.t. skynjunar og þarfa. Í fjórða lagi er um að ræða rannsóknir á því hvernig tengja má ólík fyrirbæri, t.d. einkenni og þarfir ýmissa lífvera, rými og skipulagsmál í manngerðu umhverfi, ræktun nytjaplantna o.s.frv. hvert við annað á nýja og óvænta vegu, sem og að setja slík fyrirbæri í nýtt samhengi, oft með óvæntri og lærdómsríkri útkomu fyrir okkur mannfólkið. Mætti segja að þessi nálgun - þvert á greinar, landamæri og lífverur, með óvæntum tengslum og óhefðbundnu samhengi - sé meðal þess mikilvægasta sem listir og hönnun hafa fram að færa til skilnings, þekkingar og viðbragða samfélagsins við loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra. Lausnir á loftslagsvandanum og viðbrögð samfélagsins verða að vera skapandi og fara ótroðnar slóðir.

Djúpstæðar breytingar í umhverfi okkar, á dýrum og plöntum og öllu sem ekki er mennskt, eins og loftslagsbreytingar hafa í för með sér, hafa aftur grundvallaráhrif á okkur mannfólkið, menningu okkar og samfélag, skilning okkar á okkur sjálfum og umheiminum. Það er ekki síst í samhengi loftslagsbreytinga og loftslagsvár sem strandsvæði norðurhafa fá sífellt meira vægi, því strendur landsins hafa alltaf verið lykilsvæði í lífsbaráttu landsmanna. Með auknum siglingum og ferðamennsku, svo eitthvað sé nefnt, verða breytingar á strandsvæðum okkar og þessi ferli, ásamt öðrum, hafa haft og munu hafa áhrif á sjálfsmynd okkar.

Ein birtingarmynd loftslagsvárinnar hérlendis er koma hvítabjarna, sem rannsóknarverkefnið Visitations: Polar bears out of place – „ísbirnir á villigötum“(2019 – 2022) sem unnið var í

samvinnu fræðafólks í Listaháskóla Íslands, Háskóla Íslands og Þjóðminjasafninu, ásamt ýmsum öðrum (Katla Kjartansdóttir og Kristinn Schram, 2020d; Katla Kjartansdóttir og Kristinn Schram, 2020a; Katla Kjartansdóttir og Kristinn Schram, 2020b; Katla Kjartansdóttir og Kristinn Schram, 2020c). Í verkefninu er dýrið í forgrunni og það skoðað sem lífvera, sambýlisvera manna, sem gestur, umhverfisvísir og skrautmunur. Reynt er að afbyggja þá „öðrun“(*e. othering*) sem það verður fyrir í mannheimum og þá hlutgervingu sem bæði dýr og ýmsir hópar fólks verða fyrir, ekki síst þegar umhverfismál ber á góma. Þetta er svo aftur innlegg í umræðu um eignarhald í umhverfispólitísku samhengi. Það er ekki síst hlutverk hvítabjarna, sem umhverfisvísir á norðurslóðum, sem er mikilvægt hér því kortlagning á hugmyndum fólks um hann í sögulegu samhengi og nútíma er mikilvægt innlegg í loftslagsumræðuna. Þar er spurt um hugmyndir um hlutverk bjarnarins í loftslagsorðræðu og samspil hans og manneskja í samhengi vistkerfis Íslands og norðurslóða. Þegar kemur að hvítabjörnum sem þvælast hingað til lands er ljóst að björninn er í nútímanum skilgreindur sem aðskotahlutur í vistkerfinu og opinber stefna er að skjóta hann á færi af því hann er metinn sem ógn við menn, dýr og annað lífríki af yfirvöldum, vísindafólki og öðrum (Sigfúsdóttir, 2022; Bryndís Snæbjörnsdóttir og M. Wilson, 2020; Katla Kjartansdóttir og Kristinn Schram, 2020d).

Táknmynd hvítabjarnarins um viðkvæmni lífríkis norðurslóða hefur vaxið fram síðan á síðustu áratugum 20. aldar en út frá því hvernig fjallað er um hann í samhengi hamfarahlýnunar sést ákveðinn skilningur vísindanna og samfélagsins yfirleitt á því hvað þessi hlýnun hefur í för með sér fyrir okkur sem búum á norðurslóðum. Í enn stærra samhengi má sjá tengsl orðræðna um afdrif hvítabjarna á norðurslóðum við hugmyndir um t.d. öryggismál og hnattvæðingu, nýtingu auðlinda og opnun sjóleiða á Norðurheimskautinu (Katla Kjartansdóttir og Kristinn Schram, 2020d; Kristinn Schram og Fiocca, 2017). Vistkerfi hvítabjarnarins er eitt af fyrstu fórnarlömbum loftslagsbreytinga og ljóst er að aukin bráðnun hafíss er það sem hefur rekið björninn í auknum mæli í fæðuleit þar sem hann endar, hér á okkar slóðum, á flæðiskerjum íslenskra stranda. Honum er svo ýmist teflt fram sem hluta af ímynd landsins, gagnvart ferðamönnum, t.d. í formi mjúkdýra í lundabúðum, eða sem aðskotahlutar sem alls ekki er hluti af náttúru landsins heldur sé eingöngu um að ræða einn og einn björn sem flækist hingað frá Grænlandi. Þarna er um að ræða mótsagnakenndar ímyndir hvítabjarnarins sem kallast á við ýmsar útgáfur náttúru landsins og fólksins sem þar býr (Æsa Sigurjónsdóttir, 2020; K. Schram og Jónsson, 2019).

6.6.4 Lagalegar hliðar loftslagsvandans

Loftslagsbreytingar og viðbrögð við þeim hafa þegar haft umtalsverð áhrif á lög og reglur og dómsmál víða um heim. Árið 2023 voru í alþjóðlegum gagnagrunni skráð 3150 dæmi um lög og stefnur sem settar hafa verið til að bregðast við loftslagsvánni og rúmlega 2200 dæmi um dómsmál, tengd loftslagsmálum og aðgerðum sem hafa verið höfðuð (*Climate Laws* 2023). Eins og í nágrannalöndum hafa hérlendar reglur, tengdar loftslagsmálum á síðustu árum, þróast frá því að vera brotakenndar í þá átt að verða heilsteyptari og marvissari. Hér verður stuttlega farið yfir íslenska umfjöllun um loftslagsrétt, erlend dómsmál og loks sértækara dæmi fyrir Ísland, þ.e. afmörkun hafsvæða.

6.6.4.1 Loftslagsréttur

Loftslagsrétti eru gerð greinargóð skil í samnefndri bók (Hrafnhildur Bragadóttir og A. Jóhannsdóttir, 2021) þar sem farið er yfir alþjóðlegar skuldbindingar Íslands og íslenskan rétt sem varðar loftslagsmál. Í bókinni er bent á fjögur einkenni loftslagsvandans sem skapa sérstakar áskoranir við stefnumótun og lagasetningu (Hrafnhildur Bragadóttir og A. Jóhannsdóttir, 2021, bls 44–46).

Í fyrsta lagi eru loftslagsbreytingar hnattrænt sameignar-vandamál þar sem gengið er á sameiginlega auðlind, þann eiginleika lofthjúpsins að geta tekið við ákveðinni losun af gróðurhúsalofttegundum.

Í öðru lagi eru loftslagsbreytingar víðfeðmari og kostnaðarsamari vandi en mörg önnur umhverfisvandamál (t.d. staðbundin mengunarmál). Loftslagsbreytingar hafa áhrif á náttúru, vistkerfi og samfélög og aðgerðir til að draga úr slíkum áhrifum hafa víðtæk áhrif á atvinnu- og efnahagslíf. Kostnaður við að draga úr loftslagsbreytingum er mikill en þó hefur verið sýnt fram á að kostnaður við aðgerðaleysi sé dýrasti kosturinn (Stern, 2007).

Í þriðja lagi er margþætt óvissa í vísindalegum niðurstöðum um áhrif loftslagsbreytinga, sérstaklega um áhrif til lengri tíma (áratugi og árhundruð). Þetta getur einnig átt við um afrakstur aðgerða til þess að stemma stigu við breytingunum.

Í fjórða lagi blasir vandinn á ólíkan hátt við efnahagslega vel stæðum ríkjum sem eiga meiri möguleika á að takast á við hann en þeim ríkjum sem standa efnahagslega verr, en eins og bent var á í umfjöllun um siðfræði í grein 6.4, eiga þær þjóðir sem loftslagsbreytingar bitna harðast á yfirleitt litla sök á vandanum og sama má segja um komandi kynslóðir sem vandinn þó bitnar ótvírætt á.

Þessar áskoranir gera það að verkum að umfjöllun um lagalegar hliðar loftslagsmála snýr ekki einungis að regluverki þjóða til að draga úr losun, heldur einnig að mögulegum bótarétti, rétti til hagþróunar og siðferðilegum og lagalegum skyldum þeirra þjóða sem lengi hafa byggt sína hagsæld á losun gróðurhúsalofttegunda. Áhrif loftslagsbreytinga eru víðtæk og til langs tíma, sem kann að stangast á við skammtímahagsmuni stjórnmála- og hagsmunaaðila.

Rammasamningur Sameinuðu þjóðanna um loftslagsmál (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) frá árinu 1992 er grundvöllur að alþjóðlegri samvinnu um loftslagsmál. Markmið samningsins er að styrk gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpnum verði haldið innan þeirra marka að komið verði í veg fyrir hættulega röskun á loftslagi. Á grunni samkomulagsins hafa síðan verið gerðir tveir aðrir samningar, Kýótó-bókunin (árið 1997 og uppfærður 2012) og árið 2015 náðist Parísarsamingurinn (Hrafnhildur Bragadóttir og A. Jóhannsdóttir, 2021, bls 9-10).

Til að uppfylla skuldbindingar þessara samninga og til að ná markmiðum í loftslagsmálum hefur ESB byggt upp ítarlegt regluverk á sviði loftslagsréttar og er það að miklu leyti hluti af samningnum um evrópska efnahagssvæðið (EES-samningnum). Í fyrrgreindri bók eru þessar evrópsku gerðir sagðar „hryggjarstykkið“ í íslenskum loftslagsrétti, en stór hluti þeirrar losunar sem á sér stað vegna efnahagsstarfsemi á Íslandi, auk landnotkunar, fellur undir ákvæði þeirra.

Í lögum um loftslagsmál (nr. 70/2012) var annars vegar leitast við að setja heildarlöggjöf á sviði loftslagsmála og hins vegar að innleiða EES-gerðir tengdar þessum málaflokki, m.a. viðskiptakerfi ESB með losunarheimildir. Þessum lögum hefur verið breytt nokkrum sinnum, m.a. með hliðsjón af breytingum á skuldbindingum Íslands samkvæmt EES-samningnum. Ýmsar reglur íslensks réttar, sem varða loftslagsmál, heyra einnig undir aðra lagabálka en loftslagslög og má þar nefna reglur um kolefnisgjald og skattlagningu ökutækja og eldsneytis og reglur um niðurdælingu koldíoxíðs í jarðlög. Þar sem loftslagsmál liggja þvert á fjölmarga málaflokka geta ýmiss konar reglur komið til skoðunar þegar fjallað er um málaflokkinn, ss. reglur á sviði orkumála, mengunarmála, úrgangsmála, skipulagsmála, landnotkunar, samgangna og matvælamála.

6.6.4.2 Dómsmál tengd loftslagsrétti

Þegar litið er til annarra landa hefur, eins og fyrr var greint frá, fjöldi dómsmála tengdum loftslagsmálum verið höfðaður. Hér á landi féll í Landsrétti úrskurður um meðferð losunarheimilda flugfélagsins WoW eftir gjaldþrot þess (2020/598). WoW Air hafði vanrækt að skila losunarheimildum fyrir árið 2018 en fyrir gjaldþrot hafði fyrirtækið selt losunarheimildir og því var mögulegt að kaupandi þeirra og WoW Air hefðu losað gróðurhúsalofttegundir á grundvelli sömu losunarheimilda. Í bókinni Loftslagsréttur er þetta mál rakið og bent á vankanta í lögum sem þurfi að laga (Hrafnhildur Bragadóttir og A. Jóhannsdóttir, 2021, bls 313–316).

Eins og rakið er hér að framan tengjast loftslagsmál siðferðilegum og lagalegum skyldum þeirra þjóða sem mest losa, og alþjóðlegir samningar um viðbrögð við loftslagshamförum leggja

skyldur á herðar þjóða um að draga úr losun. Dómstólaleiðin er eitt þeirra tóla sem stuðningsfólk aðgerða í loftslagsmálum lítur nú til í þeim tilgangi að knýja ríki til frekari aðgerða.

Tvö þeirra mála, þar sem reynt er að knýja ríki til frekari aðgerða, eru rakin í nýlegri grein í Úlfljóti (Kári Hólmar Ragnarsson, 2022) en í báðum tilvikum töldu dómstólar að loftslagsaðgerðir viðkomandi ríkja fullnægðu ekki þeim kröfum sem leiða má af mannréttindaákvæðum. Íslenskar réttarfarsreglur um lögvarða hagsmuni voru einnig ræddar í greininni og bent á að þær gætu hindrað slíkar málsóknir hér á landi. Fram kemur í greininni að henni er ætlað að hefja umræður um æskilegt hlutverk dómstóla á þessu sviði.

6.6.4.3 Hafréttarmál

Í hafréttarsamningi Sameinuðu þjóðanna eru almennar reglur um notkun hafsins og þær leikreglur sem þjóðir heims eiga að fara eftir (Snólaug Árnadóttir, 2021). Loftslagsbreytingar hafa þegar haft áhrif á notkun hafsins, svo sem vegna hækkunar á yfirborði sjávar og nýrrar notkunar á haftengdum auðlindum, bæði sem viðbragð við og afleiðing af loftslagsbreytingum. Hærra sjávarborð og landrof getur breytt tilkalli ríkja til hafsvæða og er sérstaklega brýnt fyrir eylönd, svo sem Ísland, að tryggja sína efnahagslögsögu. Alþjóðalaganefnd Sameinuðu þjóðanna skoðar nú áhrif hærra sjávarborðs á hafrétt (Snólaug Árnadóttir, 2021).

Öll strandríki eiga tilkall til hafsvæða og kallast þau landhelgi, aðlægt belti, efnahagslögsaga og landgrunn. Úthaf og hið alþjóðlega hafbotnssvæði eru fyrir utan lögsögu ríkja. Að öllu jöfnu miðast tilkall ríkja til hafsvæða við strandlengju og skiptir því staðsetning hennar miklu máli. Landlukt ríki t.d. eiga ekki tilkall til neinna hafsvæða því tilkallið leiðir af strandlengjunni (Marston, 1994).

Við afmörkun strandlengju eru fyrst dregnar grunnlínur sem miðast vanalega við stórstraumsfjöruborð, eins og það birtist í opinberum gögnum strandríkis. Ytri mörk eru merkt frá þeim grunnlínum, það er landhelgi 12 sjómílur (sm) frá grunnlínu, aðlægt belti 24 sm, efnahagslögsaga 200 sm og landgrunn 200 sm eða lengra. Grunnlínur og ytri mörk færast með strandlengjum skv almennri túlkun hafréttarsamnings Sameinuðu þjóðanna. Loftslagsbreytingar hafa því áhrif vegna breytinga á hæð yfirborðs sjávar sem hefur bein áhrif á strandlengjuna, grunnlínur og ytri mörk (Árnadóttir, 2022).



Við afmörkun hafsvæða Íslands hafa að mestu leyti verið notaðar beinar grunnlínur í stað venjulegra stórstraumsgrunnlína. Ísland hefur því miðað við fjærstu mögulega grunnlínupunkta, svo sem eyjar, kletta og flæðisker, og þannig ýtt grunnlínum sínum lengra út en ella væri til að fá lögsögu yfir stærri hafsvæðum. En þar sem grunnlínur byggjast á einstaka grunnlínupunktum geta loftslagsbreytingar haft afdrifaríkar afleiðingar fyrir umfang hafsvæða, þ.e. ef þessir grunnlínupunktar, sem oft eru langt úti á hafi, fara á kaf vegna hækkunar sjávarborðs (Soons, 2020).

Í Hafréttasamningi Sþ (2. tl. 13. gr.) segir að ef flæðisker er utan 12 sjómílna megi ekki nota það sem grunnlínupunkt. Land, sem sokkið er í sæ, myndar ekki tilkall til hafsvæða. Nokkrir grunnlínupunktar gætu verið í hættu við Íslandsstrendur (Sjá alla grunlínupunkta í 1. gr. Laga um landhelgi, aðlægt belti, efnahagslögsögu og landgrunn nr. 41/1979 Alþingi, 1979), svo sem:

- Geirfugladrangur á Reykjaneshrygg, 16 sjómílur frá landi. Hann er sökkvandi flæðisker og of langt frá landi til að nota megi hann sem grunnlínupunkt. Grunnlínur eru dregnar að Geirfugladrangi einhliða og þar sem ekki eru mannvirki (t.d. viti) eða framkvæmdir til staðar á skerinu þá geta önnur ríki mótmælt því að víðátta íslenskra hafsvæða sé mæld þaðan.
- Kolbeinsey, nyrsta eyja Íslands, um 50 sjómílur frá landi. Þessi sökkvandi eyja hafði áhrif á afmörkun tvíhliða marka á milli Íslands og Danmerkur/Grænlands og hefur hækkandi sjávarmál ekki bein áhrif á gildi slíkra marka. Hins vegar getur hækkandi sjávarmál haft áhrif á venjulegar einhliða grunnlínur utan um Kolbeinsey og hafsvæði mæld frá þeim, þ.e. landhelgi og aðlægt belti.
- Hvítingar sunnan við Vatnajökul. Þetta sker er mögulega komið undir sjávarmál á lágflæði og hefur ekkert mannvirki og uppfyllir því að öllum líkindum ekki kröfur Hafréttarsamnings Sþ um grunnlínupunkt.

Tilvera grunnlínupunkta er afar mikilvæg fyrir afmörkun íslenskra hafsvæða og þ.a.l. fyrir tilkall Íslendinga til gjöfulla fiskimiða. Ríki geta misst lögsögu yfir hafsvæðum sem spanna hundruð og jafnvel þúsundir ferkílómetra þegar einstaka eyjar og klettar sökkva í sæ (Soons, 2020). Þannig getur hvarf Geirfugladrangs t.d. leitt til þess að ytri mörk efnahagslögsögunnar færist umtalsvert nær landi.

Hægt er að ráðast í að minnsta kosti tvær aðgerðir til að koma í veg fyrir breytingar á mörkum hafsvæða. Í fyrsta lagi er hægt að koma í veg fyrir breytingar með þar til gerðum mannvirkjum, svo sem með því að treysta flóðavarnir, að halda eyjum í upprunalegu horfi með mannvirkjum eða að tryggja að mannvirki séu á flæðiskerjum. Í öðru lagi er hægt að skila endurriti af kortum og skrám til aðalframkvæmdastjóra Sameinuðu þjóðanna en það hefur Ísland ekki gert. Kortin eða skrárnar eiga að sýna grunnlínur og ytri mörk með landfræðilegum hnitum staða og þessi skráning ýtir undir að grunnlínupunktar teljist alþjóðlega viðurkenndir, jafnvel þótt aðstæður breytist. Strandríki eiga að birta þessi kort eða skrár með landfræðilegum hnitum á tilhlýðilegan hátt og koma í vörslu hjá aðalframkvæmdastjóra Sameinuðu þjóðanna endurriti af þeim öllum (Samgöngustofa, 1985). Litið er svo á að mörk séu ekki formlega sett fyrr en þessu skilyrði er fullnægt (ICJ, 2022) og til þess nægir ekki að setja löggjöf um mörk hafsvæða eða gera tvíhliða samninga um mörk í hafi (Árnadóttir, 2022).

Í ljósi loftslagsbreytinga er mikilvægt að Ísland hafi betra eftirlit með grunnlínupunktum. Einnig er mikilvægt að íslenska ríkið taki afstöðu til þess hvort það telji að mörk hafsvæða séu (eða eigi að vera) stöðug. Viljum við leyfa öðrum ríkjum að halda sínum mörkum, þrátt fyrir miklar landfræðilegar breytingar, eða viljum við fylgja aldalangri túlkun Hafréttarsamningsins og líta svo á að mörk hafsvæða færist með strandlengjum? Ísland þarf einnig að taka ákvörðun um hvort það muni lýsa mörkum hafsvæða fyrir aðalframkvæmdastjóra Sameinuðu þjóðanna. Máli skiptir að festa mörkin formlega í sessi vegna þess að ákveðnir grunnlínupunktar standa tæpt en sú aðgerð getur líka orðið til þess að önnur ríki geri athugasemdir við mörkin og telji þau ólögmæt (Árnadóttir, 2021).

Heimildir

Alexander, Lisa V., Simon F.B. Tett og Trausti Jonsson (júl. 2005). „Recent observed changes in severe storms over the United Kingdom and Iceland“. Í: *Geophysical Research Letters* 32 (13), bls. 1–4. DOI: 10.1029/2005GL022371.

Althor, Glenn, James Watson og Richard Fuller (2016). „Global mismatch between greenhouse gas emissions and the burden of climate change“. Í: *Scientific Reports* 6, bls. 20281. DOI: 10.1038/srep20281.

Alþingi (1979). *Lög um landhelgi, aðlægt belti, efnahagslögsögu og landgrunn*. Alþingi. URL: https://www.althingi.is/lagas/nuna/1979041.html.

Amundsen, Helene (2012). „Illusions of Resilience? An Analysis of Community Responses to Change in Northern Norway.“ Í: *Ecology and Society* 17 (4). DOI: 10.5751/ES-05142-170446.

Animal Science, EAAP – European Federation of (2011). *Norfor - the Nordic feed evaluation system*. Gefið út af Harald Volden. Wageningen Academic Publishers. URL: https://link.springer.com/content/pdf/bfm:978-90-8686-718-9/1.pdf.

Anna María Bogadóttir (2022). *Jarðsetning*. Angústúra (forlag) útgefandi.

Attari, Shahzeen Z., Mary Schoen, Cliff I. Davidson, Michael L. DeKay, Wändi Bruine de Bruin, Robyn Dawes og Mitchell J. Small (2009). „Preferences for change: Do individuals prefer voluntary actions, soft regulations, or hard regulations to decrease fossil fuel consumption?“ Í: *Ecological Economics* 68.6, bls. 1701–1710. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2008.10.007.

Auður Pálsdóttir og Lára Jóhannsdóttir (2021). „Key Competencies for Sustainability in University of Iceland Curriculum“. Í: *Sustainability* 13, bls. 8945. DOI: 10.3390/su13168945.

Árnadóttir, Snjólaug (2021). „Climate Change and Efforts to Stabilise Otherwise Fluctuating Maritime Entitlements“. Í: *ELSA Iceland's Law Review: Helga* 1, bls. 53–70.

— (2022). *Climate Change and Maritime Boundaries: Legal Consequences of Sea Level Rise*. Cambridge University Press, bls. 340. ISBN: 978-1316517895.

Barkun, Michael (2013). *A Culture of Conspiracy: Apocalyptic Visions in Contemporary America*. Berkeley, California.: University of California Press.

Bauman, Whitney A. (2014). *Religion and Ecology: Developing a Planetary Ethic*. New York: Columbia University Press.

Báez, José C., Luis Gimeno og Raimundo Real (2021). „North Atlantic Oscillation and fisheries management during global climate change“. Í: *Reviews in Fish Biology and Fisheries 2021 31:2* 31 (2), bls. 319–336. DOI: 10.1007/S11160-021-09645-Z.

Bendell, Jem (2018). „Deep adaptation: A map for navigating climate tragedy“. Institute for Leadership and Sustainability (IFLAS) Occasional Papers Volume 2. University of Cumbria, Ambleside, UK. Unpublished.

Bergmann, Eirikur (jan. 2018). „Conspiracy and populism: The politics of misinformation“. Í: *Conspiracy and Populism: The Politics of Misinformation*, bls. 1–186. DOI: 10.1007/978-3-319-90359-0/COVER.

— (2020). „Neo-Nationalism“. Í: *Neo-Nationalism*. DOI: 10.1007/978-3-030-41773-4.

Better Work programme (2013). *Women, work & development: evidence from Better Work*. URL: https://labordoc.ilo.org/discovery/delivery/41ILO_INST:41ILO_V1/1270209900002676.

Bjarki Bragason (2019). *Þrjúþúsund og níu ár*. Sýning í Nýlistasafninu og tillaga að útilistaverki í Kópavogi, áætluð verklok 2023.

Bressler, R. D. (2021). „The Mortality Cost of Carbon“. Í: *Nature Communications* 12, bls. 4467. URL: https://doi.org/10.1038/s41467-021-24487-w.

Bressler, R. D. og Geoffrey Heal (2022). *Valuing Excess Deaths Caused by Climate Change*. Tæknileg skýrsla. National Bureau of Economic Research.

Bridge, Damian J. (2022). „The ethics of climate change: a systematic literature review“. Í: *Accounting and Finance* 62.2, bls. 2651–2665. DOI: 10.1111/acfi.12877.

Bryndís Snæbjörnsdóttir og Mark Wilson (maí 2020). „Bani boðberans. Rýnt í teikn hækkandi sjávarmála“. Í: *Ritið* (1), bls. 171–181. DOI: 10.33112/ritid.20.1.8.

Calhoun, Craig, Eduardo Mendieta og Jonathan VanAntwerpen, ritstj. (2013). *Habermas and Religion*. Cambridge, UK: Polity Press.

Carter, Timothy R., Magnus Benzie, Emanuele Campiglio, Henrik Carlsen, Stefan Fronzek, Mikael Hildén, Christopher P.O. Reyer og Chris West (júl. 2021). „A conceptual framework for cross-border impacts of climate change“. Í: *Global Environmental Change* 69, bls. 102307. DOI: 10.1016/J.GLOENVCHA.2021.102307.

Clarke, Jack, Jukka Heinonen og Juudit Ottelin (2017). „Emissions in a decarbonised economy? Global lessons from a carbon footprint analysis of Iceland“. Í: *Journal of Cleaner Production* 166, bls. 1175–1186. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2017.08.108.

Climate Laws (2023). Climate Laws. URL: https://climate-laws.org/ (skoðað 07.06.2023).

Communications Networks Content, European Commission Directorate-General for og Technology (2018). *A multi-dimensional approach to disinformation : report of the independent High level Group on fake news and online disinformation*. Publications Office. DOI: doi/10.2759/739290.

Cook, David og Lára Jóhannsdóttir (2021). „Impacts, Systemic Risk and National Response Measures Concerning COVID-19—The Island Case Studies of Iceland and Greenland“. Í: *Sustainability* 13 (15). DOI: 10.3390/su13158470.

Cousins, Elicia M. (maí 2021). „Mobilizing motherhood: The gendered burden of environmental protection“. Í: *Sociology Compass* 15 (5). DOI: 10.1111/soc4.12879.

Dietz, Thomas, Amy Dan og Rachael Shwom (2007). „Support for Climate Change Policy: Social Psychological and Social Structural Influences“. Í: *Rural Sociology* 72.2, bls. 185–214.

Dillman, K., J. Heinonen og B. Davíðsdóttir (2023). „A longitudinal analysis of the strong social and ecological sustainability of Icelandic mobility provisioning“. Submitted to *Global Environmental Change*.

Douglas, Karen, Robbie Sutton og Aleksandra Cichocka (2017). „The Psychology of Conspiracy Theories“. Í: *Current Directions in Psychological Science*.

Dzialo, Liz (okt. 2017). „The feminization of environmental responsibility: a quantitative, cross-national analysis“. Í: *Environmental Sociology* 3 (4), bls. 427–437. DOI: 10.1080/23251042.2017.1327924.

Edlund, Jonas (2006). „Trust in the Capability of the Welfare State and General Welfare State Support: Sweden 1997-2002“. Í: *Acta Sociologica* 49.4, bls. 395–417. DOI: 10.1177/0001699306071681.

Edlund, Jonas og Arvid Lindh (2013). „Institutional trust and welfare state support: on the role of trust in market institutions“. Í: *Journal of Public Policy* 33.3, bls. 295–317. DOI: 10.1017/s0143814x13000160.

Eiríkur Bergmann (2021). *Þjóðarávarpið. Popúlísk þjóðernishyggja í hálfa öld*. JPV útgáfa.

Fairbrother, Malcolm, Ingemar Johansson Sevä og Joakim Kulin (2019). „Political Trust and the Relationship between Climate Change Beliefs and Support for Fossil Fuel Taxes: Evidence from a Survey of 23 European Countries“. Í: *Global Environmental Change* 59.

Faith for Nature (2020). Our Sacred Commitment declaration. URL: faithfornature.org/wp-content/uploads/2020/10/Declaration-FINAL.pdf (skoðað 08.08.2023).

Feser, F., M. Barcikowska, O. Krueger, F. Schenk, R. Weisse og L. Xia (2015). „Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review“. Í: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141 (687), bls. 350–382. DOI: 10.1002/QJ.2364.

Flyvbjerg, Bent (2014). „What You Should Know about Megaprojects and Why: An Overview“. Í: *Project Management Journal* 45 (2), bls. 6–19. DOI: 10.1002/pmj.21409.

Francis, Pope (2015). „Encyclical letter: Laudato si. On Care of our Common Home“. Í: *Sobre o Cuidado da Casa Comum*.

Fridays for Future (2023). URL: https://fridaysforfuture.org/.

Gardiner, Stephen M. (2011). *A Perfect Moral Storm: The Ethical Challenge of Climate Change*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Gardiner, Stephen M., Simon Caney, Dale Jamieson og Henry Shue (2010). *Climate Ethics: Essential Readings*. Online edition. New York: Oxford Academic.

Gardiner, Stephen M. og L. Hartzell-Nichols (2012). „Ethics and Global Climate Change“. Í: *Nature Education Knowledge* 3 (10). URL: https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/ethics-and-global-climate-change-84226631/.

Gebara, Ivone (1999). *Longing for Running Water: Ecofeminism and Liberation*. Fortress Press.

— (2017). „Women's Suffering, Climate Injustice, God, and Pope Francis's Theology: Some Insights from Brazil“. Í: *Planetary Solidarity: Global Women's Voices on Christian Doctrine and Climate Justice*, bls. 67–79.

Glazebrook, Trish (2011). „Women and climate change: A case-study from northeast Ghana“. Í: *Hypatia* 26.4, bls. 762–782.

Global Footprint Network (2023). *Earth Overshoot Day 2022 home - MoveTheDate*. URL: https://www.overshootday.org/.

Gottlieb, Roger S., ritstj. (1996). *This Sacred Earth: Religion, Nature, Environment*. New York og London: Routledge.

Grafton, R. Quentin (2010). „Adaptation to climate change in marine capture fisheries“. Í: *Marine Policy* 34 (3), bls. 606–615. DOI: 10.1016/J.MARPOL.2009.11.011.

Group, ISSP Research (2022). *International Social Survey Programme: Environment IV - ISSP 2020*. DOI: 10.4232/1.13921.

Guðbjörg R. Jóhannesdóttir, Sigríður Þorgeirsdóttir og Elsa Haraldsdóttir (2021). „Líkamleg gagnrýnin hugsun: Fyrstu persónu aðferðir gagnrýninnar hugsuna“. Í: *Tímarit Kennslumiðstöðvar Háskóla Íslands* 8, bls. 52–55.

Guðbjörg Rannveig Jóhannesdóttir (2020). *Vá!: ritgerðir um fagurfræði náttúrunnar*. Heimspekistofnun Háskóla Íslands.

Guðmundsdóttir, Arnfríður (2019). „How climate change is changing the lives of women and why we need to know about it“. Í: *Dialog* 58.2, bls. 90–90.

Halldór Björnsson (2008). *Gróðurhúsaáhrif og Loftslagsbreytingar*. Hið Íslenska Bókmenntafélag.

Hammar, Henrik og Sverker C. Jagers (2006). „Can trust in politicians explain individuals' support for climate policy? The case of CO2 tax“. Í: *Climate Policy* 5.6, bls. 613–625. DOI: 10.1080/14693062.2006.9685582.

Hanna Styrmisdóttir og Hulda Stefánsdóttir (2021). *Nature in Transition, Shifting Identities*. Exhibition at the Nordic House Reykjavik, Iceland. Reykjavik, Iceland.

Harring, Niklas (2018). „Trust and state intervention: Results from a Swedish survey on environmental policy support“. Í: *Environmental Science & Policy* 82, bls. 1–8. DOI: 10.1016/j.envsci.2018.01.002.

Heck, Nadine, Michael W. Beck og Borja Reguero (okt. 2021). „Storm risk and marine fisheries: a global assessment“. Í: *Marine Policy* 132, bls. 104698. DOI: 10.1016/J.MARPOL.2021.104698.

Hessel, Dieter T. og Rosemary Radford Ruether (2000). *Christianity and Ecology: Seeking the Well-being of Earth and Humans*.

Hlynur Orri Stefánsson (2022). „Skyldur Íslands í loftslagsmálum“. Í: *Hugur*.

Hobday, Alistair J., Kevern Cochrane, Nicola Downey-Breedt, James Howard, Shankar Aswani, Val Byfield, Greg Duggan, Elethu Duna, Leo X.C. Dutra, Stewart D. Frusher, Elizabeth A. Fulton, Louise Gammage, Maria A. Gasalla, Chevon Griffiths, Almeida Guissamulo, Marcus Haward, Astrid Jarre, Sarah M. Jennings, Tia Jordan, Jessica Joyner, Narayana Kumar Ramani, Swathi Lekshmi Perumal Shanmugasundaram, Willem Malherbe, Kelly Ortega Cisneros, Adina Paytan, Gretta T. Pecl, Éva E. Plagányi, Ekaterina E. Popova, Haja Razafindrainibe, Michael Roberts, Prathiba Rohit, Shyam Salim Sainulabdeen, Warwick Sauer, Sathianandan Thayyil Valappil, Paryiappanal Ulahannan Zacharia og E. Ingrid van Putten (jún. 2016). „Planning adaptation to climate change in fast-warming marine regions

with seafood-dependent coastal communities“. Í: *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 26 (2), bls. 249–264. ISSN: 15735184. DOI: 10.1007/S11160-016-9419-0/FIGURES/5.

Hrafnhildur Bragadóttir og Aðalheiður Jóhannsdóttir (2021). *Loftslagsréttur*. Reykjavík: Háskólaútgáfan, bls. 362.

Hultman, Martin og Paul M Pulé (2018). *Ecological masculinities: Theoretical foundations and practical guidance*. Routledge.

Hvítbók (2021). *Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum - Drög að stefnu*. Starfshópur um stefnu stjórnvalda varðandi aðlögun að loftslagsbreytingum. Stjórnarráð Íslands: Umhverfis- og auðlindaráðuneytið.

ICJ (2022). „Alleged Violations of Sovereign Rights and Maritime Spaces in the Caribbean Sea (Nicaragua v Colombia) (Judgment)“. Í: *ICJ Reports*. International Court of Justice.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press.

— (2014a). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 1132.

— (2014b). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects*. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 1133–1197.

IPCC Working Group II (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3056. DOI: 10.1017/9781009325844.

Jackson og Humphrey (2022). *Yale Experts Explain Intersectionality and Climate Change*. URL: sustainability.yale.edu/explainers/yale-experts-explain-intersectionality-and-climate-change.

Jenkins, Willis, Evan Berry og Luke Beck Kreider (2018). „Religion and climate change“. Í: *Annual Review of Environment and Resources* 43, bls. 85–108. DOI: 10.1146/annurev-environ-102017-025819.

Johnson, Elizabeth A. (2014). *Ask the Beasts: Darwin and the God of Love*. London: Bloomsbury.

Jolley, Daniel og Karen M. Douglas (2014). „The Social Consequences of Conspiracism: Exposure to Conspiracy Theories Decreases Intentions to Engage in Politics and to Reduce One's Carbon Footprint“. Í: *British Journal of Psychology* 105.1, bls. 35–56. DOI: 10.1111/bjop.12018.

Jóhannes Sveinbjörnsson og Bragi L. Ólafsson (1999). *Orkuþarfir sauðfjár og nautgripa í vexti með hliðsjón af mjólkurfóðureiningakerfi*. Ráðunautafundur 1999 204-217.

Jóhannsdóttir, Lára og David Cook (sep. 2019). „Systemic risk of maritime-related oil spills viewed from an Arctic and insurance perspective“. Í: *Ocean and Coastal Management* 179, bls. 104853. DOI: 10.1016/J.OCECOAMAN.2019.104853.

Jóhannsdóttir, Lára, David Cook og Gisele M. Arruda (júl. 2021). „Systemic risk of cruise ship incidents from an Arctic and insurance perspective“. Í: *Elementa* 9 (1). DOI: 10.1525/ELEMENTA.2020.00009/118040.

Jónas Baldursson, Eva Margrét Jónudóttir og Magnús H. Jóhannsson (2020). *Greining á magni lífrænna áburðarefna á Íslandi og tækifaeri til aukinnar nýtingar*. Matís ohf. URL: https://matis.is/wp-content/uploads/Matis-skyrsla-sjalfbaer-aburdur-2022.pdf.

Katla Kjartansdóttir og Kristinn Schram (2020a). „„Fólk í feldklæðum“. Lundar og hvítabirnir á mannöld“. Í: *Ritið. Náttúruhvörf: samband fólks og dýra*. URL: https://ritid.hi.is/index.php/ritid/article/view/92/88.

— (maí 2020b). „Mannskepnur og önnur dýr“. Í: *Ritið. Náttúruhvörf: samband fólks og dýra* (1), bls. 1–6. DOI: 10.33112/ritid.20.1.1.

— (2020c). „Mobilising the Arctic. Puffins and Polar Bears in Transnational Interplay“. Í: *Mobility and Transnational Iceland: Current Transformations and Global Entanglements*. Gefið út af Loftsdóttir, Skaptadóttir og Hafsteinsson. Háskólaútgáfan, bls. 209–228.
— (2020d). „Samband fólks og dýra“. Í: *Ritið. Náttúruhvörf: samband fólks og dýra* 1 (20).
Katrín María Káradóttir (2019). *FishSkin*. URL: https://www.fishskinhorizon.org.
Kári Hólmar Ragnarsson (2022). „Loftslagsváin og dómstólar“. Í: *Úlfljótur*, bls. 3–13. URL: https://ulfljotur.com/2022/01/21/loftslagsvain-og-domstolar/.
Kennedy, Emily og Liz Dzialo (okt. 2015). „Locating Gender in Environmental Sociology“. Í: *Sociology Compass* 9. DOI: 10.1111/soc4.12303.
Kim, Grace Ji-Sun og Hilda P. Koster, ritstj. (2017). *Planetary Solidarity: Global Women's Voices on Christian Doctrine and Climate Justice*. Fortress Press.
Kinnvall, Catarina og Helle Rydstrøm (2021). *Climate hazards, disasters, and gender ramifications*. Routledge, bls. 288. URL: https://www.routledge.com/Climate-Hazards-Disasters-and-Gender-Ramifications/Kinnvall-Rydstrom/p/book/9780367727895.
Lam, San-Pui (2015). „Predicting support of climate policies by using a protection motivation model“. Í: *Climate Policy* 15.3, bls. 321–338. DOI: 10.1080/14693062.2014.916599.
Malm, Andreas (2021). *How to Blow Up a Pipeline*. Verso Books.
Mannréttindaskrifstofa Íslands (2023). *Mannréttindayfirlýsing Sameinuðu þjóðanna*. URL: www.humanrights.is/is/mannrettindi-og-island/helstu-samningar-og-yfirlysingar/sameinudu-thjodirnar/mannrettindayfirlysing-sameinudu-thjodanna.
Marston, Geoffrey (1994). „The Stability of Land and Sea Boundary Delimitations in International Law“. Í: *Maritime boundaries: World Boundaries, vol 5*. Gefið út af Gerald Blake. (p. 154). London: Routledge, bls. 144–168.
Matsuura, Aya og Carly Teng (2020). *Understanding the gender composition and experience of ready-made garment (RMG) workers in Bangladesh*. Tæknileg skýrsla. International Labour Organization.
McCauley, D. og R. Heffron (2019). „Just transition: integrating climate, energy and environmental justice“. Í: *Energy Policy* 119, bls. 1–7.
McCauley, Darren, Vasna Ramasar, Raphael J. Heffron, Benjamin K. Sovacool, Desta Mebratu og Luis Mundaca (2019). „Energy justice in the transition to low carbon energy systems: Exploring key themes in interdisciplinary research“. Í: *Applied Energy* 233-234, bls. 916–921.
McFague, Sallie (1993). *The Body of God. An Ecological Theology*. Fortress Press.
— (2001). *Life Abundant: Rethinking Theology and Economy for a Planet in Peril*. Fortress Press.
— (2013). *Blessed are the Consumers: Climate Change and the Practice of Restraint*. Fortress Press.
— (2008). *A New Climate for Theology. God, the World, and Global Warming*. Fortress Press.
Mescher, Marcus (2020). *The Ethics of Encounter: Christian Neighbor Love as a Practice of Solidarity*. Maryknoll: Orbis Books.
Méjean, Aurélie, Antonin Pottier, Stéphane Zuber og Marc Fleurbaey (2023). „Opposite ethical views converge under the threat of catastrophic climate change“. Í: *Ecological Economics* 212, bls. 107887. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107887.
Milfont, Taciano L., Isabel Richter, Chris G. Sibley, Marc S. Wilson og Ronald Fischer (sep. 2013). „Environmental consequences of the desire to dominate and be superior“. Í: *Personality & social psychology bulletin* 39 (9), bls. 1127–1138. DOI: 10.1177/0146167213490805.
Moltmann, Jürgen. (2012). *Ethics of hope*. Fortress Press, bls. 271. ISBN: 9780800698584.
Morino, Costanza (nóv. 2018). „The Hidden Hazard Of Melting Ground Ice In Northern Iceland“. Í: DOI: 10.21954/OU.RO.0000E1EC.
Nash, James A. (1991). *Loving Nature: Ecological Integrity and Christian Responsibility*. Nashville: Abingdon Press.

Newell, Peter, Sanjay Srivastava, Lars Otto Naess, Gerardo Alfonso Torres Contreras og Richard Price (2020). *Towards Transformative Climate Justice: Key Challenges and Future Directions for Research*. IDS Working Paper 540. Brighton: Institute of Development Studies.

Nordic Council of Ministers (2021). *Mapping Education for Sustainability in the Nordic Countries*. Tæknileg skýrsla. URL: pub.norden.org/temanord2021-511/temanord2021-511.pdf.

Nunez, Theodore W. (1998). „Earth Community, Earth Ethics. By Larry L. Rasmussen.“ Í: *Horizons* 25 (2), bls. 332–333. DOI: 10.1017/S036096690003142X.

O'Neill, John, Andrew Light og Alan Holland (2012). „Environmental Ethics“. Í: *Nature Education Knowledge* 3.10, bls. 7.

OXFAM (2020). *Confronting carbon inequality: OXFAM media briefing 21 September 2020*.

Ólafur Páll Jónsson (2007). *Náttúra, vald og verðmæti*. Icelandic. Umhverfisrit Bókmenntafélagsins. Hið íslenska bókmenntafélag. ISBN: 9979662034.

— (2012). „Lífskjör og Réttlæti“. Í: *Stjórnmál & stjórnsýsla* 1.8, bls. 219–230.

— (2020). *Annáll um líf í Annasömum heimi*. Sæmundur. ISBN: 9789935493774.

— (2021). *Jörð í kófi*. Skoðanagrein. URL: https://kjarninn.is/skodun/jord-i-kofi/.

Ólafur Páll Jónsson og Allyson Macdonald (des. 2021). „Pack for Sustainability: Navigating through Uncharted Educational Landscapes“. Í: *Sustainability 2021, Vol. 13, Page 13555* 13 (24), bls. 13555. DOI: 10.3390/SU132413555.

Ólafur Páll Jónsson, Jakob Frímann Þorsteinsson, Hervördur Ölmur Árnadóttur og Karen Rut Gísladóttur (2021). „On Being in Nature: Aldo Leopold as an Educator for the 21st Century“. Í: *Philosophical Inquiry in Education* 27.2, bls. 106–121. URL: https://doi.org/10.7202/1074041ar.

Palomino, Elisa og Katrin Káradóttir (2021). „The Case of Fish Skin: A Historical Material Assimilated as an Innovative Sustainable Material for Fashion“. Í: *Fashion: Culture, Commerce, Craft, and Identity*. Brill, bls. 185–199. ISBN: 978-90-04-44658-8.

Pausz, Thomas (2021). *Making New Land*. URL: https://www.pausz.org/Work/Making-New-Land-Part-1.

Páll Skúlason og Guðmundur Ingólfsson (2005). *Hugleiðingar við Öskju: um samband manns og náttúru*. Háskólaútgáfan.

Prior, Tahnee Lisa og Leena Heinämäki (2017). „The rights and role of indigenous women in climate change regime“. Í: *Arctic Review on Law and Politics* 8.

project, CliCNord (2021). *CliCNord*. URL: https://www.clicnord.org/about.

Pulé, Paul og Martin Hultman (2019). „Industrial/breadwinner masculinities: Understanding the complexities of climate change denial“. Í: *Climate Hazards, Disasters, and Gender Ramifications*. 1st Edition. Routledge, bls. 12.

Rannsóknarnefnd Alþingis (2010). *Aðdragandi og orsakir falls íslensku bankanna 2008 og tengdir atburðir*.

Rasmussen, Larry L. (2013). *Earth-Honoring Faith: Religious Ethics in a New Key*. Oxford University Press.

Rhodes, Ekaterina, Jonn Axsen og Mark Jaccard (2014). „Does effective climate policy require well-informed citizen support?“ Í: *Global Environmental Change* 29, bls. 92–104. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2014.09.001.

Ritchie og Roser (2020). *CO2 emissions - Our World in Data*. URL: https://ourworldindata.org/co2-emissions.

Robb, Carol S. (2010). *Wind, Sun, Soil, Spirit: Biblical Ethics and Climate Change*. Minneapolis: Fortress Press.

Robinson, Saffron A. og David A. Carlson (2021). „A just alternative to litigation: applying restorative justice to climate-related loss and damage“. Í: *Third World Quarterly* 42.6, bls. 1384–1395.

Róbert H. Haraldsson og Þorvarður Árnason (1994). *Náttúrusýn: safn greina um siðfræði og náttúru*, bls. 356. ISBN: 9789979915904.

Ruether, Rosemary Radford (1992). *Gaia & God: An Ecofeminist Theology of Earth Healing*. Harper San Francisco.
— (1993). *The Body of God: An Ecological Theology*. Fortress Press.
— ritstj. (1996). *Women Healing Earth: Third World Women on Ecology, Feminism, and Religion*. Orbis Books.
Sainsbury, Nigel C., Martin J. Genner, Geoffrey R. Saville, John K. Pinnegar, Clare K. O'Neill, Stephen D. Simpson og Rachel A. Turner (2018). „Changing storminess and global capture fisheries". Í: *Nature Climate Change* 8, bls. 655–659. DOI: 10.1038/s41558-018-0206-x.
Samgöngustofa (1985). *United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS). Icelandic Translation*. Sjá 16. gr. Hafréttarsamnings Sþ. URL: https://eplica.samgongustofa.is/media/siglingar/skyrslur/UNCLOS_IS.pdf.
Santmire, Paul (1985). *The Travail of Nature: The Ambiguous Ecological Promise of Christian Theology*. Minneapolis: Fortress Press.
Schram, K. og J. Jónsson (2019). *Visitations: The Social and Cultural History of Polar Bear Narratives in Iceland and the North Atlantic*. Gefið út af Convery Nevin og Davis Woodbridge. Boydell & Brewer.
Schram, Kristinn og Andrea Fiocca (2017). „Mobility and change in the Arctic an ethnographic case study of sled dogs in Greenland". Í: *Arctic and Antarctic* 11.
Schwarcz, Steven L. (2008). „Systemic Risk". Í: *Georgetown Law Journal* 97 (163). URL: https://papers.ssrn.com/abstract=1008326.
Shukla, AR, Jim Skea, A Reisinger, R Slade, R Fradera, M Pathak, A Al Khourdajie, M Belkacemi, R van Diemen, A Hasija, G Lisboa, S Luz, J Malley, D McCollum, S Some og P Vyas (2022). „Summary for Policymakers". Í: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz og J. Malley. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.001.
Siðmennt (2019). Reykjavíkuryfirlýsing Húmanista um loftslagsvána. URL: www.sidmennt.is/um-sidmennt/frettir/reykjavikuryfirlysing-humanista-um-loftslagsvana/ (skoðað 08.08.2023).
Sigfúsdóttir, Ó. G. (2022). „Art as Disruptive Catalyst: Snæbjörnsdóttir/Wilson on Their Practice in and Beyond the World of Art". Í: *Art in Iceland* (2), bls. 185–203.
Sigríður Ingibjörg Ingadóttir, Henný Hinz og Þórunn Sveinbjarnardóttir (2021). *Réttlát Umskipti - Leiðin að kolefnislausu samfélagi*. URL: https://www.asi.is/media/317116/rettlat_umskipti_loka_mars21.pdf.
Sigríður Þorgeirsdóttir og Donata Schöller (2019). „Líkamleg gagnrýnin hugsun: Hvarfið að reynslunni og umbreytingarmáttur þess". Í: *Hugur: tímarnir um heimspeki*, bls. 148–164.
Singer, Peter (2009). „Speciesism and moral status on JSTOR". Í: *Metaphilosophy* 40 (3/4), bls. 567–581. URL: https://www.jstor.org/stable/24439802.
Snólaug Árnadóttir (2021). „Breytingar á hafréttarsamningi Sameinuðu þjóðanna". Í: *Úlfljótur* 74.3, bls. 395–420.
Soons, Alfred (2020). „The Effects of Sea Level Rise on Baselines and Outer Limits of Maritime Zones". Í: *New Knowledge and Changing Circumstances in the Law of the Sea*. Gefið út af Tomas Heidar. (p. 366). Leiden: Brill Nijhoff, bls. 358–381.
Sóllilja Bjarnadóttir (2020). *Do people behave as their family and friends? The role of social networks for pro-environmental behavior in Iceland*. Tæknileg skýrsla. University of Iceland.
— (2021). *Þekking í þágu loftslagsmála*. Loftslagsráð og Stofnun Sæmundar fróða við Háskóla Íslands.
Sóllilja Bjarnadóttir, Malcolm Fairbrother, Sigrún Ólafsdóttir og Jason Beckfield (2023a). „Institutional trust and climate policy preference: Evidence from Iceland". Óbirt.

Sóllilja Bjarnadóttir, Sigrún Ólafsdóttir og Helga Ögmundardóttir (2023b). *Hvað finnst Íslendingum um umhverfismál og loftslagsbreytingar?* Tæknileg skýrsla. Félagsvísindastofnun.

Sólveig Anna Bóasdóttir (2016). „Trú og loftslagsbreytingar. Yfirlýsingar trúarleiðtoga og kirknasamtaka í aðdraganda COP21“. Í: *Ritið, Tímarit Hugvísindastofnunar* 1, bls. 73–99.

— (2017). *Guð og gróðurhúsaáhrif. Kristin siðfræði á tímum loftslagsbreytinga.* Háskólaútgáfan.

— (2018). „Hvernig á ég að breyta og hvers má ég vona? Um von og vonleysi í guðfræðilegri og siðfræðilegri orðræðu um loftslagsbreytingar“. Í: *Ritröð Guðfræðistofnunar, Studia Theologica Islandica* XXI. URL: https://ojs.hi.is/ritrodgudfraedistofnunar/article/view/2888.

Sparkman, Gregg, Lauren Howe og Greg Walton (okt. 2021). „How social norms are often a barrier to addressing climate change but can be part of the solution“. Í: *Behavioural Public Policy* 5 (4), bls. 528–555. DOI: 10.1017/BPP.2020.42.

Sterling, Stephen (2001). „Sustainable education – Re-visioning learning and change“. Í: URL: https://www.researchgate.net/publication/289505456.

Stern, Nicholas Herbert (2007). *The Economics of Climate Change: the Stern review.* Cambridge University Press.

THE (2020). *The World University Rankings. University of Iceland.* Times Higher Education. URL: https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings/university-iceland (skoðað 2020).

Thomas Pausz (2017). *Ekki-blóm/Non-flowers for a hover-fly.* Rannsóknarverkefni unnið í samstarfi við National Center for Biological Sciences í Bangalore á Indlandi. URL: https://www.pausz.org/Work/Nonflowers.

— (2018). *Making New Land.* Sýning í Votlendisskálanum á Arkítektúrtvíæringnum í Feneyjum. URL: http://swamp.lt/.

Treen, Kathie M. d'I., Hywel TP Williams og Saffron J. O'Neill (2020). „Online misinformation about climate change“. Í: *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 11.5, e665.

Tuana, Nancy (2020). „From a Lifeboat Ethic to Anthropocenean Sensibilities“. Í: *Environmental Philosophy* 17 (1).

Umhverfisstofnun (2023). *Saman gegn sóun. Textíll og jafnrétti.* URL: https://samangegnsoun.is/textillogjafnretti/ (skoðað 08.08.2023).

UN (2015). „Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development“. Í: *United Nations General Assembly.*

UNESCO (2017). *Education for Sustainable Development Goals: Learning Objectives.* Paris, France: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO), bls. 1–67.

— (án árs). *Climate change: ethical and social dimensions.* URL: https://www.unesco.org/en/climate-change/ethical-social-dimensions.

Ungir Umhverfissinnar (2022). *UU - Samþykktir.* URL: https://www.umhverfissinnar.is/sam%C3%BEykktir.

— (2023a). *Lok herferðarinnar #AÐGERÐIR STRAX.* URL: https://www.umhverfissinnar.is/post/lok-herferdarinnar-adgerdir-strax.

— (2023b). *Samantekt frá landsfundi UU um loftslagsmál.* URL: https://www.umhverfissinnar.is/post/samantekt-fr%C3%A1-landsfundi-uu-um-loftslagsm%C3%A1l.

Uscinski, Joseph E. og Joseph M. Parent (2014). *American Conspiracy Theories.* Oxford University Press.

Van Prooijen, Jan-Willem, André P. M. Krouwel og Thomas V. Pollet (2015). „Political Extremism Predicts Belief in Conspiracy Theories“. Í: *Social Psychological and Personality Science* 6.5, bls. 570–578. DOI: 10.1177/1948550614567356.

Vare, Paul og William Scott (2007). „Learning for a Change“. Í: *Journal of Education for Sustainable Development* 1 (2), bls. 191–198. DOI: 10.1177/097340820700100209.

Verkefnisstjórn aðgerðaráætlunar í loftslagsmálum (2020). *Aðgerðaráætlun í loftslagsmálum 2 útgáfa*. Tæknileg skýrsla. URL: https://www.stjornarradid.is/verkefni/umhverfi-og-natturuvernd/loftslagsmal/adgerdaaaetlun-i-loftslagsmalum/.

Vestergård, Louise Ormstrup og Lars Johan Rustad (ágú. 2022). „Food self-sufficiency in five Nordic island societies“. Í: DOI: 10.6027/PB2022:4.2001-3876.

Wang, X. og L. Kevin Lo (2021). „Just transition: a conceptual review“. Í: *Energy Research & Social Science* 82, bls. 102291.

White, Lynn Jr. (1967). „Historical Roots of Our Ecologic Crisis“. Í: *Science* 155.3767, bls. 1203–1207. DOI: 10.1126/science.155.3767.1203.

Wilson (2006). *Nanoq : flat out and bluesome : a cultural life of polar bears*. Gefið út af Bryndís Snæbjörnsdóttir og Mark Wilson. Black Dog Pub., bls. 190. ISBN: 1904772390.

Wirzba, Norman (2021). *This Sacred Life: Humanity's Place in a Wounded World*. Cambridge: Cambridge University Press.

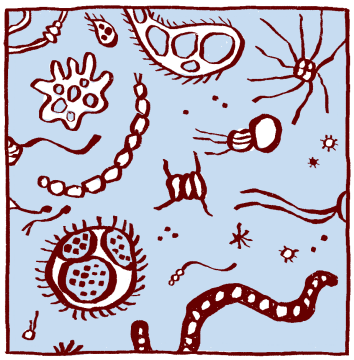
Þjóðkirkja Íslands (2023). Umhverfisstefna. URL: kirkjan.is/kirkjan/graen-kirkja/umhverfistefna/ (skoðað 08.08.2023).

Æsa Sigurjónsdóttir (2020). „Sjónarspil tegundanna: Hvalurinn í öllum sínum (líf) myndum.“ Í: *Ritið*, bls. 7–47.

KAFLI

7

LÝÐHEILSA, HEILBRIGÐISKERFIÐ OG SAMFÉLAG





Efnisyfirlit kafla

7.1 Inngangur 226
7.1.1 Helstu hugtök og forsendur 226
7.2 Staðan og horfur á heimsvísu samkvæmt AR6 227
7.3 Staða og horfur í Evrópu samkvæmt AR6 229
7.3.1 Dauðsföll, veikindi og slys vegna hita og öfga í veðri 230
7.3.2 Loftgæði 230
7.3.3 Smitsjúkdómar 230
7.3.4 Ofnæmi og frjókorn 230
7.3.5 Vinnutengd heilsa og framleiðni 231
7.3.6 Gæði matvæla og fæðuöryggi 231
7.3.7 Andleg heilsa og líðan 231
7.3.8 Fólksflutningar og tilfærsla fólks 231
7.4 Loftslagsbreytingar og lýðheilsa í íslensku samhengi 231
7.4.1 Mannfjöldaspár og fólksflutningar 232
7.4.2 Heilsa, vellíðan og samfélag 233
7.4.3 Heilbrigðiskerfið 239

Samantekt

- Samkvæmt Alþjóðaheilbrigðisstofnuninni eru loftlagsbreytingar stærsta heilsufarsógnin sem mannkynið stendur frammi fyrir.
- Andleg, líkamleg og félagsleg heilsa og líðan fólks ræðst af flóknu samspili einstaklinga við nánasta umhverfi og aðstæður, þar með talið náttúrlegt umhverfi. Fyrirliggjandi staða þekkingar úr 6. matshring IPCC staðfestir að loftslagsbreytingar ógna heilsu fólks og vistkerfum um allan heim.
- Á heimsvísu valda loftslagsbreytingar m.a. aukningu í algengi smitbærra og ósmitbærra sjúkdóma, ótímabærra dauðsfalla og vannæringar í ýmsum myndum. Loftslagsbreytingar hafa neikvæð áhrif á andlega heilsu og líðan með beinum og óbeinum hætti og eru í vaxandi mæli ástæða þvingaðra fólksflutninga, tilfærslu fólks og átaka.
- Ljóst er að samfélög standa misjafnlega að vígi og upphafspunkturinn fyrir loftslagsþolna þróun er ólíkur eftir því hvar ber niður innan og á milli landa. Samfélög, þar sem ójöfnuður er mikill, hafa minni viðnámsþrótt gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga.
- Í Evrópu, líkt og annars staðar í heiminum, standa viðkvæmir og jaðarsettir hópar alla jafna hallari fæti gagnvart afleiðingum loftslagsbreytinga, s.s. flóðum, hita og þurrki sem og heilsufarsógnum vegna útbreiðslu sjúkdóma sem aftur leiðir til aukins ójöfnuðar. Á Íslandi liggur nú þegar fyrir töluverð þekking á áhrifum náttúruhamfara á einstaklinga og samfélög.
- Sviðsmyndir Eurostat, hagstofu Evrópusambandsins, taka sem stendur ekki tillit til mögulegra áhrifa loftslagsbreytinga á fólksflutninga. Það sama gildir um mannfjöldaspár fyrir Ísland.
- Loftmengun er ein stærsta lýðheilsuógnin í Evrópu og veldur aukinni sjúkdómabyrði og dauðsföllum vegna öndunarfærasjúkdóma, hjarta- og æðasjúkdóma, krabbameina auk neikvæðra áhrifa á geðheilsu. Þá eru vísbendingar um að loftmengun kunni að stuðla að heilabilun.
- Þegar kemur að smitsjúkdómum stafar Evrópubúum einna helst ógn af sjúkdómum sem berast með mítlum. Eingöngu er tímaspursmál hvenær smit fara að berast úr mítlunum í fólk hér á landi. Moskítóflugur eru annað dæmi um smitferjur sem hafa til þessa ekki náð að nema land á Íslandi.
- Styrkur frjókorna í lofti mun aukast um alla Evrópu, þar með talið á Íslandi, sem hefur m.a. þau áhrif að fyrirliggjandi ofnæmistilfelli geta versnað og ný bæst við.
- Rannsóknir víðsvegar í Evrópu sýna í vaxandi mæli að ungt fólk er að upplifa loftslagskvíða en frekari þekkingu skortir á útbreiðslu og alvarleika hvað þetta varðar. Á Íslandi hafa rannsóknir sýnt að nærri 20% svarenda segjast finna fyrir miklum umhverfiskvíða, og er hlutfallið hæst hjá þeim sem eru yngri en 30 ára.
- Nauðsynlegt er að auka þekkingu á áhrifum loftslagsbreytinga á lýðheilsu, heilbrigðiskerfi og samfélag í víðasta skilningi. Samhliða vaxandi þekkingu á alþjóðavísu, og á stöðu viðeigandi áhrifaþátta heilbrigðis á Íslandi, hafa skapast betri forsendur til úrbóta hvað þetta varðar.
- Efla þarf heilbrigðisviðbúnað og mönnun til að auka áfallaþol heilbrigðiskerfisins.

7.1 Inngangur

Samkvæmt Alþjóðaheilbrigðisstofnuninni (WHO, 2021c) eru loftlagsbreytingar ein stærsta heilsufarsógnin sem mannkynið stendur frammi fyrir.

Í fyrri skýrslum vísindanefndar hefur verið fjallað um möguleg áhrif loftslagsbreytinga á heilsufar. Í V2018 voru smit- og öndunarfærasjúkdómar taldar helstu heilsufarsógnirnar vegna loftslagsbreytinga hér á landi og heilbrigðiskerfið almennt talið vel í stakk búið að takast á við afleiðingar loftslagsbreytinga.

Frá því skýrslur 5. matshrings IPCC kom út á árunum 2013 og 2014 (AR5) hefur staða þekkingar styrkst og vitund aukist um núverandi áhrif og áætlaða áhættu loftslagsbreytinga hvað varðar heilsu, vellíðan, fólksflutninga og átök, þar með talin neikvæð áhrif á andlega líðan (IPCC, 2022d; Cissé o.fl., 2022). Í tengslum við náttúruvár atburði eins og ofanflóð, jarðhræringar og eldgos og vegna alþjóðlegra áskoranna eins og m.a. COVID-19 faraldursins og stríðsins í Úkraínu hefur ný þekking og reynsla orðið til sem getur gagnast í glímunni við áhrif loftslagsbreytinga.

Þessi kafli byggir að hluta á upplýsingum sem komu fram á málstofum sem vísindanefndin hélt árið 2022. Einstakar greinar byggja að hluta eða verulegu leyti á fyrirlestrum sem þar voru fluttir og/eða annars konar framlagi. Sérstaklega má nefna Ölmu D. Möller, Guðrúnu Aspelund, Þórólf Guðnason, Dóru G. Guðmundsdóttur, Sigríði Haralds Elínardóttur, Hólmfríði Þorgeirsdóttur, Jóhönnu E. Torfadóttur, Kjartan H. Njálsson, Rafn Jónsson, Sveinbjörn Kristjánsson, Viðar Jensson, Gunnar Guðmundsson, Þorsteinn Jóhannsson, Ragnhildi Finnbjörnsdóttur, Þorstein Hermansson, Þórhall Inga Halldórsson, Ágúst Gunnar Gylfason, Hrafnkel Proppé, Anton Örn Karlsson, Maríu Ingibjörgu Kristjánsdóttur og Sigríði Jakobínudóttur.

7.1.1 Helstu hugtök og forsendur

Í umfjöllun um lýðheilsu og loftslagsmál er gagnlegt að vera samstíga um notkun helstu hugtaka og forsenda sem liggja til grundvallar markvissu lýðheilsustarfi. Hér í framhaldinu eru skilgreiningar á nokkrum lykilhugtökum sem Alþjóðaheilbrigðisstofnunin (WHO, 2021b) gefur út og fjallað er um í þessum kafla vísindaskýrslunnar.

Heilsa (*e. health*) er andleg, líkamleg og félagsleg vellíðan einstaklinga og ekki einungis það að vera laus við sjúkdóma og örorku. Samanber skilgreininguna er meira og minna allt undir í samfélaginu þegar heilsa og líðan fólks er annars vegar.

Vellíðan (*e. wellbeing)* er að upplifa jákvætt ástand. Vellíðan felur í sér lífsgæði og getu fólks m.a. til að takast á við dagleg verkefni og leggja sitt af mörkum í stærra samhengi. Velsæld samfélaga má að sama skapi m.a. meta út frá viðnámsþrótti þeirra, getu til aðgerða og hversu reiðubúin þau eru að takast á við áskoranir eins og loftslagsbreytingar.

Áhrifaþættir heilbrigðis (*e. determinants of health*) eru ýmsir einstaklingsbundnir, félags- og efnahagslegir þættir sem og manngerðir og náttúrulegir umhverfisþættir sem hafa áhrif á lifnaðarhætti, heilsu og vellíðan samanber mynd 7.1. Heilbrigðisþjónusta er mikilvæg en er einn þáttur af mörgum sem hafa áhrif þegar lýðheilsa er annars vegar.

Lýðheilsa (*e. public health*) beinir sjónum að heilsu allra í samfélaginu og felur í sér markvissar aðgerðir hins opinbera og annarra sem miða að því að vernda og bæta heilsu, líðan og lífsgæði einstaklinga, tiltekinna samfélagshópa eða samfélaga í heild sinni.

Heilsuefling (*e. health promotion*) eru lýðheilsuaðgerðir þar sem markvisst er unnið með áhrifaþætti heilbrigðis (mynd 7.1) til að skapa umhverfi og aðstæður sem auðvelda fólki að hlúa að heilsu sinni og vellíðan. Slíkar aðgerðir geta bæði miðað að því að efla einstaklingsbundna þætti og ýmsa þætti í nánasta umhverfi markhópsins hverju sinni.

Forvarnir (*e. prevention*) eru lýðheilsuaðgerðir sem fela í sér að sporna gegn því sem er óæskilegt, minnka áhættu á sjúkdómum og öðrum heilsufarsvanda (1. stig) og ef til þess kemur að takast á við veikindi (2. og 3. stig).

Jöfnuður til heilsu (*e. health equity*) veltur á því að allir hafi jöfn tækifæri til að varðveita og bæta heilsu sína án tillits til bakgrunns eða stöðu. Auk almennra aðgerða sem mæta þörfum



Mynd 7.1: Áhrifaþættir heilsu og vellíðanar og heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna. Aðlögun útgáfa embættis landlæknis af regnbogamódeli Dahlgren og Whitehead út frá íslenskum aðstæðum.

fjöldans er því mikilvægur liður í markvissu lýðheilsustarfi að greina stöðu og þarfir ólíkra undirhópa og mæta þeim eftir því sem við á með sértækari lausnum (sjá m.a. töflu 7.1 og mynd 7.1).

Heilbrigði jarðar (*e. planetary health*) tekur til ástands náttúrulegra kerfa og heilsu fólks og byggir á þeirri forsendu að heilsa fólks og siðmenning er háð heilbrigði náttúrulegra kerfa og ábyrgri umgengni um þau.

Heilsa og vellíðan fólks ræðst af flóknu samspili einstaklinga við sitt nánasta umhverfi og aðstæður (Dahlgren og Whitehead, 1991; WHO, 1986) samanber mynd 7.1. Einstaklingar þurfa að búa yfir viðeigandi forsendum til að líða vel og taka sem bestar ákvarðanir fyrir sig og jörðina (hvíti og guli boginn) og á endanum snýst lýðheilsa um í hvers konar samfélagi fólk býr s.s. hversu heilsueflandi og örugg heimabyggðin er hverju sinni. Góður samhljómur er á milli grunnstoða sjálfbærrar þróunar og áhrifaþátta heilbrigðis sem eru allt í senn félags-, efnahags- og menningarlegar aðstæður sem og byggt og náttúrulegt umhverfi (græni, rauði og appelsínuguli boginn). Auk heilbrigðisþjónustu eru þættir eins og atvinna, húsnæði, menntun, félagsþjónusta, loftgæði, tækifæri til að tilheyra og taka þátt í samfélagi og öryggi í víðasta skilningi dæmi um hornsteina heilsu sem er mikilvægt að standa vörð um, hvort sem um er að ræða loftslagsbreytingar eða aðrar samfélagslegar áskoranir.

Lýðheilsa er nátengd ástandi náttúrulegra kerfa og þarf að vera sameiginlegt, samfélagslegt viðfangsefni þvert á stjórnsýslustig og málefnasvið (Cissé o.fl., 2022; WHO, 2021d)

7.2 Staðan og horfur á heimsvísu samkvæmt AR6

Í skýrslu vinnuhóps 2 fyrir 6. vísindaskýrslu IPCC (IPCC, 2022a), hér eftir nefnd AR6 WG2, kemur fram að loftslagsbreytingar af mannavöldum ógna heilsu fólks og jarðarinnar. Í skýrslunni

Tafla 7.1: Dæmi um hópa sem eru líklegri til að standa hallari fæti gagnvart loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra (Cissé o.fl., 2022; WHO, 2021a)

Hópar
Börn
Konur, ekki síst þungaðar konur
Eldra fólk
Fólk með undirliggjandi heilsufarsvanda
Efnaminna fólk
Farandfólk og flóttafólk
Þjóðfélagshópar sem skera sig úr fjöldanum, félagslega jaðarsettir hópar

eru skoðuð áhrif loftslagsbreytinga á náttúru og fólk á heimsvísu og framtíðaráhrif metin miðað við mismunandi stig hlýnunar og þá áhættu sem af henni hlýst. Sjöundi kafli skýrslunnar (Cissé o.fl., 2022) fjallar um heilsu, vellíðan og samfélagsbreytingar. Samanber fyrri umfjöllun um áhrifaþætti heilbrigðis (mynd 7.1) er því haldið til haga að aðrir kaflar þessarar skýrslu sem og annarra skýrsla IPCC hafa einnig þýðingu í heildarsamhenginu þegar lýðheilsa er annars vegar. Í umfjöllun um AR6 er notað kvarðað orðalag IPCC sem fjallað er um í sérgrein AA í viðauka.

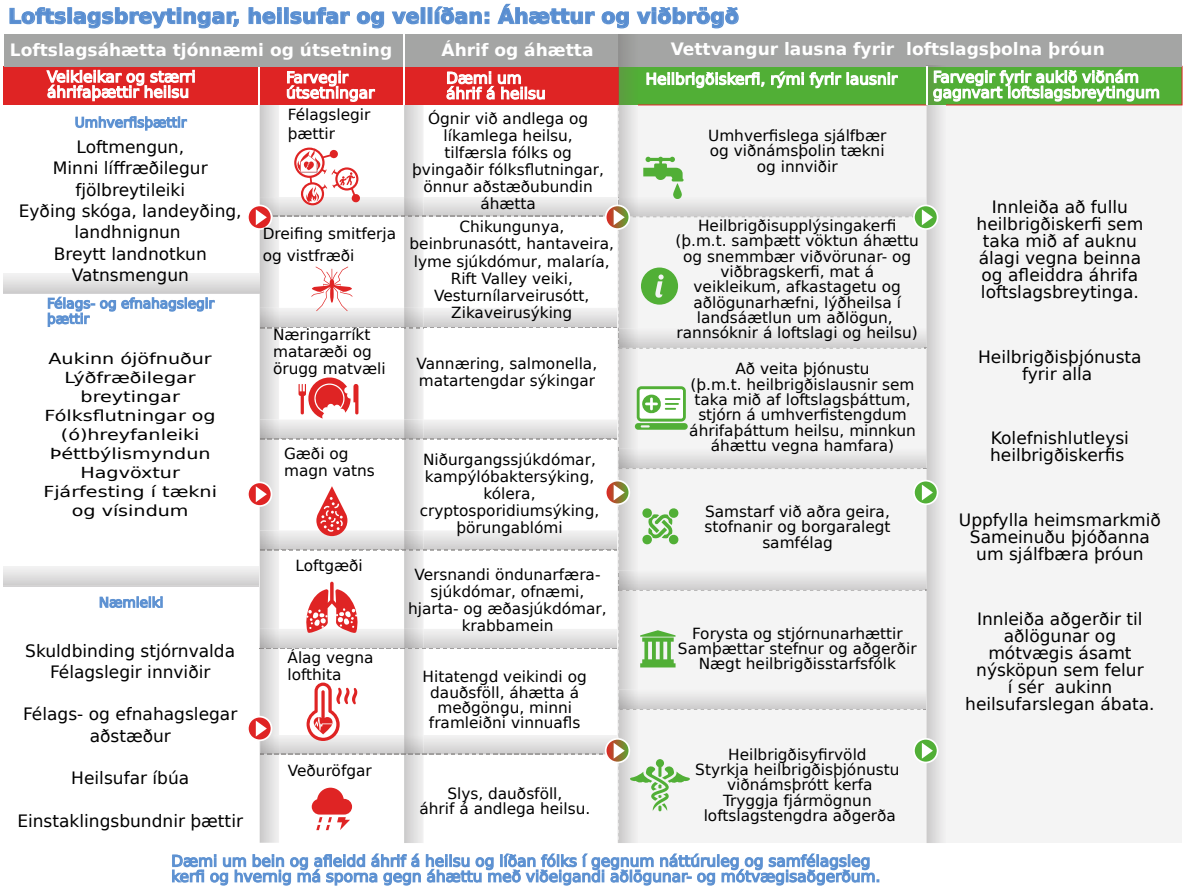
Í kaflanum kemur fram að almennt er aukning í loftslagstengdum veikindum, smitbærum og ósmitbærum sjúkdómum, ótímabærum dauðsföllum, vannæringu í öllum sínum myndum og einnig ógnum við andlega heilsu og vellíðan *(mjög mikil vissa)*. Loftslagsvár eru í vaxandi mæli ástæða þvingaðra fólksflutninga og tilfærslu fólks *(mikil vissa)* og eiga sinn þátt í ofbeldisfullum átökum *(mikil vissa)*. Þessi áhrif eru oft samtengd, er dreift ójafnt innan og á milli samfélaga og áfram mun verða ójöfnuður í hver stendur hallari fæti gagnvart þessum áhrifum vegna mismunandi útsetningar og veikleika *(mjög mikil vissa)* sem aftur stuðlar að auknum ójöfnuði til heilsu (Cissé o.fl., 2022; IPCC, 2022c).

Mynd 7.2 sýnir dæmi um bein og afleidd áhrif loftslagsbreytinga á heilsu og líðan, áhrifaþætti s.s. náttúruleg og samfélagsleg kerfi og hvernig má sporna gegn loftslagstengdri áhættu með viðeigandi aðlögunar- og mótvægisaðgerðum. Ljóst er að samfélög standa misjafnlega að vígi og upphafspunkturinn fyrir loftslagsþolna þróun er ólíkur eftir því hvar ber niður innan og á milli landa. Samfélög þar sem ójöfnuður er mikill hafa minni viðnámsþrótt gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga *(mikil vissa)*.

Í skýrslunni er undirstrikað að með því að ráðast tímanlega í viðeigandi aðlögunaraðgerðir má draga úr ýmsum ógnum sem snúa að heilsu og líðan fólks vegna loftslagsbreytinga *(mjög mikil vissa)*. Þannig felur sjálfbær og loftslagsþolin þróun (*e. climate resilient development*) samfélaga í sér mikil tækifæri og töluverð samlegðaráhrif og ábata m.t.t. heilsu og vellíðanar, þvingaðra fólksflutninga og átaka *(mjög mikil vissa)*. Bent er á þörfina á breyttum vinnubrögðum, til að skapa farvegi fyrir loftslagsþolna þróun, þar sem tekið er mið af aðstæðum hverju sinni og hugað er að þörfum allra hópa. Er þá ekki síst átt við hópa sem eru í viðkvæmri og jaðarsettri stöðu (sjá m.a. töflu 7.1).

Lykilfarvegur fyrir loftslagsþolna þróun í heilbrigðiskerfinu er að tryggja aðgengi allra að fyrsta stigs heilbrigðisþjónustu, þar með talið geðheilbrigðisþjónustu *(mikil vissa)*. Fjárfesting í öðrum kerfum og málaflokkum sem bætir m.a. stöðu félagslegra áhrifaþátta heilbrigðis er einnig líkleg til að minnka veikleika gagnvart loftslagstengdri áhættu og skila sameiginlegum ábata *(mikil vissa)*. Má þar sem dæmi nefna innviði, almenningssamgöngur, húsnæði, hreina orku, vatn og hreinlæti, aðgengi að hollum mat, félagsþjónustu og ýmsa þætti sem hafa áhrif á félagstengsl og þátttöku. Að því sögðu eru borgarkerfi og önnur þéttbýliskerfi sérstaklega nefnd sem mikilvægir vettvangar fyrir loftslagsþolna þróun.

Í sjöunda kafla skýrslu 2. vinnuhóps IPCC (Cissé o.fl., 2022) kemur fram að ýmsir alþjóð-



Mynd 7.2: Dæmi um bein og afleidd áhrif loftslagsbreytinga á heilsu og líðan fólks. Myndin sýnir einnig áhrifaþætti og hvernig má sporna gegn áhættu með viðeigandi aðlögunar- og mótvægisaðgerðum. (Byggt á mynd TS.8 í AR6 (Pörtner o.fl., 2022))

legir samningar eru þegar til staðar er varða loftslagsbreytingar (t.d. Parísarsamningurinn (Stjórnarráð Íslands, 2015)), minnkun hamfaraáhættu (Sendai samkomulagið (UNDRR, 2015)), sjálfbærni (Heimsmarkmið Sþ (UN, 2015)) auk samninga varðandi þéttbýlismyndun (UN, 2017b), fólksflutninga (UN, 2017a) og flóttafólk (UNHCR, 2019). Ítrekað er að ef þessir samningar væru uppfylltir mætti minnka áhrif loftslagsbreytinga á heilsu, líðan, fólksflutninga og átök *(mjög mikil vissa)*. Sem dæmi er nefnt að væntur heilsufarsábati af bættum loftgæðum einum saman er í krónum talið áætlaður meiri en kostnaðurinn við að uppfylla Parísarsamninginn *(mikil vissa)*.

COVID-19 faraldurinn er sagður hafa varpað ljósi á þær áskoranir sem eru í veginum fyrir innleiðingu þessara samninga með því að afhjúpa veikleika samfélagslegra kerfa, innan landa og á alþjóðavísu, til að gera ráð fyrir og bregðast við alþjóðlegri áhættu *(mikil vissa)*. Stigvaxandi stefnur og aðgerðir eru sagðar til þessa hafa reynst ófullnægjandi til að draga úr loftslagstengdri áhættu m.a. hvað varðar heilsu og líðan, fólksflutninga og átök. Sú staða endurspegli mikilvægi þess að nálgast þetta margslungna viðfangsefni sem loftslagsmálin eru með samþættri nálgun, þvert á kerfi og málaflokka eins og lagt er upp með í umræddum samningum *(mikil vissa)*.

7.3 Staða og horfur í Evrópu samkvæmt AR6

Í AR6 fjallar 13. kafli skýrslu WG2 um Evrópu (Bednar-Friedl o.fl., 2022). Í undirkafla 13.7 er fjallað um loftslagsbreytingar, heilsu, vellíðan, samfélagsbreytingar og í undirkafla 13.8 um viðkvæma hópa og ójöfnuð. Líkt og annars staðar í heiminum standa Evrópubúar í viðkvæmri og jaðarsettri stöðu alla jafna hallari fæti en aðrir samfélagshópar gagnvart flóðum, hita og þurrki sem og heilsufarsógnum vegna útbreiðslu sjúkdóma.

7.3.1 Dauðsföll, veikindi og slys vegna hita og öfga í veðri

Fram kemur að núverandi hlýnun jarðar um 1.1°C hefur þegar áhrif á náttúrleg og mannleg kerfi í álfunni *(mjög mikil vissa)*. Um 74% Evrópubúa búa í þéttbýli þar sem áhrif hitabylgja geta magnast upp vegna bygginga, annarra manngerðra innviða og loftmengunar. Ef tekst að takmarka hlýnun við 1.5°C er áætlað að draga megi úr ótímabærum dauðsföllum yfir sumartímann um 15-20% samanborið við 2°C hlýnun. Almennt er áætlað að neikvæðu áhrifin verði mest í sunnanverðri álfunni t.d. aukin þörf fyrir kælingu, aukin vatnsþörf, uppskerubrestur og vatnsskortur. Á móti má vænta ábata til skamms tíma í norðri hvað varðar t.d. aukna uppskeru og vöxt skóga. Eldra fólk, börn, konur m.a. þungaðar konur, félagslega einangraðir og fólk með minni líkamshreysti er sagt sérstaklega útsett fyrir áhrifum af miklum hita ásamt þeim sem eru með undirliggjandi sjúkdóma s.s. hjarta- og æðasjúkdóma, nýrnasjúkdóma, sykursýki og öndunarfærasjúkdóma. Aðrar öfgar í veðri s.s. stormar, mikil úrkoma og flóð hafa þegar valdið stórkostlegri áhættu með tilliti til lýðheilsu í Evrópu. Áætlað er að dauðsföll af þessum sökum og einnig vegna skógarelda geti aukist verulega fyrir árið 2100.

7.3.2 Loftgæði

Í kaflanum kemur fram að loftmengun er nú þegar ein stærsta lýðheilsuógnin í Evrópu. Þannig er t.d. áætlað að árið 2016 hafi um 412.000 ótímabær dauðsföll orðið vegna langtímaútsetningar gagnvart fíngerðu svifryki ($PM_{2,5}$), 71.000 vegna köfnunarefnisdíoxíðs (NO_2) og 15.000 ótímabærra dauðsfalla vegna ósons við yfirborð jarðar. Hækkað hitastig, breytingar í úrkomu, skógareldar o.fl. mun hafa áhrif á loftgæði í framtíðinni. Við 2.5°C er t.d. áætlað að dauðsföllum vegna fíngerðs svifryks fjölgi um 73% í Evrópu. Almennt er gert ráð fyrir að lakari loftgæði valdi aukinni sjúkdómabyrði og dauðsföllum m.a. vegna öndunarfærasjúkdóma. Auk verri loftgæða utandyra má gera ráð fyrir að aukinn raki og mygla í húsnæði hafi neikvæð, heilsufarsleg áhrif s.s. ofnæmi, astma og nefslímubólgu.

7.3.3 Smitsjúkdómar

Hvað loftslagsbreytingar varðar mun sú ógn sem evrópsku samfélagi stafar af smitsjúkdómum sem berast með mítlum (*e. tick-borne diseases*) taka breytingum. Lyme sjúkdómurinn er þeirra algengastur. Með aukinni hlýnun er gert ráð fyrir aukningu í slíkum sjúkdómum í Norður-Evrópu *(miðlungs vissa)* en fækkun í Suður-Evrópu vegna breyttra skilyrða. Moskítóflugur eru einnig smitferjur fyrir ýmsa sjúkdóma eins og Vesturnílarveirusótt, beinbrunasótt, chikungunya, zikaveirusýkingu og malaríu. Þó svo að aukin hlýnun stuðli að aukningu í malaríusmitum og sú þróun sé að færast norðar í álfuna er það almennt talin vera lítil heilsufarsógn fyrir Evrópu vegna félags- og efnahagslegra aðstæðna og aðgengis að heilbrigðisþjónustu. Hlýnun í álfunni hefur m.a. verið tengd aukningu í ýmsum sýkingum í Evrópulöndum og hækkaður sjávarhiti og tilteknar aðstæður í sjó, eins og við Eystrasaltið, lengja þann tíma yfir árið sem víbríóbakteríur geta valdið sýkingum með tilheyrandi heilsufarsógnum.

7.3.4 Ofnæmi og frjókorn

Loftslagsbreytingar hafa áhrif á ofnæmi með aukinni útbreiðslu ofnæmisvaldandi plantna. Bæði geta fyrirliggjandi ofnæmistilfelli versnað og ný bæst við *(mikil vissa)*. Hlýnun veldur því almennt að frjókornatímabil hefst fyrr og stendur lengur en munur er á þessu á milli svæða, tegunda, eiginleika og blómgunartímabila (*e. flowering periods*). Sem dæmi er nefnt að í Norður-Evrópu er blómgunartími birkis að hefjast allt að tveimur vikum fyrr síðustu áratugina en áður var. Því er spáð að styrkur frjókorna í lofti muni aukast um alla Evrópu og verða útbreiddari heilsufarsvandi en nú er.

7.3.5 Vinnutengd heilsa og framleiðni

Í skýrslunni kemur fram að hita- og kuldabylgjur eru tengdar aukinni hættu á vinnuslysum og breytingum í framleiðni vinnuafls. Frekari gögn skortir um áhrif annars konar öfga í veðri á þessa þætti. Í Evrópu er áhættan mest í atvinnugreinum þar sem hátt hlutfall starfsfólks stundar kröftuga útivinnu, aðallega byggingavinnu og í landbúnaði, eins og sýndi sig m.a. í hitabylgjunni í N-Evrópu árið 2018. Áhrif geta einnig komið fram m.a. í framleiðslu- og þjónustugeirum ef loftkæling er ófullnægjandi.

7.3.6 Gæði matvæla og fæðuöryggi

Vaxandi staða þekkingar styður að loftslagsbreytingar hafa neikvæð áhrif á gæði matvæla (s.s. fjölbreytni, næringargildi og öryggi matvæla) og aðgengi að matvælum n.t.t. fæðuöryggi. Áhættan er þó talin minni fyrir Evrópubúa en aðra íbúa jarðarinnar. Áætlaðar breytingar í uppskeru og búfjárframleiðslu, sérstaklega minna aðgengi að ávöxtum og grænmeti og næringarsnauðari matvæli, munu hafa meiri áhrif á heilsu Evrópubúa sem eru í viðkvæmri stöðu m.a. þeirra sem eru efnaminni og þannig stuðla að auknum ójöfnuði til heilsu.

7.3.7 Andleg heilsa og líðan

Rannsóknir víðsvegar í Evrópu styðja í vaxandi mæli að ungt fólk er að upplifa loftslagskvíða en frekari þekkingu skortir á útbreiðslu og alvarleika hvað þetta varðar. Staða þekkingar á áhrifum flóða í Evrópu er talin góð og sýnir að flóð geta verið kveikja fyrir áfallastreituröskun, kvíða og þunglyndi *(mikil vissa)*. Minna er sagt vitað um áhrif annars konar öfga í veðri á andlega heilsu og líðan. Rannsóknir sýna t.d. að það að lenda flóði veldur út af fyrir sig streitu og hefur neikvæð áhrif á sjálfsmynd en einnig áskoranir sem fylgja í kjölfar slíkra viðburða m.a. ágreiningur vegna trygginga og endurbóta á húsnæði. Rannsóknir í kjölfar flóða í Bretlandi á árunum 2013-2014 sýna t.d. að íbúar sem gátu ekki snúið aftur á heimili sitt í ár eða lengur voru marktækt líklegri til að vera með áfallastreituröskun, þunglyndi og kvíða. Áhrifin voru meiri ef íbúar höfðu ekki fengið viðvörun áður en flóð skall á.

7.3.8 Fólksflutningar og tilfærsla fólks

Í skýrslunni kemur fram að almennt eiga fólksflutningar og tilfærsla fólks sér helst stað innan landamæra einstakra landa og innan einstakra svæða[1]. Hvað framtíðarhorfur varðar er talið að ójöfn dreifing áhættu vegna loftslagsbreytinga geti í vaxandi mæli þrýst á fólksflutninga en almennt vantar frekari upplýsingar hvað þetta varðar.

Víða er fjallað um fólksflutninga og ástæður þeirra í AR6 WG2. Í 7. kafla skýrslunnar (Cissé o.fl., 2022) eru áhrif loftslagsbreytinga á fjórar tegundir fólksflutninga metin sjá töflu 7.2. Í sérgrein 7.4 í kaflanum kemur fram að kyn er einn af þeim þáttum sem hefur áhrif á ákvarðanatöku um flutning og afleiðingarnar sem flutningar hafa í för með sér. Á það við bæði almennt og einnig ef um er að ræða flutninga sem viðbrögð við loftslagsvá. Rannsóknir benda til náttúruvá er líklegri til að hafa neikvæð áhrif á konur af ýmsum ástæðum sem spanna allt frá m.a. umönnunarhlutverki, minni menntun og veikari fjárhagsstöðu yfir í menningarleg viðmið um klæðnað.

7.4 Loftslagsbreytingar og lýðheilsa í íslensku samhengi

Heildstætt stöðumat og spár um heilsu og líðan fólks og viðeigandi áhrifaþætti heilbrigðis út frá beinum og afleiddum áhrifum loftslagsbreytinga í íslensku samhengi liggja ekki fyrir. Samhliða vaxandi þekkingu á alþjóðavísu og á ýmsum, tengdum þáttum á Íslandi eru að skapast betri

[1]Sjá einnig sérgrein á blaðsíðum 1082–1083 og töflu á bls. 1100 í (IPCC, 2022a).

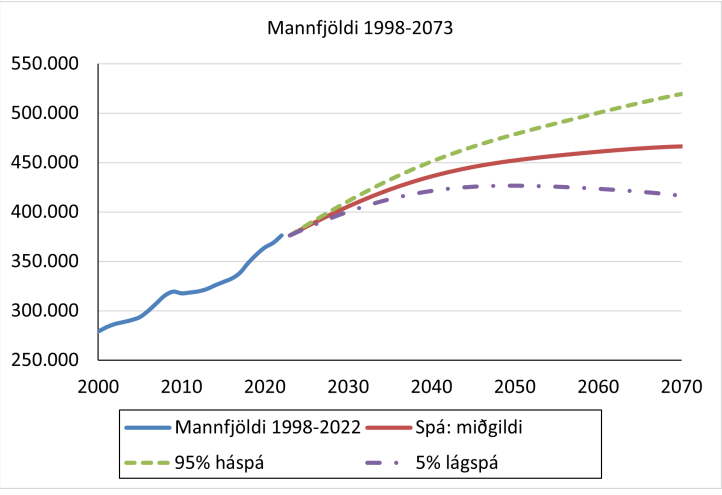
Tafla 7.2: Yfirlit yfir fjórar tegundir fólksflutninga og einkenni þeirra.

Tegund fólksflutninga	**Einkenni**
1. Fólksflutningar sem aðlögun (*e. adaptive migration*)	Flutningarnir eru val einstaklinga eða heimila.
2. Þvingaðir fólksflutningar og tilfærsla (*e. Involuntary migration and displacement*)	Fólk hefur litla eða enga aðra valkosti en að flytja sig um set.
3. Skipulagðir fólksflutningar (*e. organised relocation of populations*)	Skipulagðir flutningar stærri hópa frá svæðum sem eru í mikilli hættu vegna loftslagsvár.
4. Kyrrstaða á hættusvæði (*e. immobility*)	Fólk getur ekki eða vill ekki flytjast frá hættusvæðum af t.d. menningarlegum, efnahagslegum eða félagslegum ástæðum.

forsendur til að bæta stöðu þekkingar hvað þetta varðar. Í þessu samengi er rétt að nefna að til viðbótar við umfjöllun um heilbrigði í fyrri vísindaskýrslum hefur Alþjóðaheilbrigðisstofnunin o.fl. frá árinu 2015 staðið fyrir útgáfu yfirlits um ástand loftslagstengdra heilsufarsmála (*Health and Climate Change Contry Profile*) og kom það nýjasta út fyrir Ísland árið 2022 (WHO, 2022a)

7.4.1 Mannfjöldaspár og fólksflutningar

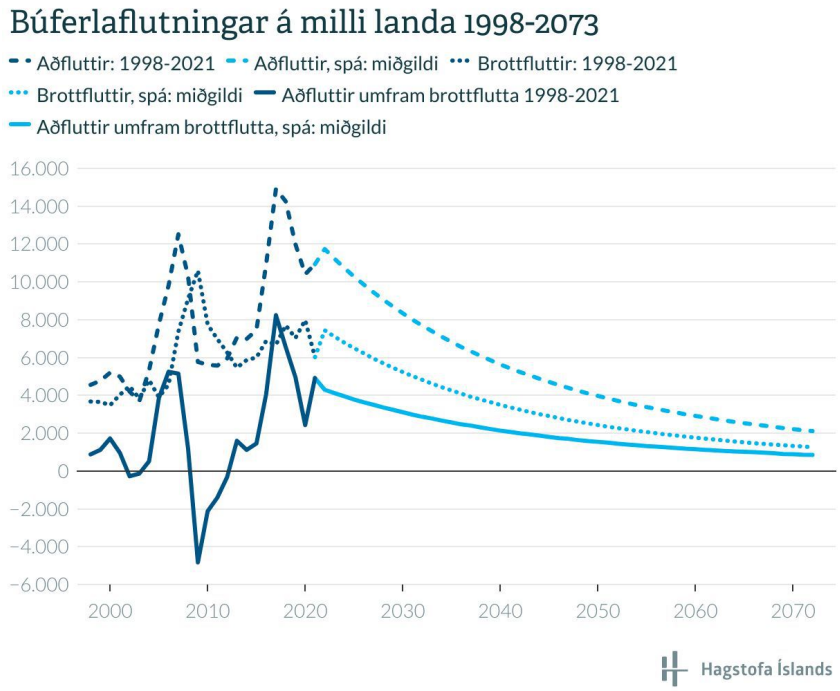
Grundvallarspurningar sem snúa að loftslagsbreytingum, samfélögum og lýðheilsu eru m.a. hver eru stödd hvar á landinu á hverjum tíma, hverjar eru þarfir ólíkra hópa og hvernig eru ýmsir samfélagslegir innviðir og kerfi, þar með talið heilbrigðiskerfið, í stakk búin til að mæta þeim þörfum?



Mynd 7.3: Mannfjöldaspá Hagstofunnar til ársins 2073. (Heimild: Hagstofa Íslands (2022).).

Hagstofa Íslands vinnur mannfjöldaspár og birtir í lok hvers árs. Stofnunin er í nánu samstarfi við Hagstofu Evrópusambandsins (*e. Eurostat*) sem sér um að samræma og samþætta vinnu innan evrópska hagskýrslusamstarfsins. Mannfjöldaspárnar byggja fyrst og fremst ástöðunni eins og hún hefur verið og því eru t.d. spár um loftslagsbreytingar og afleiðingar þeirra ekki teknar inn í myndina enn sem komið er. Fámennið á Íslandi er almennt áskorun í þessu samhengi þar sem litlar breytingar geta haft mikil áhrif.

Samkvæmt mannfjöldaspá Hagstofunnar (2022) til ársins 2073 fjölgar íbúum landsins úr 376 þúsund í 467 þúsund á tímabilinu miðað við miðspá, sjá mynd 7.3. Fram kemur að spáin felur ekki í sér áhrif hugsanlegra áfalla af náttúrulegum, félagslegum eða efnahagslegum orsökum.



Mynd 7.4: Búferlaflutningar á milli landa frá árinu 1998 og spá til ársins 2073. (Heimild: Hagstofa Íslands (2022). Birt með leyfi).

Hvað varðar spá um búferlaflutninga á milli landa gerir spá Hagstofunnar ráð fyrir að fjöldi aðfluttra verði meiri en fjöldi brottfluttra allt tímabilið, fyrst og fremst vegna búferlaflutninga erlendra ríkisborgara samanber mynd 7.4. Miðað við núverandi forsendur fer hlutfallið minnkandi eftir því sem líður á spátímabilið. Spyrja má hvort slíkt sé líklegt að halda ef loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á fólksflutninga eru tekin með í framtíðarspár.

Þjóðin er að eldast samanber mynd 7.5 en þróunin er þó hægari á Íslandi en í öðrum Evrópulöndum. Almennt skerðist heilsa og færni smám saman með hækkandi aldri og líkur á ýmsum sjúkdómum aukast. Þessir þættir og fleiri valda því að aldraðir og fleiri hópar eru í viðkvæmari stöðu en aðrir gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga.

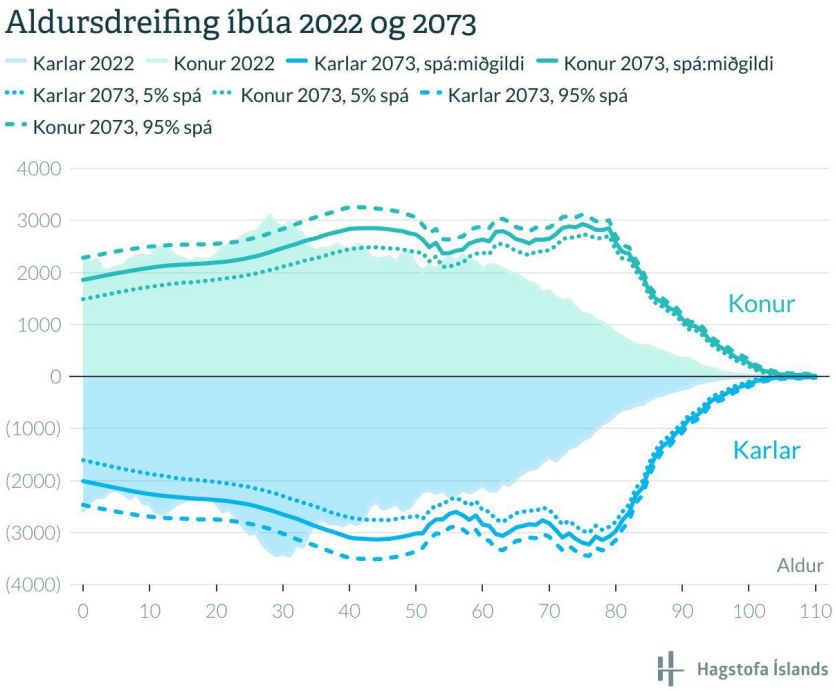
7.4.2 Heilsa, vellíðan og samfélag

Heilsa og líðan hefur áhrif á viðnámsþrótt einstaklinga og samfélaga til að takast á við áskoranir líkt og loftslagsbreytingar (WHO, 2022b). Óhætt er að segja að Ísland búi almennt vel hvað varðar gögn um heilsu, líðan og lifnaðarhætti á flestum æviskeiðum. Þó skortir m.a. betri gögn um fólk af erlendum uppruna. Fámennið veldur því einnig að það eru takmarkanir á því hversu ítarlega er hægt að greina úrtaksgögn fyrir t.d. tiltekna undirhópa og svæði á landinu.

Forsætisráðuneytið og Hagstofa Íslands standa að útgáfu velsældarvísa (Hagstofa Íslands, 2023). Þeim er ætlað að gefa heildarmynd af hagsæld og lífsgæðum landsmanna yfir tíma. Vísarnir eru sem stendur 39 talsins og eru þeir flokkaðir í þrjá undirþætti: Félagslegir mælikvarðar, efnahagslegir mælikvarðar og umhverfislegir mælikvarðar samanber þrjár meginstoðir sjálfbærni[2].

Embætti landlæknis hefur frá árinu 2016 gefið út lýðheilsuvísa[3]. Vísarnir sem eru safn mælikvarða sem gefa vísbendingar um heilsu og líðan þjóðarinnar á hverjum tíma á landsvísu, í heilbrigðisumdæmum og eftir því sem gögn leyfa á afmarkaðri svæðum þ.m.t. í sveitarfélögum. Líkt og velsældarvísar eru lýðheilsuvísar í sífelldri þróun og er m.a. unnið að því að bæta inn fleiri vísum sem snúa að umhverfi og heilsu.

[2]sjá visar.hagstofa.is/velsaeld
[3]sjá www.island.is/maelabord)



Mynd 7.5: Aldurdreifing íbúa eftir kyni árið 2022 og líkleg dreifing árið 2073. (Heimild: Hagstofa Íslands (2022). Birt með leyfi).

Í tengslum við starf Heilsueflandi samfélags, skóla og vinnustaða, sem embætti landlæknis stýrir í samstarfi við ýmsa hagaðila, er lög rík áhersla á markvisst, gangadrifið heilsueflingar- og forvarnastarf sem tekur mið af aðstæðum og þörfum hverju sinni. Auk þess að nýta lýðheilsuvísa og önnur gögn eru til staðar gátlistar fyrir hverja nálgun sem innihalda viðmið um hvaða þáttum er mikilvægt að huga að til að skapa umhverfi og aðstæður sem stuðla að heilbrigðum lifnaðarháttum, heilsu og vellíðan allra í viðeigandi markhópum. Á lokuðu vinnusvæði, *heilsueflandi.is*, geta þátttakandi sveitarfélög, skólar og vinnustaðir haldið utanum sitt starf, metið stöðu þess og framvindu, sjá dæmi hvað þetta varðar í umfjöllun um hreyfingu síðar í kaflanum.

7.4.2.1 Andleg heilsa og líðan

Samkvæmt Alþjóðaheilbrigðisstofnuninni (WHO, 2022b) hefur staða þekkingar á beinum og afleiddum áhrifum loftslagsbreytinga á andlega líðan verið að styrkjast (sjá einnig grein 7.3.7).

Töluverð þekking liggur fyrir um áhrif náttúruhamfara á íslensk samfélög samkvæmt Tinnu Halldórsdóttur (Tinna Halldórsdóttir, 2023) m.a. um snjóflóðin á Súðavík og á Flateyri árið 1995, eldgosið í Heimaey árið 1973 og eldgosið í Eyjafjallajökli árið 2010. Í niðurstöðum rannsóknar sem hún vann fyrir Austurbrú á áhrifum aurskriðanna á Seyðisfirði árið 2020 kemur fram að náttúruhamfarirnar hafi haft mikil áhrif á líðan íbúa og samfélagið. Seigla íbúa er sögð birtast í bjartsýni og baráttuhug fyrir bæinn og fáir hafa flutt brott. Óvissa varðandi m.a. öryggi húsnæðis og atvinnulífs virðist hins vegar vera íþyngjandi.

Valdir lýðheilsuvísar embættis landlæknis og önnur gögn hafa m.a. verið notuð til að meta möguleg óbein áhrif Covid-19 faraldursins með tilliti til lýðheilsu og er það lærdómur sem getur nýst m.t.t. væntanlegra breytinga af völdum hlýnunar jarðar. Fyrir liggur að neikvæð þróun var í andlegri líðan flestra hópa á þeim tíma sem faraldurinn stóð. Sem dæmi má nefna að samkvæmt gögnum úr árlegri vöktun á áhrifaþáttum heilbrigðis, sem Gallup framkvæmir fyrir embættis landlæknis, hækkaði hlutfall fullorðinna sem metur andlega heilsu sína sæmilega eða lélega úr 24% árið 2019 í tæp 33% árið 2022. Vert er að hafa í huga að á sama tíma og faraldurinn gekk yfir og í framhaldinu af honum er mögulegt að ýmsar aðrar breytingar, atburðir og aðstæður

hafi haft sín áhrif á andlega líðan t.d. efnhagslegar áskoranir, tíðar jarðhræringar og eldsgos og stríðið í Úkraínu.

Gallup kannaði umhverfiskvíða á meðal fullorðinna með netkönnun í febrúar árið (2023). Þar kom m.a. fram að 19% fullorðinna Íslendinga segjast almennt finna fyrir miklum umhverfiskvíða. Er það marktækt lægra hlutfall en þegar spurt var árið 2020, var þá 22% (Gallup, 2022). Konur eru líklegri til að finna fyrir miklum umhverfiskvíða (22%) en karlar (16%). Ef litið er til aldurs var hlutfall þeirra sem segjast finna fyrir miklum umhverfiskvíða hæst í yngsta aldurshópnum (yngri en 30 ára) eða 36% á móti 13% í elsta aldurshópnum (60 ára og eldri). Þetta hlutfall helst nánast óbreytt hjá yngsta hópnum frá árinu 2020, var þá 35%.

7.4.2.2 Smitsjúkdómar

Fólksfjölgun og fólksflutningar, ferðalög og vöruskipti, öfgar í veðri, eyðing skóga og breytingar í landbúnaði eru allt dæmi um þætti sem hafa áhrif á tíðni smitsjúkdóma og útbreiðslu þeirra. Auknar samvistir og nálægð manna og dýra hafa í för með sér aukningu á svokölluðum súnum. Súna er smitsjúkdómur sem smitast frá dýrum yfir í fólk en einnig öfugt. Margir algengir smitsjúkdómar eru súnur, t.d. Covid-19, matartengdar sýkingar (t.d. af völdum kampýlóbakter og salmonellu), mpx veirusýking (áður apabóla), fuglainflúensa og ebóla.

Hvað varðar smit sem berast með skordýrum, n.t.t. smitferjum (vektorum), þá ógna smitsjúkdómar sem berast með skógarmítlum ekki síst heilsu Evrópubúa sbr. lið 7.3.3. Lymesjúkdómurinn (borrelíósa) er þeirra útbreiddastur og þekktur í flestum löndum Evrópu utan Íslands. Bakterían *Borrelia burgdorferi* veldur sjúkdóminum en hún berst í menn eftir bit skógarmítils. Náttúrufræðistofnun Íslands stendur fyrir vöktun á farfuglum sem koma til landsins og safnar skógarmítlum sem berast með þeim og hefur bakterían greinst í mítlunum og aðeins er talið tímaspursmál hvenær smit geta farið að berast úr mítlunum í fólk hér á landi. Moskítóflugur eru annað dæmi um smitferjur sem bera með sér ýmsa sýkla sem valda smitsjúkdómum en moskítóflugur hafa til þessa ekki náð að nema land á Íslandi.

Sérfræðingar benda einnig á að með aukinni hlýnun jarðar geti faraldsfræði smitbærra öndunafærasjúkdóma breyst. Þá mun breyting á veðurfari, auknar rigningar og flóð, breytingar á skóglendi og hlýnun sjávar, hafa áhrif á vistkerfið, smitferjur og súnur.

Auk smita með dýrum og skordýrum smitast smitsjúkdómar síðan fyrst og fremst manna á milli. Auk bólusetninga gegn þeim sjúkdómum sem hægt er að bólusetja gegn eru almennar sóttvarnir almennings eins og handþvottur og sértækar sóttvarnir í heilbrigðisþjónustu lykilatriði í forvörnum. Sérfræðingar leggja áherslu á að vöktun á tíðni og útbreiðslu þarf að vera viðvarandi og með sameiginlegri þátttöku sem flestra landa til að tryggja viðbrögð í tíma. Viðbragðsáætlanir þurfa einnig að taka tillit til breyttra tíma og við hverju megi búast í framtíðinni. Þá er nauðsynlegt að viðhalda þróun og framleiðslu nýrra sýklalyfja til meðferðar þeirra smitsjúkdóma sem það á við og í þeim efnum er baráttan gegn sýklalyfjaónæmi baktería veigamikil.

7.4.2.3 Loftgæði

Samkvæmt Alþjóðaheilbrigðisstofnuninni (WHO, 2023a) er hreint loft ein af grundvallarforsendum góðrar heilsu og er loftmengun ein stærsta lýðheilsuógnin í álfunni. Helstu heilsufarsógnirnar sem tengjast loftmengun eru m.a. ótímabær dauðsföll og sjúkdómabyrði vegna öndunarfærasjúkdóma, hjarta- og æðasjúkdóma, krabbameina sem og neikvæð áhrif á geðheilsu. Þá eru vísbendingar um að loftmengun kunni að stuðla að heilabilun (Sommerlad og Liu, 2023). Sérfræðingar benda á að loftmengun og loftslagsbreytingar séu nátengdar áskoranir. Í útdrætti nýjustu landsskýrslu um losun loftmengunarefna á Íslandi frá 1990-2021 (Umhverfisstofnun, 2023b) kemur m.a. fram að loftmengunarefni hafi skaðleg áhrif á heilsu fólks og geti haft áhrif á vistkerfi og lífríki. Þau hafi einnig áhrif á hnattræna hlýnun sem forefni gróðurhúsalofttegunda eða með öðrum hætti.

Loftmengun vísar til efna í andrúmslofti sem hafa óæskileg og skaðleg áhrif m.a. á heilsu fólks (Alþingi, 1998).

Í íslensku samhengi er um að ræða efni eins og t.d. svifryk (PM_{10} og minna), köfnunarefnisdíoxíð (NO_2), kolmónoxíð (CO), brennisteinsdíoxíð (SO_2) og brennisteinsvetni (H_2S). Loftmengunarefni berast út í andrúmsloftið frá ýmsum uppsprettum þar með talið af völdum mannlegra athafna s.s. bruna jarðefnaeldsneytis (t.d. frá umferð), iðnaði og orkuframleiðslu og einnig náttúruleg s.s. frá eldgosum, jarðhitasvæðum og jarðvegsfoki (Umhverfisstofnun, 2017).

Ísland er meðal þeirra þjóða sem teljast með mikil loftgæði og er yfirleitt í 1-3. sæti fyrir gæði andrúmslofts í Evrópu (European Environment Agency (EEA), 2023). Á loftgæðavefsvæði Umhverfisstofnunar (Umhverfisstofnun, 2023a) má sjá stöðu loftgæða í rauntíma úr mælum víðs vegar um landið. Í ársskýrslu um loftgæði á Íslandi árið 2020 (Einar Halldórsson, 2022) kemur m.a. fram að loftgæði á höfuðborgarsvæðinu hafa aukist töluvert síðan loftgæðamælingar hófust á Grensásvegi árið 1995. Ef t.d. litið er á ársmeðaltal svifryks (PM_{10}) hefur styrkur þess dregist saman um 70% á tímabilinu. Hvað varðar styrk NO_2 og CO, sem kemur frá útblæstri bíla, hefur einnig verið samdráttur í styrk þeirra efna, þátt fyrir aukinn bílafjölda og aukna umferð. Samkvæmt sérfræðingum spilar þar fyrst og fremst inn tækniþróun í bílum. Þrátt fyrir samdrátt í losun loftmengandi efna frá samgöngum jókst losun gróðurhúsalofttegunda frá vegasamgöngum samkvæmt Umhverfisstofnun (2022) um 58% á tímabilinu 1990-2020 en 13% samdráttur var þó á árunum 2019–2020.

Íslenskar rannsóknir hafa sýnt fram á tengsl loftmengunar á Íslandi og ýmis konar heilsubrests. Sem dæmi veitir yfirlitsgrein Gunnars Guðmundssonar ofl (2019) um loftmengun á Íslandi og áhrif hennar á heilsu manna ágætar upplýsingar um íslenskar rannsóknir þessu tengdar.

Sérfræðingar telja mikilvægt að halda áfram að efla rannsóknir hvað þetta varðar m.a. með því nýta betur þau gögn sem eru til og einnig sérstöðu Íslands hvað varðar gæði andrúmsloftsins.

7.4.2.4 Öndunarfærasjúkdómar og hjarta- og æðasjúkdómar

Sérfræðingar benda á að öndunarfærin eru með nokkra sérstöðu gagnvart umhverfinu vegna mikillar útsetningar. Þannig eiga m.a. ryk og ýmsar örverur greiða leið í lungun. Útsetning fyrir loftmengun í æsku auki einnig líkur á öndunarfærasjúkdómum síðar á æviskeiðinu.

Hvað varðar áhrif loftlagsbreytinga á lungnaheilsu er íslenskum sérfræðingum einna efst í huga aukið magn og nýjar tegundir gróðurs auk neikvæðra áhrifa gróðurelda, stækkun á eyðimerkursvæðum m.a. vegna hopunar jökla með tilheyrandi loftmengun vegna jarðvegsfoks, áhrif eldgosa, breytt flóra af örverum sem getur leitt til breyttrar tíðni öndunarfærasýkinga og ný mynstur smitfaraldra í öndunarfærum. Hvað varðar algengi öndunarfærasjúkdóma eru um 5% Íslendinga með astma og allt að 10% með bólgu í nefi (Kisiel o.fl., 2023). Astmi er mun algengari á meðal barna en fullorðinna(Herbert Eiríksson o.fl., 2000). Sérfræðingar benda á að ólíkt því sem þekkist víða annars staðar eru tilfelli alvarlegs astma, sem veldur jafn vel sjúkrahúslegu, enn sem komið er fremur sjaldgæf hér á landi og notkun nýjustu líftæknilyfja heldur minni. Öfgar í veðri geti haft neikvæð áhrif á andlega líðan og lifnaðarhætti líkt og hreyfingu og reykingar sem getur aftur haft slæm áhrif á m.a. lungnaheilsu.

Loftslagsbreytingar eru almennt ekki taldar hafa teljandi áhrif á hjarta- og æðasjúkdóma hér á landi enn sem komið er nema þá helst í samhengi við loftmengun. Þannig hafa komið fram nýjar, íslenskar rannsóknir sem sýna fram á tengsl loftmengunar við hjartastopp og gáttatif (Gunnar Guðmundsson o.fl., 2019; Halldorsdottir o.fl., 2022; Halldorsdottir o.fl., 2023). Sem fyrr er mikilvægt að hafa hugfast að ákveðnir hópar eru viðkvæmari gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga en aðrir samanber m.a. töflu 7.1.

Sérfræðingar leggja áherslu á að rannsóknir í tengslum við loftslagsbreytingar og öndunarfærasjúkdóma, sem og aðrar heilsufarsútkomur verði efldar. Þeir telja mikilvægt að koma upp neti loftgæðamæla um land allt og ekki síst tryggja mælingar á landssvæðum þar sem vitað er að jarðvegsfok er mikið í ljósi þeirra neikvæðu áhrifa sem slíkar aðstæður geta haft á ofnæmisviðbrögð og versnun á öndunarfærasjúkdóma eins og astma.

7.4.2.5 Mataræði, hreyfing og aðrir lifnaðarhættir

Heilsusamlegir lifnaðarhættir eru mikilvæg forsenda þess að viðhalda og bæta heilsu og líðan á öllum æviskeiðum. Samkvæmt Alþjóðaheilbrigðisstofnuninni (WHO, 2017) vega þar einna þyngst hollt mataræði, reglubundin hreyfing og að takmarka kyrrsetu og að sleppa tóbaki, áfengi og öðrum vímuefnum auk geðræktar og góðra svefnvenja. Staða þekkingar á alþjóðavísu sýnir að loftslagsbreytingar geta haft ýmis bein og afleidd áhrif á daglegt líf, lifnaðarhætti og líðan fólks. Að sama skapi skipta athafnir fólks, ekki síst þeirra sem geta haft mikil áhrif í krafti stöðu sinnar í samfélögum, lykilmáli hvernig til tekst að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og að aðlagast breyttum aðstæðum samanber niðurstöður 6. vísindaskýrslu IPCC 2022.

Mataræði: Nýjar norrænar næringarráðleggingar (NNR6) voru kynntar í júní 2023 og er nú í fyrsta sinn ekki aðeins tekið mið af áhrifum á heilsu fólks heldur einnig umhverfið. Almennt er mælt með mataræði sem er ríkt af afurðum úr jurtaríkinu og aukinni fiskneyslu en að dregið verði úr kjötneyslu. Sem fyrr mun endurskoðuð útgáfa opinberra ráðlegginga um mataræði fyrir Ísland byggja á þeim norrænu(Embætti Landlæknis, 2023; Blomhoff o.fl., 2023).

Varðandi loftslagsbreytingar og framleiðslu matvæla benda sérfræðingar á að það er ekki nóg að meta kolefnissporið heldur þarf einnig að taka aðra þætti með í heildarmyndina eins og m.a. landnotkun og vatnsnotkun. Í ljósi loftslagsbreytinga og hversu hratt jarðarbúum fjölgar kallaði *EAT-Lancet Commission* (2023) saman hóp sérfræðinga víðsvegar að úr heiminum til að kanna áhrifin á mataræði. Verkefnið var að reyna að útbúa viðmiðunarmatseðil (birtur í Lancet árið 2019) sem styður við sjálfbæra matvælaframleiðslu (t.d. með minni losun gróðurhúsalofttegundar, minni vatns- og áburðarnotkun og betri nýtingu á ræktarlandi), tryggir að nægur matur sé til fyrir jarðarbúa, stuðlar að betri heilsu jarðarbúa og fækkar ótímabærum dauðsföllum sem rekja má til mataræðis (um 11 milljónir árlega á heimsvísu). Í stuttu máli voru niðurstöður nefndarinnar í samræmi við áðurnefndar áherslur norrænu ráðleggingarnanna. Mataræði sem telst hollt fyrir mannfólkið er alla jafna einnig sjálfbært og öfugt.



Samkvæmt niðurstöðum nýjustu landskönnunar á mataræði Íslendinga 2019 til 2021 2022 má sem dæmi nefna að dregið hefur úr neyslu á rauðu kjöti um 60 gr/viku eða um 10% frá síðustu könnun sem var framkvæmd á árunum 2010-2011. Um 60% þátttakenda fóru yfir viðmið um hámarksneyslu á rauðu kjöti sem eru 500 gr/viku. Um fjórðungur þátttakenda hafði grænmetisrétt sem aðalrétt á borðum einu sinni í viku eða oftar. Grænmetisneysla stóð í stað en neysla á ávöxtum minnkaði og einungis 2% þátttakenda náðu að fylgja ráðleggingum um 500 gr/dag af þessum fæðutegundum. Þá náði 27% þátttakenda að borða 70 gr/dag af heilkornavörum en 30% þátttakenda neyttu engra heilkornavara. Sérfræðingar við Háskóla Íslands hafa unnið að því að meta kolefnisspor Íslendinga út frá niðurstöðum könnunarinnar. Í þeirri vinnu kemur m.a. fram að meðal Íslendingurinn losar um 6,8 kg af CO_2-ígildum á dag sem er hátt samanborið við aðrar Evrópuþjóðir. Bent er á að dreifingin er töluvert mikil og sóknarfærin sögð m.a. í tengslum við þann hluta sem er að losa allt upp í 30 kg af CO_2-ígildum á dag. Mataræði sem felur í sér svo mikla losun er talið a.m.k. að hluta skýrast af vinsældum lágkolvetnamataræðis. Samkvæmt niðurstöðunum skýrir rautt kjöt um 50% af kolefnisspori mataræðis Íslendinga, fiskneysla tæp 20% og neysla á mjólkurvörum um 10%. Skilaboð sérfræðinga eru ekki að hætta þurfi allri kjötneyslu heldur, samanber nýju norrænu ráðleggingarnar, fremur að leitast við að draga úr henni og auka neyslu á afurðum úr jurtaríkinu. Einnig þurfi m.a. að kortleggja betur og mögulega bæta framleiðsluferla.

Hreyfing: Endurskoðuð útgáfa opinberra ráðlegginga um hreyfingu og takmörkun kyrrsetu fyrir Ísland er væntanleg en þær byggja á ráðleggingum Alþjóðaheilbrigðisstofnunarinnar (Embætti Landlæknis, 2020). Í íslensku ráðleggingunum verður áfram lögð áhersla á m.a. fjölþætt gildi þess að nota virkan ferðamáta þ.e. ferðamáta felur í sér hreyfingu eins og t.d. göngu og hjólreiðar fyrir heilsuna, fjárhaginn og umhverfið.

Virkur ferðamáti er einn af lýðheilsuvísum embættis landlæknis og má sjá nýjustu niðurstöður hverju sinni m.a. í mælaborði lýðheilsu. Samkvæmt nýjustu gögnum úr árlegri vöktun sem Gallup framkvæmir fyrir embættið notuðu um 17% fullorðinna virkan ferðamáta árið 2022 þ.e. gengu eða hjóluðu til vinnu eða skóla 3x í viku eða oftar. Samkvæmt nýjustu gögnum úr Ískrá heilsugæslunnar komu rúmlega 57% grunnskólanemenda gangandi eða hjólandi í skólann daginn sem viðtal við skólahjúkrunarfræðing fór fram skólaárið 2022-23. Nemendur í 7. bekk voru sem fyrr duglegastir að nota slíkan ferðamáta eða alls tæp 66% umrætt skólaár.

Umhverfi og aðstæður hafa mikil áhrif á hreyfingu fólks, líkt og aðra lifnaðarhætti. Í aðgerðaráætlun Alþjóðaheilbrisstofnunarinnar um hreyfingu 2018-2030 (WHO, 2018) er sérstaklega dregið fram hvernig fjárfesting í ýmsum aðgerðum sem stuðla að aukinni hreyfingu stuðlar einnig að innleiðingu ýmissa heimsmarkmiða Sameinuðu þjóðanna um sjálfbæra þróun. Auk augljóslega markmiðs 3 (Heilsa og vellíðan) má þar t.d. nefna markmið 10 (Aukinn jöfnuður), markmið 11 (Sjálfbærar borgir) og markmið 13 (Aðgerðir í loftslagsmálum).

Alls hafa verið gefnir út sjö gátlistar fyrir starf Heilsueflandi samfélags (HSAM, 2023) og hafa öll viðmið í listunum verið tengd við viðeigandi heimsmarkmið í vefkerfinu fyrir þetta starf. HSAM gátlistinn Vellíðan með hreyfingu og útiveru inniheldur sjö yfirviðmið. Í júlí árið 2023 höfðu 16 samfélög dregið grunnlínu í þessum gátlista. Yfirviðmið nr. 6 felur í sér undirviðmið sem gefa vísbendingar um hversu raunhæfur valkostur virkur ferðamáti og almenningssamgöngur eru fyrir íbúa viðkomandi samfélags. Samkvæmt mati samfélaga á stöðu undirviðmiðs *6.2. Til staðar er samfellt net göngu- og hjólastíga sem tengir saman helstu áfangastaði íbúa* metur eitt samfélag stöðuna á þessu viðmiði 1 (að engu leyti komið til framkvæmda, 0%), fjögur meta stöðuna 3 (að hluta til komið til framkvæma, 50%), tíu meta stöðuna 4 (að mestu leyti komið til framkvæmda, 75%) og eitt metur stöðuna 5 (að fullu komið til framkvæmda, 100%). Þegar horft er til framtíðar er m.a. mikilvægt að huga að því að umhverfi og aðstæður fyrir íþróttaiðkun og annars konar hreyfingu þróist í samræmi við breytta tíma og þarfir ólíkra hópa.

Tóbak, áfengi og önnur vímuefni: Íslendingar hafa náð frábærum árangri í að draga úr reykingum í öllum aldurshópum og einnig m.a. áfengisdrykkju og annarri áhættuhegðun á meðal ungmenna (Embætti landlæknis, 2023). Samkvæmt Vergunst og félögum (2023) geta loftslagsbreytingar stuðlað að aukinni notkun áfengis og annarra vímuefna ekki síst á meðal ungs fólks. Frekari rannsókna er þörf en mögulegir farvegir fyrir neikvæða þróun hvað þetta varðar eru m.a. aukin tíðni geðraskana, ýmiss konar breytingar og ótti við það sem koma skal.

Í staðreyndablaði Alþjóðaheilbrigðisstofnunarinnar (WHO, 2020) um áfengisnotkun og sjálfbæra þróun kemur fram að áfengisnotkun spornar gegn innleiðingu á 13 af 17 heimsmarkmiðum Sameinuðu þjóðanna. Það hafi afleiðingar m.a. með tilliti heilsu barna, smitbærra og ósmitbærra sjúkdóma, andlegrar heilsu og umferðarslysa og í víðara samhengi fyrir efnahagslega og félagslega þróun, umhverfi og jafnrétti. Meðal annars kemur fram að umtalsvert magn af vatni þarf til að framleiða áfengi, ekki síst bjór. Þannig geti þurft allt að 10L af vatni til að framleiða 1L af bjór. Þá eru ótalin áhrif m.a. vegna notkunar á áburði og sú orka sem fer í framleiðsluferlið.

Undanfarin ár hefur Alþjóðaheilbrigðisstofnunin í auknum mæli beint athyglinni að skaðlegum áhrifum tóbaksnokunar fyrir umhverfið auk vel þekktra, neikvæðra áhrifa á heilsu fólks, efnahag og samfélög (WHO, 2023b). Stofnunin hefur þannig m.a. lagt áherslu á að auka vitund í tóbaksræktarsamfélögum um kosti þess að hverfa frá ræktun á tóbaki og skipta yfir í sjálfbæra ræktun. Með því má bæta gæði matvæla og auka fæðuöryggi. Í þessu samhengi eru þjóðir hvattar til að hætta styrkveitingum til tóbaksræktunar og nýta fremur fjármuni til að styðja

bændur við að skipta út tóbaksræktun fyrir ræktun matvæla.

7.4.2.6 Jöfn tækifæri til heilsu og velsældar

Rannsóknir staðfesta að ójöfnuður til heilsu er staðreynd á Íslandi líkt og annars staðar í heiminum. Í skýrslu Sigríðar Haralds Elínardóttur og félaga (2021) kemur m.a. fram að þeir sem eru með hærra menntunarstig og/eða búa við betri fjárhagslega afkomu hafa tilhneigingu til þess að búa við betra heilsufar og líðan heldur en þeir sem hafa minni menntun eða eiga erfitt með að ná endum saman. Þetta á einkum við um mat á andlegri og líkamlegri heilsu, takmarkanir í daglegu lífi vegna heilsufars og tíðni sykursýki. Einnig kemur m.a. fram að tíðni daglegra reykinga og of stutts svefns er um tvisvar til þrisvar sinnum algengari í hópi minna menntaðra og þeirra sem eiga erfitt með að ná endum saman. Þeir sem standa hallari fæti félags- og efnahagslega virðast líklegri til að bera minna traust til annarra og einmanaleiki fylgir einnig félagslegri stigskiptingu og er meiri í hópi þeirra sem eiga erfitt með að ná endum saman.

Í nýlegri skýrslu Alþjóðaheilbrigðisstofnunarinnar (2022) um heilsu flóttafólks og farandfólks kemur m.a. fram að aldrei hafi fleiri verið á ferðinni og heilsa þessara hópa sé líklegri til að vera verri en þeirra sem fyrir eru. Er það sagt skýrast af ýmsum áskorunum eins og t.d. ótryggri réttarstöðu; ýmiss konar mismunun og hindrunum m.a. félagslegum, menningarlegum tungumálalegum, stjórnsýslulegum og fjárhagslegum; skorti á upplýsingum um réttindi m.a. hvað varðar heilbrigðisþjónustu; litlu heilsulæsi og ótta við farbann og brottvísun.

Þessar niðurstöður undirstrika að það er ekki síður mikilvægt á Íslandi en annars staðar að standa vörð um hornsteina heilsu (sjá mynd 7.1, rauði og appelsínuguli boginn) og huga sérstaklega að þörfum viðkvæmra og jaðarsettra hópa í mótvægis- og aðlögunaraðgerðum vegna loftslagsbreytinga.

7.4.3 Heilbrigðiskerfið

Samkvæmt lögum nr. 40/2007um heilbrigðisþjónustu (Alþingi, 2007) er heilbrigðisþjónusta skilgreind sem

> „*. . . hvers kyns heilsugæsla, lækningar, hjúkrun, . . . sjúkrahúsþjónusta, sjúkraflutningar, hjálpartækjaþjónusta og þjónusta heilbrigðisstarfsmanna innan og utan heilbrigðisstofnana sem veitt er í því skyni að efla heilbrigði, fyrirbyggja, greina eða meðhöndla sjúkdóma og endurhæfa sjúklinga*“.

Markmið laganna er að allir landsmenn eigi kost á fullkomnustu heilbrigðisþjónustu sem er tök á að veita á hverjum tíma til að vernda andlegt, líkamlegt og félagslegt heilbrigði. Í Heilbrigðisstefnu til ársins 2030 (Heilbrigðisráðuneytið, 2019) er áhersla á að við skipulag heilbrigðisþjónustu skuli stefnt að því að hún sé ávallt veitt á viðeigandi þjónustustigi og að heilsugæslan sé að jafnaði fyrsti viðkomustaður. Samanber fyrri umfjöllun um náttúruvá, smitsjúkdóma og fleira er einnig vert að nefna að markmið laga um almannavarnir (nr. 82/2008) er að

> „*. . . undirbúa, skipuleggja og framkvæma ráðstafanir sem miða að því að koma í veg fyrir og takmarka, eftir því sem unnt er, að almenningur verði fyrir líkams- eða heilsutjóni, eða umhverfi eða eignir verði fyrir tjóni, af völdum náttúruhamfara eða af mannavöldum, farsótta eða hernaðaraðgerða eða af öðrum ástæðum og veita líkn í nauð og aðstoð vegna tjóns sem hugsanlega kann að verða eða hefur orðið.*“

Reynslan sýnir að íslenska heilbrigðiskerfið býr yfir margvíslegum eiginleikum sem styðja við öflugt viðbragð við óvæntum áföllum og atburðum. Það felst einkum í því að stefnumörkun og stjórnun, ásamt eftirliti og fjármögnun, fer fram miðlægt á landsvísu. Þetta fyrirkomulag

studdi vel við öflugt og áhrifaríkt viðbragð við heimsfaraldri COVID-19 (SARS-CoV-2), þar sem ráðuneyti dómsmála og heilbrigðismála unnu saman í krafti undirstofnana sinna (embættis landlæknis og almannavarnadeildar ríkislögreglustjóra) og samkvæmt landsáætlun vegna heimsfaraldurs (OECD, 2021). Draga má margvíslegan lærdóm af heimsfaraldrinum þar sem líkur á að breytingar á loftslagi muni leiða aukinnar tíðni óvæntra og jafnvel stórfelldra atburða sem reyna munu á innviði heilbrigðiskerfisins (t.d. flóð og skriðuföll).

Hins vegar er það svo að loftslagstengd áhætta er margþætt og ekki bundinn við tiltekna eða afmarkaða atburði. Þessar nýju áskoranir geta einnig átt sér stað yfir lengri tíma og þannig valdið langvarandi álagi á innviði og mannauð (WHO, 2015)

Samanber fyrri umfjöllun í kaflanum má nefna að aukinn fjöldi fólks mun þurfa að flýja heimkynni sín vegna loftslagsbreytinga og röskunar á vistkerfum og líffræðilegum fjölbreytileika. Langvarandi ógnir eru bæði beinar og afleiddar. Beinar ógnir taka til dæmis til aukinnar tíðni dauðsfalla og alvarlegra veikinda vegna hærri lofthita og hamfara sem eiga sér stað yfir stuttan tíma. Víðtæk viðbrögð og skipulag líkt og þurfti til í heimsfaraldri COVID-19 má skoða til að undirbúa viðbrögð við þessum ógnum. Afleidd áhrif eru breytingar á vistkerfum og félagslegum kerfum, fæðuöryggi og nýjar smitleiðir sjúkdóma ásamt heilsufarslegum áhrifum búferlaflutninga vegna breytinga á loftslagi (sjá m.a. mynd 7.4).

Heimsfaraldur COVID-19 og ekki síst eftirköst hans hafa einnig dregið fram veikleika íslensks heilbrigðiskerfis. Þar er að mati sérfræðinga brýnast að bæta úr skorti á heilbrigðismenntuðu starfsfólki sem reyndar er alþjóðlegt vandamál en hugsanlega meira áberandi hérlendis vegna smæðar kerfisins sem gerir það enn viðkvæmara. Þá þarf að setja verulega aukinn kraft í að byggja upp og viðhalda innviðum eins og húsnæði og upplýsingakerfum þótt vissulega sé margt verið að gera nú þegar eins og t.d. með uppbyggingu Landspítala. Áskoranir sem heilbrigðisþjónustan stendur frammi fyrir eru því margvíslegar; aukin eftirspurn og kostnaður, skortur á starfsfólki, eftirstöðvar heimsfaraldurs COVID-19 og sýklalyfjaónæmi auk þeirra afleiðinga loftslagsbreytinga sem fyrirsjáanlegar eru. Það er mikilvægt að bregðast við þessum áskorunum með markvissum og fjölþættum aðgerðum. Annars vegar þarf að efla lýðheilsu með forvörnum og heilsueflingu og þannig minnka eftirspurn eftir heilbrigðisþjónustu. Hins vegar þarf að nýta heilbrigðiskerfið með sem skynsamlegustum hætti þar sem straumlínulögun þjónustu, sjálfbærni og hvers kyns nýsköpun eru lykilþættir. Í þessu samhengi má m.a. nefna samþættingu og samfellu í veitingu velferðaþjónustu í heimabyggð og eflingu fjarheilbrigðisþjónustu. Ljóst er að ráðast þarf í stórátak til að efla menntun og mönnun heilbrigðisstétta. Síðast en ekki síst er talið brýnt að leggjast í rannsóknarvinnu til að meta bein og afleidd áhrif hnattrænna loftslagsbreytinga, til skemmri og lengri tíma litið, á heilsu og líðan. Slík vinna þarf bæði að taka til þess hvernig heilbrigðiskerfið getur tekið þátt í milda áhrif loftslagsbreytinga og hvernig aðlaga þarf kerfið að breyttum aðstæðum svo lágmarka megi heilsutjón og stuðla að vellíðan allra (McMichael, 2013). Horfa þarf til kjarnainnviða um allt land og einnig til minni byggða sem standa hallari fæti gagnvart skyndilegum áföllum m.a. vegna náttúruvár atburða. Með því að efla heilbrigðisviðbúnað og almannavarnir skapast aukið áfallaþol heilbrigðiskerfisins sem mun nýtast við framtíða áskoranir vegna loftslagsbreytinga og annarrar heilbrigðisvár.

Heimildir

Alþingi (1998). *Lög um hollustuhætti og mengunarvarnir*. Alþingi. URL: https://www.althingi.is/lagas/nuna/1998007.html.

— (2007). *Lög um heilbrigðisþjónustu*. Alþingi. URL: https://www.althingi.is/lagas/nuna/2007040.html.

Bednar-Friedl, B., R. Biesbroek, D.N. Schmidt, P. Alexander, K.Y. Børsheim, J. Carnicer, E. Georgopoulou, M. Haasnoot, G. Le Cozannet, P. Lionello, O. Lipka, C. Möllmann, V. Muccione, T. Mustonen, D. Piepenburg og L. Whitmarsh (2022). „Europe". Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 1817–1927. ISBN: 9781009325844. DOI: 10.1017/9781009325844.015.1817.

Blomhoff, Rune, Rikke Andersen, Erik Kristoffer Arnesen, Jacob Juel Christensen, Hanna Eneroth, Maijaliisa Erkkola, Ieva Gudanaviciene, Þórhallur Ingi Halldórsson, Anne Høyer-Lund, Eva Warensjö Lemming, H. M. Meltzer og I Thorsdottir (2023). *Nordic Nutrition Recommendations 2023: Integrating Environmental Aspects*, bls. 388. URL: https://pub.norden.org/nord2023-003/nord2023-003.pdf.

Cissé, G., R. McLeman, H. Adams, P. Aldunce, K. Bowen, D. Campbell-Lendrum, S. Clayton, K.L. Ebi, J. Hess, C. Huang, Q. Liu, G. McGregor, J. Semenza og M.C Tirado (2022). „Health, Wellbeing, and the Changing Structure of Communities". Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 1041–1170. ISBN: 9781009325844. DOI: 10.1017/9781009325844.009.1042.

Dahlgren, Göran og Margaret Whitehead (1991). *Policies and Strategies to Promote Social Equity in Health*. Aðlöguð útgáfa embættis landlæknis 2019 (3.0). Stockholm, Sweden: Institute for Future Studies.

EAT (2023). *The EAT-Lancet Commission on Food, Planet, Health*. EAT-Lancet Commission. URL: https://eatforum.org/eat-lancet-commission/.

Einar Halldórsson (2022). *Loftgæði á Íslandi – Ársskýrsla 2020*. Tæknileg skýrsla UST-2022:8. Umhverfisstofnun, bls. 49.

Embætti Landlæknis (2020). *Endurskoðun opinberra ráðlegginga um hreyfingu að hefjast*. Embætti Landlæknis. URL: https://island.is/frett/Endurskodun-opinberra-radlegginga-um-hreyfingu-ad-hefjast.

— (2023). *Nýjar Norrænar næringarráðleggingar 2023 - mataræði sem stuðlar að góðri heilsu og hefur jákvæð áhrif á umhverfið*. Embætti Landlæknis. URL: https://island.is/frett/nyjar-norraenar-naeringarradleggingar-2023-mataraedi-sem-studlar-ad-godri.

Embætti landlæknis (2023). *Áfengis- og vímuefnanotkun - tölur*. Embætti landlæknis. URL: https://island.is/tolfraedi-um-afengi-vimuefni/talnabrunnur-afengis-og-vimuefnanotkun.

European Environment Agency (EEA) (2023). *European AQ Portal*. European Environment Agency (EEA). URL: https://aqportal.discomap.eea.europa.eu/.

Gallup (2022). *Ríflega helmingur finnur lítið fyrir umhverfiskvíða*. Gallup. URL: https://www.gallup.is/frettir/riflega-helmingur-finnur-litid-fyrir-umhverfiskvida/.

— (2023). *Þjóðarpúls Gallup | Umhverfiskvíði*. Gallup. URL: https://www.gallup.is/frettir/thjodarpuls-gallup-umhverfiskvidi/.

Gunnar Guðmundsson, Ragnhildur Guðrún Finnbjornsdottir, Þorsteinn Johannsson og Vilhjálmur Rafnsson (2019). „Loftmengun á Íslandi og áhrifhennar á heilsu manna-Yfirlitsgrein“. Í: *Læknablaðið* 10. DOI: 10.17992/lbl.2019.10.252.

Gunnarsdóttir, Steina, Ragnhildur Guðmannsdóttir, Hólmfríður Þorgeirsdóttir, Jóhanna Eyrún Torfadóttir, Ellen Alma Tryggvadóttir, Birna Þórisdóttir, Ólöf Guðný Geirsdóttir, Ólafur Reykdal, T´Hórhallur Ingi Halldórsson, Ingibjörg Gunnarsdóttir og Bryndís Eva Birgisdóttir (2022). *Hvað borða Íslendingar*.

Hagstofa Íslands (2022). *Mannfjöldaspá 2022*. URL: https://hagstofa.is/utgafur/frettasafn/mannfjoldaspa/mannfjoldaspa-2022/ (skoðað 08.08.2023).

— (2023). *Velsældarvísar*. Hagstofa Íslands. URL: https://visar.hagstofa.is/velsaeld/.

Halldorsdottir, Solveig, Ragnhildur Gudrun Finnbjornsdottir, Bjarki Thor Elvarsson, Gunnar Gudmundsson og Vilhjalmur Rafnsson (jan. 2022). „Ambient nitrogen dioxide is associated with emergency hospital visits for atrial fibrillation: a population-based case-crossover study in Reykjavik, Iceland“. Í: *Environmental Health* 21.1, bls. 2. ISSN: 1476-069X. DOI: 10.1186/s12940-021-00817-9. URL: https://doi.org/10.1186/s12940-021-00817-9.

Halldorsdottir, Solveig, Ragnhildur Gudrun Finnbjornsdottir, Bjarki Thor Elvarsson, Oddny Sigurborg Gunnarsdottir, Gunnar Gudmundsson og Vilhjalmur Rafnsson (2023). „Ambient air pollution and emergency department visits and hospitalisation for cardiac arrest: a population-based case–crossover study in Reykjavik, Iceland“. Í: *BMJ Open* 13.5. ISSN: 2044-6055. DOI: 10.1136/bmjopen-2022-066743.

Heilbrigðisráðuneytið (2019). *Stefna fyrir íslenska heilbrigðisþjónustu til ársins 2030*. Tæknileg skýrsla. Heilbrigðisráðuneytið, bls. 47. URL: https://www.stjornarradid.is/library/04-Raduneytin/Heilbrigdisraduneytid/ymsar-skrar/Heilbrigdisstefna_4.juli.pdf.

Herbert Eiríksson, Björn Árdal, Björn Rúnar Lúðvíksson, Ásbjörn Sigfússon, Helgi Þ. Valdimarsson og Ásgeir Haraldsson (2000). „Ofnæmi og astmi hjá íslenskum börnum“. Í: *Laeknabladid* 86.2, bls. 102–107.

HSAM (2023). *Heilsueflandi samfélag*. HSAM. URL: https://www.heilsueflandi.is/.

IPCC (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3056. DOI: 10.1017/9781009325844.

— (2022b). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report*. Gefið út af Priyadarshi R. Shukla, Jim Skea, Raphael Slade, Roger Fradera, Minal Pathak, Alaa Al Khourdajie, Malek Belkacemi, Renée van Diemen, Juliette Malley, David McCollum, Shreya Some og Purvi Vyas. Accessed: 2023-10-02. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf.

— (2022c). *Fact sheet - Health*. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/outreach/IPCC_AR6_WGII_FactSheet_Health.pdf.

— (2022d). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001.

Kisiel, Marta A, Malin Sedvall, Andrei Malinovschi, Karl A Franklin, Thorarinn Gislason, Viktor Shlunssen, Annika Johansson, Lars Modig, Rain Jogi, Mathias Holm, Cecilie Svanes, Louise Lindholdt, Malin Carlson og Christer Janson (sep. 2023). „Inflammatory bowel disease and

asthma. Results from the RHINE study“. Í: *Respiratory Medicine* 216. Epub ahead of print, bls. 107307. DOI: 10.1016/j.rmed.2023.107307.

McMichael, Anthony J. (2013). „Globalization, Climate Change, and Human Health“. Í: *New England Journal of Medicine* 368.14. PMID: 23550671, bls. 1335–1343. DOI: 10.1056/NEJMra1109341.

OECD (2021). *Iceland: Country Health Profile 2021, State of Health in the EU*. Tæknileg skýrsla, bls. 24.

Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, H. Adams, I. Adelekan, C. Adler, R. Adrian, P. Aldunce, E. Ali, R. Ara Begum, B. Bednar- Friedl, R. Bezner Kerr, R. Biesbroek, J. Birkmann, K. Bowen, M.A. Caretta, J. Carnicer, E. Castellanos, T.S. Cheong, W. Chow, G. Cissé G. Cissé og Z. Zaiton Ibrahim (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Technical Summary. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 37–118.

Sigríður Elínardóttir, Hildur Björk Sigbjörnsdóttir og Jón Óskar Guðlaugsson (2021). *Ójöfnuður í heilsu á Íslandi. Ástæður og árangursríkar aðgerðir til úrbóta*. Tæknileg skýrsla. Embætti Landlæknis.

Sommerlad, Andrew og Kathy Y Liu (2023). „Air pollution and dementia“. Í: *bmj* 381.

Stjórnarráð Íslands (2015). *Parísarsamningurinn*. URL: https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit--skyrslur-og-skrar/Par%C3%ADsarsamningurinn.pdf.

Tinna Halldórsdóttir (2023). *Seigla í kjölfar náttúruhamfara*. Tæknileg skýrsla, bls. 46.

Umhverfisstofnun (2017). *Hreint loft til framtíðar – Áætlun um loftgæði á Íslandi 2018-2029*. Tæknileg skýrsla. Reykjavík, Iceland: Umhverfis- og auðlindaráðuneytið, bls. 62.

— (2022). *Losun gróðurhúsalofttegunda*. URL: https://ust.is/library/Skrar/loft/NIR/%c3%9atdr%c3%a1ttur%20NIR%202022.pdf.

— (2023a). *Loftgæði*. Umhverfisstofnun. URL: https://loftgaedi.is/.

— (2023b). *Útdráttur úr landsskýrslu um losun loftmengunarefna á Íslandi frá 1990 til 2021*. Umhverfisstofnun, bls. 38. URL: https://ust.is/library/Skrar/loft/IIR/%C3%9Atdr%C3%A1ttur%20IIR%202023.pdf.

UN (2015). „Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development“. Í: *United Nations General Assembly*.

— (2017a). *Global Compact for Migration*. United Nations, bls. 66. URL: refugeesmigrants.un.org/sites/default/files/180713_agreed_outcome_global_compact_for_migration.pdf.

— (2017b). *The new Urban Agenda*. Habitat III Secretariat, United Nations, bls. 66. URL: https://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-English.pdf.

UNDRR (2015). *What is the Sendai Framework?* URL: https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sendai-framework.

UNHCR (2019). *Global Compact for Refugees*. United Nations High Comissioner on Refugees. URL: www.unhcr.org/about-unhcr/who-we-are/global-compact-refugees.

Vergunst, Francis, Helen L Berry, Kelton Minor og Nicholas Chadi (2023). „Climate Change and Substance-Use Behaviors: A Risk-Pathways Framework“. Í: *Perspectives on Psychological Science* 18.4, bls. 936–954.

WHO (1986). *Ottawa Charter for Health Promotion, 1986*. Tæknileg skýrsla. World Health Organization. Regional Office for Europe. URL: https://apps.who.int/iris/handle/10665/349652.

— (2015). *Operational framework for building climate resilient health systems*. World Health Organization, 47 p.

— (2017). *Tackling NCDs:'best buys' and other recommended interventions for the prevention and control of noncommunicable diseases*. World Health Organization.

— (2018). *Global action plan on physical activity 2018-2030: more active people for a healthier world*. Tæknileg skýrsla. World Health Organization, bls. 104. URL: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/272722/9789241514187-eng.pdf.

WHO (2020). *Alcohol consumtion and sustainable development*. URL: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/340806/WHO-EURO-2020-2370-42125-58041-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
— (2021a). *Climate Change and Health - Fact Sheet*. URL: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health.
— (2021b). *Health Promotion Glossary of Terms 2021*. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Geneva: World Health Organization.
— (2021c). *On Climate and Health*. URL: https://www.un.org/sites/un2.un.org/files/2021/08/fastfacts-health.pdf.
— (2021d). *Zero regrets: scaling up action on climate change mitigation and adaptation for health in the WHO European Region. Key messages from the Working Group on Health in Climate Change*. Tæknileg skýrsla. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. World Health Organization. Regional Office for Europe. URL: https://apps.who.int/iris/handle/10665/344733.
— (2022a). *Health and Climate Change: Country Profile 2022: Iceland*. Tæknileg skýrsla. WHO Reference Number: WHO/HEP/ECH/CCH/22.01.03. World Health Organization, bls. 20. URL: https://www.who.int/publications/i/item/WHO-HEP-ECH-CCH-22.01.03.
— (2022b). *Mental Health and Climate Change: Policy Brief*. Tæknileg skýrsla. ISBN: 9789240045125. World Health Organization, bls. 16.
— (2022c). *World report on the health of refugees and migrants*.
— (2023a). *A Healthy Environment in the WHO European Region: Why It Matters and What Steps We Can Take to Improve Health*. Tæknileg skýrsla. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
— (2023b). *World No Tobacco Day 2023: grow food, not tobacco*. World Health Organization, 32 p.

KAFLI

8 ATVINNUVEGIR





Efnisyfirlit kafla

8.1 Inngangur 249
8.2 Landbúnaður 249
8.3 Veiðihlunnindi göngufiska 250
8.4 Sjávarútvegur 251
8.4.1 Veiðar 251
8.4.2 Fiskeldi 254
8.4.3 Áhrif loftslagsbreytinga á sjávarbyggðir og samfélög 255
Sérgrein 8A: Viðnámsþróttur samfélaga 256
8.5 Ferðaþjónusta 257
8.6 Vátrygginga- og fjármálastarfsemi 259
8.6.1 Loftslagsbreytingar og hlutverk seðlabanka 260
8.6.2 Loftslagsbreytingar og hlutverk banka og lífeyrissjóða 261
8.6.3 Loftslagsbreytingar og tryggingafélög 263
8.7 Áhrif loftslagsbreytinga og umbreyting atvinnulífsins 266

Samantekt

1. Loftslagsbreytingar, afleiðingar þeirra og viðbrögð við þeim gera loftslagsmál að einu stærsta efnahagsmáli samtímans. Áhrif á atvinnuvegi geta verið bæði bein og óbein, svo sem í gegnum aðfangakeðjur, og haft samfélags- og efnahagslegar afleiðingar. Aðlögunaraðgerðir geta mildað áhrifin.

2. Loftslagsbreytingar munu hafa áhrif á ræktun nytjaplantna á Íslandi. Ræktunaröryggi mun aukast og nýjar plöntur teknar til ræktunar í landbúnaði, garðyrkju og skógrækt. Vegna breyttra ræktunarskilyrða mun jarðrækt á fæðu-, fóður-, viðar- og orkuplöntum aukast. Sveiflur í veðurfari, sníkjudýr, þurrkar og gróðureldar geta þó aukið áhættu.

3. Röskun í aðfangakeðjum geta haft umtalsverð óbein áhrif á hefðbundið dýrahald sem er að hluta háð innfluttu kjarnfóðri, svo sem í nautgripa-, svína og kjúklingarækt. Loftslagsbreytingar munu hafa lítil bein áhrif á hefðbundið dýrahald.

4. Stefna stjórnvalda í loftslagsmálum og aðgerðir þeirra til að draga úr losun, og samsvarandi breytingar á neysluhegðan almennings, geta haft áhrif á þróun og afkomu þeirra greina landbúnaðarins sem í dag eru ábyrgar fyrir mikilli losun gróðurhúsalofttegunda. Fæðuöryggi hérlendis er undir bæði beinum og óbeinum áhrifum loftslagsbreytinga.

5. Umtalsverð verðmæti eru falin í veiðihlunnindum tengdum laxi, bleikju og urriða. Undanfarin ár hafa stofnar bleikju verið á undanhaldi en stofnar urriða að styrkjast, á meðan laxastofnar haldast nokkuð jafnir. Sú þróun hefur mælst í stofnum á nær öllu landinu og á sér einnig stað á sama tíma í norðanverðum Noregi. Samhliða þróun á svo stóru svæði hefur meðal annars verið tengd við hnattrænar loftslagsbreytingar, s.s. bein og óbein áhrif hækkunar á vatnshita. Ef þessi þróun heldur áfram gæti þurft að draga úr veiðisókn í hnignandi stofna.

6. Hækkandi sjávarhiti og súrnun sjávar hafa áhrif á sjávarútveg. Hækkun á hitastigi sjávar veldur breytingum á útbreiðslu og stofnstærð nytjategunda. Slíkar breytingar geta haft áhrif á heildarafla, aflasamsetningu og orsakað auknar deilur milli þjóðríkja vegna deilistofna. Veðurfarsbreytingar geta haft áhrif á aðstæður til sjósóknar og á markaði.

7. Hækkandi sjávarhiti á íslenska landgrunninu hefur þegar leitt til breytinga á útbreiðslu margra botnfisktegunda við landið, svo sem ýsu, þorsks og skötusels, og munu slíkar breytingar halda áfram. Nytjategundir, sem hafa verið við nyrðri mörk útbreiðslu sinnar á Íslandsmiðum, hafa nú þegar og munu áfram stækka útbreiðslusvæði sitt til norðausturs. Á sama tíma gætu stofnstærðir og útbreiðsla kaldsjávartegunda, t.d. hlýra, hrognkelsa og loðnu, minnkað. Þessar breytingar geta haft áhrif á tilhögun og afkomu veiða. Samspil tegunda og nýtingar í vistkerfi sjávar er afar flókið og nauðsynlegt að þróa og nota fjölstofna vistkerfislíkön við mat á áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg.

8. Súrnun sjávar, sem er örari á íslensku hafsvæði en víða annars staðar, hefur víðtæk neikvæð áhrif, einkum á kalkmyndandi lífverur. Slíkar lífverur eru mikilvægar í vistkerfi og fæðuvef sjávar auk þess sem þær eru nýttar sem matvæli eða til iðnaðarframleiðslu, s.s. skelfiskur og kalkþörungar. Súrnun sjávar mun hafa neikvæð áhrif á nýtingu þeirra. Rannsóknum á samspili hlýnunar og súrnunar sjávar er ábótavant en þær fáu rannsóknir sem gerðar hafa verið sýna að í heildina virðast áhrif hlýnunar á sjávarútveg vega þyngra en áhrif súrnunar.

9. Frekari rannsókna er þörf á efnahags- og samfélagslegum áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg, svo sem á afkomu, atvinnu, byggðaþróun og viðnámsþrótt samfélaga. Gæta þarf sérstaklega að sjávarbyggðum vegna áhrifa á sjávartengdar nytjar, veðurtengdra áhrifa á sjósókn og aukinnar hættu af náttúruvá.

10. Áhrif loftslagsbreytinga á fiskeldi geta t.d. verið staðbundnar breytingar á vaxtarhraða eldistegunda, nýir sjúkdómar og sníkjudýr, breytt afkastageta svæða, áhrif á bæði aðfanga- og virðiskeðju, einkum þegar kemur að fóðurframleiðslu, og áhrif veðuröfga á innviði. Rannsóknum er ábótavant á áhrifum loftslagsbreytinga á fiskeldi á Íslandi.

11. Áhrif loftslagsbreytinga á ferðaþjónustu helgast meðal annars af breytingum á náttúrulegu umhverfi, landslagi, náttúruvá og breytingum á eftirspurn. Breytingarnar eru þegar sýnilegar, svo sem í Kerlingarfjöllum, og marktæk fylgni er milli breytinga á yfirborðshita sjávar og auknum sýnileika steypireiðs og minni sýnileika hrefnu á Skjálfandaflóa. Loftslagsbreytingar geta haft neikvæð áhrif á öryggi ferðamanna, t.d. í samhengi aukinnar náttúruvár.

12. Eftirspurn eftir ferðalögum til norðlægra landa gæti aukist, a.m.k. til skamms tíma. Þá sérstaklega ásókn til þeirra áfangastaða sem eru viðkvæmir fyrir áhrifum loftslagsbreytinga, svo sem jökla eða jökullóna. Mögulegt er að loftslagsbreytingar auki eftirspurn eftir ferðaþjónustu á Íslandi, a.m.k. í náinni framtíð. Þó geta aðgerðir í loftslagsmálum og neikvæð viðhorf til langra ferðalaga, sem leiða til mikillar losunar gróðurhúsalofttegunda, dregið úr eftirspurn. Ferðaþjónustan getur spyrnt við fótum með vist- og loftslagsvænni uppbyggingu.

13. Íslensk ferðaþjónusta hefur hafið aðlögunaraðgerðir vegna loftslagsbreytinga og aukinnar eftirspurnar eftir vistvænni ferðaþjónustu. Aðlögun í jökultengdri ferðaþjónustu er ýmist venjubundin eða sem viðbragð við sýnilegri áhættu eða tækifærum.

14. Vátrygginga- og fjármálastarfsemi getur orðið fyrir áhrifum af loftslagsbreytingum, haft áhrif á hvernig veðurtengdri áhættu er stýrt og hvernig bætt er fyrir afleiðingar alvarlegra veðuratburða og loftslagstengdra náttúruhamfara.

15. Áhrif loftslagsbreytinga á vátrygginga- og fjármálastarfsemi skiptast í raunlæga áhættu, svo sem vegna tjóns á eignum, og umbreytingaráhættu vegna aðgerða til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda eða vegna aðlögunaraðgerða. Vátrygginga- og fjármálastarfsemi þarf í auknum mæli að upplýsa um umhverfis- og loftslagsáhættu sem tengist rekstri hennar, til að mynda hvernig loftslagsáhætta er skilgreind, hvernig hún er metin og hvernig henni er stýrt.

16. Loftslagsbreytingar tengjast umboði og hlutverki Seðlabanka Íslands, s.s. í samhengi fjármálastöðugleika, fjármálaeftirlits og peningaeftirlits. Loftslagsáhætta er vaxandi og mun hafa áhrif á verðlag, fjármálastöðugleika og öryggi fjármálakerfisins. Greiningar og haglíkön þurfa að taka tillit til loftslagsáhættu, meta þarf áhrif á gæði eignasafna fjármálafyrirtækja og þróa þarf álagspróf. Fjármálaeftirlit þarf að tryggja að upplýsingagjöf sé í samræmi við Evrópureglur og taka þarf tillit til loftslagsáhættu við framkvæmd peningastefnu.

17. Viðbrögð við loftslagsbreytingum munu leiða til atvinnu- og iðnþróunar sem oft byggir á nýsköpun. Þegar hafa verið sett á fót fyrirtæki sem vinna að lág-kolvetnishagkerfi, þ.e. efnahagsstarfsemi sem miðar að sem minnstri losun. Þá kalla viðbrögðin einnig á nýsköpun hjá fjármálafyrirtækjum.

18. Loftslagsáhætta almennrar bankastarfsemi felur í sér aukna fjárhagslega óvissu, áhættu og aukinn kostnað tengdum fjárfestingum eða útlánum. Greiningargeta banka á þessum áhrifum er þó fremur skammt á veg komin. Innlendir bankar eru aðilar að reglum um ábyrgar fjárfestingar og reglum um ábyrga bankastarfsemi.

19. Græn skuldabréf eru dæmi um vöru sem hvetur til fjárfestinga í loftslagsvænum verkefnum og hafa íslensk fjármálafyrirtæki, sveitarfélög og önnur fyrirtæki gefið út slík skuldabréf.

20. Íslenskir lífeyrissjóðir taka þátt í samstarfsvettvangi norænna og breskra lífeyrissjóða sem hefur að markmiði að fjárfesta í grænum verkefnum. Markmið íslensku sjóðanna er að fjárfesta 9% af heildareignasafni sjóðanna, eins og það stóð árið 2021, í loftslagstengdum verkefnum.

21. Loftslagstengd veðurfarstjón hafa áhrif á rekstur vátryggingafélaga, þar með talið Náttúruhamfaratrygginga Íslands, þar sem slíkir atburðir valda persónu- og eignatjóni. Búist er við að tíðni og umfang tjóna muni aukast og endurkomutími atburða styttast. Loftslagstengdir atburðir annars staðar í heiminum geta einnig haft áhrif á rekstur vátryggingafélaga innanlands vegna endurtryggingasamninga við erlend vátryggingafélög.

8.1 Inngangur

Loftslagsbreytingar hafa ólík áhrif á atvinnuvegi. Þessi kafli fjallar um áhrif loftslagsbreytinga á loftslagsháða atvinnuvegi, svo sem landbúnað, sjávarútveg, fiskeldi og ferðaþjónustu. Einnig er fjallað um áhrif og viðbrögð fjármála- og tryggingafélaga við loftslagsbreytingum, en vátrygginga- og fjármálastarfsemi er mikilvæg til að stýra veðurtengdri áhættu eða til að bæta fyrir afleiðingar alvarlegra veðuratburða og náttúruhamfara.

Þessi kafli byggir að hluta á upplýsingum sem komu fram á málstofum sem vísindanefndin hélt árið 2022. Einstakar greinar byggja verulega á fyrirlestrum sem þar voru fluttir. Sérstaklega má nefna að grein 8.4 byggir á erindum Daða Más Kristóferssonar, Erlu Sturludóttur og Ragnhildar Friðriksdóttur. Grein 8.4.3 og sérgrein 8A byggja á erindum Catherine Chambers og Matthiasar Kokorsch. Grein 8.5 byggir á erindum Rannveigar Ólafsdóttur, Kjartans Bollasonar og Jóhannesar Welling og grein 8.6 á erindum Gunnars Jakobssonar, Láru Jóhannsdóttur og Reynis Smára Atlasonar.

8.2 Landbúnaður

Eins og fram kemur í grein 4.2 munu loftslagsbreytingar hafa áhrif á ræktun ýmissa nytjaplantna á Íslandi. Með loftslagsbreytingum er líklegt að ræktunaröryggi þeirra aukist og nýjar plöntur verði í auknum mæli teknar til ræktunar í landbúnaði, garðyrkju og skógrækt. Jarðrækt og framleiðsla fóður-, fæðu-, viðar- og orkuplantna mun aukast (sjá sérgrein 4B). Þó bera að hafa í huga að ef nýjar tegundir eru viðkvæmari fyrir sveiflum í veðurfari, mun tjónnæmi aukast, sem svarar til hlutfalls þeirra í heildarframleiðslu. Loftslagsbreytingum getur einnig fylgt aukið álag af sníkjudýrum og auknir þurrkar geta valdið ræktendum vandræðum og magnað upp hættu á gróðureldum við ákveðnar aðstæður. Hefðbundið dýrahald verður með svipuðum hætti og áður en talið er að loftslagsbreytingar hafi þar lítil bein áhrif.

Óbein áhrif loftslagsbreytinga á íslenskan landbúnað geta þó orðið umtalsverð og haft áhrif á rekstrarafkomu mismunandi greina. Landbúnaður er nú ábyrgur fyrir 13% af heildarlosun gróðurhúsalofttegunda frá Íslandi, ef nettólosun vegna landnotkunar (svokölluð LULUCF) er undanskilin, en hún er um 67% heildarlosunar landsins. Losun frá landbúnaði hefur minnkað um tæp 11% frá 1990. Ræktun búfjár er ábyrg fyrir um 65% af losun landbúnaðar á Íslandi, ef losun frá LULUCF er undanskilin (Keller o.fl., 2023). Óhjákvæmilegt er að stefna stjórnvalda, og tilheyrandi samdráttur í losun gróðurhúsalofttegunda, hafi áhrif á þróun og afkomu þeirra greina sem eru ábyrgar fyrir umtalsverðri losun, svo sem sauðfjárrækt, nautgriparækt og mjólkurframleiðslu. Breytingar í neysluhegðun munu einnig hafa áhrif á framleiðslu og eftirspurn (IPCC, 2022, kafli 4.7.5).

Íslenskur landbúnaður er nokkuð berskjaldaður fyrir alls kyns röskunum á virðis- og aðfangakeðjum erlendis. Unnin var úttekt á fæðuöryggi Íslands (Erla Sturludóttir o.fl., 2021) með áherslu á að skoða innlenda matvælaframleiðslu og hver áhrifin yrðu á hana ef aðföng og grunnhráefni skorti. Einnig var farið yfir atriði sem gætu stuðlað að auknu fæðuöryggi á Íslandi.

Greiningin leiddi í ljós að íslensk matvælaframleiðsla er háð innfluttum aðföngum, t.d. innfluttu jarðefnaeldsneyti, áburði, fóðri, sáðvöru og vélakosti. Niðurstöður sýndu m.a. að alifugla- og svínarækt er mjög háð innfluttu fóðri og gæti rof í aðfangakeðjum leitt til framleiðslustöðvunar í þeirri grein, á meðan framleiðsla myndi dragast saman í nautgriparækt og mjólkurframleiðslu. Skortur á áburði myndi leiða til samdráttar í fóðurframleiðslu, þar sem uppskerumagn gæti minnkað um 25–35% strax á fyrsta ári. Samdrátturinn héldi síðan áfram og hefði áhrif á búfjárrækt, sem er háð fóðurframleiðslu. Einnig er talið að framleiðsla í garðyrkju myndi dragast saman. Áhrif á ræktun sauðfjár og hrossa og matvælaframleiðslu henni tengdri yrðu þó lítil. Áhrif loftslagsbreytinga á aðfangakeðjur og matvælaöryggi eru rædd með hliðsjón af kerfislægri áhættu í grein 10.3.3. Mikilvægt er að átta sig á afleiðingum loftslagsbreytinga í viðskiptalöndum Íslands, en almennt er rannsóknum á óbeinum áhrifum loftslagsbreytinga á landbúnað á Íslandi ábótavant.

Eins og V2018 (Halldór Björnsson o.fl., 2018) lagði áherslu á er flókið að spá fyrir um áhrif hlýnunar á atvinnugreinar landbúnaðarins. Þar hafa aðrir þættir en áhrif loftslagsbreytinga mikil áhrif, svo sem gengissveiflur, heimsmarkaðsverð á landbúnaðarafurðum, stjórnvaldsaðgerðir og vilji og geta bænda til að laga sig að breyttum heimi. Mikilvægt er að auka rannsóknir á bæði beinum og óbeinum áhrifum loftslagsbreytinga á atvinnugreinar landbúnaðar, þá sérstaklega í samhengi fæðuöryggis, samfélags- og efnahagslegra áhrifa.

8.3 Veiðihlunnindi göngufiska

Þegar talað er um veiðihlunnindi er einkum átt við þrjár laxfiskategundir, lax, bleikju og urriða. Verðmæti af veiðum á þessum tegundum eru töluverð. Í skýrslu Hagfræðistofnunar Háskóla Íslands 2018 var núvirtur ágóði veiðiréttareigenda um 70 milljarðar króna og rekja mátti um níu milljarða landsframleiðslu beint til lax- og silungsveiða. Í nýlegri skýrslu Hafrannsóknastofnunar, um stöðu umhverfis og vistkerfa í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga (Guðmundur J. Óskarsson o.fl., 2021), var fjallað um göngufiska, tegundir fiska sem hafa lífsferil bæði í ferskvatni og sjó (Guðni Guðbergsson o.fl., 2021). Til þeirra teljast meðal annars ofangreindar þrjár laxfiskategundir en þær hafa mismunandi kjörhitastig, þar sem lax er einkum að finna í hlýrri, frjósamari ám á meðan bleikja er ríkjandi í kaldari og snauðari ám og urriði þar mitt á milli (Guðni Guðbergsson og Þórólfur Antonsson, 1996). Ef breytingar verða á hitastigi getur það haft mismunandi áhrif á útbreiðslu og stofnstærðir þessara tegunda. Þannig eru vísbendingar um að á kuldaskeiðum hafi bleikja náð yfirhöndinni í samkeppni við hinar tegundirnar en að hlýindaskeið hafi jákvæð áhrif á hinar tegundirnar tvær (Guðni Guðbergsson, 2016). Líkt og fjallað er um í kafla 4 hafa stofnar bleikju verið á undanhaldi á undanförnum árum, á sama tíma og urriða hefur fjölgað. Einnig er fjallað um nýlega grein eftir (Svenning o.fl., 2021) þar sem greint var frá samskonar niðursveiflu í bleikju samhliða uppsveiflu í urriða í Norður-Noregi. Ef stofnar bleikju halda áfram að hnigna má ætla að margir stofnar verði undir þeim mörkum að hafa veiðiþol og því verði að draga úr veiðisókn til að forðast ofveiði. Ekki hefur tekist að skýra hvar í lífsferlinum hnignun sjóbleikju kemur fram og því ekki hægt að rekja hana beint til breytinga á hitastigi. Mikilvægt er að fá betra yfirlit yfir þá þætti sem liggja að baki. Setja má fram tilgátu um að hækkun á vatnshita leiði til þess að bleikjuhrogn klekist út fyrr að vori. Ef það gerist áður en frumframleiðni og hryggleysingjar, sem eru undirstöðufæða laxfiskaseiða, eru komnir nægilega vel af stað getur það leitt til aukinna affalla. Þessi niðursveifla gæti haft neikvæð áhrif á hlunnindi í bleikjuveiðiám og -vötnum og mögulegt að slíkt hafi nú þegar átt sér stað. Þó er um flóknara samspil að ræða, þar sem markaðsaðstæður koma meðal annars til sögu. Veiðileyfi í laxveiði hafa hækkað talsvert í verði sem gæti aukið eftirspurn eftir ódýrari veiði á bleikju og urriða. Einnig eru líkur á því að stofnar sjóbirtings styrkist og fylli að einhverju leyti í það skarð sem sjóbleikja skilur eftir varðandi stofnstærð og nýtingu. Líkur eru á að sveiflur haldi áfram að koma fram í stofnum laxfiska ef öfgar í veðurfari aukast. Það gæti skilað sér í meiri og örari breytileika í vatnshita og vatnsrennsli sem hefur áhrif á afkomu fiskstofna í ám.

8.4 Sjávarútvegur

8.4.1 Veiðar

Fiskveiðar, þ.m.t. veiðar hryggleysingja, er mikilvæg atvinnugrein á Íslandi og ein af grunnstoðum útflutningstekna landsins. Mjög náin tengsl eru því á milli skilyrða í hafi og afkomu greinarinnar. Greinin býr að jafnaði við miklar sveiflur, s.s. mikinn náttúrulegan breytileika sem þýðist yfir í breytileika leyfðs afla í fiskveiðistjórnunarkerfinu. Í ljósi þess breytileika má gera ráð fyrir því að hún hafi mikla getu til að bregðast við ófyrirséðum áhrifum af völdum loftslagsbreytinga. Losun gróðurhúsalofttegunda frá fiskveiðum hefur dregist saman um 36% síðan 1990 (Keller o.fl., 2023). Áhrif fiskveiðistjórnunarkerfisins er meginástæða samdráttarins en eldsneytisverð og tæknibreytingar virðast hafa skipt minna máli (Daði Kristofersson o.fl., 2021).

Í fyrri skýrslum vísindanefndar hefur komið fram að til skemmri tíma er líklegt að nýtanlegar auðlindir sjávar geti staðið af sér og aðlagast áhrifum loftslagsbreytinga, ef unnt verður að halda áhrifum álagsþátta tengdum veiðum, mengun og raski á búsvæðum í lágmarki. Því er mikilvægt að veiðar séu stundaðar með sjálfbærni og ábyrg langtímasjónarmið í huga. Þetta á einnig við um nytjar annarra auðlinda hafsins, svo sem nýtingu þara og þangs, námuvinnslu og beislun vindorku.



Fjallað var um áhrif loftslagsbreytinga á fiskveiðar í V2008 og V2018. Niðurstaða V2008 var að langtímaáhrif loftslagsbreytinga yrðu líklega ekki mikil á greinina þó að samdráttur í fiskigengd gæti haft neikvæð áhrif til skamms tíma. Í V2018 kom fram að vegna flókins samspils í vistkerfum sjávar væri erfitt að meta áhrif loftslagsbreytinga á væntа afkomu sjávarútvegs. Þar var auk þess bent á takmarkaðar greiningar á áhrifum loftslagsbreytinga á líf og afkomu þeirra sem starfa í fiskveiðum og fiskeldi. Þær greiningar sem þó höfðu verið gerðar sýndu að hækkun hitastigs sjávar er líkleg til að hafa að jafnaði jákvæð áhrif á sjávarútveg á norðlægum slóðum. Talið var líklegt að aðflutningur suðlægra fiskitegunda inná norðlæg svæði muni aukast og er ganga makríls dæmi um slík áhrif. Í V2018 var ekki vitað um sambærilega göngustofna á nálægum hafsvæðum sem hingað gætu leitað, en í dag er ljóst að tegundir eins og bristlingur, brynstirtla og bláuggatúnfiskur hafa eða munu leita inn á Íslandsmið. Þó rannsóknir, sem vitnað var til í V2018, gæfu til kynna að áhrif loftslagsbreytinga á sjávarútveg væru í heildina jákvæð er mikilvægt að hafa í huga að þær beindu sjónum að hlýnun en ekki súrnun.

Áhrif loftslagsbreytinga á sjávarútveg felast í grunninn í áhrifum á nytjategundir. Þau birtast meðal annars í breytingum á útbreiðslu- og farmynstri tegunda, stofnstærð, vaxtarhraða og kynþroskaaldri fiska ásamt breytingum á tegundasamsetningu, fæðukeðjum og fæðuframboði. Einnig breytist tíðni sjúkdóma, sníkjudýra og ágengra tegunda (2020). Þessar breytingar hafa síðan áhrif á heildarafla og aflasamsetningu hvað varðar tegundir, stærð og aldursdrefingu. Þá getur aukin illviðratíðni breytt aðstæðum til sjósóknar, haft í för með sér hættulegri vinnuskilyrði og aukið fjarlægð á mið Barange o.fl., 2018. Að auki má búast við auknum deilum vegna kvótaskiptingar deilistofna og í ljósi tilfærslu tegunda norður á bóginn má ætla að þess gæti sérstaklega á norðurslóðum. Í V2008 (Halldór Björnsson o.fl., 2008, grein 4.7.2) var bent á þetta og hefur aukins flækjustigs samningaviðræðna þegar orðið vart hvað varðar nýtingu deilistofna, t.d. makríls (Østhagen o.fl., 2020). Loks geta umtalsverð óbein áhrif loftslagsbreytinga falist í sveiflum á markaðsverði og öðrum markaðsáhrifum (sjá einnig umræðu alþjóðaviðskipti og aðfangakeðjur 10.3.2).

Í kafla 5 var fjallað um breytingar á helstu nytjategundum á Íslandsmiðum. Hækkandi

sjávarhiti á íslenska landgrunninu hefur þegar leitt til breytinga á útbreiðslu margra botnfisktegunda við landið, svo sem ýsu, þorsks og skötusels. Aukin hlýnun mun halda áfram að leiða til breytinga á útbreiðslu ýmissa nytjastofna við landið. Nytjategundir, sem hafa verið við nyrðri mörk útbreiðslu sinnar á Íslandsmiðum, hafa og munu stækka útbreiðslusvæði sitt í norðaustur á meðan stofnstærðir og útbreiðsla kaldsjávartegunda, svo sem hlýra, hrognkelsa og loðnu, mun minnka. Á sama tíma munu búsvæði suðlægari tegunda, svo sem ýsu og skötusels, aukast allt í kringum landið. Rannsókn (Mason o.fl., 2021) notast við sviðsmyndir um losun til að meta breytingar á búsvæðum helstu nytjategunda við landið. Rannsóknin sýnir að búsvæði þorsks við sunnarvert landið muni minnka en stækka lítillega fyrir norðan land. Allar þessar breytingar geta haft áhrif á tilhögun og afkomu veiða.

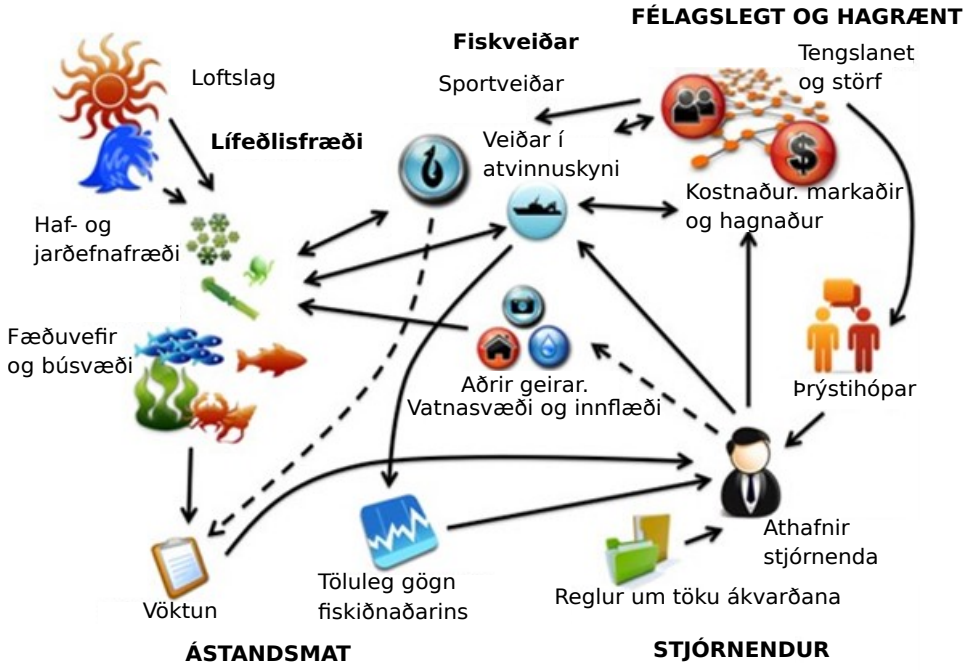
Evrópska rannsókaverkefnið *ClimeFish* (2020) skoðaði áhrif loftslagsbreytinga á fiskveiðar og fiskeldi í sjó og vötnum með sjö tilviksrannsóknum. Metin voru afleidd áhrif, bæði hagræn og samfélagsleg, svo sem áhrif breytinga í afla eða framleiðslu á efnahag fyrirtækja, tekjur, kostnað, hagnað og virðisauka, sem og fjölda starfa. Einnig voru skoðuð áhrif á byggðaþróun, sér í lagi fyrir byggðir sem reiða sig á sjávarútveg. Heildarniðurstaða verkefnisins var að samfélagsleg og hagræn áhrif loftslagsbreytinga á sjávarútveg og fiskeldi yrðu takmörkuð (Agnarsson, 2020). Ein tilviksrannsókna *ClimeFish* fjallaði um áhrif loftslagsbreytinga á veiðar á uppsjávarfiski í Norður-Atlantshafi í samhengi mismunandi losunarsviðsmynda (Agnarsson, 2020). Niðurstöður benda til aukningar í síldarafla til skamms tíma undir öllum losunarsviðsmyndum sem metnar voru, en minnkunar til lengri tíma eða til ársins 2050. Afli makríls jókst til skemmri og lengri tíma en breytingar á afla kolmunna reyndust ýmist neikvæðar eða jákvæðar milli sviðsmynda. Heildaráhrif á afkomu sjávarútvegsins voru jákvæð til skamms tíma en neikvæð til lengri tíma litið. Heildaráhrif á atvinnustig fór eftir aðlögunaraðgerðum flotans.

Ofangreindar rannsóknir greindu ekki áhrif af súrnun sjávar á sjávarútveg. Samkvæmt V2018 getur súrnun sjávar haft neikvæð áhrif á kalkmyndandi lífverur, sem eru taldar viðkvæmar fyrir súrnuninni. Kalkmyndandi lífverur í hafinu í kringum Ísland eru fjölmargar. Slíkar lífverur eru mikilvægar í vistkerfi og fæðuvef sjávar auk þess sem þær eru nýttar sem matvæli og til iðnaðarframleiðslu, s.s. skelfiskur og kalkþörungar. Vegna aðstæðna í hafinu umhverfis Ísland er súrnun sjávar örari hér en að jafnaði í heimshöfunum. Því er líklegt að neikvæð áhrif súrnunar sjávar komi fyrr fram hér en annars staðar.

Síðan V2018 kom út hefur lítið bæst við af heildrænum greiningum á áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg þar sem áhrif hærri hita og súrnunar á lífeðlisfræðilegar breytingar, fiskistofna og sjávarútveg eru metin. Þó er að greiningargeta á þessu sviði að batna. Dæmi um slíkt er eitt öndvegisverkefna RANNÍS, *Fiskveiðar til framtíðar*, sem er samvinnuverkefni Hafrannsóknastofnunar, Háskóla Íslands, Landbúnaðarháskóla Íslands og erlendra samstarfstofnana. Verkefnið snýr að því hvernig hægt er að beita vistfræðilegri nálgun við fiskveiðistjórnun með notkun vistkerfislíkana.

Meðal þeirra líkana sem unnið er með er Atlantislíkanið (Fulton o.fl., 2011; Audzijonyte o.fl., 2017a; Audzijonyte o.fl., 2017b), sem er heildstætt vistkerfislíkan sem upphaflega var þróað fyrir hafið í kringum Ástralíu. Það samanstendur af fimm samverkandi líkönum: lífeðlisfræðilegu, fiskveiðilíkani, stofnmatslíkani, veiðistjórnunarlíkani og félags-hagfræðilíkani. Lífeðlisfræðilega líkanið tekur til hafstrauma, hringrásar næringarefna, fæðuvefs og lífsferla lífvera. Líkanið hefur verið uppfært fyrir um 40 hafsvæði, þ.m.t. hafsvæði umhverfis Ísland, en vinna við íslensku uppfærsluna hófst árið 2013 sem hluti af tveimur Evrópuverkefnum. Tekur líkanið í dag til 1,6 milljón ferkílómetra af hafsvæðum umhverfis Ísland og er því skipt í 53 reiti. Hverjum reit er skipt í allt að sjö lög, sex sjávarlög auk botnsets. Hver reitur inniheldur upplýsingar um hitastig, seltu og hafstrauma frá árinu 1948. Fiskveiðilíkanið inniheldur upplýsingar um veiðiflotann eftir tegund, veiðarfærum og veiðmynstri. Líkanið er m.a. hægt að nota til að herma áhrif stefnu stjórnvalda á vistkerfið, stofnstærðir og félags-hagfræðilega þætti og meta áhrif loftslagsbreytinga á þessar stærðir.

Búið er nú þegar að byggja upp lífeðlisfræðilega hlutann, m.t.t. íslenskra aðstæðna, auk



Mynd 8.1: Helstu þættir Atlantislíkansins (CSIRO, án árs)

þess sem einfalt fiskveiðilíkan hefur verið sett upp. Líkanið hermir vænta hegðun (þ.m.t. afrán, fæðu, hrygningargöngur og farhegðun) og stofnstærðir (þ.m.t. vöxt og nýliðun) 52 tegunda/hópa dýra. Þar á meðal eru 25 hryggdýrahópar, svo sem 16 fiskahópar þar sem átta innihalda einstakar tegundir, fimm spendýrahópar og einn hópur sjófugla, 16 hópar hryggleysingja, sex hópar frumframleiðenda, tveir hópar baktería og þrjár gerðir úrgangshópa, þar með talið einn fyrir brottkast (Sturludottir o.fl., 2018).

Með raungreiningum, m.a. á stofnmati, aflatölum og magainnihaldi, hefur verið staðfest að líkanið hermir nú ágætilega hið raunverulega vistkerfi. Í framhaldinu er því hægt að greina möguleg áhrif mismunandi sviðsmynda loftslagsbreytinga með breyttu hitastigi í líkaninu, en sjávarhiti hefur bein áhrif á vöxt lífvera, nýliðun og tilfærslu sem síðan hefur áhrif á fæðusamsetningu og fæðuvefinn. Í kjölfarið verður hægt að meta áhrif þessara breytinga á fiskveiðar og efnahag þeim tengdum.

Í framtíðinni er fyrirhugað að þróa líkanið frekar svo kanna megi áhrif breytinga á sýrustigi sjávar til viðbótar við breytt hitastig. Þá verður hægt að herma áhrif súrnunar á afkomu kalkmettandi þörunga og þar með áhrif á aðra hópa vistkerfisins, sem og helstu nytjastofna. Þá verður einnig unnt herma samlegðaráhrif hækkunar sjávarhita og súrnunar. Þar sem búist er við að íslenska hafsvæðið muni súrna hraðar en önnur hafsvæði (V2018) er mikilvægt byggja þetta inn í líkanið svo herma megi heildstætt áhrif loftslagsbreytinga á allt kerfið; vistkerfið og sjávarútveginn í heild.

Þrátt fyrir að áhrif súrnunar séu ekki reiknuð beint í líkaninu er vitað að súrnun sjávar hefur neikvæð áhrif á kalkmyndandi lífverur (sjá umfjöllun í kafla 5). Með því að auka afföll kalmyndandi lífvera í Atlantislíkaninu má námunda áhrif súrnunar. Í slíkri rannsókn (Oostdijk o.fl., 2022) gáfu niðurstöður til kynna að stofnstærðir efnahagslega mikilvægra tegunda eru líklegar til að viðhaldast á íslenskum hafsvæðum. Niðurstöðurnar benda til afar fjölbreyttra áhrifa hækkunar hitastigs og aukinnar súrnunar hjá mismunandi tegundum, sum neikvæð og önnur jákvæð. Í heildina virtust áhrif hlýnunar vera meiri en áhrif súrnunar og ljóst að margar

nytjategundir á íslenskum hafsvæðum eru ekki við efri þolmörk hitastigs. Frumframleiðendur og smáar tegundir uppsjávarfiska virtust fá ávinning af breytingunum en botnfiskar og ránfiskar urðu almennt fyrir neikvæðum áhrifum. Að aflareglu óbreyttri virtist stofnstærð þorsks ekki verða fyrir neikvæðum áhrifum, jafnvel í tilviki mikillar súrnunar og hlýnunar. Einnig kom í ljós að þegar stofnstærð þorsks minnkaði jókst stofnstærð annarra tegunda. Þetta sýnir hið flókna samspil tegunda og nýtingar í vistkerfi sjávar sem undirstrikar nauðsyn þess að beita fjölstofna vistkerfislíkönum þegar áhrif loftslagsbreytinga eru metin.

Hægt er að milda áhrif loftslagsbreytinga á sjávarútveg með aðlögunaraðgerðum. Á vegum *ClimeFish* verkefnisins var þróaður heildstæður rammi fyrir gerð áhættumats og aðlögunaráætlana vegna mögulegra áhrifa loftslagsbreytinga á sjávarútveg. Nánari umfjöllun um verkefnið er að finna í kafla 11 en tafla 8.1 sýnir samantekt á helstu áhættum.

Tafla 8.1: Helstu áhættuþættir vegna loftslagsbreytinga samkvæmt ClimeFish. Kæfitegund er meðaflategund sem stöðvar veiðar á öðrum nytjategundum þegar aflamarki hennar er náð.

Helstu áhættuþættir	**Nánari skýring**
Samsetning tegunda	• Tegundir færast norður • Stærri stofnar, makríls, kolmunna, lýsings. • Smærri stofnar síld, þorskur, innlendar tegundir. • Nýjar, mögulega ágengar tegundir.
Breytingar í vaxtarhraða og kynþroskaaldri	• Breytingar á árgöngum. • Útbreiðsla fæðu. • Vaxtarhraði.
Breytingar á útbreiðslu og farmynstri	• Samsetning afla. • Breytingar í útbreiðslu. • Veiðafæri og veiðanleiki.
Kvótaskipting deilistofna, heildarafli	• Aukið flækjustig í samningaviðræðum. • Ofveiði sameiginlegra stofnar. • Kæfitegund.
Rekstur sjávarútvegsfyrirtækja	• Lengra á miðin. • Hættulegri vinnuskilyrði. • Skemmdir á innviðum. • Færri veiðidagar, hærri kostnaður.

Rannsóknum á væntum áhrifum loftslagsbreytinga á íslenskan sjávarútveg er ábótavant. Einnig er þörf á frekari rannsóknum á efnahagslegum og samfélagslegum áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg, svo sem á afkomu, atvinnu, byggðaþróun og viðnámsþrótt samfélaga, með sérstakri áherslu á strandsamfélög. Að auki þarf, ekki síst í ljósi efnahagslegs og samfélagslegs mikilvægis sjávarútvegs, að vinna að áhættumati fyrir íslenskan sjávarútveg í heild sinni og setja fram aðlögunaráætlanir. Frekari umfjöllum um aðlögun má sjá í 11.

8.4.2 Fiskeldi

Síðan V2018 kom út hefur fiskeldi vaxið sem atvinnugrein á Íslandi en framleiðslumagn jókst um 179% á milli 2018 og 2021 (Hagstofa Íslands, 2023). Fjallað var stuttlega um áhrif loftslags-

breytinga á fiskeldi í V2018 þar sem þau voru talin verða vegna breytinga á sjávarhita, súrnunar sjávar, hækkunar á yfirborði sjávar og breytinga á tíðni og styrk ofsaveðra.

Möguleg áhrif loftslagsbreytinga á fiskeldi á Íslandi hafa ekki verið metin sérstaklega. Í ljósi sívaxandi mikilvægis atvinnugreinarinnar, ekki síst fyrir smærri samfélög utan höfuðborgarsvæðisins, er brýnt að slíkar rannsóknir fari fram. Frá útgáfu V2018 hafa möguleg áhrif loftslagsbreytinga á fiskeldi í Noregi og víðar verið skoðuð (Agnarsson, 2020). Til eru rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á fiskeldi á Bretlandseyjum (Collins o.fl., 2020) auk þess sem almennar yfirlitsgreinar hafa komið út (Maulu o.fl., 2021). Niðurstöður benda til að helstu áhrif loftslagsbreytinga á fiskeldi séu staðbundnar breytingar í vaxtarhraða tegunda, sveiflur milli ára og árstíða, aukinn breytileiki í stærð og aukin dánartíðni. Þá má gera ráð fyrir nýjum veiru- og bakteríusjúkdómum og sníkjudýrum sem kalla á nýjar meðferðir og lyfjanotkun, en einsleitni í tegundavali eykur áhættu á slíkum áföllum. Breytingar á lagskiptingu sjávar getur valdið súrefnisþurrð og breytingar í nærliggjandi vistkerfum geta meðal annars aukið líkur á skaðlegum þörungablóma og ásætum (*e: fouling*), svo sem gróðri á netum. Loftslagsbreytingar geta því haft áhrif á hentugleika eldissvæða, burðarþol og afkastagetu. Veðuröfgar geta einnig haft áhrif á innviði greinarinnar. Áður var minnst á aðfangakeðjur og alþjóðaviðskipti (sjá grein 10.3.2) en truflanir á þeim geta haft áhrif markaðsaðstæður, bæði hvað varðar afurðaverð og aðföng, svo sem fóður. Brýnt er að meta áhrif loftslagsbreytinga á fiskeldi á Íslandi en slíkar greiningar vantar.

8.4.3 Áhrif loftslagsbreytinga á sjávarbyggðir og samfélög

Þegar skoðuð eru áhrif loftslagsbreytinga á sjávarútvegs- og strandsamfélög, þar sem nýting auðlinda hafsins er undirstaða efnahags og mannlífs, er ljóst að breytingar í veðurfari er eitt af því sem slík samfélög þurfa að glíma við (Heck o.fl., 2021).

Þættir eins og súrnun og hækkandi hiti sjávar og breytingar á útbreiðslu hafíss, sem aftur hafa svo áhrif á farleiðir og afkomu ýmissa tegunda sjávarlífvera, eru lykilatriði sem nauðsynlegt er að reyna að skilja og kortleggja. Sem dæmi um veður, sem hefur mikil áhrif á fiskveiðar og sjósókn, eru aftakaveður. Þó rannsóknir á slíkum veðrum hafi aukist á undanförnum áratugum er ýmislegt enn á huldu um afleiðingar þeirra, t.d. varðandi hrygningarsvæði fisktegunda. Hingað til hefur athyglin mest beinst að þéttbýlum svæðum hitabeltisins, bæði vegna þess hversu margir þar búa og reiða sig á nytjar hafsins og vegna breytinga á aftakaveðri, s.s. hitabeltistorma. Rannsóknir hafa nýlega beinst að hnattrænu samhengi ofsaveðra og storma og áhrifum þeirra á fiskveiðar og afkomu strandsamfélaga, t.d. á Íslandi (Sainsbury o.fl., 2018). Tíðni óveðra hefur einnig áhrif á öryggi sjófarenda, siglingar, aðgengi að mörkuðum og innviði strandsamfélaga.

Samkvæmt (Gulev o.fl., 2021) hafa lægðabrautir á norðurslóðum almennt hnikast í átt að pólsvæðum og fjöldi þeirra *líklega* aukist á síðustu áratugum. Breytileiki milli áratuga er þó mikill og *lítil* til *miðlungs* vissa fyrir því hvernig ólíkir þættir hafa breyst. Byggt á sviðsmyndareikningum loftslagslíkana er talið að tilfærsla lægða norður á bóginn muni halda áfram en *miðlungsvissa* er fyrir því að vindhraðabreytingar verði litlar (sjá grein 10.4.2 og Lee o.fl., 2021; Seneviratne o.fl., 2021). Breytingar á Norður-Atlantshafssveiflunni (NAO) á síðustu áratugum voru líklega innan eðlilegra marka, byggt á fornverðufarsgögnum Nokkur gögn sýna þó áhrif þessarar sveiflu á lægðagang og óveður á Norður-Atlantshafi (Gulev o.fl., 2021; Alexander o.fl., 2005; Báez o.fl., 2021; Feser o.fl., 2015).

Rannsóknir á áhrifum ofsaveðra og vinds á strandsamfélög Íslands hafa m.a. beinst að Vestfjörðum, enda byggð þar afar háð sjósókn. Dæmi um slíkt verkefni er ARCPATH (*e. Arctic climate predictions – pathways to resilient, sustainable societies, 2016-2020*). Tilviksrannsókn í því verkefni beindi sjónum að áhrifum stórviðra á samfélögin á Vestfjörðum og leitaði svara við spurningum um upplifun og reynslu fólks af slíkum veðrum, viðbrögðum og ýmsum leiðum sem fólk hefur til að auka viðnámsþrótt samfélagsins gegn þeim. Atvinnugeirar og samfélagshópar, eins og fiskveiðar og -eldi, fiskvinnslur, hafnir, strandgæsla og björgunarsveitir, sem og þættir eins og fæðuöryggi og þróun svæðisins, voru skoðuð. Aðferðafræðin byggðist einkum á viðtölum

við fólk í fyrrnefndum geirum. Fyrstu niðurstöður rannsóknarinnar taka að mestu til eftirtalinna sviða: ógnanir og vandamál, áhrif og afleiðingar (*e. impacts*) og aðlögun (*e. adaptation*). Hér að neðan verður stiklað á stóru hvað varðar áhrif og afleiðingar en nánar er fjallað um þá þætti er snúa að aðlögun í kafla 11.

Vegna mismunandi aðstæðna á hverju svæði er erfitt að fastsetja ákveðin viðmið (*e. thresholds*) hvað varðar vindstyrk, fyrir það hvort bátar og skip komast á sjó. Þarna koma inn mun fleiri þættir sem þarf að athuga og hvernig samspili þeirra við vindstyrk er háttað, svo sem ölduhæð, árstími, hitastig lofts og sjávar, vindátt og bátastærð. Hvað varðar skynjun fólks á breytingum í veðurfari kemur fram að mörgum finnast óveður vara skemur en að vindstyrkur sé hærri nú en áður. Annað dæmi um fyrstu niðurstöður er að eigendur smærri báta segja að nú komist þeir sjaldnar á sjó að vetri til en áður, í um 10 daga/mánuði en áður hafi það verið um 15 dagar/mán.

Þetta hefur augljóslega tekjutap í för með sér en inn í þetta spila önnur atriði, eins og t.d. minni afli í hverri ferð og skemmdir á veiðarfærum og bátum vegna veðurs og öldugangs. Þetta samspil þarf að rannsaka betur. Veðurspár, gæði þeirra og aðgengi er mjög mikilvægt þegar kemur að sjósókn. Í rannsókninni kom meðal annars fram að þegar Covid-19 varð til þess að flugferðum til Vestfjarða fækkaði (eins og í heiminum sem heild) hafði það þau áhrif að minna var um veðurathuganir í rauntíma. Það hafði svo neikvæð áhrif á aðgengi sjófarenda að veðurupplýsingum og gerði ákvarðanatöku um hvort farið yrði á sjó eða ekki mun erfiðari.

Frekari rannsókna er þörf þegar kemur að áhrifum loftslagsbreytinga og breytinga á veðurfari á strandsvæði, eins og t.d. Vestfirði.

Í því samhengi má nefna rannsóknir á ákvarðanatöku sjófarneda, innbyrðis áhrifum breytinga á fiskistofna og fiskveiðistjórnun (Grafton, 2010) og samspili athafna sem fram fara á sjó og landi. Sem dæmi má nefna hvernig flutningar á fiski á landi hafa áhrif á og verða fyrir áhrifum. Einnig má nefna rannsóknir á áhrifum ferðamennsku og skipaferða og flutninga á fiskveiðar og samfélög sem reiða sig á fiskiðnað. Kanna þarf hvort og þá hvernig aukin fjölbreytni í atvinnu, bæði í sjó og á landi, gerir strandsamfélög sveigjanlegri og aðlögunarhæfari (Hobday o.fl., 2016). Mikilvægt er að taka til greina svæðisbundinn breytileika, en staðbundnar veðuraðstæður geta verið mjög ólíkar og sama óveður haft gjörólíkar afleiðingar.

8A Viðnámsþróttur samfélaga - niðurstöður CliCNord

Birtingarmyndir þeirra samfélagslegu umskipta, sem loftslagbreytingar kalla á, eru víðtækar og tengjast meðal annars öðrum umhverfisbreytingum og náttúruvá. Fjallað er um náttúruvá í kafla 11.4 og grein gerð fyrir helstu hugtökum áhættustýringar. Viðnámsþróttur samfélaga er eitt þessara hugtaka og réttlát umskipti þurfa að miða að því að auka þennan viðnámsþrótt. Það er ljóst að mörg samfélög á Norðurlöndunum eru í aukinni hættu vegna náttúruhamfara af völdum loftslagsbreytinga, sum viðkvæmari en önnur. Nauðsynlegt er að rannsaka betur ástæður þessarar hættu, eðli og tíðni hamfaranna og viðbrögð samfélaga við þeim, bæði hvað varðar varnir gegn þeim og viðbrögð við afleiðingum þeirra. Sem dæmi um hvernig áhrif náttúruvá getur haft á lítil dreifbýlissamfélög verður sjónum beint að rannsóknarverkefninu CliCNord (NordForsk, 2024) þar sem skoðað var hvernig átta dreifbýlissamfélög á Norðurlöndunum takast á við náttúruvá sem rekja má til loftslagsbreytinga.

Á Íslandi var megináherslan lögð á snjóflóðahættu á Flateyri og Patreksfirði/Vesturbyggð þó aðrar gerðir ofanflóða væru einnig skoðaðar. Spurt var hvaða áhrif loftslagsbreytingar hafa á tíðni og eðli ofanflóða og hvaða áhrif þau hafa á byggð, svo sem hvað varðar hættumat (t.d. skiptingu byggðar í hættusvæði), innviði, eins og orkudreifingu, samgöngur og vöruflutninga, atvinnu og svo má áfram telja. Hugmyndir heimamanna og skynjun þeirra á snjóflóðahættu voru í brennidepli. Auk þess var skoðað hvernig samfélagið byggir upp viðnámsþrótt og varnir og hvenær og hvernig slík samfélög þurfa á utanaðkomandi aðstoð að halda, t.d. frá yfirvöldum, ríkisstofnunum og samfélaginu í heild.

Markmiðið með verkefninu er að setja fram tillögur fyrir samfélögin, sem og fyrir yfirvöld, um forvarnir (*e. prevention*), undirbúning (*e. preparedness*), viðbrögð (*e. response*) og endurheimt (*e. recovery*), einkum hvað varðar það sem þessir aðilar geta unnið að í sameiningu. Allt miðar þetta að því að gera samfélögin öruggari gagnvart aukinni tíðni náttúruhamfara vegna loftslagsbreytinga. Hvað forvanir varðar eru nú þegar þekktar og notaðar aðgerðir eins og snjóflóðavarnir, viðvörunarkerfi og rýmingaráætlanir auk viðbragða eins og tímabundinna rýminga og vegalokana.
Með endurheimt er átt við það hvernig samfélag, sem hefur orðið fyrir skaða af völdum náttúruhamfara eins og snjóflóða, nær sér aftur á strik og græðir sárin. Þessi þáttur er hvað minnst þekktur af þeim fjórum, sem taldir eru upp hér að ofan, og þarf mun meiri athygli. Þá þarf að huga að hinni sögu- og menningarlegu vídd, því ekki er nóg að skilja aðstæður dagsins í dag heldur verður að skoða samfélagið í fortíð og nútíð. Stærsta spurningin í þessu tilfelli er kannski hvers vegna fólk heldur áfram að búa á stöðum sem hafa verið skilgreindir í mikilli hættu vegna náttúruvár. Þar kemur inn sú staðreynd að væntumþykja íbúa gagnvart heimahögunum er sterkt afl, bæði á jákvæðan og neikvæðan hátt. Hana þarf alltaf að taka með í greiningu á aðstæðum fólks, kannski einkum í þessu samhengi: þegar yfir vofir hætta eins og snjóflóð.
Viðnámsþrótt samfélags er hægt að skilgreina sem getu þess til að ráða við og aðlagast því álagi sem orsakast af félagslegum, pólitískum og umhverfislegum breytingum, virkja samfélagið til að sigrast á mótlætinu og nýta þau tækifæri sem bjóðast í viðbragðsferlinu (Amundsen, 2012). Í verkefninu CliCNord eru kenningar um viðnámsþrótt miðlægar. Mikilvægt er að gera sér grein fyrir því að þótt umhverfislegar breytingar séu í brennidepli, í þessu tilfelli breytingar á tíðni og eðli ofanflóða vegna loftslagsbreytinga, eru afleiðingar fyrir tiltekið samfélag og viðbrögð þess við slíkum breytingum alltaf blanda af náttúrufarslegum, pólitískum, félagslegum og sögulegum þáttum. Þeir verða því ekki auðveldlega aðskildir í rannsókn sem þessari enda í raun ekki nokkur tilgangur með því.
Þó samfélög á Vestfjörðum hafi einkum verið í brennidepli í CliCNord er ljóst að hægt er að yfirfæra mikið af þeim upplýsingum og lærdómi sem verkefni skilaði á aðrar byggðir á Íslandi. Þá sérstaklega byggðir sem eru í svipaðri stöðu hvað varðar aukna ofanflóðavá og aðgerðir gegn henni. Fjallað er um slíka vá í grein 10.4.1 og mynd 10.13 sýnir þá staði þar sem lagt hefur verið mat á ofanflóðahættu.

8.5 Ferðaþjónusta

Náttúra Íslands er ein af meginstoðum íslenskrar ferðaþjónustu, en rúmlega 9 af hverjum 10 ferðamönnum koma til landsins vegna fjölbreytileika íslenskrar náttúru (Oddný Þóra Óladóttir, 2022).

Eins og rakið er í köflum 2 og 4 munu loftslagsbreytingar valda miklum breytingum á landinu og það hefur svo áhrif á ferðaþjónustu. Þegar fjallað er um áhrif loftslagsbreytinga á ferðaþjónustu þarf annars vegar að skoða bein áhrif vegna breytinga á áfangastöðum og eftirspurn ferðamanna þeim tengdum og hins vegar viðbrögð ferðaþjónustunnar eða ferðamanna við stjórnvaldsaðgerðum sem snúa að því að draga úr losun eða aðlagast.

Fjallað var um áhrif loftslagsbreytinga á ferðaþjónustu í V2018. Þar kemur fram að líklegt er að straumur ferðamanna til norðlægari og kaldari áfangastaða muni aukast. Að auki var bent á að loftslag og veður hefur áhrif á val ferðamanna á áfangastöðum, þar sem ferðamenn eru í auknum mæli að sækja á staði sem eru viðkvæmir fyrir áhrifum loftslagsbreytinga, svo sem jöklar og jökullón (sjá mynd 8.2) eða staðir sem líklegir eru til að sökkva í sæ. Slík eftirspurn er kennd við síðustu forvöð (*e. last chance tourism*) en frekari rannsóknir þarf á mögulegum áhrifum loftslagsbreytinga á slíka eftirspurn (Abrahams o.fl., 2022). Ef slík eftirspurn eykst gætu staðir, eins og þeir sem eru háðir aðdráttarafli jökla, orðið sérstaklega fyrir áhrifum, þetta á til dæmis

við ferðamannastaði á Íslandi. Breytingar á ásýnd ferðamannastaða hafa þegar raungerst vegna loftslagsbreytinga, svo sem í Kerlingarfjöllum og Hveradölum, þar sem áður voru skíðasvæði. Loftslagsbreytingar geta einnig haft áhrif á aðgengi og öryggi ferðamanna.



Mynd 8.2: Siglt á Heinabergslóni. (Ljósm. Iceguide, birt með leyfi).

Í V2018 kemur fram að veðurskilyrði til ferðamennsku hafa áhrif á eftirspurn eftir mismunandi afþreyingu. Til dæmis getur aukinn lofthiti haft jákvæð áhrif á eftirspurn eftir útsýnisferðum á norðlægum slóðum, en neikvæð áhrif á eftirspurn og skilyrði til skíðaiðkunar. Breytingar á útbreiðslu dýrategunda, svo sem vegna breytinga á farhegðan hvala, getur haft áhrif á ferðaþjónustu til framtíðar. Ennfremur gætu viðhorf almennings til ferðalaga breyst vegna aðgerða til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, bæði vegna aukins ferðakostnaðar og vilja almennings til að stuðla að samdrætti í losun. Slík breyting á viðhorfum gæti dregið úr áhuga og getu til að ferðast til fjarlægra áfangastaða og vilja til að nota fararmáta sem losa mikið (Gössling og Dolnicar, 2023).

Viðbrögð ferðaþjónustunnar við áætlunum stjórnvalda að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda geta haft áhrif á áframhaldandi eftirspurn eftir ferðalögum til Íslands. Breytt ferðahegðun getur haft álíka áhrif. Þar sem náttúra Íslands er eitt helsta aðdráttaraflið geta verið samlegðaráhrif á milli þess að draga úr losun og viðhalda ímynd Íslands.

Ferðaþjónustaðilar hafa þegar hafið vegferð í átt að uppbyggingu vistvænna ferðamannastaða. Sem dæmi má nefna uppbyggingu gestastofu við Ásbyrgi þar sem byggingar hafa verið endurgerðar og -nýttar og þannig dregið úr losun gróðurhúsalofttegunda vegna uppbyggingar staðarins (sjá mynd 8.3).



Mynd 8.3: Gestastofan Ásbyrgi (Mynd: Vatnajökulsþjóðgarður, birt með leyfi).

Efnahags- og samfélagsleg áhrif vegna áhrifa loftslagsbreytinga á ferðaþjónustu hafa ekki verið rannsökuð hérlendis. Þó voru rök færð fyrir því í V2018 að efnahagsleg áhrif á Íslandi væru líkleg til að vera jákvæð, til skamms tíma að minnsta kosti, vegna aukinnar eftirspurnar eftir ferðum til kaldari landa og ásóknar í náttúrufyrirbrigði sem væru viðkvæm fyrir loftslagsbreytingum. Nú þegar eru jöklaferðir og jöklatengd afþreying afar mikilvæg íslenskri ferðaþjónustu í efnahagslegu tilliti, þá sérstaklega fyrir ákveðin sveitarfélög.

Hvalaskoðun er annað dæmi um mikilvæga tegund ferðaþjónustu sem gæti orðið fyrir áhrifum loftslagsbreytinga (Oddný Þóra Óladóttir, 2022). Greining á mögulegum áhrifum loftslagsbreytinga á farhegðun hvala og hvalaskoðun á Skjálfandaflóa sýndi fram á tölfræðilega marktæka fylgni á milli aukins yfirborðshita sjávar og minni sýnileika hrefnu, en aukins sýnileika steypireiðs (Malinauskaite o.fl., 2022).

Efnahags- og samfélagsleg áhrif loftslagsbreytinga á ferðaþjónustuna munu að hluta til ráðast

af viðbrögðum aðila í ferðaþjónustu. Rannsóknir sýna að ferðaþjónustan hefur þegar hafið aðlögun að breyttum aðstæðum.

Í doktorsrannsókn sinni skoðaði Jóhannes Welling (Welling og Árnason, 2016; Welling og Abegg, 2019) meðal annars hvernig aðlögun að loftslagsbreytingum er háttað hjá smáum og meðalstórum fyrirtækjum í jöklaferðamennsku og lagði mat á hvaða þættir hafa áhrif á aðlögun þessara fyrirtækja. Skipta má áhrifum loftslagsbreytinga á jökultengda ferðaþjónustu í fjóra flokka:

- **Skert aðgengi**, svo sem vegna jökullóna eða nýrra áa.
- **Aukna náttúruvá**, svo sem vegna jökulhruns (*e. calving glaciers*) sem kemur af stað öldum og flóðum, sem og auknum aur- og skriðuföllum.
- **Breytingar á landslagi**, svo sem vegna aukinnar þekju aurs á jöklum og þar sem jökull hverfur eins og í tilviki Oksins.
- **Ný tækifæri**, svo sem með tilkomu fleiri jökullóna og auknum áhuga á náttúru á hverfanda hveli (*e. last chance tourism*).

Niðurstöður sýndu að meirihluti aðlögunaraðgerða reyndist tilfallandi. Þá var einnig bent á ýmsar hindranir fyrir framsýnni aðlögun, m.a. skammtímahugsun, togstreitu milli ólíkra hagsmuna og ólíkar þarfir hvað varðar þær upplýsingar sem þarf til beita framsýnni aðlögun. Nánar er fjallað um verkefni Jóhannesar Welling í samhengi aðlögunar í kafla 11.

Mikilvægt er að efla enn frekar rannsóknir á mögulegum áhrifum loftslagsbreytinga á ferðaþjónustu, samfélagslegum og hagrænum, og mögulegum viðbrögðum ferðaþjónustuaðila og ferðamanna.

8.6 Vátrygginga- og fjármálastarfsemi

Vátrygginga- og fjármálastarfsemi er kerfislega og þjóðhagslega mikilvæg starfsemi. Hún snýr að margvíslegum fyrirtækjum, svo sem bönkum, einkareknum vátryggingafélögum, lífeyrissjóðum, Náttúruhamfaratryggingu Íslands og sjóðum, eins og Bjargráðasjóði, sem bæta sumt veðurfarstjón (sjá umfjöllun í Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum 2021).

Vátrygginga- og fjármálastarfsemi getur bæði orðið fyrir áhrifum af loftslagsbreytingum og verið hluti lausnar þegar kemur að því að stýra veðurtengdri áhættu (sjá t.d. Hvítbók (2021)). Skipta má áhrifum loftslagsbreytinga á seðlabanka, almenna bankastarfsemi, lífeyrissjóði, tryggingafélög og aðra fjármálastarfsemi í tvo flokka. Annars vegar *raunlæga áhættu*, sem verður til vegna raunáhrifa loftslagsbreytinganna sjálfra vegna tjóns á eignum. Hins vegar *umbreytingaráhættu*, sem verður til vegna áhrifa af mótvægisaðgerðum, það er aðgerðum sem eiga að koma í veg fyrir loftslagsbreytingar eða gera mögulegt að aðlagast þeim. Aðgerðirnar sem um ræðir gætu t.d. átt við nýja tækni, breytingar á reglum og breytingar á eigna- og fjármagnsmörkuðum (Landsbankinn, 2020).

Vátrygginga- og fjármálastarfsemi mun í auknum mæli þurfa að upplýsa um umhverfis- og loftslagsáhættu sem tengist rekstri; hvernig áhættan er metin, skilgreind og henni stýrt. Ákvæði um ófjárhagslega upplýsingagjöf er þegar að finna í lögum um ársreikninga nr. 3/2006 (Alþingi, 2006), í nýjum lögum um upplýsingagjöf um sjálfbærni á sviði fjármálaþjónustu og flokkunarkerfi fyrir sjálfbærar fjárfestingar (Alþingi, 2023). Að auki hefur áhersla á ábyrgar fjárfestingar vaxið, til dæmis við endurskoðun á lögum nr. 129/1997 um skyldutryggingu lífeyrisréttinda og starfsemi lífeyrissjóða. Árið 2017 kom einnig inn ákvæði um siðferðileg viðmið i fjárfestingum lífeyrissjóða.

Hér verður fjallað um áhrif og viðbrögð aðila sem flokkast til vátrygginga- og fjármálastarfsemi, Seðlabankans, banka, tryggingafélaga og lífeyrissjóða.

8.6.1 Loftslagsbreytingar og hlutverk seðlabanka

Í desember 2017 var haldin ráðstefna sem kennd er við „*One Planet Summit*"þar sem 8 seðlabankar stofnuðu samtök seðlabanka og fjármálaeftirlita um grænkun fjármálakerfa (*e. Central Banks and Supervisors Network for Greening the Financial System; NGFS*). Í ársskýrslu NGFS tveimur árum síðar voru sett fram eftirfarandi ráð til seðlabanka í samhengi loftslagsbreytinga. Þar er lögð áhersla á eftirfarandi atriði (NGFS, 2019):

1. Loftslagsáhætta þarf að vera hluti af þjóðhagsvarúð.
2. Sjálfbærni þarf að vera tekin til greina í eigin eignastýringu seðlabanka.
3. Tryggja þarf að gagnasöfn séu fullnægjandi og að þau séu nýtt.
4. Öflun og miðlun þekkingar.
5. Krafa um og stöðlun upplýsingagjafar þar sem umhverfis- og loftlagsáhætta þarf að vera skýr þegar kemur að fjármálafyrirtækjum og atvinnulífinu.
6. Stuðla að tilvist alþjóðlegra flokkunarreglna fyrir atvinnulífið og græna áhættu.

Síðan þessi sex ráð voru gefin út hefur vaxandi þungi orðið í mikilvægi þess að seðlabankar víða um heim, þ.m.t. Seðlabanki Íslands, meti og taki til greina í sinni starfsemi hver áhrif aukinnar áhættu vegna loftslagsbreytinga eru á stefnu og starfsemi seðlabanka (Gunnar Jakobsson o.fl., 2021). Hvað Seðlabanka Ísland varðar skiptir eftirfarandi máli:

- Loftslagsáhætta er raunveruleg og vaxandi og mun hafa áhrif á stöðugt verðlag, fjármálastöðugleika og öryggi fjármálakerfisins. Afleiðingar og viðbrögð gera loftslagsmálin því að einu stærsta efnahagsmáli samtímans. Vegna þessa væri það óábyrgt að taka ekki tillit til hennar í starfsemi Seðlabankans.
- Greiningar frá Seðlabanka, og haglíkön almennt, þurfa í auknum mæli að taka tillit til umbreytingar- og raunáhættu sem stafar af breytingum í loftslagi og aðgerðum stjórnvalda til að draga úr áhrifum þeirra.
- Umbreytingar- og raunáhætta loftslagsbreytinga munu hafa áhrif á gæði eignasafna fjármálafyrirtækja og getur þannig veikt viðnámsþrótt þeirra. Þróa þarf sviðsmyndir og álagspróf til að meta slík áhrif.
- Upplýsingagjöf fjármálafyrirtækja er undirstaða gagnsæis og greininga á áhrifum loftslagsáhættu og þarf fjármálaeftirlit að tryggja slíka upplýsingagjöf í samræmi við Evrópureglur, auk heilbrigðra viðskiptahátta við grænkun fjármálakerfisins.
- Talið er æskilegt að taka tillit til loftslagsáhættu við framkvæmd peningastefnu, meðal annars með því að setja viðmið varðandi efnahagsreikning Seðlabankans og stýringu gjaldeyrisforðans. Til dæmis hefur sænski seðlabankinn sett ákveðin skilyrði fyrir því hvaða skuldabréf eru keypt í eignasafn bankans vegna áhættunnar við að eiga þessi bréf þegar loftslagsáhættan raungerist.

Seðlabanki Íslands gerðist aðili að NGFS árið 2020. Ári síðar, í samstarfi við NGFS og samhliða COP26 ráðstefnunni, setti bankinn fram tilteknar skuldbindingar vegna áhættu af loftslagsbreytingum. Þær snúa bæði að eigin rekstri og starfsemi ábyrgðarsviða bankans (Gunnar Jakobsson o.fl., 2021). (Sjá frekari umfjöllun í kafla 11).

Hlutverki og umboði Seðlabanka Íslands og snertiflötum við loftslagsbreytingar (Gunnar Jakobsson o.fl., 2021) má skipta í þrjá þætti: fjármálastöðugleika, fjármálaeftirlit og peningamálastefnu. Hvað **fjármálastöðugleika** varðar er mikilvægt að leggja áherslu á greiningar og

þróun þjóðarvarúðartækja. Ráðast þarf í sviðsmyndagreiningu loftslagsáhættu, þar sem áhættan er greind og metið að hvaða áhættu er mögulega ekki verið að huga. Nýta þarf álagspróf til að greina og meta fjárhagsáhættu fjármálakerfisins. Meta þarf áhrif á greiðslumiðlun og öruggt fjármálalíf. Í samhengi **fjármálaeftirlits** þarf að leggja áherslu á fjóra þætti: (1) Áhættuflokkun og staðlaða upplýsingagjöf, (2) áhættustefnu og trausta stjórnarhætti, (3) góða viðskiptahætti og lágmörkun grænþvottar og (4) samráð og væntingastjórnun. Sem dæmi um viðskiptahætti og mögulegan grænþvott má nefna hvort verið sé að veita lán til verkefna sem eru kölluð græn en eru það í raun ekki. Við framkvæmd **peningastefnu** þarf að gera sér grein fyrir samspili loftslagsáhættu og haglíkana.

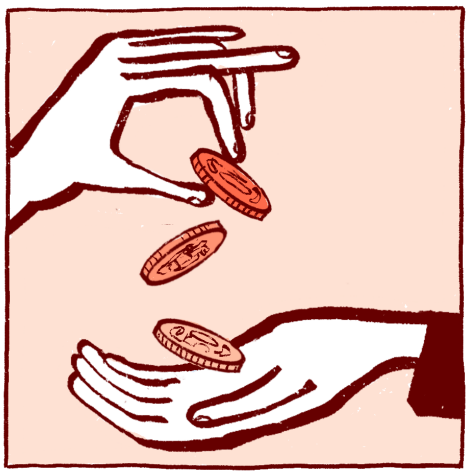
Eins og rakið er hér að ofan eru einungis nokkur ár síðan seðlabankar víða um heim fóru að líta á loftslagsbreytingar sem efnahagsvandamál og leggja mat á áhrif þeirra á fjármálakerfi. Gera má ráð fyrir að aðferðafræði seðlabanka við mat á loftslagsáhættu og efnahagslegum áhrifum verði traustara með aukinni reynslu. Auk þess sem loftslagsbreytingar skapa áhættu fyrir fjármálakerfið munu óhjákvæmilegar efnahagsbreytingar, sem viðbrögðin hafa í för með sér, valda skapandi umbyltingu í iðnaði, tækni og fyrir fjármálastarfsemi (Grippa o.fl., 2019). Í ljósi þeirra áhrifa sem loftslagsbreytingar og aðgerðir gegn þeim geta haft á fjármálakerfið er líklegt að loftslagsmál verði í sívaxandi mæli viðfangsefni fjármálageirans (Guðmundur Örn Jónsson, 2022).

8.6.2 Loftslagsbreytingar og hlutverk banka og lífeyrissjóða

8.6.2.1 Almenn bankastarfsemi

Áhrif loftslagsbreytinga, eða loftslagsáhætta í tilfelli banka, felur annars vegar í sér aukna fjárhagslega óvissu eða áhættu og hins vegar kostnað tengdum fjárfestingum eða útlánum. Bankar eru þó í lykilaðstöðu innan samfélagsins til að búa til og beita hvötum til umskipta og viðbragða.

Ein og minnst var á í grein 8.6 má skipta áhættu sem tengist loftslagsbreytingum í tvo flokka; raunlæga áhættu á eignasafn (*e. physical risk*) eða umbreytingaráhættu á eignasafn (*e. transition risk*) (TCFD, 2017).



Raunlæg áhætta á eignasafn felur í sér þá mögulegu áhættu sem skapast vegna loftslagsbreytinga. Áhættan getur verið viðvarandi (*e. chronic*) eða bráð (*e. acute*) en þó í báðum tilvikum undirorpin óvissu. Óvissan skapast meðal annars af því að framtíðin er óljós og áhrifin óviss, bæði hvað varðar birtingarmynd þeirra og hvar þau raungerast. Einnig er óvissa um áhrif á atvinnugreinar og hvort mismunandi atvinnugreinar séu undirbúnar undir áhrif loftslagsbreytinga, aðlögun að þeim og möguleika til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, þar sem bæði bein og óbein losun er tekin til greina.

Almenn greiningargeta banka á þessum áhrifum er fremur skammt á veg komin en þó er PACTA (*e. Paris Agreement Capital Transition Assessment*) fyrir banka hvað þróaðasta verkfærið til að greina raunlæga áhættu eignasafna. PACTA er opinn hugbúnaður sem gerir bönkum kleyft að meta hversu vel eignasafn þeirra fellur að sviðsmyndum loftslagsbreytinga, sem og að meta einstök fyrirtæki í því samhengi (*Transition Monitor* 2022). Hugveitan Rocky Mountain er umsjónaraðili PACTA. Íslenskir bankar eru skammt á veg komnir við að meta raunlæga áhættu, svo sem vegna fasteignalána. Þó er líklegt að gögn frá Veðurstofu Íslands gætu nýst bönkunum í að áætla áhrif flóða á fasteignalánasafn sitt.

Umbreytingaráhætta á eignasafn er áhætta sem felst í hagrænum og samfélagslegum breytingum í átt til kolefnishlutleysis. Áhættan getur tengst stefnumótun og reglugerðabreytingum, áhættu tengdri tæknibreytingum, breytingum á mörkuðum, lagalegri þáttum og almenningsáliti (*e: social license to operate*). Það er nokkuð auðveldara að gera sér grein fyrir umfangi umbreytingaráhættu þar sem hún raungerist nær nútímanum en raunlæg áhætta og mögulegt að átta sig á því hvar afleiðingarnar verða helst. Þó eru fjárhagslegar afleiðingar fyrir banka ekki vel þekktar.

Regluverkið er að breytast hratt innan margra atvinnugreina. Má þar til dæmis nefna flokkunarreglugerð Evrópusambandsins sem á að leiða til þess að fjárfestingar leiti í átt til sjálfbærra verkefna. Þá er mikilvægt að sameiginlegur skilningur sé á því hvað meint er með *sjálfbærum verkefnum*, en reglugerðin er einmitt kerfi sem tiltekur hvaða verkefni teljast umhverfislega sjálfbær.

Aðrar reglur, sem þegar eru innleiddar, eru SFDR (*e. Sustainable Finance Disclosure Regulation*) og kröfur evrópska fjármálaeftirlitsins (EBA) varðandi innleiðingu sjálfbærniáhættu í upplýsingagjöf til EBA í gegnum áhættuskýrslu banka (European Banking Authority (EBA), 2022). Viðbrögð banka við loftslagsvánni hafa verið margvísleg en hér má nefna að innlendir bankar eru aðilar að reglum um ábyrgar fjárfestingar (*e. Principles for responsible investment, PRI*), reglum um ábyrga bankastarfsemi, hafa gefið út græn skuldabréf og metið óbeina losun gróðurhúsalofttegunda frá sinni starfsemi í gegnum útlán og fjárfestingar (Landsbankinn, 2018).

Mat á losun gróðurhúsalofttegunda frá útlánasöfnum. Íslandsbanki, PCAF (*e. Partnership for Carbon Accounting Financials*) er alþjóðleg aðferðafræði, sem enn er í þróun, þar sem bæði er metin bein og óbein losun gróðurhúsalofttegunda frá fjárfestingum og útlánasafni þeirra. Á grundvelli hennar hafa Landsbankinn, Arion banki og Kvika birt losunartölur og niðurstöður sýna að óbein losun tengd íslenskum bönkum er aðallega tengd sjávarútvegi og flutningi, bæði á sjó og landi.

Græn skuldabréf. Fjármálafyrirtæki eru í lykilstöðu til að fjármagna verkefni sem leiða til samdráttar í losun gróðurhúsalofttegunda eða minni umhverfisáhrifa almennt. Græn skuldabréf, samkvæmt skilgreiningu Alþjóðasamtaka aðila á verðbréfamarkaði (*e. International Capital Market Association, ICMA)*, eru hvers kyns skuldabréfagerningar þar sem fjármunum er varið í að fjármagna eða endurfjármagna ný eða fyrirliggjandi græn verkefni, að hluta eða að fullu, og sem samræmast fjórum grunnstoðum viðmiða ICMA um græn skuldabréf (*e. green bond principles, GBP*) (ICMA, 2021). Í raun er enginn munur á grænum skuldabréfum og öðrum skuldabréfum, fyrir utan að söluandvirði grænna skuldabréfa skal varið til umhverfisvænna verkefna. Útgáfa grænna skuldabréfa er því dæmi um vöru sem fjármálafyrirtæki bjóða uppá sem hvetur til fjárfestinga í loftslagsvænum verkefnum. Umgjörð grænna skuldabréfa fylgir valkvæðum viðmiðum um græn skuldabréf, sem er lýst í GBP, þar sem meðal annars er tekið á hvers konar verkefni má fjármagna. Markmið ICMA með þessu er að stuðla að samræmdu verklagi, koma í veg fyrir grænþvott og stuðla að gagnsæi og upplýsingagjöf til fjárfesta. Dæmi um verkefni sem má fjármagna eru verkefni tengd endurnýjanlegri orku, minni orkukræfni, grænum samgöngum, aðlögun að loftslagsbreytingum, hringrásarhagkerfi og grænum byggingum. Ekki er sjálfgefið að fá betri kjör á grænni skuldabréfaútgáfu þó það sé stundum raunin. Reynsla erlendis sýnir að ávöxtun grænna skuldabréfa er almennt ekki síðri en annarra.

Íslensk fjármálafyriræki, önnur fyrirtæki og sveitarfélög hafa ráðist í útgáfu grænna skuldabréfa. Reykjavíkurborg gaf út fyrsta skuldabréfið en Orkuveita Reykjavíkur er stærsti útgefandinn hér á landi (sjá töflu 8.2).

Mikilvægt er að bankar fylgist vel með þeirri þróun sem er að eiga sér stað erlendis. Regluverk um grænar skuldabréfaútgáfur er einnig að verða til innan Evrópusambandsins og búast má við að útgefendur fylgi þeim fremur en leiðbeiningum ICMA. Leiðbeiningar Evrópusambandsins

Útgefandi	**Upphæð**	**Hlutfall** (%)
Arion banki hf.	11.8	5.6
Brim hf.	5.0	2.4
Félagsbústaðir hf.	18.8	8.9
Gróska ehf.	4.2	2.0
HS Veitur hf.	2.0	0.9
IS Kredit SPV 21 hs.	12.0	5.7
Íslandsbanki hf.	17.5	8.3
Kvika banki hf.	6.2	2.9
Lánasjóður sveitarfélaga ohf.	8.4	4.0
Ljósleiðarinn ehf.	8.2	3.9
Orkuveita Reykjavíkur	54.6	25.9
Reginn hf.	34.1	16.2
Reykjavíkurborg	22.3	10.6
Sveitarfélagið Árborg	5.8	2.7

Tafla 8.2: Útgáfa grænna skuldabréf á Íslandi í milljörðum króna í október 2023 (Heimild: Reynir Smári Atlason, óbirt).

byggja þó að miklu leiti á leiðbeiningum ICMA og því ætti ekki að verða mikil breyting á fyrirkomulagi grænna skuldabréfaútgáfa.

8.6.2.2 Lífeyrissjóðir

Þar sem starfsemi lífeyrissjóða er tengd almannahagsmunum, sbr. 2. gr. laga um ársreikninga, eru þeir skilgreindir sem kerfislega mikilvægir eftirlitsskyldir aðilar. Í ljósi þessa er mikilvægt að meta hvort loftslagsbreytingar ógna afkomu lífeyrissjóða og þar með greiðslum til sjóðsfélaga í framtíðinni. Þetta á sérstaklega við um loftslagsáhættu þeirra fyrirtækja sem sjóðirnir hafa fjárfest í eða hyggjast fjárfesta í. Þó er mikilvægt að horfa til þess að veruleg fjárfestingatækifæri kunna að vera tengd þeim umskiptum sem eru að verða á hagkerfum heimsins, og fjárfestingar í loftslagsvænum verkefnum gætu verið viðskiptatækifæri.

Árið 2021 var stofnaður samstarfsvettvangur norrænna og breskra lífeyrissjóða um græn verkefni og gengu 13 íslenskir lífeyrissjóðir í samstarfið. Markmið þess er að leggja 130 milljarða Bandaríkjadala í græn verkefni. Sem aðilar að þessu samstarfi ætla íslenskir lífeyrissjóðir að veita 580 miljörðum til loftslagstengdra verkefna til ársins 2030, sem er um 9% af heildareignasafni lífeyrissjóðanna árið 2021 (RÚV, 2021). Sem dæmi um aðrar aðgerðir útilokaði Lífeyrissjóður verslunarmanna fjárfestingar í 88 fyrirtækjum sem framleiða jarðefnaeldsneyti. Í samanburði ætlar hollenskur lífeyrissjóður að losa sig við meirihluta fjárfestinga í jarðefnaeldsneytisfyrirtækjum, en það eru um 3% af heildareignum sjóðsins.

8.6.3 Loftslagsbreytingar og tryggingafélög

Tryggingastarfsemi, líkt og önnur fjármálastarfsemi, er talin kerfislega og þjóðhagslega mikilvæg. Undir tryggingastarfsemi fellur Náttúruhamfaratrygging Íslands (NTÍ) og einkarekin vátryggingafélög. Þessir aðilar veita vátryggingavernd gagnvart tjónum tengdum náttúruhamförum, svo sem vegna loftslagsbreytinga, þó svo að áhættan sé sjaldnast skilgreind sem slík. Þessu til viðbótar má nefna aðra sjóði sem koma að loftslags- og náttúruhamfaratengdri óvissu, t.d. Ofanflóðasjóð og Bjargráðasjóð.

Náttúruhamfaratrygging Íslands (NTÍ) (2023) (fyrrum Viðlagatrygging en nafni stofnunarinnar var breytt árið 2018), bætir tjón á eignum af völdum jarðskjálfta, eldgosa, skriðufalla,

snjóflóða og vatnsflóða. Hér er um að ræða húseignir, innbú og lausafé, innviði svo sem veitur, hafnir og brýr, síma- og fjarskiptainnviði í meirihlutaeigu hins opinbera, sem og skíðalyftur. Erlendar eignir má tryggja hjá vátryggingafélögum með starfsleyfi hér á landi. Til þess að innbú sé vátryggt gegn náttúrhamförum þarf það að vera brunatryggt hjá einkareknum tryggingafélögum og er iðgjald innheimt samhliða brunatryggingum.

NTÍ vinnur eftir viðbragðsáætlun við náttúruhamförum en hún tryggir að stofnunin geti tekist á við stóra tjónsatburði. Áætlunin er byggð á sviðsmyndum og líkindafræðilegum greiningum á mögulegum tjónsviðburðum í framtíðinni. Áhættustýring NTÍ felur í sér kaup á endurtryggingavernd á erlendum mörkuðum en hún á að tryggja gjaldþol stofnunarinnar.

Nokkur hluti mögulegra tjóna, sem tengjast loftslagsbreytingum, eru undanþegin bótaskyldu, t.d. tjón vegna asahláku eða skýfalls, óveðurstjórn og foktjón og tjón vegna snjóþunga. Þessi tjón er hægt að tryggja sérstaklega hjá einkareknu félögunum með valfrjálsum tryggingum. Tryggingavernd sem snýr að áhrifum loftslagsbreytinga, sem birtast sem náttúruvá, eru því annars vegar skyldutryggingar og hins vegar valkvæðar tryggingar.

Ofanflóðasjóður, sem rekinn er af ríkissjóði, er forvarnasjóður stofnaður um varnir gegn snjóflóðum. Ofanflóðanefnd er umsýsluaðili sjóðsins og ráðstafar fjármunum úr honum. Fara þeir fjármunir meðal annars í áhættumat, uppsetningu búnaðar og tækja til rannsókna og undirbúning, framkvæmdir og viðhald vegna varnarmannvirkja (sjá lög um varnir gegn snjóflóðum og skriðuföllum (1997) og reglugerð 637/1997).

Bjargráðasjóður er bótasjóður sem er sjálfstæð stofnun í eigu Bændasamtaka Íslands og íslenska ríkisins og fer hvor um sig með 50% eignahlut. Náttúruhamfaratrygging er umsýsluaðili sjóðsins (*Bjargráðasjóður* 2023). Sjóðurinn skiptist í tvær deildir; Almenna deild og búnaðardeild. Almenna deildin veitir fjárhagsaðstoð til einstaklinga og félaga sem hafa orðið fyrir meiriháttar tjóni af völdum náttúruhamfara en búnaðardeildin bætir meiriháttar tjón sem einstaklingar eða félög verða fyrir vegna óvenjulegs veðurfars, meðal annars tjón á afurðum og uppskeru (sjá lög um Bjargráðasjóð (2009) og reglugerð 30/1998).

Einkarekin vátryggingarfélög bæta tjón vegna veðurfarstjóna ef viðskiptavinir hafa keypt sér slíka vernd. Geta veðurfarstjón haft áhrif á skaðatryggingar sem og persónu- og líftryggingar.

Vátryggingafélög, hvort sem þau eru rekin af opinberum aðilum eða einkaaðilum, geta haft áhrif á viðbrögð við loftslagsbreytingum á margvíslegan hátt. Þau geta aukið **áhættuvitund** og **miðlað þekkingu** með ráðgjöf til viðskiptvina og hagaðila um áhættugreiningu og áhættustjórnun, svo sem í samhengi endurbóta á skipulagi og byggingarreglugerðum auk þess með að miðla upplýsingum og gögnum. Í gegnum **kjarnastarfsemi** geta þau einnig haft áhrif á viðbrögð við loftslagsbreytingum með áhættumiðuðum vátryggingakjörum, skilyrtum vátryggingaskilmálum eða undanþáguákvæðum sem breyta hegðan vátryggingataka. Þau dreifa einnig áhættu í gegnum alþjóðlegan vátryggingamarkað. Með **forvarna- og viðvörunarkerfum** geta vátryggingafélög reynt að forða tjónum og beint fjárfestingum og aðgerðum í loftslagsvænni áttir meðmati á loftslagsáhættu (Jóhannsdóttir, 2017).

Sendai rammaáætlun Sameinuðu þjóðanna, sem Ísland er aðili að, snýst um aðgerðir til að draga úr áhrifum hamfara á tímabilinu 2015-2030, sjá nánari umfjöllun í kafla 11

8.6.3.1 Áhrif loftslagsbreytinga á tryggingafélög

Veðurfarstjón hafa áhrif á rekstur vátryggingarfélaga, þar sem slíkir atburðir geta haft neikvæð áhrif á persónu- og eignatjón. IAIS (2021) segir að loftslagsáhætta geti verið til staðar fyrir a.m.k. 35% af fjárfestingum vátryggingafélaga og hefur Evrópska eftirlitsstofnunin um vátrygginga- og

lífeyrissjóði (EIOPA) birt leiðbeiningar til að hjálpa vátryggingafélögum og lífeyrissjóðum við að takast á við loftslagsáhættu (EIOPA, 2022a; EIOPA, 2022b).

Erlendis hefur orðið aukning á tíðni og umfangi veðurfarstengdra tjóna. Ein ástæða er mikil samþjöppun eigna og þéttbýlismyndun á svæðum þar sem hætta er á loftlagstengdum náttúruhamförum, svo sem vatns- og sjávarflóðum, skriðuföllum og snjóflóðum (Hvítbók, 2021). Samkvæmt gögnum NTÍ voru skráðir 276 atburðir á Íslandi frá 1987–2022 (sjá umfjöllun og mynd 10.6 í grein 10.4.1). Af þeim voru 9% tengd vatns- og sjávarflóðum, 6% aurskriðum og 13% snjóflóðum. Þegar dreifing þessara atburða frá 1987 er skoðuð er ekki hægt að merkja aukningu í tíðni. Langstærsti atburðurinn eru aurskriðurnar sem áttu sér stað á Seyðisfirði í desember 2020. Ef tjónskostnaður frá því tímabili er skoðaður má sjá veika aukningu, en ef stóri atburðurinn á Seyðisfirði er fjarlægður er ekki marktæk aukning í tjónakostnaði. Það er þó mat NTÍ að tíðni og umfang tjóna muni aukast og að endurkomutími atburða styttast. Það gæti þýtt aukinn tjónskostnað og hærri iðgjöld.

Loftslagstengdir atburðir annars staðar í heiminum geta einnig haft áhrif á rekstur innlendra vátryggingarfélaga, svo sem NTÍ, vegna endurtryggingasamninga við erlend vátryggingafélög (Hvítbók, 2021). Loftslagsáhætta getur leitt til hækkunar á vátryggingaiðgjöldum vegna aukinnar tjónatíðni og bótafjárhæða sem greiddar eru og mögulega gjaldþrots vátryggingafélaga (OECD, 2021; PACICC, 2022). Líkt og í tilfelli bankastarfsemi, má skipta loftslagstengdri áhættu tryggingafélaga í raunlæga áhættu og umbreytingaáhættu. Raunlæg áhætta felst í áhrifum loftslagsbreytinga á eignir, aðföng, rekstur, aðfangakeðjur og heilsu í víðu samhengi og getur skapað eigna-, bóta-, og skaðabótaskyldu. Umbreytingaráhætta snýr að áhættu tengdri viðbrögðum við loftslagsbreytingum, svo sem breyttri löggjöf og stefnumörkun stjórnvalda, orðspori á markaði og tæknilegri áhættu. Einnig má nefna félagslega áhættu og áhættu sem lýtur að stjórnarháttum viðkomandi starfsemi.

Dæmi um óbein áhrif loftslagsbreytinga á vátryggingavernd hér á landi eru gróðureldar, sem verða algengari í kjölfar hlýnunar, en sú vá getur í meira mæli aukið kröfur um tryggingavernd (Hvítbók, 2021).

Lára Jóhannsdóttir hefur metið styrkleika og veikleika (sjá töflur 8.4 og 8.3, NTÍ og opinberra sjóða annars vegar og einkarekinna tryggingafyrirtækja hins vegar, í samhengi við áhrif loftslagsbreytinga (Johannsdottir og Wallace, 2018). Nánar verður fjallað um viðbrögð tryggingafélaga við loftslagsvá í kafla 11.

Tafla 8.3: NTÍ og opinberir sjóðir

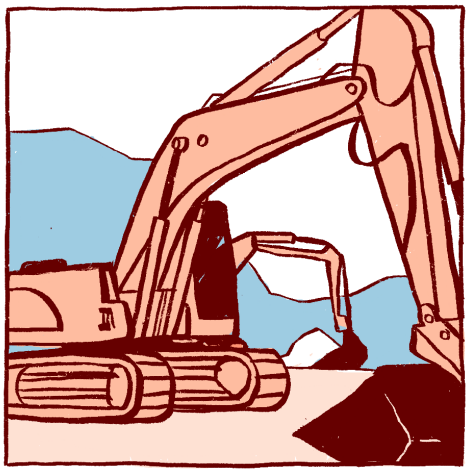
Styrkleikar	**Veikleikar**
Skyldutryggingar vegna tjóna á eignum af völdum jarðskjálfta, eldgosa, skriðufalla, snjóflóða og vatnsflóða	Skortur á framboði og fullnægjandi vernd gegn flóðum en flóðahætta getur aukist vegna loftslagsbreytinga
Fjárhagslegur styrkur opinbera kerfisins	Flækjur í stjórnskipulagi hins opinbera geta dregið úr skilvirkni
Skilvirkt kerfi áhættustýringar, t.d. viðbragðsáætlun vegna náttúruhamfara, innleiðing á ISO 22301um rekstrarsamfellu og nýlegt upplýsingakerfi	NTÍ tekur ekki þátt í gerð skipulagsáætlana sem unnar eru af fámennum sveitarfélögum með takmarkaða fjármuni og sérþekkingu
Aðgangur að gögnum frá fasteignaskrá o.fl.	
Aukið samtarf við ýmsa hagaðila	

Tafla 8.4: Einkarekin vátryggingafélög

Styrkleikar	**Veikleikar**
Valkvæðar tryggingar sem tengjast stormum, skýfalli, asahláku og snjóþunga	Skortur á gagnsæi um aðgerðir í loftslagsmálum hjá einstökum félögum sem og hjá samtökum fjármálafyrirtækja.
Forvarnakerfi og viðvörunarkerfi	Skortur á upplýsingum t.d. um tíðni og alvarleika tjóna, vátryggingarkjör og skilmála.
	Skortur á upplýsingum um það hvort og þá hvernig tjónaupplýsingar nýtast til að draga úr áhættu af veðurfarstjónum með endurbótum reglugerða sem lúta að hönnun mannvirkja eða landsskipulagi

8.7 Áhrif loftslagsbreytinga og umbreyting atvinnulífsins

Eins og fram kemur í kaflanum þá gera afleiðingar loftslagsbreytinga og viðbrögð við þeim loftslagsmál að einu stærsta efnahagsmáli samtímans. Í kaflanum var að mestu einblínt á þær atvinnugreinar sem líklegastar eru til að verða fyrir beinum áhrifum loftslagsbreytinga, svo sem landbúnað, sjávarútveg og ferðaþjónustu og þá geira atvinnulífsins sem eru í lykilaðstöðu til að stuðla að og styðja við viðbrögð, svo sem fjármála- og vátryggingastarfsemi. Þrátt fyrir að áhrif loftslagsbreytinga séu sýnilegust á þá geira sem verða fyrir beinum áhrifum geta allar atvinnugreinar orðið fyrir óbeinum áhrifum, svo sem vegna áhrifa á aðfangakeðjur (Pörtner o.fl., 2022, bls 66).



Heildaráhrifin ná til núverandi atvinnugreina þó þau, og viðbrögð við þeim, kalli ekki síður á umbreytingu atvinnulífs sem getur skapað tækifæri fyrir nýsköpun og nýjar atvinnugreinar. Meðal þessa má nefna kolefnisföngun og -förgun, framleiðslu nýrra orkugjafa eða orkubera, framleiðslu próteina, aukna skilvirkni og hringrás framleiðslukerfa og aðra starfsemi sem stuðlar að hinu svokallaða lág-kolvetnishagkerfi, þ.e. efnahagsstarfsemi sem miðar að sem minnstri losun. Þegar falla nokkur fyrirtæki á Íslandi í þennan flokk. Eins og minnst var á í grein 8.6.2.1 er fjármálakerfið, svo sem bankar, í lykilstöðu þegar kemur að því að stuðla að viðbrögðum og umskiptum, en viðbrögðin hafa einnig áhrif á hefðbundnar atvinnugreinar, eins og rakið er í greinum 8.2 og 9.3. Stjórnvöld hafa hlutverk í því að skapa umhverfi sem styður við nýsköpun og breytingar. Í kafla 11 er fjallað um aðlögun að loftslagsbreytingum, en sá hluti hennar sem snýr að uppbyggingu innviða og félagslegra kerfa kann að leiða til atvinnusköpunar á því sviði. Þrátt fyrir vöxt í starfsemi á sviðum sem miða að því að draga úr losun eða afleiðingum loftslagsbreytinga skortir mjög á rannsóknir um áhrif loftslagsbreytinga á íslenskt atvinnulíf og hvaða umbreytingar gætu verið frammundan.

Heimildir

Abrahams, Z, G Hoogendoorn og J M Fitchett (jan. 2022). „Glacier tourism and tourist reviews: an experiential engagement with the concept of "Last Chance Tourism"“. Í: *Scandinavian Journal of Hospitality and Tourism* 22.1, bls. 1–14. ISSN: 1502-2250. DOI: 10.1080/15022250.2021.1974545. URL: https://doi.org/10.1080/15022250.2021.1974545.

Agnarsson, Sveinn (2020). *Co-creating a decision support framework to ensure sustainable fish production in Europe under climate change*. Deliverable 4.2. Climefish Grant agreement No 677039. sjá einnig www.climefish.eu.

Alexander, Lisa V., Simon F.B. Tett og Trausti Jonsson (júl. 2005). „Recent observed changes in severe storms over the United Kingdom and Iceland“. Í: *Geophysical Research Letters* 32 (13), bls. 1–4. DOI: 10.1029/2005GL022371.

Alþingi (1997). *Lög um varnir gegn snjóflóðum og skriðuföllum*. Alþingi. URL: https://www.althingi.is/lagas/nuna/1997049.html.

— (2006). *Lög um ársreikninga nr 3/2006*. URL: https://www.althingi.is/lagas/nuna/2006003.html.

— (2009). *Lög um Bjargráðasjóð*. Alþingi. URL: https://www.althingi.is/lagas/153a/2009049.html.

— (2023). *Lög um upplýsingagjöf um sjálfbærni á sviði fjármálaþjónustu og flokkunarkerfi fyrir sjálfbærar fjárfestingar nr 25/2023*. URL: https://www.althingi.is/altext/153/s/1682.html.

Amundsen, Helene (2012). „Illusions of resilience? An analysis of community responses to change in northern Norway“. Í: *Ecology and Society* 17.46.

Audzijonyte, Asta, Rebecca Gorton, Isaac Kaplan og Elizabeth A. Fulton (2017a). *Atlantis User's Guide Part I: General Overview, Physics & Ecology*. CSIRO living document.

— (2017b). *Atlantis User's Guide Part II: Socio-Economics*. CSIRO living document.

Barange, Manuel, Tarif Bahri, Malcolm C. M. Beveridge, Kevern L. Cochrane, Simon Funge-Smith og Florence Poulain, ritstj. (2018). *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper 627. Rome: FAO, bls. 628.

Báez, J.C., L. Gimeno og R. Real (2021). „North Atlantic Oscillation and fisheries management during global climate change“. Í: *Rev Fish Biol Fisheries* 31, bls. 319–336. DOI: 10.1007/s11160-021-09645-z.

Bjargráðasjóður (2023). URL: https://www.nti.is/bjargradasjodur/.

ClimeFish Consortium (2020). *ClimeFish*. URL: http://www.climefish.eu.

Collins, C., E. Bresnan, L. Brown, L. Falconer, J. Guilder, L. Jones, A. Kennerley, S. Malham, A. Murray og M. Stanley (2020). „Impact of climate change on aquaculture“. Í: *MCCIP Science Review*, bls. 482–520.

CSIRO (án árs). *Modelling Australia's Oceans*. URL: https://blog.csiro.au/modelling-australias-oceans/.

Daði Kristofersson, Stefán Gunnlaugsson og Hreiðar Valtysson (jún. 2021). „Factors affecting greenhouse gas emissions in fisheries: evidence from Iceland's demersal fisheries“. Í: *ICES Journal of Marine Science* 78.7, bls. 2385–2394. ISSN: 1054-3139. DOI: 10.1093/icesjms/fsab109. eprint: https://academic.oup.com/icesjms/article-pdf/78/7/2385/41746913/fsab109.pdf. URL: https://doi.org/10.1093/icesjms/fsab109.

EIOPA (2022a). *Application guidance on climate change materiality assessments and climate change scenarios in ORSA*. The European Insurance og Occupational Pensions Authority. URL: https://www.eiopa.europa.eu/publications/application-guidance-climate-change-materiality-assessments-and-climate-change-scenarios-orsa_en.

— (2022b). *EIOPA Underlines Its Commitment to Supporting Insurance and Pensions Sectors in Tackling Climate Change*. European Insurance og Occupational Pensions Authority. URL:

https://www.eiopa.europa.eu/eiopa-underlines-its-commitment-supporting-insurance-and-pensions-sectors-tackling-climate-change-2022-11-18_en (skoðað 07.06.2023).

Erla Sturludóttir, Guðni Þorvaldsson, Guðríður Helgadóttir, Ingólfur Guðnason, Jóhannes Sveinbjörnsson, Ólafur Ingi Sigurgeirsson og Þóroddur Sveinsson (2021). *Fæðuöryggi á Íslandi*. Gefið út af Erla Sturludóttir og Jóhannes Sveinbjörnsson. Rit LBHÍ nr 139. Landbúnaðarháskóli Íslands.

European Banking Authority (EBA) (2022). *EBA Publishes Binding Standards on Pillar 3 Disclosures of ESG Risks*. European Banking Authority. URL: https://www.eba.europa.eu/eba-publishes-binding-standards-pillar-3-disclosures-esg-risks (skoðað 24.01.2022).

Feser, F., M. Barcikowska, O. Krueger, F. Schenk, R. Weisse og L. Xia (2015). „Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe—A review". Í: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 141 (687), bls. 350–382. DOI: 10.1002/QJ.2364.

Fulton, Elizabeth A., Jason Link, Isaac C. Kaplan, Paul Johnson, Marie Savina-Rolland, Cameron Ainsworth, Peter Horne, Rebecca Gorton, Robert J. Gamble, Tony Smith og David C. Smith (2011). „Lessons in modelling and management of marine ecosystems: The Atlantis experience". Í: *Fish and Fisheries* 12, bls. 171–188.

Grafton, R. Quentin (2010). „Adaptation to climate change in marine capture fisheries". Í: *Marine Policy* 34 (3), bls. 606–615. DOI: 10.1016/J.MARPOL.2009.11.011.

Grippa, Pierpaolo, Jochen Schmittmann og Felix Suntheim (2019). „Climate Change and Financial Risk". Í: *International Monetary Fund. Finance & Development*. URL: https://www.imf.org/-/media/Files/Publications/Fandd/Article/2019/December/climate-change-central-banks-and-financial-risk-grippa.ashx.

Guðmundur J. Óskarsson, Guðmundur Þórðarsson, Guðni Guðbergsson, Ingibjörg G. Jónsdóttir, Sigurður Guðjónsson og Sólveig R. Ólafsdóttir (2021). *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafnarfjörður: Hafrannsóknastofnun. URL: https://www.hafogvatn.is/is/midlun/utgafa/haf-og-vatnarannsoknir/stada-umhverfis-og-vistkerfa-i-hafinu-vid-island-og-horfur-naestu-aratuga-hv-2021-14.

Guðmundur Örn Jónsson (2022). „Mat á loftslagsáhættu – Aðferðarfræði fjármálafyrirtækja". Í: *Kalkofninn rit Seðlananka Íslands*. URL: https://www.sedlabanki.is/utgefid-efni/kalkofninn/grein/2022/07/05/Mat-a-loftslagsahaettu/.

Guðni Guðbergsson (2016). *Lax- og silungsveiðin 2016*. Reykjavík: Veiðimálastofnun, bls. 38.

Guðni Guðbergsson, Hlynur Bárðarson, Ingi Rúnar Jónsson, Sigurður Már Einarsson og Magnús Jóhannson (2021). „Göngufiskar". Í: *Staða umhverfis og vistkerfis í hafinu við Ísland og horfur næstu áratuga*. Gefið út af Guðmundur J. Óskarsson. Bd. HV 2021-14. Haf- og vatnarannsóknir. Hafrannsóknastofnun.

Guðni Guðbergsson og Þórólfur Antonsson (1996). *Fiskar í ám og vötnum*. Reykjavík: Landvernd, bls. 191.

Gulev, S K, P W Thorne, J Ahn, F J Dentener, C M Domingues, S Gerland, D Gong, D S Kaufman, H C Nnamchi, J Quaas, J A Rivera, S Sathyendranath, S L Smith, B Trewin, K von Schuckmann og R S Vose (2021). „Changing State of the Climate System". Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 287–422. DOI: 10.1017/9781009157896.004.

Gunnar Jakobsson, Ragnheiður Jónsdóttir og Sigrún María Einarsdóttir (2021). „Seðlabankar hafa hlutverki að gegna í loftslagsmálum". Í: *Kalkofninn rit Seðlananka Íslands*. URL: https://www.sedlabanki.is/utgefid-efni/kalkofninn/grein/2021/11/03/Sedlabankar-hafa-hlutverki-ad-gegna-i-loftslagsmalum/.

Gössling, Stefan og Sara Dolnicar (2023). „A review of air travel behavior and climate change“. Í: *WIREs Climate Change* 14.1, e802. DOI: https://doi.org/10.1002/wcc.802. eprint: https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/wcc.802. URL: https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wcc.802.

Hagfræðistofnun Háskóla Íslands (2018). *Virði lax- og silungsveiða október 2018. Skýrsla nr. C18:07*. URL: https://ioes.hi.is/files/2021-05/Virdi-lax-og-silungsveida.pdf.

Hagstofa Íslands (2023). *Sjávarútvegur*. URL: https://hagstofa.is/talnaefni/atvinnuvegir/sjavarutvegur/ (skoðað 06.01.2023).

Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson og Trausti Jónsson (2018). *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018*. Veðurstofa Íslands. URL: https://www.vedur.is/media/loftslag/Skyrsla-loftslagsbreytingar-2018-Vefur-NY.pdf.

Halldór Björnsson, Árný E Sveinbjörnsdóttir, Anna K Daníelsdóttir, Árni Snorrason, B D Sigurdsson, Einar Sveinbjörnsson, Gísli Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Snorri Baldursson, Sólveig Þorvaldsdóttir og Trausti Jónsson (2008). „Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi“. Í: *Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar, Umhverfisráðuneyti*.

Heck, Nadine, Michael W. Beck og Borja Reguero (2021). „Storm risk and marine fisheries: a global assessment“. Í: *Marine Policy* 132, bls. 104698. DOI: 10.1016/j.marpol.2021.104698. URL: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104698.

Hobday, Alistair J., Kevern Cochrane, Nicola Downey-Breedt, James Howard, Shankar Aswani, Val Byfield, Greg Duggan, Elethu Duna, Leo X.C. Dutra, Stewart D. Frusher, Elizabeth A. Fulton, Louise Gammage, Maria A. Gasalla, Chevon Griffiths, Almeida Guissamulo, Marcus Haward, Astrid Jarre, Sarah M. Jennings, Tia Jordan, Jessica Joyner, Narayana Kumar Ramani, Swathi Lekshmi Perumal Shanmugasundaram, Willem Malherbe, Kelly Ortega Cisneros, Adina Paytan, Gretta T. Pecl, Éva E. Plagányi, Ekaterina E. Popova, Haja Razafindrainibe, Michael Roberts, Prathiba Rohit, Shyam Salim Sainulabdeen, Warwick Sauer, Sathianandan Thayyil Valappil, Paryiappanal Ulahannan Zacharia og E. Ingrid van Putten (jún. 2016). „Planning adaptation to climate change in fast-warming marine regions with seafood-dependent coastal communities“. Í: *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 26 (2), bls. 249–264. ISSN: 15735184. DOI: 10.1007/S11160-016-9419-0/FIGURES/5.

Hvítbók (2021). *Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum - Drög að stefnu*. Starfshópur um stefnu stjórnvalda varðandi aðlögun að loftslagsbreytingum. Stjórnarráð Íslands: Umhverfis- og auðlindaráðuneytið.

IAIS (2021). *Global Insurance Market Report. The Impact of Climate Change on the Financial Stability of the Insurance Sector*. The International Association of Insurance Supervisors (IAIS). URL: https://www.iaisweb.org/uploads/2022/01/210930-GIMAR-special-topic-edition-climate-change.pdf.

ICMA (2021). *The Principles, Guidelines and Handbooks*. International Capital Markets Association. URL: https://www.icmagroup.org/sustainable-finance/the-principles-guidelines-and-handbooks/.

IPCC (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report*. Gefið út af Priyadarshi R. Shukla, Jim Skea, Raphael Slade, Roger Fradera, Minal Pathak, Alaa Al Khourdajie, Malek Belkacemi, Renée van Diemen, Juliette Malley, David McCollum, Shreya Some og Purvi Vyas. Accessed: 2023-10-02. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf.

Johannsdottir, L og JR Wallace (2018). „Climate change resilience: Role of insurers in bridging the gap between climate change science and heterogeneous stakeholders“. Í: *Handbook of climate change resilience. Springer*.

Jóhannsdóttir, Lára (2017). „Climate change and Iceland's risk-sharing system for natural disasters". Í: *The Geneva Papers on Risk and Insurance – Issues and Practice* 42.2, bls. 275–295.

Keller, Nicole, Ásta Karen Helgadóttir, Sigríður Rós Einarsdóttir, Rafn Helgason, Birgir Urbancic Ásgeirsson, Diljá Helgadóttir, Inga Rún Helgadóttir, Brian Charles Barr, Chanee Jónsdóttir Thianthong, Kristinn Már Hilmarsson, Leone Tinganelli, Arnór Snorrason, Sigmundur Helgi Brink og Jóhann Þórsson (2023). *National Inventory Report Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2021*. Tæknileg skýrsla. Reykjavík, Iceland: The Environment Agency of Iceland. URL: http://www.umhverfisstofnun.is/library/Skrar/loft/NIR/ISL_NIR%202023_15%20april_on_web.pdf.

Landsbankinn (2018). *Græn skuldabréf fjárfest í grænni framtíð*. Landsbankinn. URL: https://www.landsbankinn.is/umraedan/samfelagid/graen-skuldabref-fjarfest-i-graenni-framtid.

— (2020). *Loftslagsbreytingar – auka og breyta áhættu í fjármálageiranum*. URL: https://www.landsbankinn.is/umraedan/samfelagid/loftslagsbreytingar-auka-og-breyta-ahaettu-i-fjarmalageiranum.

Lee, J.-Y., J Marotzke, G Bala, L Cao, S Corti, J P Dunne, F Engelbrecht, E Fischer, J C Fyfe, C Jones, A Maycock, J Mutemi, O Ndiaye, S Panickal og T Zhou (2021). „Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information". Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.

Malinauskaite, L., D. Cook, B. Bavidsdottir, M.P. Karami, T. Koenigk, T. Kruschke, H. Ögmundardottir og M. Rasmussen (2022). „Connecting the dots: an interdisciplinary perspective on climate change effects on whales, and whale watching in Skjalfandi Bay, Iceland". Í: *Ocean and Coastal Management* 226, bls. 106274.

Mason, Julia G, Pamela J Woods, Magnús Thorlacius, Kristinn Guðnason, Vincent S Saba, Patrick J Sullivan og Kristin M Kleisner (nóv. 2021). „Projecting climate-driven shifts in demersal fish thermal habitat in Iceland's waters". Í: *ICES Journal of Marine Science* 78.10, bls. 3793–3804. DOI: 10.1093/icesjms/fsab230.

Maulu, S., O.J. Hasimuna, L.H. Haambiya, C. Monde, C.G. Musuka, T.H. Markorwa, B.P. Mungana, K.J. Phiri og J.D. Nsekanabo (2021). „Climate change effects on aquaculture production: sustainability implications, mitigation and adaptation". Í: *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5, bls. 609097.

Náttúruhamfaratrygging (2023). URL: https://www.nti.is/.

NGFS (2019). *NGFS Annual Report 2019*. URL: https://www.greenfinanceplatform.org/research/ngfs-annual-report-2019.

NordForsk (2024). *CliCNord - Climate change resilience in small communities in the Nordic countries*. Tímabil: 2022 – 2024. NordForsk. URL: https://www.clicnord.org/.

Oddný Þóra Óladóttir (2022). *Erlendir ferðamenn á Íslandi 2021: Lýðfræði, ferðahegðun og viðhorf*. FMS 2022-17. URL: https://www.ferdamalastofa.is/static/files/ferdamalastofa/kannanir/2022/erlendir-ferdamenn-a-islandi-jul22.pdf.

OECD (2021). *Global Insurance Market Trends 2021*. Organisation for Economic Co-operation og Development. URL: https://www.oecd.org/daf/fin/insurance/Global-Insurance-Market-Trends-2021.pdf.

Oostdijk, Maaike, Eydis Sturludottir og Maria Santos (2022). „Risk assessment for key socio-economic and ecological species in a sub-arctic marine ecosystem under combined ocean acidification and warming". Í: *Ecosystems* 25, bls. 1117–1134.

PACICC (2022). *Why Insurers Fail: Mapping the road to ruin 2022*. Property og Casualty Insurance Compensation Corporation. URL: http://www.pacicc.ca/wp-content/uploads/2022/06/Why-Insurers-Fail-Mapping-the-road-to-ruin-2022.pdf.

Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, H. Adams, I. Adelekan, C. Adler, R. Adrian, P. Aldunce, E. Ali, R. Ara Begum, B. Bednar- Friedl, R. Bezner Kerr, R. Biesbroek, J. Birkmann, K. Bowen, M.A. Caretta, J. Carnicer, E. Castellanos, T.S. Cheong, W. Chow, G. Cissé G. Cissé og Z. Zaiton Ibrahim (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Technical Summary. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 37–118.

RÚV (2021). *Fyrirtækin sem við fjárfestum í þurfa að breytast*. Ríkisútvarpið ohf. URL: https://www.ruv.is/frettir/innlent/2021-11-03-fyrirtaekin-sem-vid-fjarfestum-i-thurfa-ad-breytast.

Sainsbury, Nigel C., Martin J. Genner, Geoffrey R. Saville, John K. Pinnegar, Clare K. O'Neill, Stephen D. Simpson og Rachel A. Turner (2018). „Changing storminess and global capture fisheries". Í: *Nature Climate Change* 8, bls. 655–659. DOI: 10.1038/s41558-018-0206-x.

Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner og B. Zhou (2021). „Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate". Í: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 1513–1766. DOI: 10.1017/9781009157896.013.

Sturludottir, E., C. Desjardins, B. Elvarsson, E. A. Fulton, R. Gorton, K. Logemann og G. Stefansson (2018). „End-to-end model of Icelandic waters using the Atlantis framework: exploring system dynamics and model reliability". Í: *Fisheries Research* 207, bls. 9–24.

Svenning, Martin-A., Morten Falkegård, J. Brian Dempson, Michael Power, Bård-Jørgen Bårdsen, Guðni Guðbergsson og Per Fauchald (2021). „Temporal changes in the relative abundance of anadromous Arctic charr, brown trout, and Atlantic salmon in northern Europe: Do they reflect changing climates?" Í: *Freshwater Biology* 67.1, bls. 64–77. ISSN: 1365-2427. DOI: 10.1111/fwb.13693.

TCFD (2017). *Recommendations of the Task Force on Climate-related Financial Disclosures*. URL: https://assets.bbhub.io/company/sites/60/2021/10/FINAL-2017-TCFD-Report.pdf.

Transition Monitor (2022). URL: https://www.transitionmonitor.com (skoðað 01.06.2023).

Welling, J. og B. Abegg (2019). „Following the ice: adaptation processes of glacier tour operators in Southeast Iceland". Í: *International Journal of Biometeorology*. DOI: 10.1007/s00484-019-01779-x.

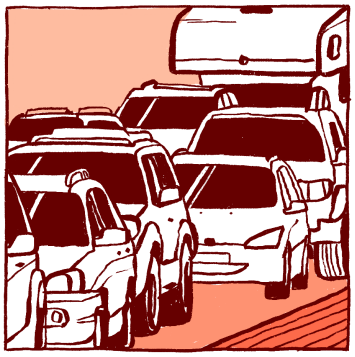
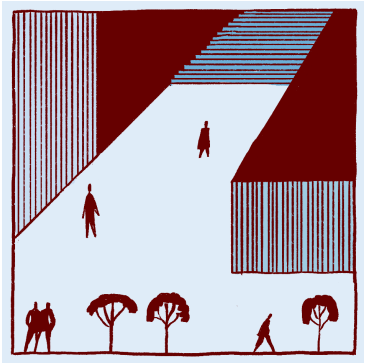
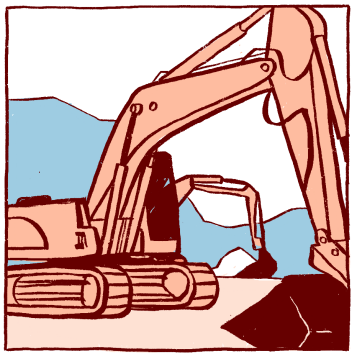
Welling, J. og Þ. Árnason (2016). „External and Internal Challenges of Glacier Tourism Development in Iceland". Í: *Mountain Tourism: Experiences, Communities, Environments and Sustainable Futures*. Gefið út af H. Richins og J. S. Hull. Wallingford: CAB International, bls. 186–195.

Østhagen, Andreas, Jessica Spijkers og Olav Anders Totland (2020). „Collapse of cooperation? The North-Atlantic mackerel dispute and lessons for international cooperation on transboundary fish stocks". Í: *Maritime Studies* 19.2, bls. 155–165. ISSN: 2212-9790. DOI: 10.1007/s40152-020-00172-4. URL: https://doi.org/10.1007/s40152-020-00172-4.

KAFLI

9

BYGGÐIR INNVIÐIR

Efnisyfirlit kafla

9.1 Inngangur 276
9.2 Innviðir vatnsmiðlunar 276
9.2.1 Forði, vatnsöflun og dreifikerfi 276
9.2.2 Ástand og tegundir vatnsbóla 279
9.2.3 Fráveita 280
9.3 Orkukerfi 283
9.3.1 Framleiðsla 283
9.3.2 Eftirspurn 288
9.3.3 Miðlun orku 290
9.4 Samgöngur 293
9.4.1 Vegasamgöngur 293
9.4.2 Flugvellir og flug 295
9.4.3 Samgöngur á sjó 296

Samantekt

1. Loftslagsbreytingar eru nú þegar farnar að hafa áhrif á ýmsa byggða innviði, sem hefur kallað á viðbrögð.

2. Áhrif loftslagsbreytinga, s.s. þurrkar, aukin ákefð úrkomu, umhleypingar, flóð og hækkuð sjávarstaða geta haft áhrif á forða, vatnsöflun og dreifikerfi vatnsveitna. Meðal áhrifa eru hætta á örveru- eða seltumengun vatnsbóla og breytt grunnvatnsstaða.

3. Fyrir fráveitur geta sömu þættir aukið flóðahættu, t.d. ef niðurföll fyllast, hættu á bakflæði í lögnum og að það flæði upp úr niðurföllum. Fyrir blönduð fráveitukerfi geta áhrifin verið verri en í aðgreindum kerfum, þar sem ofanvatn og skólp er ekki í sömu lögnum.

4. Flóðaatburðir hér á landi eru oftast vegna rigningar sem fellur á frosna jörð eða á snjó. Rannsóknir sýna að rigning á snjó er vaxandi vandamál fyrir fráveitukerfi.

5. Blágrænar ofanvatnslausnir hafa reynst mikilvægar til að draga úr flóðahættu samfara aftakarigningu.

6. Bráðnun jökla vegna loftslagsbreytinga hefur mikil áhrif á vatnsaflsframleiðslu á Íslandi. Sú aukning, sem þegar hefur átt sér stað, hefur verið nýtt í núverandi kerfi vatnsaflsvirkjana og miðlana þeirra, m.a. með stækkun Búrfellsvirkjunar. Tímaþróun áframhaldandi aukningar er óviss en nýting hennar er háð uppbyggingu í samræmi við þróun auðlindarinnar.

7. Þurrkar og breyting á úrkomudreifingu innan ársins, auk breytinga á hlutfalli rigningar og snævar í úrkomu, munu hafa áhrif á rekstur miðlana og vatnsaflsframleiðslu.

8. Breytingar á hvassviðratíðni getur haft áhrif á rekstraröryggi vindorkuvera, en sumarhlýnun getur aukið möguleika á framleiðslu á orkuplöntum.

9. Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á rekstraröryggi raforkukerfis, t.d. með tilfærslu þeirra svæða þar sem ísingar gætir helst, vegna verri hvassviðra, ofanflóða og annarrar loftslagstengdrar náttúruvár.

10. Hlýnun getur dregið úr eftirspurn eftir orku til húshitunar, en þrátt fyrir minnkun í meðalnotkun geta sveiflur í veðurfari aukið tímabundna álagstoppa. Mikilvægt er að greina áhrif fólksfjölgunar og loftslagsbreytinga á allar vatnsveitur landsins.

11. Loftslagsbreytingar geta aukið eftirspurn eftir raforku til kælimiðla, en ljóst er að orkuskipti muni auka orkuþörf.

12. Ólíkar forsendur um hagvöxt, uppbyggingu, útflutning og þarfir efnahagslífsins, auk tækniþróunar og orkunýtni, gerir það að verkum að mismunandi sviðsmyndir um orkuþörf vegna orkuskipta ná frá engri þörf á viðbótarraforku til ríflega tvöföldunar á raforkuframleiðslu. Mikilvægt er að orkuskipti byggi á vandaðri ákvarðanatöku og miði að því að ná sem víðtækastri samfélagssátt.

13. Loftslagsbreytingar hafa áhrif á vegasamgöngur, m.a. vegna hlýnunar, hitabylgna, þurrka og tíðari hitasveiflna umhverfis frostmark. Áhrifin eru m.a. blæðingar í yfirborði vega, skemmdir á burðarlagi og styttri líftími slitlags. Sambærileg áhrif á flugbrautir geta einnig haft neikvæð áhrif á flugsamgöngur.

14. Loftslagsbreytingar geta dregið úr þörf á snjómokstri, en á svæðum þar sem hitasveiflur um frostmark aukast verður meiri viðhaldsþörf slitlags. Breytt grunnvatnsstaða getur haft áhrif á burðarþol og aukinn vindur valdið tjóni á slitlagi.

15. Sjávarstöðubreytingar hafa einnig áhrif á rof og flóðahættu á vegum á strandsvæðum, en á fjallvegum gæti minna frost í jörðu haft áhrif á stöðugleika undirlags.

16. Aukin skriðuföll og óstöðugleiki jarðlaga getur einnig valdið tjóni á innviðum.

17. Hærri sjávarstaða kann að auka viðhaldsþörf á hafnarsvæðum og rof og ágangur sjávar að valda skemmdum.

18. Hafís á siglingaleið nærri Íslandi hefur dregist saman á undanförnum áratugum. Líklegt er að sú þróun haldi áfram, en hafís getur þó truflað siglingar hluta ársins. Borgarísjaka frá Grænlandi mun áfram reka á siglingaleið og gætu mögulega orðið meira vandamál ef íshellur á Grænlandi brotna upp.

19. Verði hnattræn hlýnun á bilinu 1,5–2,0 °C er líklegt að sumarhafís hverfi að mestu af Íshafinu sum ár, en hlýni meira 3 °C þá muni það gerast flest ár.

20. Dragist hafís verulega saman opnast nýjar siglingaleiðir um Íshafið. Greiningar á ábata Íslands af opnun siglingaleiða um Íshafið bendir ekki til þess að staðsetning landsins gefi okkur umtalsvert samkeppnisforskot, nema í tilviki svokallaðrar Miðleiðar.

21. Öryggismál tengd siglingum, hafís, borgarís og lagnaðarís eru mjög mikilvæg og mikilvægt að vöktun sé sinnt. Alþjóðleg samvinna um eftirlit, vöktun og miðlun hafísupplýsinga hefur reynst árangursrík og mikilvægt að henni sé haldið áfram.

9.1 Inngangur

Nauðsynlegir innviðir samfélaga eru af mörgum toga, allt frá byggðum innviðum tengdum vatni, orku og samgöngum til félagslegra innviða. Loftslagsbreytingar eru nú þegar farnar að hafa áhrif á byggða innviði og hefur það kallað á viðbrögð. Sem dæmi má nefna aukningu í framleiðslugetu Búrfellsvirkjunar, breyttar hönnunarforsendur hjá Vegagerðinni og áhersla á blágrænar ofanvatnslausnir í borgarumhverfinu.

Þessi kafli fjallar um áhrif loftslagsbreytinga á byggða innviði. Fyrst verður fjallað um áhrif á innviði sem tengjast miðlun neysluvatns og fráveitu auk efnahagsstarfsemi. Því næst er fjallað um áhrif á orkukerfið, frá framleiðslu til breytinga í eftirspurn og að lokum verður fjallað um áhrif á samgöngur á landi, hafi og í lofti.

9.2 Innviðir vatnsmiðlunar

Áhrif loftslagsbreytinga á vatnstengda innviði skiptast í áhrif á vatnsból, vatnsöflun og dreifikerfi, áhrif á fráveitu- og ofanvatnskerfi og áhrif á eftirspurn eftir vatni. Tafla 9.1 sýnir þessa flokka, innviði sem þeim tengjast, einstaka álagsþætti vegna loftslagsbreytinga og helstu áhrif þeirra.

9.2.1 Forði, vatnsöflun og dreifikerfi

Neysluvatn á Íslandi er að stærstum hluta grunnvatn, eða um 95%. Á nokkrum svæðum, aðallega á Austurlandi og Vestfjörðum, þarf þó að nota yfirborðsvatn til neyslu (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

Loftslagsbreytingar, svo sem hærri lofthiti, breytingar í ákefð og magni úrkomu, skriðuföll og hækkun á sjávarstöðu, geta haft margs konar áhrif á vatnsveitur og vatnsgæði og þar með á neysluvatn. Líklegt er að grunnvatnsforðinn muni aukast við aukna úrkomu, en með hlýnun er líklegt að úrkoma á norðurslóðum aukist auk þess sem hún leiðir til massataps jökla sem fæða grunnvatnsgeyma.

Í V2018 var ályktað að úrkomubreytingar væru líklegar til að hafa áhrif á forða og gæði vatnsbóla. Þar koma auk þess fram að ef þurrkar verða algengari hér á landi getur það haft áhrif á aukna eftirspurn eftir vatni á sama tíma og staða vatnsbóla yrði erfiðari.

Síðan V2018 kom út hafa rannsóknir verið gerðar á áhrifum loftslagsbreytinga á vatnsveitur og vatnsgæði á mismunandi landssvæðum. Flokka má áhrif og áhættu vegna loftslagsbreytinga á vatnsgæði og vatnsveitur í 4 flokka; (1) Breytingar í úrkomu, flóð og hærri sjávarstaða, (2) skriðuföll, (3) yfirfullar skólplagnir og (4) örverur í neysluvatni (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019). Þá er aukin hætta af gróðureldum og verður sá þáttur ræddur hér ásamt hinum fjórum.

Tafla 9.1: Helstu áhrif loftslagsbreytinga á innviði sem tengjast vatns- og fráveitum

Flokkar	**Innviðir**	**Einstaka þættir loftslagsbreytinga**	**Áhrif**
Forði, vatnsöflun, dreifikerfi	Vatnsból.	Aukin úrkomuákefð, hláka, ofsaflóð, leysingar, skriðuföll,	Aukið magn ofanvatns, mengun í vatnsbólum.
	Vatnsöflun.	Breytingar í úrkomumynstri, þurrkar.	Breytt grunnvatnsstaða, vatnsforði í hættu.
	Dreifikerfi.	Hærri sjávarstaða. Aukning gróðurelda.	Selta ógnar vatnsbólum við sjó. Mengun grunnvatns.
Eftirspurn	Vatnsból.	Hitastigssveiflur.	Sveiflur (aukning) í eftirspurn eftir köldu vatni.
	vatnsöflun.		
Fráveita	Ofanvatnskerfi almennt	Aukin úrkomuákefð, leysingar	Aukið magn ofanvatns, flóðahætta.
		Hækkun sjávarborðs.	Aukið viðnám viðtaka, flóðahætta, bakflæði.
	Blönduð ofanvatns og skólpkerfi (einföld kerfi).	Aukin úrkomuákefð, leysingar	Aukið magn ofanvatns, flóðahætta, skólp á yfirfall, bakflæði, mengunarhætta.
	Skólpkerfi.	Hækkun sjávarborðs.	Aukið viðnáms viðtaka, flóðahætta, bakflæði

9.2.1.1 Breytingar í úrkomu, flóð og hærri sjávarstaða

Aukin úrkoma og leysingar geta haft áhrif á neysluvatn, bæði þar sem notað er yfirborðsvatn og þar sem grunnvatn er meginuppistaða vatnsforða. Sérstök hætta er á mengun ef vatnsból eru í slæmi ástandi. Loftslagsbreytingar hafa áhrif á aukna tíðni flóða, sem getur aukið líkur á að vatnsból fari á kaf. Aukin hætta er á að yfirborðsvatn komist í grunnvatn í mikilli úrkomu eða við asahláku og leysingar, en yfirborðsvatn getur mengað grunnvatn. Meiri hætta er á ferðum þar sem jarðlög eru gropin og jarðvegslög þunn, en þar eru áhrif yfirborðsvatns á neysluvatn meiri. Við mikla úrkomu eða asahláku getur yfirborðsvatn einnig borist í grunnvatnsgeyma nálægt vatnstökuholum. Hægt er að vinna gegn mögulegri mengun með því að meðhöndla grunnvatn, t.d. með síun og geislum (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019), og er það meðal annars gert á sumum vatnstökusvæðum Veitna.

Hærri sjávarstaða getur valdið saltmengun í grunnvatni þar sem vatnsból eru nálægt sjó, m.a. á Reykjanesi. Flóð geta einnig haft áhrif á afhendingu vatns, t.d. vegna áhrifa á vatnsleiðslur

sem hengdar eru á brýr. Miklir þurrkar geta einnig valdið því að grunnvatnsborð lækkar (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.1.2 Örverur í neysluvatni

Mögulegt er að áhrif loftslagsbreytinga muni auka magn örvera í neysluvatni. Almennt er þó talið að grunnvatn úr borholum sé betur varið fyrir slíkri yfirborðsmengun en þar sem vatnið er tekið úr uppsprettum eða gröfnum brunnum. Rannsóknir sýna að saurgerlamengun mælist oftar í minni vatnsveitum, eða í um 5–8% tilvika, og skýrist það að einhverju leyti af því að minni vatnsveitur fá sjaldan vatn úr borholum (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.1.3 Skriðuföll

Tíðni skriðufalla getur aukist með úrkomuákefð með neikvæðum áhrifum á gæði neysluvatns. Dæmi um slíkan atburð á Íslandi voru afleiðingar skriðufalla í Búlandsdal í júlí 2010. Þá eyðilögðust inntaksmannvirki vatnsveitu Djúpavogs og í kjölfarið greindust örverur í vatnssýnum teknum úr neysluvatni (sjá mynd 9.1) (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).



Mynd 9.1: Vatnsból hjá Vatnsveitu Djúpavogs menguðust vegna skriðufalla í Búlandsdal í júlí 2010 (mynd: Dúpivogur (2010), birt með leyfi).

Annað dæmi er frá júní 2014, þegar skriða féll á tvö vatnsból hjá vatnsveitu á Árskógasandi og Hauganesi, sem leiddi til blöndunar yfirborðsvatns og neysluvatns (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019). Afleiðingarnar slíkra atburða eru þær að íbúar verða að sjóða neysluvatn í töluverðan tíma í kjölfarið og ef neysluvatn á viðkomandi stað er notað í matvælaframleiðslu, svo sem í frystihúsum, þarf að stöðva framleiðslu með tilheyrandi tjóni.

Ef rýnt er í tilkynningar vegna frávika í gæðum neysluvatns sést að á tuttugu ára tímabili (1998-2017) (María J. Gunnarsdottir o.fl., 2020) voru:

- 15 vatnsbornar hópsýkingar hjá 12 vatnsveitum skráðar hjá embætti landslæknis – 516 skráð veikindatilfelli og 8 þúsund manns á áhrifasvæði.
- 37 suðutilmæli birt í fjölmiðlum hjá 28 vatnsveitum og um 19 þúsund manns á áhrifasvæði.

Greining sýndi að frávik og endurtekin frávik finnast oftast hjá minni vatnsveitum, en eins og áður sagði nýta þær sjaldnar vatn úr borholum. Ekki er hægt að tengja öll þessu tilvik við áhrif loftslagsbreytinga, en a.m.k. 9 af 37 suðutilkynningum komu í kjölfar mikillar úrkomu eða skriðufalla (María J. Gunnarsdottir o.fl., 2020).

9.2.1.4 Yfirfullar skólplagnir

Frárennsliskerfi, sem taka við yfirborðsvatni, yfirfyllast ef úrkoma er nógu áköf til að álagið á þau sé umfram afköst þeirra. Við aukna tíðni ákafrar úrkomu er hætta á að frárennsliskerfi yfirfyllist oftar en þau gera í dag, með tilheyrandi mengunarhættu. Á þeim stöðum, þar sem frárennslið rennur í sjó, dregur hækkun sjávarborðs enn frekar úr virkni frárennsliskerfanna. Það stafar af því að minni hæðarmunur er til að knýja sjálfrennsli skólpsins frá byggðinni, jafnvel þannig að rennslið verður ekkert án dælinga. Í verstu tilvikum ræður frárennsliskerfið ekki við álagið og getur það leitt til bakflæðis, innandyra sem utan, með aukinni mengunar- og smithættu. Sérstök hætta er þar sem einfalt frárennsliskerfi er til staðar, það er þar sem skólp og yfirborðsvatn er í sömu pípunni. Einnig skapast mengunarhætta ef vatnslagnir leka og þrýstingur fellur. Þá getur

skólpvatn blandast í neysluvatn ef neysluvatnslagnir og fráveitulagnir liggja í sama skurði (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.1.5 Gróðureldar og breytt ræktunarskilyrði

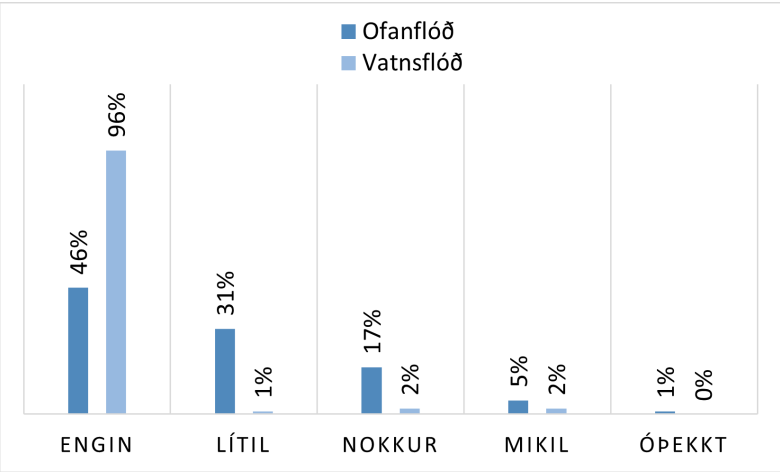
Gróðureldar geta haft neikvæð áhrif á grunnvatn. Gropin, þunn eldfjallajarðlög, þar sem lítið vatn er á yfirborði, þorna fljótt upp í þurrkum. Skapar það hættu á gróðureldum á sumrin auk hættu á sinueldum á vorin og veturna, þegar gróður er í dvala (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019). Mengunarhætta getur falist í gróðureldum og baráttu við þá. Þannig þurfti að gæta sérstaklega að mengunarhættu þegar barist var við gróðurelda við vatnsverndarsvæðið í Heiðmörk í maí 2021, en sérstaklega þarf að fylgjast með vatnsgæðum í kjölfar slíkra atburða (Veitur, 2021).

Hækkandi hitastig lengir ræktunartímabil og getur breytt ræktun í landbúnaði þannig að efnanotkun, svo sem áburðarnotkun, eykst. Vegna þessa getur orðið meiri hætta á að næringar- og varnarefni leki niður í grunnvatnsgeyminn. Þessi hætta á helst við á landbúnaðarsvæðum, svo sem á Suðurlandi (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.2 Ástand og tegundir vatnsbóla

Eins og áður sagði, er hætta vegna loftslagsbreytinga meiri fyrir vatnsból með yfirborðsvatni, lindarvatni eða brunnvatni en minni þar sem notaðar eru borholur.

Greining á ástandi vatnsbóla hjá vatnsveitum sem þjóna færri en 500 íbúum sýndi að í 11% tilvika er ástand talið lélegt, 15% sæmilegt en gott í 74% tilvika. Meðal stærri vatnsveitna er ástand vatnsbóla almennt talið gott eða um 97% (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019). Rannsóknir á orsökum frávika í neysluvatnsgæðum og hvort loftslagsbreytingar skapi hættu fyrir afhendingu á hreinu neysluvatni benda til þess að um fjórðungur frávika í neysluvatnsgæðum sé vegna mikillar úrkomu og að truflanir í vatnsafhendingu séu vegna þurrka. Haghafar telja líklegustu áhættuþættina vegna loftslagsbreytinga vera flóð eða skriðuföll í kjölfar mikillar úrkomu (Gunnarsdottir o.fl., 2017; Gunnarsdottir o.fl., 2020).



Mynd 9.2: Hlutfall (%) vatnsbóla á Norðausturlandi í hættu vegna flóða eða skriðufalla (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019)

Mynd 9.2 sýnir dæmi um þessar niðurstöður. Sértæk greining að á svæði heilbrigðiseftirlits Norðurlands eystra fundust frávik í örverum tengd mengun frá yfirborðsvatni í 65 sýnum af 606. Í einu tilfella hafði skriða eyðilagt vatnsbólið (á Árskógssandi). Áhættugreining á skemmdum vatnsbóla vegna skriðufalla og flóða á Norðausturlandi sýndi að 53% vatnsbóla eru í einhverri hættu vegna skriðufalla en 5% í mikilli hættu. Aðeins 4% vatnsbóla eru í hættu vegna flóða (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

Gera má ráð fyrir að þeir staðir, sem þegar hafa orðið fyrir fráviki í gæðum neysluvatns vegna loftslagstengdra atburða, muni búa áfram við óbreytta eða aukna áhættu (María J. Gunnarsdóttir o.fl., 2019).

9.2.2.1 Eftirspurn

Rannsóknum á mögulegum breytingum á eftirspurn eftir köldu vatni er ábótavant. Þó hafa Veitur borið saman gögn frá 2018, þegar vatnsforði var góður, við þurrkaárin 2010, 2012 og 2019. Niðurstöður sýna að í þurrum árum var aukin eftirspurn samhliða lágmarksstöðu á virkjuðum vatnsforða (Sædís Ólafsdóttir, 2021; Sverrir Guðmundsson, 2023). Í miklum sumarþurrkum hefur komið upp sú staða að vatnsvinnsla nálgast núverandi þolmörk á einstaka vatnstökusvæðum Veitna, líkt og gerðist á vatnstökusvæðum á Akranesi og í Grábrókarhrauni sumarið 2019 (Sædís Ólafsdóttir, 2021, kafli 4). Í kafla fjögur í Sædís Ólafsdóttir (2021) er dregin sú ályktun að þessi sumur kunni að endurspegla áhrif öfga í veðurfari líkt og þær sem talið er að geti orðið algengari við breytt loftslag í framtíðinni. Veitur hafa nýtt þessar greiningar til að i) áætla framtíðareftirspurn eftir köldu vatni að teknu tilliti til aukningar vegna mögulegs loftslagsálags og ii) meta lágmarksstöðu forða í þurrkum samhliða aukinni eftirspurn og útfæra tilsvarandi áætlanir um aukna forðaöflun, þar sem þess gerist þörf (Sverrir Guðmundsson, 2023).

9.2.3 Fráveita

9.2.3.1 Skólp- og ofanvatnskerfi

Samkvæmt íslenskum lögum telst til fráveitna allt lagnakerfi sem flytur frárennsli frá heimilum, stofnunum, atvinnufyrirtækjum, götum, gönguleiðum, lóðum og opnum svæðum, svo sem tengingar við einstakar fasteignir, niðurföll, svelgir, brunnar, safnkerfi, tengiræsi, sniðræsi, stofnlagnir, yfirföll og útræsi. Til fráveitu teljast einnig öll mannvirki sem reist eru til meðhöndlunar eða flutnings á frárennsli, svo sem hreinsivirki, dælu- og hreinsistöðvar og set- og miðlunartjarnir (Alþingi, 2009). Ábyrgð á ólíkum hlutum fráveitukerfa liggur ýmist hjá sveitarfélögum, sérstökum fráveitufélögum, lóðahöfum eða félögum í þeirra eigu, veghöldurum o.s.frv.

Fráveita flytur fráveituvatn frá uppsprettu til viðtaka. Fráveituvatn getur verið vatn af yfirborði, **ofanvatn** eða **skólp**. Fráveituvatn á sér því ólíkar uppsprettur. Með orðinu **viðtaki** er átt við það svæði sem tekur við mengun og þynnir hana eða eyðir. Í tilviki Íslands er sjórinn iðulega skilgreindur sem viðtaki. Fráveitan safnar og hreinsar bæði skólp og ofanvatn og skiptist því í skólpkerfi og ofanvatnskerfi. Eins og útskýrt var í V2018 eru fráveitukerfi á Íslandi, blönduð eða aðgreind, einnig nefnd einföld eða tvöföld. Blandkerfi (einföld kerfi) taka við bæði ofanvatni og skólpi, en í aðgreindum (tvöföldum) kerfum er skólp og ofanvatn aðskilið í lögnum. Blandkerfi eru viðkvæmari fyrir áhrifum loftslagsbreytinga þar sem mikil úrkoma getur leitt til þess að skólpblandað regnvatn flæðir upp í kerfið og á yfirfalli til viðtaka. Þegar sjórinn er viðtaki hefur hækkun yfirborðs sjávar þau áhrif að fallhæð minnkar í lagnakerfunum sem dregur úr rennsli og flutningsgetu kerfanna. Mikilvægt er að skilja skólp frá öðru fráveituvatni til að draga úr slíkum atburðum.

Eins og fjallað var um í V2018, hafa úrkomubreytingar, auknar sveiflur í veðurfari, fjölgun hlákudaga og hækkandi grunnvatns- og sjávarstaða áhrif á virkni fráveitukerfa. Hver þessara þátta hefur áhrif auk þess sem um **samverkandi áhrif** getur verið að ræða. Dæmi slíkt eru samverkan hærri sjávarstöðu og aukinnar úrkomuákefðar. Aukin úrkomuákefð eykur álag á fráveitukerfin og áhrifanna gætir ekki síst á einföld kerfi. Eins og minnst var á að ofan minnkar hækkuð sjávarstaða hæðarmun (fallhæð) í lagnakerfum og því hægist á rennsli um lagnakerfin. Það getur leitt til þess að flutningsgeta kerfanna minnkar sem aftur getur leitt til þess að það flæði upp úr kerfinum, sérstaklega ef úrkomuákefð eykst. Hækkuð sjávarstaða getur einnig leitt til hærri grunnvatnsstöðu sem þýðir að meira grunnvatn rennur inn í kerfið.

Í greinum 2.1.3.1 og 3.2.3 er fjallað um þróun aftakaúrkomu. Er niðurstaðan sú að tíðni ákafrar úrkomu er líkleg til að aukast en í því felst einnig, ef miðað er við tiltekinn endurkomutíma (t.d. 10 ára úrkomu), aukið úrkomumagn. Þetta tengist svo öðrum álagsþáttum.

9.2.3.2 Ofanvatnskerfi, skólpkerfi og blandkerfi

Vatnsmagn sem fer um ofanvatnskerfin ræðst af veðri og öðrum umhverfisþáttum og því hefur aukin úrkomuákefð áhrif á ofanvatnskerfi. Telja má allt manngert yfirborð í þéttbýli til fráveitu ofanvatns. Ofanvatnskerfi taka við allri úrkomu, sem og öllu öðru yfirborðsvatni (OR, 2020). Ofanvatnskerfið flytur vatnið til viðtaka um yfirborðsfarvegi eða lagnir. Að auki eru til dæmis notaðar settjarnir til að draga úr mengun, svo sem þungmálmamengun. Ofanvatnskerfin hafa því það hlutverk að safna, flytja og losa ofanvatn úr byggðu umhverfi. Hönnunarforsendur ofanvatnskerfa eiga að koma í veg fyrir að þau yfirfyllist. Þessar forsendur þurfa að taka tillit til þess að úrkomutíðni aukist, því annars er hætta á að frárennsliskerfi yfirfyllist oftar en þau gera í dag, með tilheyrandi mengunarhættu.

Stærsta fráveitukerfi landsins er rekið af Veitum (OR, 2020). Það skiptist í:

- Skólpkerfi, sem tekur við menguðu frárennsli frá heimilum og atvinnustarfsemi um tengingar við lóðir.
- Ofanvatnskerfi, sem tekur við fráveituvatni sem ekki er skólp, svo sem regnvatni og leysingavatni.

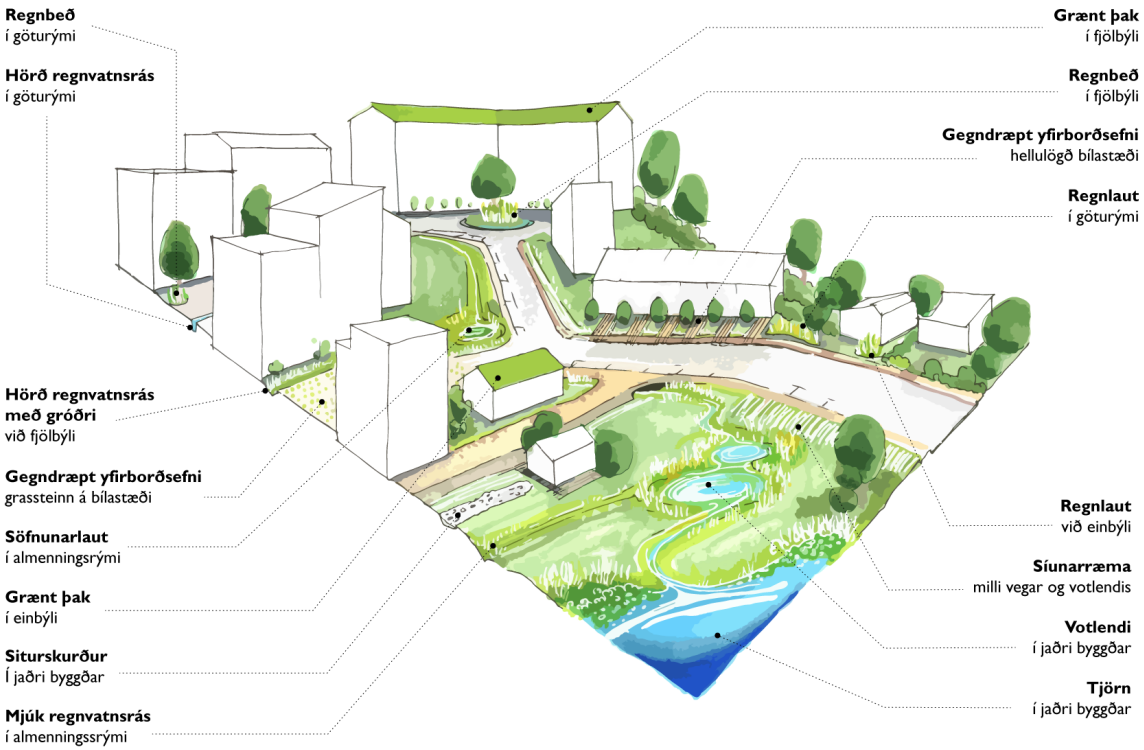
Þriðjungur fráveitukerfis Veitna eru einföld blandkerfi.

Í dag eru hönnunarforsendur á svæði Veitna þær að hámarkslíkur á flóði, uppúr lögnum sem flytja ofanvatn, skuli vera frá 2–20% á hverju ári, sem þýðir 5–50 ára endurkomutíma (OR, 2020). Líkur á yfirálagi á lagnakerfi ráðast af líkindadreifingu úrkomuákefðar. Líkur á aukinni úrkomuákefð aukast vegna loftslagsbreytinga og því þarf annað hvort að auka afköst ofanvatnskerfanna eða breyta meðhöndlun ofanvatns, svo sem með **blágrænum ofanvatnslausnum**, til að skilyrði hönnunarforsenda verði uppfyllt.

Óljóst er hvort fráveitukerfi uppfylli skilyrði hönnunarforsenda og óskýrt er hver er ábyrgur fyrir að stýra yfirborðsrennsli í flóðaviðburðum og hafa frumkvæði að og leiða samtvinnaða hönnun hefðbundinna fráveitukerfa og yfirborðs í tengslum við slíka atburði (OR, 2020). Í tilfelli fráveitna er mikilvægt að meta hvort hönnunarforsendur ráði við loftslagsbreytingar og að ábyrgð rekstraraðila sé skýr hvað varðar stýringu á yfirborðsrennsli (OR, 2020).

Lítið er um birtar rannsóknir um áhrif loftslagsbreytinga á flóðahættu og fráveitukerfin á Íslandi. Aðeins var fjallað um tvær rannsóknir í V2018 (Grétar Mar Hreggviðsson, 2010; Hlöðversdóttir o.fl., 2015). Benda þær báðar til þess að fráveita í hluta Reykjavíkur sé ekki í stakk búin til að mæta hækkunum á sjávarborði eða aukinni úrkomuákefð.

Síðan V2018 kom út hafa líkur á flóðaatburðum á höfuðborgarsvæðinu eftir árstíðum verið skaðar. Ólíkt flóðaatburðum erlendis, sem eiga sér stað aðallega stað á sumrin, eru vetrarflóð mun algengari á Íslandi. Hrund Andradóttir og félagar skoðuðu tíðni slíkra atburða á höfuðborgarsvæðinu út frá gögnum frá íslenskum tryggingafélögum um flóðaatburði þar sem tjón voru tilkynnt á árunum 2006–2018 2021. Niðurstöður sýna að tveir atburðir af tíu gátu flokkast sem ákafar sumarrigningar. Aðrir atburðir voru allt vetraratburðir þar sem tilkynningar um tjón fyrir hvern atburð voru mun fleiri en í tilfelli sumarrigninga. Í flestum tilvikum var um að ræða rigningu, annars vegar á frosna jörð og hins vegar á snjó og frosna jörð. Í þessum tilfellum voru tjónatilkynningar þrefalt fleiri en fyrir sumaratburði. Ástæða þessa er að ís á yfirborði kemur í veg fyrir að jarðvegur sé virkur sem geymsla fyrir vatn eða krapi stíflar niðurföll. Einnig kom í ljós að vatnstjón eru útbreidd á vetrum, hvorki með marktækum mun á milli hverfa né á milli einfaldra og tvöfaldra kerfa (H. Andradóttir o.fl., 2021). Leitað var vísbendinga um hvort flóðatengdir vetraratburðir séu að stækka, en gögn frá 1949–2018 staðfesta að svo sé. Á síðustu 70 árum hefur marktæk aukning orðið á dægurmagni regns á snjó, bæði hvað varðar stærð meðalatburðar á ári og stækkun á stærsta atburði á ári (H. Andradóttir o.fl., 2021). Þar sem flóðaatburðir á vetrum tengjast frosti í jörð beittu Zaqout, Andradóttir og Sorensen tölfræðilegu spálíkani til að spá fyrir um frost í jörðu 2023. Niðurstöður benda til að frosttímabilið sé að styttast og þjappast saman á það tímabil þegar mestar líkur eru á að fá stóra regnatburði. Því



Mynd 9.3: Blágrænar ofanvatnslausnir (Heimild: BGO Reykjavík, 2021, birt með leyfi).

eru vísbendingar um að verstu rigningar muni eiga sér stað á sama tíma og jörð er frosin eða snævi þakin sem gæti aukið flóðahættu í nálægri framtíð.

9.2.3.3 Blágrænar ofanvatnslausnir

Blágrænar ofanvatnslausnir, svo sem græn þök, regnbeð, gróðurrásir og settjarnir, eru nýttar til að hafa áhrif á afköst ofanvatnskerfa á umhverfisvænan hátt, þar sem hermt er eftir náttúrulegri hringrás vatns.

Blágrænar ofanvatnslausnir eiga að hægja á og draga úr för ofanvatns með því að veita ofanvatni um jarðveg og gróður á leið um byggt umhverfi og koma þannig í veg fyrir að það fari beint í ofanvatns- eða blandkerfi. Tilgangurinn er að draga úr áhrifum sveiflna í vatnsmagni, svo sem vegna aukinnar ofankomu eða aukinnar úrkomuákefðar og draga þannig úr flóðahættu. Blágrænar ofanvatnslausnir eiga einnig að hafa jákvæð áhrif á loftgæði, græn svæði og líffræðilegan fjölbreytileika.

Í ljósi þess að flóðahætta í byggðu umhverfi á Íslandi virðist vera meiri á vetrum er mikilvægt að gera sér grein fyrir virkni blágrænna lausna í köldu loftslagi. Í því samhengi hefur Urriðaholt verið notað sem lifandi tilraunastofa fyrir blágrænar lausnir í samstarfsverkefni HÍ, Veðurstofunnar, Garðabæjar og Urriðaholts ehf. þar sem meðal annars hefur verið mæld virkni gróðurrása.

Rannsóknirnar sýna að íslenskur jarðvegur er óvanalega vatnsheldinn og vatnsgleypinn og drenast því hægt (Tareq Zaqout og H. Ó. Andradóttir, 2021). Hvað varðar virkni gróðurrása sýna niðurstöður að þær virka allt árið, en þó minnkar frost virkni þeirra. Plöntur með þéttum rótum draga úr áhrifum frosts og þýðu þar sem rótarkerfi skipta miklu máli (Tarek Zaqout o.fl., 2022). Því þarf að huga að vali á plöntum þegar verið er að skipuleggja notkun blágrænna lausna til að draga úr flóðahættu, til dæmis með því að velja gras með þéttum rótum ásamt plöntum með dýpri rætur. Einnig má draga úr frostmyndum, viðhalda og tryggja vatnsleiðni og

auðvelda drenun með því að varast þjöppun jarðvegs, blanda sandi við hann eða bæta drenlagi undir blágræna innviði. Virkni settjarna við að fanga þungmálma hefur einnig verið rannsökuð og staðfest að hún helst nokkuð jöfn yfir árið (Vollertsen o.fl., 2009).

9.3 Orkukerfi

Loftslagsbreytingar munu hafa áhrif á orkukerfi um allan heim. Til dæmis er búist við að tjón vegna áhrifa loftslagsbreytinga á orkuinnviði innan Evrópusambandsins aukist um meira en 1600% til ársins 2080, allt frá 0,5 milljörðum evra á ári (Forzieri o.fl., 2018).

Orkukerfi Íslands er nokkuð ólíkt orkukerfum annars staðar í heiminum hvað varðar orkugjafa, en árið 2021 voru 70,4% af raforku framleidd með vatnsaflsvirkjunum, 25,8% með jarðvarmavirkjunum, 0,06% með vindorkuverum og 2,5% með jarðefnaeldsneyti. Tæplega 90% af notkun orku til húshitunar kemur frá jarðvarma, um 7% frá raforku og um 3% frá kyntum veitum (Orkustofnun, 2022).

Áhrif loftslagsbreytinga á orkukerfi Íslands og innviði sem tengjast því skiptast í áhrif á framleiðslu, flutning og eftirspurn eftir hita og rafmagni og eru áhrif á þessa hluta samtvinnuð. Tafla 9.2 sýnir samantekt á helstu áhrifum og er uppfærð frá V2018.

9.3.1 Framleiðsla

Loftslagsbreytingar hafa áhrif á tvær af þremur auðlindum sem í dag eru nýttar til að framleiða rafmagn á Íslandi, það er vatnsafl og vindorku (Clarke o.fl., 2022). Auk þess geta loftslagsbreytingar haft áhrif á möguleika í framleiðslu á orkuplöntum. Jarðvarmi er hvorki talinn háður loftslagi né veðurfari, hvort sem um ræðir framleiðslu rafmagns eða hita (Goldstein o.fl., 2011).

9.3.1.1 Vatnsafl

Í V2008 og V2018 var fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á framleiðslu raforku með vatnsafli. Niðurstöður bentu til að rúmmál jökla muni rýrna verulega á þessari öld og afrennsli aukast til miðbiks aldarinnar. Um miðbik aldarinnar myndi hægja á masstapi og afrennsli minnka. Búist var við að aukið afrennsli til miðbiks aldarinnar myndi leiða til aukningar í nýtanlegu vatnsafli. Að auki var lögð áhersla á að líta þyrfti til breytinga á flóðaháttum og veðurfari á virkjanasvæðum.

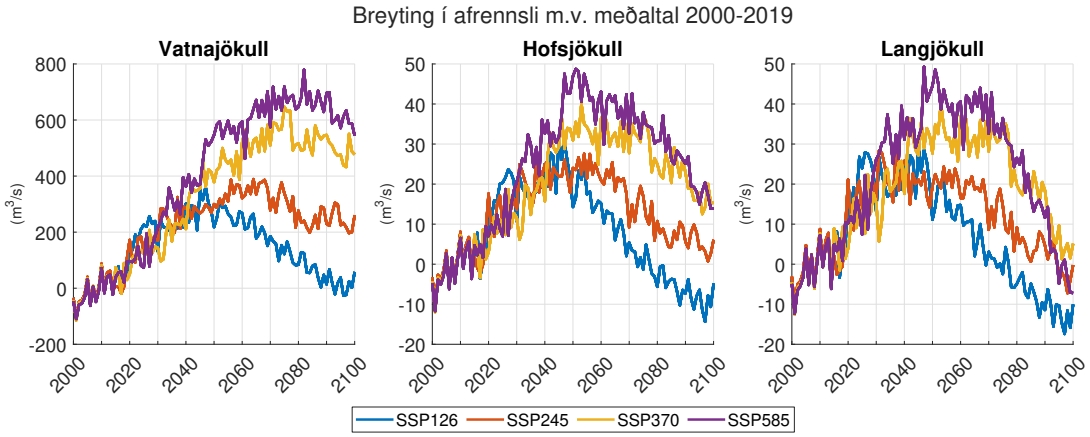
V2008 byggði að verulegu leiti á *Climate and Energy* (CE) verkefninu (Fenger, 2007) og íslenska systurverkefnis þess *Veður og orka* (VO) (Jóhannesson o.fl., 2007). Að auki lýsti V2018 niðurstöðum frá *Climate and Energy Systems (CES)* verkefninu (Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson, 2012) auk íslenska systurverkefnisins *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á orkukerfi og samfélag* (2011). Niðurstöður síðarnefndu verkefnanna sýndu að spár um rennsli til 2050 gáfu til kynna að rennsli í íslenskum jökulám gæti aukist frá 27-84% til 2050. Byggt á þessari niðurstöðu var sú ályktun dregin að nýtanlegt vatnsafl gæti aukist um 20% á tímabilinu 2010–2050, en þáverandi orkukerfi gat aðeins ráðið við 38% af þeirri aukningu. Fram kom að aðlaga þyrfti orkukerfið þessum breytingum og hefur Landvirkjun þegar brugðist við, m.a. með því að stækka Búrfellsvirkjun með byggingu Búrfellsvirkjunar II og vinna að breyttri hönnun annarra virkjana á Þjórsársvæðinu.

Landsvirkjun framleiðir yfir 90% af uppsettu afli vatnsaflsvirkjana á Íslandi og hefur framleiðslugetu sem nemur um 13,8 TWh á ári. Síðan V2018 kom út hefur verið unnið að auka skilning á áhrifum breytinga á rennslisorku vegna leysinga jökla annars vegar og ártíðabundinna breytinga á snjómagni hins vegar. Í meðalvatnsári verða yfir 50% af rennslisorku Landsvirkjunar vegna leysinga jökla og um 15% vegna árstíðabundins snævar. Breytileiki í þessum rennslisþáttum, milli ára og innan árstíða, hefur veruleg áhrif á nýtanlegt vatnsafl.

Hönnunarforsendur nýrra vatnsaflsvirkjana, forsendur aflaukningar í núverandi virkjunum og uppfærslur á eldri virkjunum miða við rennslisraðir sem taka tillit til líklegra hitabreytinga

Tafla 9.2: Áhrif loftslagsbreytinga á þætti orkukerfisins

Hluti orkukerfis	**Innviðir**	**Álagsþættir**	**Áhrif**
Framleiðsla	Vatnsafl	Aukið jökulrennsli vegna bráðnunar jökla	Aukin framleiðslugeta til skemmri eða meðallangs tíma (ár, áratugir) Breytt framleiðslugeta til lengri tíma
		Minna jökulrennsli eftir að hámarki er náð	Breytt framleiðslugeta til lengri tíma
	Vatnsafl	Tíðni þurrka og þurra tímabila eykst	Breytt rennslishegðun
		Breytingar á úrkomudreifingu innan árs	Breytt rekstrarmynstur miðlanna
		Breytingar á hlutfalli rigningar og snævar í úrkomu	Breytt framleiðslugeta
	Vindorkuver	Aukin hvassviðratíðni	Truflun á framleiðslu
	Lífmassi	Aukinn sumarhiti	Aukin framleiðslugeta á orkuplöntum
Flutningur	Raflínur	Aukin ísing, seltuálag, vindálag	Auknar líkur á flutningstruflunum
	Flutningskerfi varma	Aukin úrkoma, hærri hiti	Auknar líkur á flutningstruflunum
	Flutningsleiðir jarðefnaeldsneytis		Truflanir á milliríkjaviðskiptum
Eftirspurn	Framleiðsla hita	Aukinn sumarhiti	Minnkun á eftirspurn eftir orku til húshitunar Aukning á eftirspurn eftir orku til loftkælingar
	Framleiðsla og flutningskerfi raforku	Hvatar til að draga úr notkun jarðefnaeldsneytis	Aukning í eftirspurn eftir rafmagni



Mynd 9.4: Afrennslisbreyting frá þremur íslenskum jöklum frá meðaltali áranna 2000 - 2019, samkvæmt fjórum SSP sviðsmyndum. Myndin sýnir meðaltal afrennslisbreytingar hvers jökuls fram til ársins 2100. (Mynd: Andri Gunnarsson Landsvirkjun, Byggt á Rounce ofl. 2023 og uppfærir mynd 5.8 í V2018 sem byggir á mynd 5.7 í Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson (2012)).

á öldinni. Vatnafarslíkön eru kvörðuð með sögulegum athugunum á veðri og vatni og keyrð með endurgreiningu á veðri á öllum starfssvæðum Landsvirkjunar. Líkönin eru nýtt til að meta áhrif breytinga á hitastigi og úrkomu á afrennsli til miðlana og lóna í náinni framtíð með því að breyta inntaki þeirra og nýta líklegar sviðsmyndir fyrir breytt veðurfar fyrir mismunandi tímabil í framtíð. Tekið er tillit til líklegrar þróunar á lögun jökla í framtíð, en hún getur haft mikil áhrif á afrennsliseiginleika þeirra. Forsendur og sviðsmyndir vatnafarslíkana eru uppfærðar á fimm ára fresti til að fá betra mat á líklegri þróun auðlindarinnar. Sviðsmyndirnar eru nýttar til að meta áhrif á daglegan rekstur og viðhald, framleiðslugetu kerfisins innan árstíða og í náinni framtíð en líka til þess að þróa og uppfæra virkjanir til lengri tíma.

Hvað varðar líklega þróun á afrennsli frá jöklum varpar mynd 2.19 í grein 2.3 ljósi á samband sjávarhita og afkomu Vatnajökuls. Nýleg grein (Noël o.fl., 2022) reiknaði líklega þróun fyrir afkomu og afrennsli íslenskra jökla fram til 2100 og byggðust þeir útreikningar á þróun loftslags við losunarasviðsmynd SSP5-8.5 í loftlagslíkaninu CESM2. Í þeirri sviðsmynd var hlýnun á Norður-Atlantshafi mjög skrykkjótt á öldinni í CESM2 líkaninu. Fyrir miðja öldina kólnaði í líkaninu, en á síðasta fjórðungi aldarinnar varð áköf hlýnun. Niðurstaðan var því sú að afrennsli frá jöklum á Íslandi náði tímabundnu hámarki á fyrsta aldarfjórðungi (2000-2025), dróst svo saman í nokkra áratugi (2025-2050) en jókst ört aftur frá 2050 til 2100 hið minnsta. Eins og fram kom í grein 3.3.2 sýna mörg líkön dæmi um tímabundin kólnunarskeið á öldinni. Þeim ber þó ekki saman um tímasetningu eða umfang kólnunarinnar. Að meðaltali sýna loftslagslíkön hlýnun en gera verður ráð fyrir tímabundnum breytileika á Norður-Atlantshafssvæðinu á öldinni, sem mun væntanlega hafa áhrif á afkomu íslenskra jökla.

Í CES verkefninu og í V2018 voru rannsóknir á líklegri þróun afrennslis jökla kynntar og byggðust þær á niðurstöðum margra loftslagslíkana (Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson, 2012). Nýleg hnattræn úttekt notaði niðurstöður frá 82 ólíkum keyrslum loftslagslíkana (CMIP5 líkön með RCP sviðsmyndum og CMIP6 með SSP sviðsmyndum) til að herma þróun jökla á öldinni (Rounce o.fl., 2023). Mynd 9.4 sýnir niðurstöður SSP sviðsmyndanna fyrir Vatnajökul, Langjökul og Hofsjökul og tafla 9.3 dregur saman helstu upplýsingar um þróun afrennslis frá jöklunum.

Rétt eins og í fyrri greiningum (Jóhannesson o.fl., 2007; Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson, 2012) eykst afrennsli frá jöklunum og nær hámarki á öldinni. Tímasetning hámarksins fer eftir stærð jökulsins og því hversu mikið hlýnar. Fyrir Langjökul, sem stendur lægst þeirra jökla sem eru í töflu 9.3, nær aukning rennslis jafnvægi fyrir lok aldarinnar. Fyrir hina jöklana

heldur aukningin áfram ef hnattræn hlýnun verður meiri en 2–3 °C. Kólnun í hafi í nokkra áratugi getur seinkað hámarkinu (Noël o.fl., 2022).

Tafla 9.3: Tímasetning hámarks í afrennsli frá þremur jöklum fyrir mismikla hnattræna hlýnun (byggt á Rounce ofl. 2023)

Hlýnunar	**Vatnajökull**	**Hofsjökull**	**Langjökull**
1.5 °C	2040 – 2050	2035 – 2055	2020 – 2050
2.0 °C	2050 – 2080	2030 – 2060	2030 – 2050
3.0 °C	2070 – 2085	2045 – 2060	2050 – 2080
4.5 °C	2070 – 2095	2045 – 2060	2050 – 2070
Aukning rennslis í lok aldarinnar	Enn til staðar hlýni um 2 °C eða meira	Enn til staðar hlýni um 3 °C eða meira	Nær jafnvægi

Framtíðarsviðsmyndir vatnafarslíkans Landsvirkjunar sýna að aukin hlýnun og breytingar á lögun jökla munu skila verulegri aukningu í jökulrennsli. Eins og fram kom í V2018 mun þetta hafa áhrif á nýtanlegt vatnsafl, auk þess sem setsöfnun lóna mun breytast með auknu jökulrennsli. Aurburður getur aukist með afrennsli frá jöklum og skerðir það nýtanlega rýmd lóna til lengri tíma. Þó má þess vænta að jökullón og vötn, sem myndast fyrir framan jökla samhliða hopi þeirra, taki við hluta aurburðar. Þá má gera ráð fyrir að tímasetning hámarksaukningar afrennslis verði fyrr á litlum ísasviðum hulin jökli en stórum. Þannig má gera ráð fyrir auknu afrennsli til Hálslóns vel fram yfir miðbik aldarinnar, en rennsli frá minni vatnasviðum, svo sem Tungná, mun ná hámarki mun fyrr og dragast svo saman á næstu áratugum. Þá er einnig líklegt að breyting verði á árstíðasveiflu afrennslis, samanber umfjöllun í grein 2.2. Mynd 9.5 sýnir áætlaðar breytingar á árstíðasveiflu afrennslis Þjórsár við fossinn Dynk og fyrir innrennsli í Hálslón, fram að miðbiki aldarinnar. Hvað Þjórsá varðar er gert ráð fyrir aukinni jökulbráð síðsumars á komandi áratugum og eykur hún heildarrennslið. Fyrir innrennsli í Hálslón munu tímasetningar ekki breytast mikið, en magn aukast verulega.

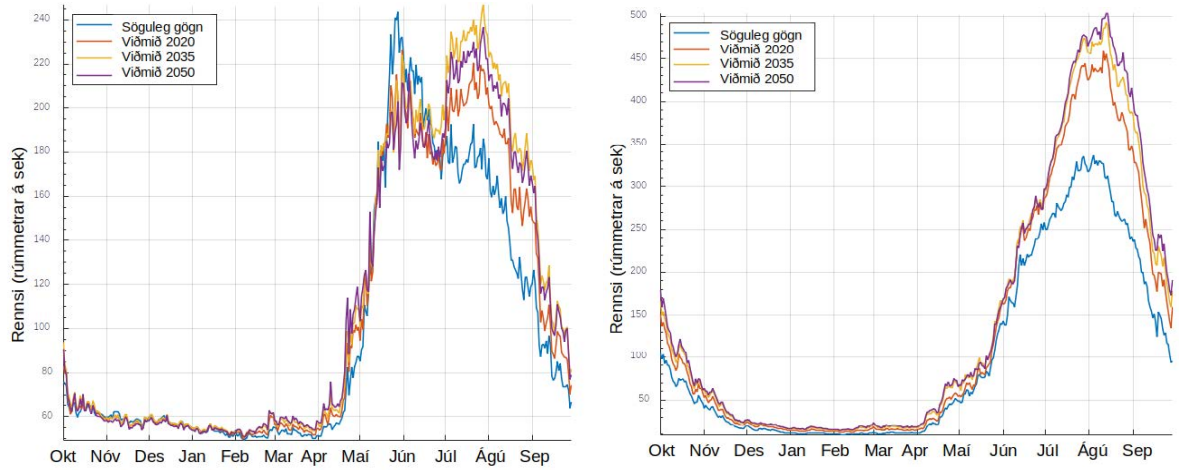
Sú aukning rennslis, sem þegar hefur átt sér stað undanfarin 25 ár, hefur að stórum hluta verið nýtt í núverandi kerfi vatnsaflsvirkjana og miðlana þeirra. Uppfærðar spár, með nýjum gögnum IPCC, benda til þess að aukning afrennslis geti verið meiri fyrir viss vatnasvið á næstu árum og áratugum en í eldra mati. Þó er ljóst að óvissa varðandi tímasetningar er nokkuð mikil. Nýting þessarar rennslisaukningar er háð því að virkjana- og flutningskerfi landsins verði byggð upp í samræmi við þróun auðlindarinnar.

9.3.1.2 Jarðvarmi

Eins og kom fram hér að framan er framleiðsla raforku með jarðvarma ekki talin háð veðri eða loftslagi. Því eru bein loftslagstengd áhrif á núverandi framleiðslugetu frá jarðvarmavirkjunum hverfandi, að undanskildum mögulegum breytingum á nýtingarmöguleikum við hop jökla. Áhrifin geta þó verið óbein, svo sem vegna áhrifa á innri samkeppnishæfni mismunandi orkukosta. Ef loftslagsbreytingar hafa þau áhrif að framleiðslukostnaður rafmagns með vatnsaflsverum lækkar, getur það skaðað samkeppnishæfni raforku frá jarðvarmaverum og vindorkuverum. Viðleitni til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda mun þó að öllum líkindum auka eftirspurn eftir orkukostum sem geta gefið stöðugt rafmagn og eru ekki háðir veðri.

9.3.1.3 Vindorka

Framleiðsla rafmagns í vindorkuverum, á landi eða í sjó, er yfirleitt vænlegri eftir því sem meðalvindhraði er meiri. Í ICEWIND verkefninu var mat lagt á vindorkuauðlindina á Íslandi og



(a) Rennsli við Dynk í Þjórsá *(b) Innrennsli í Hálslón*

Mynd 9.5: Breytingar á árstíðasveiflu rennslis (m^3/s) fyrir Þjórsá við fossinn Dynk og fyrir innflæði í Hálslón. Myndirnar sýna meðalrennsli á vatnsársgrunni fyrir söguleg gögn (1960-2018) og þrjár sviðsmyndir þar sem tekið er tillit til hlýnunar og breytinga á hæðardreifingu jökla innan vatnasviðanna fyrir mismunandi framtíðartímabil, 2020, 2035 og 2050. (Mynd: Andri Gunnarsson, gögn frá Landsvirkjun).

nærliggjandi hafsvæðum (Nawri o.fl., 2014; Hasager o.fl., 2015). Í alþjóðlegum samanburði er vindorka á Íslandi tiltölulega mikil þó vindhviður, illviðri og ísingar dragi úr rekstraröryggi. Eins og rætt er í grein 4.5.1 í V2018 sýna niðurstöður CORDEX verkefnisins að líklega mun draga úr vindi á Íslandi. Breytingar á aftakaveðrum eru ræddar í 10.4.2, en ekki er ástæða til að gera ráð fyrir færri hvassviðrum. Í rannsókn, sem notaði niðurstöður CORDEX verkefnisins til þess að skoða áhrif loftslagsbreytinga á vindorku hér á landi (Helgadóttir, 2014), kom fram að líklega myndu öfgavindar aukast en að sama skapi myndi draga úr meðalvindhraða. Loftslagsbreytingar geta því haft neikvæð áhrif á framleiðslugetu og öryggi innviða tengdum vindorkuverum (Osman o.fl., 2022).

Þróun á sviði vindorku er mikil (Enevoldsen og Xydis, 2019) og vindorkuver hafa orðið stærri og sterkbyggðari á liðnum árum. Tvær nýlegar skýrslur ræða nýtingu vindorku á landi (Hilmar Gunnlaugsson o.fl., 2023) og á hafi (Skýrsla starfshóps, 2023). Bein áhrif loftslagsbreytinga á þróun auðlindarinnar eru ekki rædd í skýrslunum en mikilvægt er að hugað sé að líklegum áhrifum loftslagsbreytinga við staðsetningu vindorkuvera.

9.3.1.4 Lífmassi

Mögulegt er að rækta lífmassa (orkuplöntur), svo sem vetrarrepju og nepju, til að framleiða innlent eldsneyti (lífolíu) og hefur Landbúnaðarháskóli Íslands, í samvinnu við bændur og Samgöngustofu, metið þessa möguleika (Ingveldur Sæmundsdóttir og Jón Bernódusson, 2021). Auk þess er hægt að nýta ýmis konar ónýttan lífmassa (Hólmgeir Björnsson, 2007) eða þörunga til framleiðslu lífolíu. Gerð hefur verið greining á möguleikum og landrými til aukinnar lífmassaframleiðslu á Suður- og Norðausturlandi (Hólmgeir Björnsson, 2007). Líklegt er að loftslagsbreytingar muni hafa jákvæð áhrif á ræktunarmöguleika ýmissa orkuplantna á Íslandi. Í þessu samhengi var í sérgrein 4B fjallað um líklegar breytingar á mögulegu ræktunarsvæði vetrarrepju og nepju út öldina. Hnattrænt fer eftirspurn eftir lífeldsneyti vaxandi (OECD-FAO, 2021) og viðbrögð við loftslagsbreytingum munu líklega auka á hana. Í þessu samhengi ber þó að hafa í huga áhrif aukinnar ræktunar orkuplantna á samkeppni um landsvæði, áhrif á líffjölbreytileika og áhrif á losun gróðuhúsalofttegunda, ekki síst vegna framræslu votlendis.

9.3.2 Eftirspurn

9.3.2.1 Raforka

Eins og fjallað var um í V2018 eru breytingar á eftirspurn eftir rafmagni, sem tengja má við loftslagsbreytingar, af tvennum toga. Annars vegar getur hlýnun aukið notkun kælimiðla og loftkælingar og hins vegar eykst eftirspurn eftir rafmagni eða rafeldsneyti vegna orkuskipta.

Margvíslegar sviðsmyndir hafa verið settar fram fyrir breytingar í eftirspurn eftir raforku. Munur sviðsmynda varðandi viðbótarafl og aukna raforkuframleiðslu sem þarf til orkuskipta hverfist um umfang orkuskipta á Íslandi, allt frá einkabílum til fullra orkuskipta, svo sem í flugi og siglingum, hlutfalls rafmagns/rafeldsneytis sem framleitt er á Íslandi og hlutar aukins orkusparnaðar og orkunýtni. Ef miðað er við full orkuskipti þarf að skipta út um 910 þúsund tonnum af olíu, miðað er við olíunotkun ársins 2019 (*Orkumál* 2019). Það ár voru samgöngur á landi rúm 35% af heildarsamgöngum, siglingar tæp 27% (þ.m.t fiskveiðiflotinn, innanlands- og millilandasiglingar) og flug rúm 34% (þar af 1% innanlandsflug).

Starfshópur á vegum umhverfis-, orku- og loftslagsráðherra setti fram fyrsta mat á heildarþörf raforkuframleiðslu til ársins 2040 á grundvelli fullra orkuskipta, byggt á mismunandi sviðsmyndum (Vilhjálmur Egilsson o.fl., 2022). Niðurstöður starfshópsins (sjá töflu 9.4) benda til þess að ef full orkuskipti eiga sér stað gæti það kallað á allt að 125% aukningu í raforkuframleiðslu. Í því tilfelli er miðað við að engin áhersla sé lögð á aukinn orkusparnað eða orkunýtni, allt rafeldsneyti sé framleitt á Íslandi og grænn iðnaður byggður upp. Þörf fyrir aukna raforkuframleiðslu stigminnkar eftir því sem innflutningur á rafeldsneyti eykst, auk þess sem áhersla á orkunýtni og orkusparnað minnkar þörfina. Orkuþörf einnar sviðsmyndanna (Landverndar og Náttúruverndarsamtakanna) var ekki magngreind (sjá töflu 9.4) en sú greining var birt síðar (Ágústa Þóra Jónsdóttir, 2022). Greining Landverndar sýndi að ef full orkuskipti eiga sér stað og mikil áhersla lögð á aukna orkunýtni og orkusparnað, auk breytinga í hópi stórnotenda raforku, krefjast full orkuskipti ekki aukinnar raforkuframleiðslu.

Hér er ekki lagt mat á ólíkar sviðsmyndir en þessar tvær gjörólíku niðurstöður sýna glöggt breytilega vegferð orkuskipta. Niðurstöður starfshópsins og Landverndar eru háðar afar ólíkum forsendum varðandi hagvöxt, uppbyggingu og þarfir efnahagslífs og samfélags, tækniþróun og breytingar á milliríkjaviðskiptum (sjá töflu 9.4). Mikilvægt er að fylgst verði með allri þróun á þessu sviði og dregið úr óvissu eins og kostur er. Ákvarðanataka verður að vera upplýst og tryggt að ekki verði minni hagsmunum fórnað fyrir meiri. Auk þess þarf að miða að því að ná samfélagssátt um þá vegferð sem frammundan er, samanber umfjöllun í grein 6.5.

Ekki liggja fyrir rannsóknir á væntri aukningu í eftirspurn eftir rafmagni á Íslandi vegna aukinnar notkunar kælimiðla, en búast má við einhverri slíkri aukningu (Després og Adamovic, 2020).

9.3.2.2 Hiti

Eftirspurn eftir heitu vatni á Íslandi er háð hita og veðurfari. Líklegt er að loftslagsbreytingar hafi áhrif á eftirspurn eftir heitu vatni. Eins og fram kom í V2018 sýna rannsóknir á vegum Orkuveitu Reykjavíkur (OR) að eftirspurn eftir heitu vatn gæti dregist saman um 5,3% ef hitastig hækkar um 1 °C. Líklegt er að eftirspurn minnki meira að vetri en sumri. Samverkandi áhrif eru á milli hitaveitu og fráveitu á höfuðborgarsvæðinu, þar sem mikil úrkomuákefð dregur úr getu fráveitukerfa til að taka við bakvatni frá hitaveitu (OR, 2020).

Veitur, dótturfyrirtæki OR, hafa unnið 100 ára framtíðarsýn í forðamálum fyrir höfuðborgarsvæðið og Rangárveitur, þar sem tekin er til greina líkleg fólksfjölgun og möguleg áhrif loftslagsbreytinga. Þrátt fyrir að meðalnotkun heits vatns gæti minnkað vegna hlýnunar er mikilvægt er að gera slíkar greiningar fyrir allar hitaveitur landsins. Veitur búast til dæmis við jafnari notkun heits vatns yfir árið, sem hefur þau áhrif að lághitasvæði ná að safna minni forða yfir sumartímann (OR, 2020).

Tafla 9.4: Forsendur sviðsmynda starfshóps um stöðu og áskoranir í orkumálum (Vilhjálmur Egilsson o.fl., 2022). Grænar kúlur vísa til þess sem er í hverri sviðsmynd og rauðar vísa til þess sem er undanskilið.

	Orkuskipti (full í einstaka flokkum)				
Aðili	Fólksbílar	Þung ökutæki	Innanlands-flug	Millilanda-flug	Haf
Grunnspá OS	●	●	●	●	●
„Græn framtíð“ OS	●	●	●	●	●
Vetnisvegvísir	●	●	●	●	●
Samorka I	●	●	●	●	●
Samorka II	●	●	●	●	●
Landvernd/ Náttúru-verndar-samtökin	●	●	●	●	●

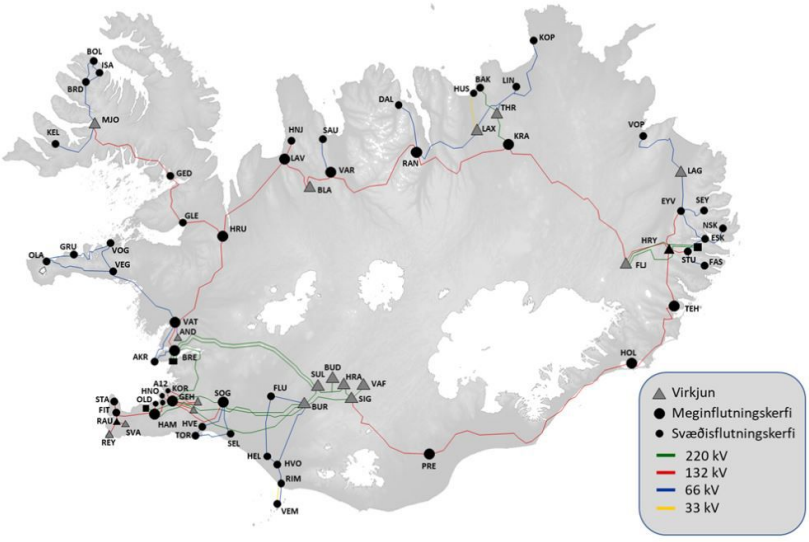
	Loftslags-markmið stjórnvalda	**Orkuþörf almenns markaðar**	**Vöxtur útflutn-ings**	**Orkuþörf sviðs-myndar**
Aðili	Full orkuskipti, kolefnishlutleysi	Samfélag og almenn notkun		GWh til 2040 (% aukning)
Grunnspá OS	●	●	●	9%
„Græn framtíð“ OS	●	●	●	14%
Vetnisvegvísir	●	●	●	68-125% (2050)
Samorka I	●	●	●	82%
Samorka II	●	●	●	124%
Landvernd/ Náttúruverndar-samtökin	●	●	●	Ekki greint.

Samkvæmt Veitum er mikilvægt að huga að eftirfarandi atriðum svo hægt sé að taka tillit til áhrifa loftslagsbreytinga við nauðsynlega uppbyggingu hitaveitu: i) setja upp og viðhalda spálíkönum um varmaþörf til framtíðar. ii) greina viðbragðsgetu lághitasvæða við öfgakenndari sveiflum vatnsborðs í tengslum við veðuratburði, minni söfnun á sumrin og jafnari notkun yfir árið. iii) meta áhrif hitaveitunnar á aðrar grunnstoðir samfélagsins á meðan þær bregðast við loftslagsbreytingum (OR, 2020).

9.3.3 Miðlun orku

9.3.3.1 Flutningskerfi raforku

Landsnet á og rekur flutningskerfi raforku á Íslandi. Það er byggt upp af sterku 220 kV kerfi á SV-horninu, auk 220 kV kerfis á Austurlandi. Byggðalína, 132 kV hringtenging, tengir saman allt landið. Unnið er að byggingu nýrrar byggðalínu með 220 kV spennu og hefur verið lokið við línur milli Fljótsdals og Kröflu og Kröflu og Rangárvalla á Akureyri (sjá mynd 9.6). Svæðisbundin kerfi tengjast meginkerfinu og eru þau á 66 kV spennu og flytja orkuna til dreifiveitna (Orkubú Vestfjarða, Rarik, Veitur, Norðurorka og HS Veitur) sem miðla því til notenda.

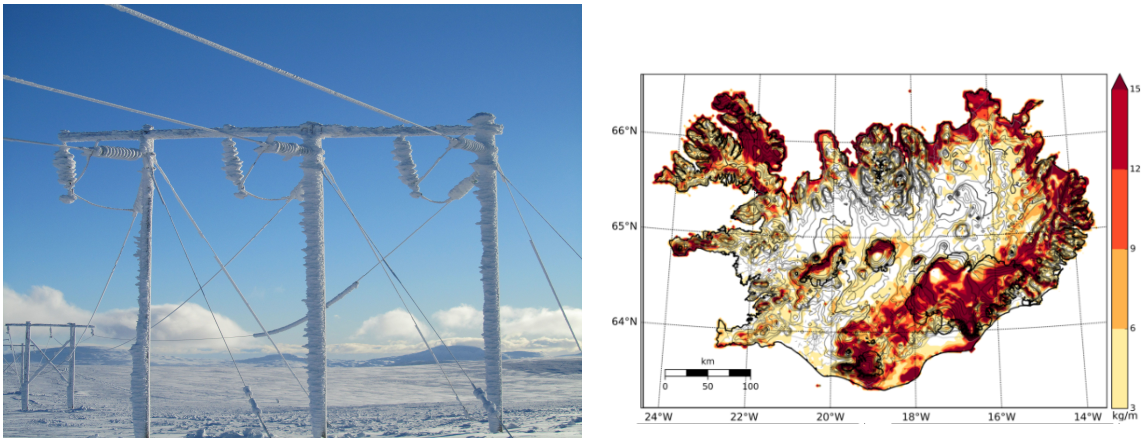


Mynd 9.6: Flutningskerfi Landsnets 2022. (Birt með leyfi).

Loftslagsbreytingar hafa áhrif á áskoranir Landsnets hvað varðar þróun og rekstur flutningskerfisins. Áskorununum má skipta í fimm þætti: (1) ísingu, (2) vind, (3) seltu, (4) snjóflóð/skriðuföll/rof og (5) jarðhræringar. Loftslagsbreytingar hafa bein áhrif á suma þessara þátta en geta haft óbein áhrif á aðra. Stuttlega er fjallað um þessa þætti hér að neðan.

Ísing. Ísingu á raflínum má skipta í skýjaísingu og slydduísingu. Sú fyrri á sér stað þegar þoka eða ský leggst á rafmagnslínur og þær ísast en sú síðari gerist þegar blaut úrkoma frýs á línunum. Skýjaísing á sér aðallega stað þar sem línur fara yfir hálendi en sú síðari getur einnig átt sér stað á láglendi. Ísing á línum (sjá mynd 9.7) getur orðið tugir sentímetra í þvermál og sligar auðveldlega þann búnað sem hún leggst á. Þetta getur valdið miklu tjóni. Landsnet hefur stundað kerfisbundnar mælingar á ísálagi frá 1977 og ná sum gögn allt aftur til ársins 1930. Greiningar byggðar á þessum gögnum hafa leitt af sér landfræðilegt spálíkan og eru niðurstöðurnar sýndar á korti með staðsetningum á landinu þar sem vænta má mikillar og öfgakenndrar ísingar á flutningslínum, (sjá mynd 9.7).

Kortið hefur verið borið saman við raunmælingar. Rannsóknir sýna að loftslagsbreytingar þurfa ekki að hafa neikvæð áhrif hvað ísingu varðar. Hins vegar gætu loftslagsbreytingar leitt til



Mynd 9.7: Hægri: Ísing á rafmagnslínu (Ljósm: Landsnet, birt með leyfi). Vinstri: Líkanreikningar af hámarki ísingarálags (km/m) nærri yfirborði (Ágústsson, 2015).

þess að svæði, sem eru í ísingarhættu í dag, verði í minni hættu í framtíðinni og áhættan færst á önnur svæði. Ísing og mögulegar breytingar á henni eru mikilvægar forsendur við hönnun og skipulag línustæða.

Vindur. Álag vegna vinds á flutningskerfi raforku hefur gegnum tíðina verið mikið og valdið truflunum. Mun algengara er að áhrifa gæti á tréstaurana sem notaðir eru fyrir 132 kV og 66 kV línur og getur vindálag brotið slíka staura. Oft er um samverkandi áhrif vinds og ísingar að ræða og eru þá auknar líkur á flutningsrofi. Eins og rakið er í grein 10.4.2 kann að draga úr meðalhraða vinds þó ekki sé jafnljóst að dragi úr hámarksálagi vegna vinds (Helgadóttir, 2014). Til framtíðar skiptir því máli að efla styrk flutningskerfisins og draga úr áhættu vegna vindálags.



Mynd 9.8: Skemmdir á rafmagnslínum vegna vindálags (Ljósm. Landsnet, birt með leyfi)

Selta frá sjó getur borist langt inn á land, jafnvel upp á hálendið. Seltan sest á háspennubúnað og getur myndað leiðandi rás til jarðar og valdið útslætti. Unnið hefur verið að uppsetningu seltumæla til að fylgjast með seltu og í dag er byggt yfir öll ný tengivirki til að verjast ísingum og seltu. Seltuburður frá sjó gerist helst í hvassviðri, og eins og rakið er í grein 10.4.2 er ekki ástæða til að ætla að þeim fækki.

Snjóflóð/skriðuföll/rof. Þegar byggja á flutningslínur/flutningsmannvirki þarf að þekkja til sögu snjóflóða og skriðufalla og greina áhættu til framtíðar. Hægt að bregðast við með því

að hnika til mannvirkjum og að reisa innviði, t.d. möstur, sem eiga að að geta klofið snjóflóð. Sjávarrof getur einnig haft áhrif og þegar hefur þurft að færa línur til vegna sjávarrofs.



Mynd 9.9: Lína sem liggur nærri sjávarkambi á Breiðarmerkursandi. (Ljósm. Landsnet, birt með leyfi)

Samverkandi áhrif. Við hönnun lína er tekið mið af þeirri þekkingu sem er til staðar, svo sem áhrifum náttúruvár og samspils ísingar og vinds. Notaðir eru opinberir vindstuðlar til að hanna flutningsmannvirki og ef þeir stuðlar breytast, vegna væntra áhrifa loftslagsbreytinga, verður tekið tilliti til þess í hönnun flutningskerfisins.

Uppbygging flutningskerfis miðar að því að auka öryggi. Í dag eru nýjar línur byggðar með tilliti til aukins veðurálags en áður. Auk þess eru nýjar línur gerðar úr þess háttar efni sem eykur rekstraröryggi. Möskvun kerfisins hefur einnig aukist, en það á að draga úr hættu á rofi á þjónustu og tapi í flutningskerfinu. Flutningskerfið sjálft er því nokkuð vel í stakk búið til að standast áhlaup vegna loftslagsbreytinga. Þó þarf að styrkja kerfið svo unnt sé að flytja raforku milli svæða. Það er ekki síst mikilvægt vegna væntinga um aukna eftirspurn eftir raforku.

Nokkuð hefur verið fjallað um að leggja loftlínur í jörð. Slíkt getur dregið úr líkum á tjóni vegna náttúruvár og er því ein leið til að mæta auknu álagi vegna loftslagsbreytinga. Á móti kemur að launafl í jarðstrengjum er margfalt á við loftlínur. Launaafl eykst eftir því sem spennan er meiri og takmarkar það lengd jarðstrengja (Hjörtur Jóhannsson, 2019). Þetta þýðir að jarðstrengir eru í raun takmörkuð auðlind. Svigrúm til jarðstrengslagna er misjafnt milli landsvæða og mest er það á lægri spennum. Nálægð við stærri virkjanir og möskvun kerfisins eru þættir sem hafa mikla þýðingu fyrir þetta svigrúm.

9.3.3.2 Dreifiveitur

Eins og áður sagði flytja dreifiveitur landsins orkuna til endanlegs notanda. Samkvæmt greiningum Veitna er líklegt að dreifikerfi rafmagns verði ekki fyrir verulegum áhrifum af loftslagsbreytingum. Þó getur aukin tíðni aftakaveðra, aukin úrkomuákefð, leysingar og skriðuföll haft áhrif. Aukinn veðurofsi mun ekki hafa áhrif á dreifikerfi sem eru neðanjarðar en sá hluti raforkukerfisins sem er ofanjarðar gæti orðið fyrir áhrifum (OR, 2020).

Líklegt er að hækkandi hitastig hafi lítil áhrif á rekstraröryggi og óveruleg áhrif á varmaleiðni. Tíðari þurrkar geta þó haft áhrif á varmaleiðni. Jarðstrengir hitna og þurr jarðvegur hefur minni varmaleiðni en rakur jarðvegur. Hægt er að verjast slíku með því að setja viðeigandi jarðveg í kringum strengi (OR, 2020).

Til viðbótar við áhrif á dreifikerfið er líklegt að aukin úrkoma auki líkur á flóðum inn í veitumannvirki. Mikilvægt er að tryggja að veitustöðvar séu varðar gegn slíkum atburðum og varast skal að staðsetja þær í kjöllurum húsa þar sem flóðaatburðir geta átt sér stað (OR, 2020).

Mikilvægt er að gera ráð fyrir dreifistöðvum í skipulagsgerð, en líklegt er að aukin notkun rafbíla muni hafa áhrif á afltoppa dreifikerfisins. Rannsókn á vegum HÍ og HR skoðaði áhrif á flutnings- og dreifikerfi raforku vegna rafbílavæðingar. Niðurstöður benda til kerfistengdra veikleika í íslenska raforkukerfinu hvað þetta varðar og kalla þeir á aðgerðir svo hægt sé að bregðast við auknu álagi. Fleiri álagspunkta er að finna á höfuðborgarsvæðinu en annars staðar á landinu. Auk þess má greina vandamál tengd framleiðslu á Reykjanesi og Austurlandi, þar sem aukin flutningsgeta á þessum svæðum er lítil sem engin (K. J. Dillman o.fl., 2021; K. Dillman o.fl., 2021). Frekari rannsókna er þó þörf.

9.3.3.3 Flutningskerfi jarðefnaeldsneytis

Samkvæmt IPCC hefur framleiðsla og flutningskerfi jarðefnaeldsneytis svipað tjónnæmi á heimsvísu og inniviðir raforkukerfa. Þó eru sum áhrif sértæk, svo sem áhrif þiðnunar sífrera. Að auki geta átök, svo sem vegna loftslagsbreytinga, haft áhrif á flutning jarðefnaeldsneytis milli landa (IPCC, 2023). Slík áhætta hefur ekki verið metin fyrir íslenskt samfélag, sjá nánar umfjöllun um flókna áhættu og aðfangakeðjur í grein10.3.2.



Mynd 9.10: Holumyndun í bundnu slitlagi (Ljósm. Páll Kolka, Vegagerðin, birt með leyfi)

9.4 Samgöngur

Samgöngur skiptast í vegasamgöngur, siglingar og flugsamgöngur og skiptast helstu innviðir samgangna í vegakerfi, hafnir og flugvelli. Í V2018 var birt yfirlit yfir möguleg áhrif loftslagsbreytinga á innviði samgangna og hefur það verið uppfært í töflum 9.5, 9.6 og 9.8, byggt á skýrslu Ástu Þorleifsdóttur ofl. (2021).

Í heild sýna töflurnar að helstu áskoranir í samgöngum vegna loftslagsbreytinga eru tengdar hlýnandi veðri, breyttri ofankomu, aukinni illveðratíðni, breytingum á sjávarstöðu og hærri ölduhæð og áhlaðanda. Hætta á sjávarflóðum eykst með hækkandi sjávarstöðu, samanber umfjöllun í greinum 2.5 og 10.4.4. Búast má við því við að tjón af völdum sjávarflóða muni aukast, bæði vegna tjóna á byggingum á áhrifasvæðum og áhrifa á margs konar nauðsynlega innviði. Hér verður stuttlega farið yfir líkleg áhrif loftslagsbreytinga á þá innviði sem tilheyra hverjum samgöngumáta.

Helstu áhrifum loftslagsbreytinga á vegasamgöngur og vegagerð er skipt í fimm flokka, til viðbótar við áhrif á strandsvæði vegna breytinga á sjávarstöðu og ölduhæð.

9.4.1 Vegasamgöngur

Áhrifum loftslagsbreytinga á vegasamgöngur voru gerð skil í V2018 og í skýrslu 2021. Niðurstöður, sem raktar eru í þessum skýrslum, byggja að hluta til á greiningum sem unnar voru fyrir Rannsóknasjóð Vegagerðarinnar og eru meginatriðin rifjuð upp hér að neðan.

9.4.1.1 Áhrif á vetrarþjónustu

Búast má við hækkandi meðalhita og að þörf fyrir snjómokstur minnki. Meiri þörf verður á hálkuvörnum þar sem sveiflur við frostmark verða algengari.

9.4.1.2 Áhrif á burðarþol vega og endingu slitlags

Þegar sveiflur við frostmark verða tíðari eykur það hættu á skemmdum á slitlagi vega og holumyndun. Skemmdirnar verða vegna niðurbrots steinefna og vatns sem frýs í burðarlagi. Áhrifin eru hvað mest í miklum umferðarþunga, á vorin og í umhleypingum þegar efstu lög vega þiðna.



Mynd 9.11: Skriða á Siglufjarðarvegi í ágúst 2015. (Ljósm. Páll Valdimar Kolka Jónsson, Vegagerðin, birt með leyfi)

Frostþíðusveiflur í hæð valda aukinni skriðumyndun og grjóthruni á vegi. Vaxandi vindstyrkur getur einnig leitt til þess að bundið slitlag flettist af vegum, en dæmi um slíkt má finna í Öræfum. Breytingar á grunnvatnsstöðu vegna breytinga á meðalrennsli eða ársúrkomu geta einnig haft áhrif á burðarþol vega.

Tafla 9.5: Möguleg áhrif loftslagsbreytinga á vegasamgöngur. Byggt á (Ásta Þorleifsdóttir, 2021)

Innviðir	**Álagsþættir**	**Áhrif á innviði**
Vegir	Hærri meðalhiti, hitabylgjur, tíðari frost/þíðuferli, þurrkar	Blæðingar og frostverkun í yfirborði vega Holur og skemmdir í burðarlagi Styttri líftími slitlags, malbiks og brúa Minni snjómökstur og meiri hálkuvarnir Aukin hætta á gróðureldum Gróður skerðir útsýni frá vegum
	Aukin/breytt ofankoma og flóð	Skemmdir á vegum Flóð á vegum Flóð í ræsakerfum Skriðuföll og grjóthrun Óstöðugleiki undirlags
	Aukin tíðni óveðra	Skemmdir á samgöngumannvirkjum Trjágróður getur teppt umferð
	Almenn áhrif	Lægri ferðahraði Lokanir vega Truflun á flutningskerfum Hærri viðgerðar og viðhaldskostnaður
Vegir á strandsvæðum	Hækkandi sjávarstaða	Flóðahætta á lágsvæðum
	Aukin tíðni aftakaveðra Aukin úrkoma, samverkandi þættir, ölduhæð, áhlaðandi, sjávarrof/sjógangur	Rof í vegum vegna ágangs sjávar Aukin hætta á skriðuföllum í bröttum hlíðum
Fjallvegir	Minna frost í jörðu	Minni stöðugleiki undirlags Skriðuföll m.a. vegna þiðnandi sífrera

9.4.1.3 Áhrif á stöðugleika jarðlaga

Hlýnun og breytingar á úrkomumynstri, auk afleiddra afleiðinga svo sem breytinga á snjóþekju og gróðurfari, geta hraðað bráðnun sífrera. Slík bráðnun getur valdið aurskriðum og grjóthruni sem getur truflað vegasamgöngur og valdið tjóni á innviðum (sjá mynd 9.11). Aukin úrkomuákefð getur einnig aukið tíðni skriðufalla. Nýlegt dæmi um það eru skriðuföllin á Seyðisfirði.

9.4.1.4 Áhrif á ræsi og brýr.

Veðurtengd áhrif á ræsi og brýr tengjast einkum rennslistoppum, en loftslagsbreytingar hafa áhrif á ýmsa þætti sem ákvarða stærð þeirra, s.s. úrkomuákefð, snjóalög (sem geta leitt til

flóða í asahláku) og dreypni (sem er m.a. háð gróðurfari og því hvort jörð er frosin eða þiðin). Breytingar á úrkomuákefð, tegund úrkomu og hitasveiflur geta því haft áhrif á ræsi og brýr. Slíkt þarf þó að meta í hverju tilviki fyrir sig og greiningar hingað til hafa ekki gefið tilefni til þess að endurskoða hönnunarforsendur. Dæmi eru um að breytingar á vatnafari, vegna bráðununar jökla, hafi haft áhrif á notkun og notagildi innviða, svo sem þegar Skeiðará breytti um farveg og færðist yfir í farveg Gígju.

9.4.1.5 Aðrir áhrifaþættir

Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á aðra þætti sem hafa afleiðingar fyrir vegakerfið. Sem dæmi má nefna aukinn vöxt gróðurs sem getur skapað hættu á gróður-/skógareldum og kallað á breytingar á vegatengdum inniviðum, svo sem vegna kröfu um flóttaleiðir. Aukinn vöxtur gróðurs getur einnig byrgt sýn við vegamannvirki og kallað á aukið viðhald.

9.4.2 Flugvellir og flug

Helstu árhif loftslagsbreytinga á innviði flugsamgangna eru tekin saman í töflu 9.6. Áhrif á flugvelli eru svipuð og á innviði vegasamgangna. Að auki geta truflanir á einum samgöngumáta haft áhrif á hinn, t.d. gæti rof á vegasamgöngum haft áhrif á aðkomu að flugvelli.

Tafla 9.6: Möguleg áhrif loftslagsbreytinga á flugvelli og flugsamgöngur.

Álagsþættir	**Áhrif á innviði**
Hærri meðalhiti, hitabylgjur, tíðari frost/þíðuferli, þurrkar	Farmur getur þarfnast kælingar á flugvelli
	Skemmri líftími flugbrauta
	Blæðingar og skemmdir á flugbrautum
	Lengra flugtak, lengri flugbrautir eða minni þyngd
	Breyttar vindáttir og notagildi flugbrauta
Aukin ofankoma og flóð	Flóðahætta og hætta á skemmdum á flugbrautum
Auknir tíðni óveðra	Vindskemmdir á flugbrautum, aðreinum og byggingum
Hækkandi sjávarstaða	Aukin hætta á sjógangi og flóðum
ölduhæð, áhlaðandi, sjávarrof/sjógangur	Sjávarrof vegna ágangs
Fleiri aftakaveður, samverkandi þættir	Hætta á hálku á flugbrautum
Almenn áhrif	Lokun flugvalla
	Hærri viðhaldskostnaður
	Tafir á samgöngum

Afbrigði í veðri hafa þegar haft áhrif á flugvelli, t.d. hefur úrkomuákefð og asahláka valdið flóðum á flugvöllum, bæði á Egilsstöðum og Siglufirði. Þar að auki er hluti innviða Ísafjarðarflugvallar á snjóflóðasvæði Kirkjubólshlíðar (Ásta Þorleifsdóttir, 2021). Flóðahætta er til staðar á fleiri flugvöllum, til dæmis gæti Akureyrarflugvöllur bæði orðið fyrir áhrifum af vatnsflóðum vegna vorleysinga í Eyjafjarðará og vegna sjávarflóða. Tafla 9.7 sýnir flugvelli á lágsvæðum, eða í minna en fimm metra hæð yfir sjávarmáli.

Tafla 9.7: Flugvellir í AIP hæð undir fimm metrum (Ásta Þorleifsdóttir, 2021)

Millilandaflugvellir	
Akureyri	1.5
Flugvellir innanlands	
Bíldudalur	3.4
Hornafjörður	2.1
Ísafjörður	2.3
Sauðárkrókur	2.4
Vopnafjörður	2.4
Lendingarstaðir	
Djúpivogur	1.5
Norfjörður	1.5

Áhrif á Keflavíkurflugvöll geta orðið vegna þoku og breytinga á vindáttum og vindstyrk. Þetta á líka við um aðra flugvelli, þó sérstaklega þar sem aðflug er krappt (Ásta Þorleifsdóttir, 2021).

Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á flug og flugtak. Vegna þess að hlýtt loft er léttara en kalt getur hlýnun haft áhrif á mögulega flugtaksþyngd eða nauðsynlega lengd flugbrauta (Ásta Þorleifsdóttir, 2021; Wang o.fl., 2023). Einnig er mögulegt að loftslagsbreytingar geti haft áhrif á háloftastrauma og orsakað breytingar á vindmynstri og aukið ókyrrð í lofti. Slíkar breytingar geta haft áhrif á flugleiðir, ferðatíma og eldsneytisnotkun (Ásta Þorleifsdóttir, 2021).

9.4.3 Samgöngur á sjó

Loftslagsbreytingar geta haft áhrif á siglingar á sjó, sem og hafnir og önnur mannvirki sem þeim tengjast. Áhrifin tengjast helst breytingum á tíðni óveðra, auknum öldugangi og breytingum á úrbreiðslu hafíss, þá sérstaklega ísjaka. Tafla 9.8 dregur saman helstu áhrif loftslagsbreytinga á samgöngur í sjó (Ásta Þorleifsdóttir, 2021) en helstu þættir eru ræddir frekar hér að neðan. Fyrst verður fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á hafnarmannvirki og sjávarstöðuhækkun á lágsvæðum og síðan verður fjallað um breytingar á siglingaleiðum.

9.4.3.1 Áhrif á strandvarnir, lágsvæði og hafnarmannvirki

Fjallað var um áhrif loftslagsbreytinga á lágsvæði og strandvarnir í V2018. Helstu áhættuþættir eru flóðahætta og skemmdir vegna hækkunar sjávarstöðu og aukinnar tíðni illviðra með áhlaðanda. Landsig (sjá umfjöllun í greinum 2.5 og 10.4.4) eykur á vandann, en jafnvel þar sem land rís vegna massataps jökla, eins og í Hornafjarðarhöfn, verða vandamál vegna setmyndunar í höfn og innsiglingu.

Viðbrögð við þessum áhættuþáttum fela í sér uppbyggingu sjóvarna á lágsvæðum og uppbyggingu og lagfæringu á höfnum. Vegagerðin fer með framkvæmd laga um sjóvarnir og felur hluti samgönguáætlunar í sér áætlanir um sjóvarnir, bæði hvað varðar strandvarnir á lágsvæðum og hafnarmannvirkjum. Þá er einnig tekið tillit til sjóvarna fyrir vegakerfið þar sem áhrif loftslagsbreytinga á vegakerfið gætu orðið nokkur, m.a. á strandvegi og vegfyllingar við sjó, t.d. þar sem firðir hafa verið þveraðir. Sveitarfélög sækja um framlag til Vegagerðarinnar vegna sjóvarna og er nauðsyn framkvæmda metin með hliðsjón af hættu á sjávarflóðum, landbroti og kostnaði og þeim forgangsraðað. Vegagerðin er einnig umsagnaraðili um skipulag á lágsvæðum en í dag er stuðst við endurskoðaðar viðmiðunarreglur frá 2018 (Sigurður Sigurðarsson, 2018).

Hækkun sjávarborðs, aukin úrkomuákefð, illviðri, aukin ölduhæð og samverkan þessara þátta geta haft áhrif á innviði vegasamgangna vegna aukinnar hættu á flóðum og strandrofi. Strandrof

Tafla 9.8: Möguleg áhrif loftslagsbreytinga á samgöngur á sjó, hafnir og önnur mannvirki á lágsvæðum

Innviðir	**Álagsþættir**	**Áhrif á innviði**
Hafnir og mannvirki á lágsvæðum	Hærri sjávarstaða	Skemmdir á höfnum vegna rofs og ágangs sjávar
	Flóð/skriðuföll	Flóðahætta
	Aukin illviðratíðni	Álag á ofanvatnskerfi Skemmdir vegna vatnsaga
	Almenn áhrif	Truflun á flutningskerfum, tafir og lokanir. Aukinn viðhalds- og framkvæmdakostnaður.
Flutningur á hafi	Breytingar á sjávarstöðu	Siglingaleiðir kunna að verða fyrir áhrifum vegna breytinga á setmyndun við grynningar
	Breytingar á skilyrðum í hafi	Aukin illviðri og ölduhæð hefur áhrif á skip og siglingar
	Ólík hlýnun lofts og sjávar	Hætta á skemmdum á farmi, breytingar á þokutíðni
	Færri dagar undir frostmarki	Minni vandamál vegna ísingar
	Minni hafís og ísmyndun	Nýjar siglingaleiðir, lengra siglingatímabil

getur síðan aukið líkur á grjóthruni og skriðuföllum. Samkvæmt skýrslu Ástu Þorleifsdóttur o.fl. (2021) þarf sérstaklega að huga að stöðum þar sem lágar brýr þvera firði, svo sem við Breiðafjörð og Breiðdalsvík, og þar sem hætta er á ofanflóðum eða skriðuföllum, svo sem í Kambanesskriðum, Almenningum og Eyrarhlíð.

Jarðskorpuhreyfingar hafa einnig áhrif á breytingar á hæð sjávarborðs en landsig hefur til dæmis átt sér stað á Reykjanesi, Reykjavík, Siglufirði og Ísafirði. Landris hefur orðið á Suðausturlandi, t.d. við Höfn í Hornafirði þar sem landris er viðvarandi (sjá umfjöllun í grein 2.5.3 og töflu 2.9).

Fjallað var um sjávarstöðubreytingar í V2018 (sjá ágrip í töflu 5.8 í V2018) og uppfært mat á þeim er gefið í grein 2.5. Í niðurstöðum V2018 var metið að líkleg hækkun eiginlegrar sjávarstöðu hérlendis væri um 20-40% af hnattrænni sjávarstöðubreytingu auk þess sem taka þyrfti tillit til jarðskorpuhreyfinga. Í töflu 5.8 í V2018 voru skoðuð þrjú ólík tilvik um hnattræna hækkun (50, 75 og 100 cm) og að teknu tilliti til landhæðarbreytinga var lagt mat á afstæðar sjávarstöðubreytingar (þ.e. staðbundnar breytingar) fyrir ólíka landshluta. Þessar niðurstöður hafa verið notaðar í útreikningum á líklegri sjávarstöðuhækkun, en til að mæta óvissu um massatap ísbreiðunnar á Suðurskautslandi hefur að auki verið bætt við 35 cm óvissuálagi á niðurstöður V2018.

Þessar tölur eru uppfærðar í grein 2.5 og þar er meðal annars tekið tillit til niðurstaðna IPCC um að þó líkleg hækkun sé á bilinu 0.5–1 m sé ekki hægt að útiloka meiri hækkun. Í greininni kemur fram að ekki er stórvægilegur munur á sjávarstöðubreytingum í hlýjustu sviðsmyndum í AR5 og AR6 en í síðari skýrslunni er einnig skoðuð sviðsmynd sem *lítil vissa* er fyrir og þá skoðaði IPCC ((Fox-Kemper o.fl., 2021, sjá töflu 9.8)) árið 2150. Það ár er ekki það fjarri í tíma að gera má ráð fyrir að mannvirki sem nú eru byggð geti enn verið til staðar þá. Í versta tilvikinu sem AR6 skoðaði verður langtímahækkunin 5 m til ársins 2150 og enn meiri árið 2300 (Fox-Kemper o.fl., 2021). Því má segja að þó ekki muni miklu um hækkun í hlýjustu sviðsmyndum frá AR5

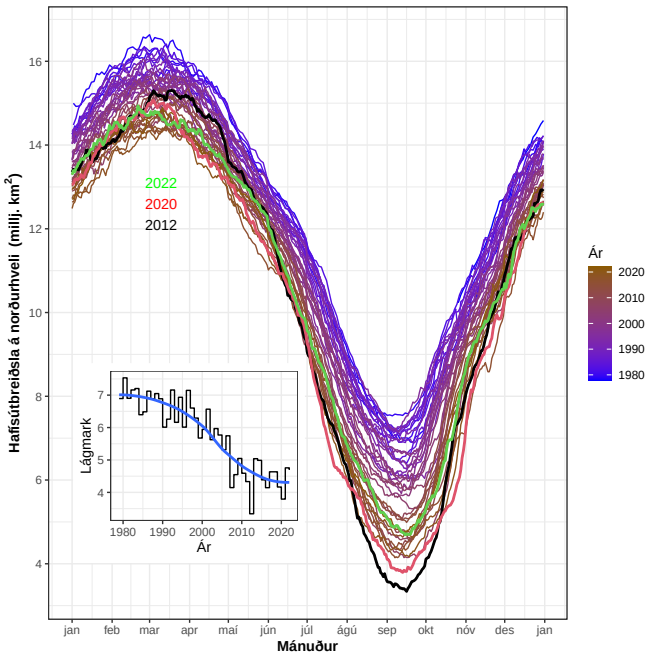


Mynd 9.12: Flóð í höfninni á Patreksfirði (Ljósm. Smári Gestsson, birt með leyfi).

til AR6 hafi óvissan aukist verulega. Það gæti gefið til kynna að núverandi útreikningar á sjávarstöðubreytingum í V2018 séu vanmat, jafnvel með 35 cm öryggismörkum. Þetta er rætt frekar í grein 10.4.4.

Til að meta samlegðaráhrif þeirra þátta sem hafa áhrif á sjávarflóð notar Vegagerðin spálíkan (Tryggvadóttir, 2020) fyrir samlíkur á hárri sjávarstöðu, áhlaðanda, háum öldum og vindi. Líkanið er notað til að skýra líkur á ágjöf sjávar yfir sjóvarnarmannvirki eða náttúrulegan sjávarkamb. Nú þegar hefur verið ráðist í hækkun sjóvarna við Sauðárkrók byggt á þessari aðferðafræði (Ásta Þorleifsdóttir, 2021) auk þess sem greiningar hafa verið unnar fyrir nokkra staði á landinu, svo sem Ægisbraut á Akranesi.

9.4.3.2 Þróun hafísþekju og áhrif á siglingar



Mynd 9.13: Útbreiðsla hafíss (millj km^2) frá 1979 til 2022 (15% þéttleiki eða meiri). Árstíðasveiflan fyrstu árin er sýnd með blálituðum línum en síðustu árin eru brúnlituð. Árin 2012, 2020 og 2022 eru merkt sérstaklega. Litla myndin sýnir þróun lágmarks hvers árs og bláa línan sýnir útjafnaðan feril. (Uppfærð mynd 4.28 í V2018).

Fjallað var um hafís á norðurslóðum í grein 4B í V2018 og bent á að hann hafi dregist verulega saman á síðustu áratugum. Mynd 9.13 sýnir þróun hafísþekju á norðurslóðum frá 1979. Myndin sýnir að útbreiðsla hafíss hefur dregist saman í öllum mánuðum, en mestur er samdrátturinn þó að sumri og hausti. Litla myndin sýnir þróun árslágmarksins. Það dróst mjög hratt saman á fyrsta áratug þessarar aldar en á síðustu árum hefur hægt á samdrættinum. Þó var lágmarksútbreiðslan árið 2020 sú önnur lægsta í mælirröðinni, en sú lægsta var 2012.

Myndin endurspeglar breytingar fyrir allan hafís á Norðurheimskautssvæðinu. Á íslensku hafsvæði er hafís helst í og við Austur-Grænlandsstrauminn, sem er kaldur hafstraumur sem streymir til suðurs, meðfram austurströnd Grænlands. Á þessu svæði hefur samdráttur ekki verið jafn ákafur og fyrir norðurslóðir í heild sinni. Eftir sem áður hefur ísinn þynnst og hlutfall fjölærs hafíss minnkað. Myndin byggir á gervitunglagögnum (NSIDC, 2023) sem greina aðeins ísþéttleika yfir

15% af flatarmáli. Mjög gisinn ís er því vanmetinn og dregur það úr mati á hafís á jaðarsvæðum, t.d. á íslenskum hafsvæðum.

Í V2018 var farið yfir niðurstöður AR5 um horfur á áframhaldandi samdrætti hafíss og í AR6 (Fox-Kemper o.fl., 2021) er lagt mat á hversu mikið þurfi að hlýna svo að lágmark hafísþekjunnar fari undir eina milljón km^2. Við þau mörk má gera ráð fyrir að Íshafið verði að jafnaði nánast íslaust að sumri, að minnsta kosti hvað siglingar varðar. Niðurstaðan er sú að við 3 °C hnattræna hlýnun má gera ráð fyrir að Íshafði verði nánast íslaust að sumri, en hækki hnattrænn hiti um 1,5 - 2 °C gerist slíkt einungis í sumum árum. Þó gögn sýni umtalsverðan breytileika milli ára bendir flest til þess að samdráttur hafísþekju haldi áfram og því eru minni líkur á langvarandi harðindatímabilum og hafísárum með vítækum áhrifum á fiskveiðar, siglingar og afkomu.



Mynd 9.14: Hafíseftirlit (Ljósm. Landhelgisgæslan, birt með heimild).

Áskoranir vegna minni hafísþekju eru margvíslegar. Hafís mun enn verða til staðar, að minnsta kosti hluta úr ári og hann getur truflað siglingar og valdið hættu og tjóni. Það sama gildir um lagnaðarís á fjörðum. Mögulegt er að borgarísjakar gætu orðið stærra vandamál í framtíðinni, einkum ef íshellur á norðausturhluta Grænlands brotna upp í auknum mæli. Erfitt er að spá fyrir um rek borgaríss en hann ristir dýpra en annar hafís og verður fyrir meiri áhrifum strauma. Dæmi eru um mikinn skaða á norðurslóðum vegna óhappa af völdum hafíss og borgaríss, svo sem skipaskaðar, olíumengun og tjón sjókvía, sem getur bæði verið fjárhagslegt og vistfræðilegt.

Öryggismál tengd tengd hafís, borgarís og lagnaðarís skipta miklu máli og mikilvægt að vöktun sé sinnt. Alþjóðleg samvinna um eftirlit, vöktun og miðlun hafísupplýsinga (IICWG, 2023) hefur frá árinu 1999 unnið að samþættingu vinnubragða og miðlunar aðila sem sinna hafíseftirliti. Þáttaka Íslands í slíku samstarfi hefur reynst árangursrík og mikilvægt að henni sé haldið áfram.



Mynd 9.15: Hafís á Siglingaleið (Ljósm. Svanhildur Egilsdóttir, Haf og Vatn, birt með leyfi).

9.4.3.3 Breytingar á siglingaleiðum

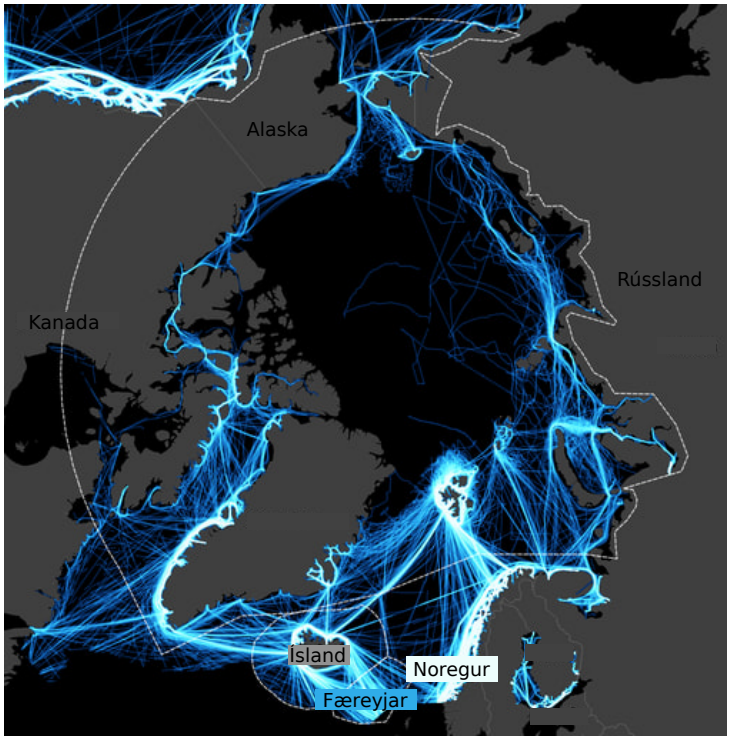
Vegna samdráttar á hafís á norðurslóðum er búist við að nýjar skipaleiðir opnist og leiði til aukinna skipaferða fjarri mikilvægum innviðum. Það á til dæmis við í tengslum við ferðamennsku, farmsiglingar og aukna auðlindanýtingu á hafsvæðum sem verða aðgengileg.

Mynd 9.16 sýnir siglingar inn á norðurslóðir frá 2013 til 2019. Slíkar siglingar skiptast í tvo flokka, annars vegar siglingar innan norðurslóða (*e. Inter-Arctic*) og hins vegar siglingar yfir Íshafið (*e. Trans-Arctic*), milli Norður-Atlantshafs og Kyrrahafs. Væntingar eru um að aukning verði í báðum flokkum vegna vinnslu auðlinda og flutninga á sjó. Flutningsleiðir geta styst umtalsvert með tilheyrandi lækkun eldsneytiskostnaðar þó óvíst sé um tímasparnað (Elíasson,

2014). Siglingar um Norðurhafið hafa þegar aukist og á tímabilinu 2013-2019 jókst fjöldi skipa um 25% og sigld vegalengd um 75%. Fiskiskip eru algengust á þessu svæði en að auki er nokkuð um ísbrjóta og rannsóknaskip. Ferðamennska á svæðinu hefur einnig aukist og árið 2019 sigldu 73 skemmtiferðaskip inn á svæðið (PAME, 2020).

Þrjár nýja siglingaleiðir yfir Íshafið eru taldar líklegastar. Norðvesturleiðin, sem liggur að mestu við strendur Kanada; Miðleiðin yfir Norðurpólinn og Norðausturleiðin, sem liggur við strendur Rússlands. Norðausturleiðin er þegar opin fyrir siglingar síðsumars og hafa verið reistir innviðir í Rússlandi vegna þessa. Eins og rakið er í V2018 fo´r sérhannað vöruflutningaskip Norðvesturleiðina 2013, en sú leið er enn lokuð flest ár. Væntanlega munu ár eða áratugir líða uns Miðleiðin opnast fyrir flutninga (Ráðherranefnd um málefni norðurslóða, 2015) en hún er talin líklegust til að gagnast Íslandi best (Hagfræðistofnun, 2019).

Í V2018 var bent á að spár geri ráð fyrir að á Norður-Íshafi hafís að mestu á sumrin. Þó sé mikil óvissa varðandi hversu mikil áhrif auknar siglingar á norðurslóðum muni hafa á Ísland. Tengdist það meðal annars hvort flutningsaðilar telji hagstætt að hafa viðkomu á Íslandi, en slíkt myndi kalla á uppbyggingu viðeigandi innviða í landinu. Hagfræðistofnun Háskóla Íslands lagði mat á hvort það gæti orðið hagstætt fyrir flutningsaðila að nota Ísland sem uppskipunarhöfn (Hagfræðistofnun, 2019).



Mynd 9.16: Siglingar inn á norðurslóðir á tímabilinu 2013 til 2019. (PAME 2021 birt með leyfi).

Niðurstöður Hagfræðistofnunar benda til að í engri þeirra sviðsmynda sem metnar voru fyrir norðaustur og Norðvesturleiðirnar kom Ísland út sem hagstæðasti kosturinn. Á þessum leiðum þyrfti því að veita verulegan afslátt af umskipunargjaldi og jafnvel dygði slíkur afsláttur ekki til. Hins vegar sýna niðurstöðurnar að á Miðleiðinni gæti Ísland haft samkeppnisforskot, m.a. vegna mögulegs hafnarstæðis í Finnafirði. Uppbygging uppskipunarhafnar þar gæti haft jákvæð efnahagsleg áhrif, m.a. með beinum og afleiddum störfum (Hagfræðistofnun, 2019).

Árið 2017 gekk í gildi alþjólegt regluverk sem kallað er Pólkóðinn (IMO, 2017), en það er lögboðið alþjóðlegt regluverk á vegum Alþjóðasiglingamálastofnunarinnar. Tilgangur þess er að auka öryggi skipa á norðurslóðum og draga úr neikvæðum áhrifum siglinga um svæðið á íbúa og viðkvæmt umhverfi hafsvæða og stranda. Pólkóðinn setur reglur um gerð skipa, siglingar og rekstur skipa á norðurslóðum og tekur til öryggis- og umhverfisþátta. Þrátt fyrir að þetta regluverk sé til bóta eru þeir óvissuættir sem taldir eru upp í greiningu Ástu Þorleifsdóttur o.fl. (2021) enn til staðar:

- Óvissa vegna öryggismála.
- Óvissa um skilyrði til siglinga, svo sem vegna ísjaka og myrkurs.
- Óvissa um kostnað vegna smíði og reksturs sérútbúinna skipa sem og tryggingar.

- Óvissa vegna mögulegra áhrifa á lífríki norðurslóða, sem er afar viðkvæmt öllu áreiti. Helstu áhyggjuefnin eru mengun frá útblæstri skipa, losun skólps, sorps og skaðlegra efna, mengunarslys vegna olíu, tilfærsla ágengra lífvera, hávaði og árekstrar.

Mikilvægt er fyrir Íslendinga að fylgjast vel með þróun siglinga á norðurslóðum og stuðla að því að þeim sé stýrt skynsamlega, með öryggi og lágmörkun umhverfisáhrifa í huga.

Heimildir

Alþingi (2009). *Lög um uppbyggingu og rekstur fráveitna, nr. 9/2009, með síðari breytingum.* Alþingi. URL: https://www.althingi.is/lagas/nuna/2009009.html.

Andradóttir, H.Ó., A.R. Arnardóttir og T. Zaqout (2021). „Rain on snow induced urban floods in cold maritime climate: Risk, indicators and trends“. Í: *Hydrol. Proc.*, bls. 14298.

Ágústa Þóra Jónsdóttir (2022). *Sviðsmyndir Landverndar um raforkunotkun 2040.* Tæknileg skýrsla. Landvernd.

Ágústsson, Hálfdán (2015). „Mesoscale aspects of atmospheric flow in complex orography“. Dissertation submitted in partial fulfillment of a Philosophiae Doctor degree in Physics. Philosophiae Doctor dissertation. University of Iceland. URL: https://rafhladan.is/handle/10802/10532.

Ásta Þorleifsdóttir (2021). *Áhrif loftslagsbreytinga á samgöngur: forsendur aðlögunar.* Tæknileg skýrsla. Reykjavík: Stjórnarráð Íslands: Samgöngu- og sveitarstjórnarráðuneytið.

BGO Reykjavík (2021). *Blágrænar ofanvatnslausnir í Reykjavík.* URL: https://www.bgoreykjavik.com/.

Björnsson, Hólmgeir (2007). *Framleiðsla lífmassa á Suðurlandi og Norðausturlandi—Skýrslur til Íslenska lífmassafélagsins.* Fjölrit LbhÍ nr. 13. Landbúnaðarháskóli Íslands. URL: http://www.lbhi.is/sites/lbhi.is/files/gogn/vidhengi/thjonusta/utgefid_efni/RitLbhi/Rit_Lbhi_nr_13.pdf.

Clarke, L., Y.-M. Wei, A. De La Vega Navarro, A. Garg, A.N. Hahmann, S. Khennas, I.M.L. Azevedo, A. Löschel, A.K. Singh, L. Steg, G. Strbac og K. Wada (2022). „Energy Systems“. Í: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz og J. Malley. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.008.

Després, J. og M. Adamovic (2020). *Seasonal impacts of climate change on electricity production.* Tæknileg skýrsla. European Commission Joint Research Centre, bls. 36. URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/900c6f8e-9652-11ea-aac4-01aa75ed71a1/language-en.

Dillman, Kevin, Michał Czepkiewicz, Jukka Heinonen, Reza Fazeli, Áróra Árnadóttir, Brynhildur Davı´ðsdóttir og Ehsan Shafiei (2021). „Decarbonization scenarios for Reykjavik's passenger transport: The combined effects of behavioural changes and technological developments“. Í: *Sustainable Cities and Society* 65, bls. 102614.

Dillman, Kevin Joseph, Reza Fazeli, Ehsan Shafiei, Jón Örvar G Jónsson, Hákon Valur Haraldsson og Brynhildur Davíðsdóttir (2021). „Spatiotemporal analysis of the impact of electric vehicle integration on Reykjavik's electrical system at the city and distribution system level“. Í: *Utilities Policy* 68, bls. 101145.

Dúpivogur (2010). *Vatnslaust á Djúpavogi.* Sveitarfélagið Djúpivogur (nú Múlaþing). URL: https://djupivogur.is/Frettir/Adalvefur/Vatnslaust-a-Djupavogi---Nyjar-myndir.

Elíasson, Kjartan (2014). „Mapping Evaluation of the Future Arctic, Implications for Iceland“. Submitted in partial fulfillment of a Magister Scientiarum degree in Environmental Engineering. Master's thesis. Reykjavík, Iceland: University of Iceland.

Enevoldsen, Peter og George Xydis (2019). „Examining the trends of 35 years growth of key wind turbine components“. Í: *Energy for Sustainable Development* 50, bls. 18–26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.esd.2019.02.003.

Fenger, Jes (2007). „Impacts of climate change on renewable energy sources. Their role in the Nordic energy system“. Í.

Forzieri, Giovanni, Alessandra Bianchi, Filipe Batista e Silva, Mario A. Marin Herrera, Antoine Leblois, Carlo Lavalle, Jeroen C.J.H. Aerts og Luc Feyen (2018). „Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe“. Í: *Global Environmental Change* 48, bls. 97–107. ISSN: 0959-3780. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378017304077.

Fox-Kemper, B, H T Hewitt, C Xiao, G Aðalgeirsdóttir, S S Drijfhout, T L Edwards, N R Golledge, M Hemer, R E Kopp, G Krinner, A Mix, D Notz, S Nowicki, I S Nurhati, L Ruiz, J.-B. Sallée, A B A Slangen og Y Yu (2021). „Ocean, Cryosphere and Sea Level Change“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 1211–1362. DOI: 10.1017/9781009157896.011.

Goldstein, Barry, Gerardo Hiriart, Ruggero Bertani, Charles Bromley, Luis Gutiérrez-Negrı´n, Ernst Huenges, Hirofumi Muraoka, Arni Ragnarsson, Jefferson Tester og Vincenzo Zui (2011). „Geothermal Energy“. Í: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Grétar Mar Hreggviðsson (2010). „Áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi“. BSc ritgerð. Háskólinn í Reykjavík.

Gunnarsdottir, Maria J., Sigurdur M. Gardarsson, Anna Charlotte Schultz, Hans-Jörgen Albrechtsen, Lisbeth Truelstrup Hansen, Kim Steve Gerlach Bergkvist, Pekka M. Rossi, Björn Klöve, Mette Myrmel, Kenneth M. Persson, Magnus Eriksson og Jamie Bartram (2020). „Status of risk-based approach and national framework for safe drinking water in small water supplies of the Nordic water sector“. Í: *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 230. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113627.

Gunnarsdottir, Maria J., Kenneth M. Persson, Hrund O. Andradottir og Sigurdur M. Gardarsson (2017). „Status of small water supplies in the Nordic countries: Characteristics, water quality and challenges“. Í: *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 220.8, bls. 1309–1317. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2017.08.006.

Hagfræðistofnun (2019). *Siglingar á norðurslóðum – Ísland í brennidepli*. Tæknileg skýrsla C19:06. Háskóli Íslands.

Hasager, Charlotte Bay, Merete Badger, Nikolai Nawri, Birgitte Rugaard Furevik, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson og Niels-Erik Clausen (2015). „Mapping offshore winds around Iceland using satellite Synthetic Aperture Radar and mesoscale model simulations“. Í: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 8.12, bls. 5541–5552.

Helgadóttir, Birta Kristín (2014). „Possible impacts of climate change on the wind energy potential in Búrfell“. M.Sc. thesis. Faculty of Civil og Environmental Engineering, University of Iceland.

Hilmar Gunnlaugsson, Björt Ólafsdóttir og Kolbeinn Óttarson Proppe (2023). *Vindorka Valkostir og greining - Skýrsla starfshóps um vindorku*. Tæknileg skýrsla. Reykjavík: Stjórnarráð Íslands: Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið.

Hjörtur Jóhannsson (2019). *Jarðstrengir í flutningskerfi raforku - Takmarkanir og áhrif notkunar jarðstrengja á hæstu spennustigum flutningskerfa raforku*. Tæknileg skýrsla. Samráðsgátt.

Hlöðversdóttir, Ásta Ósk, Brynjólfur Björnsson, Hrund Ólöf Andradottir, Jónas Eliásson og Philippe Crochet (2015). „Impacts of climate change on combined sewer systems in Reykjavik“. Í: *Water Science and Technology* 71.10, bls. 1471–1477. DOI: 10.2166/wst.2015.119.

IICWG (2023). *International Ice Charting Working Group*. National Snow og Ice Data Center, University of Colorado Boulder. URL: https://nsidc.org/ (skoðað 2023).

IMO (2017). *International Code for Ships Operating in Polar Waters (Polar Code)*. International Maritime Organization. URL: https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/polar-code.aspx (skoðað 01.08.2023).

Ingveldur Sæmundsdóttir og Jón Bernódusson (2021). *Ræktun og framleiðsla úr orkujurtum*. Stjórnarráð Íslands: Samgöngu og sveitarstjórnarráðuneytið. URL: https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit-%5C/-skyrslur-og-skrar/Repjuol%5C%C3%5C%ADa%5C_sk%C3%BDrsla%5C_sept2021.pdf.

IPCC (2023). *Summary for Policymakers*. Gefið út af Hoesung Lee, Katherine Calvin, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter Thorne, Christopher Trisos, José Romero, Paulina Aldunce, Ko Barrett, Gabriel Blanco, William W. L. Cheung, Sarah L. Connors, Fatima Denton, Aïda Diongue-Niang, David Dodman, Matthias Garschagen, Oliver Geden, Bronwyn Hayward, Christopher Jones, Frank Jotzo, Thelma Krug, Rodel Lasco, June-Yi Lee, Valérie Masson-Delmotte, Malte Meinshausen, Katja Mintenbeck, Abdalah Mokssit, Friederike E. L. Otto, Minal Pathak, Anna Pirani, Elvira Poloczanska, Hans-Otto Pörtner, Aromar Revi, Debra C. Roberts, Joyashree Roy, Alex C. Ruane, Jim Skea, Priyadarshi R. Shukla, Raphael Slade, Aimée Slangen, Youba Sokona, Anna A. Sörensson, Melinda Tignor, Detlef van Vuuren, Yi-Ming Wei, Harald Winkler, Panmao Zhai og Zinta Zommers. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press.

Jóhannesson, T, G Aðalgeirsdóttir, H Björnsson, P Crochet, E B Elíasson, S Gumundsson, J F Jónsdóttir, H Ólafsson, F Pálsson, Ó Rögnvaldsson, O Sigurðsson, Ó G Blöndal-Sveinsson og Th Thorsteinsson (2007). *Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. Reykjavík*. Tæknileg skýrsla.

Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á orkukerfi og samgöngur (LOKS) (2011). URL: https://www.vedur.is/loks/.

María J. Gunnarsdottir, Ása Atladottir og Sigurður M Gardarsson (2020). „Vatnsbornar hópsýkingar á Íslandi – greining á umfangi og ástæðum“. Í: *Læknablaðið* 106.6, bls. 283–334.

María J. Gunnarsdóttir, Sigurður M. Garðarsson, Hrund Ö. Andradóttir og A. Schiöth (2019). „Áhrif loftslagsbreytinga á vatnsveitur og vatnsgæði á Íslandi: áhættuþættir og aðgerðir“. Í: *Verktækni* 25.1, bls. 1–15.

Nawri, Nikolai, Guðrún Nı´na Petersen, Halldór Bjornsson, Andrea N Hahmann, Kristján Jónasson, Charlotte Bay Hasager og Niels-Erik Clausen (2014). „The wind energy potential of Iceland“. Í: *Renewable energy* 69, bls. 290–299.

Noël, Brice, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson, Bert Wouters, Stef Lhermitte, Jan M Haacker og Michiel R van den Broeke (2022). „North Atlantic Cooling is Slowing Down Mass Loss of Icelandic Glaciers“. Í: *Geophysical Research Letters* 49.3, e2021GL095697. DOI: https://doi.org/10.1029/2021GL095697.

NSIDC (2023). *National Snow and Ice Data Center*. National Snow og Ice Data Center, University of Colorado Boulder. URL: https://nsidc.org/ (skoðað 2023).

OECD-FAO (2021). *OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030*. OECD, Food og Agriculture Organization of the United Nations, bls. 337. DOI: https://doi.org/https://doi.org/10.1787/19428846-en.

OR (2020). *Aðlögun OR samstæðunnar að loftslagsbreytingum*. Orkuveita Reykjavíkur. URL: https://arsskyrsla2020.or.is/documents/565/A%C3%B0l%C3%B6gun_OR_samst%C3%A6%C3%B0unnar_a%C3%B0_loftslagsbreytingum__Fyrsti_%C3%A1fangi_%C3%AD_%C3%A1tt_a%C3%B0_auknum_ACUe986.pdf.

Orkumál (2019). Hagstofa Íslands. URL: https://hagstofa.is/talnaefni/umhverfi/orkumal/.

Orkustofnun (2022). *Orkutölur 2021*. URL: https://gogn.orkustofnun.is/os-onnur-rit/Orkutolur-2021-islenska-A-4.pdf.

Osman, A. I., L. Chen, M. Yang og et al. (2022). „Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review“. Í: *Environmental Chemistry Letters*. DOI: 10.1007/s10311-022-01532-0.

PAME (2020). *The Increase in Arctic Shipping 2013-2019*. Tæknileg skýrsla. Arctic Shipping Status Report (ASSR).

— (2021). *Arctic Marine Tourism*. URL: https://pame.is/projects-new/arctic-shipping/pame-shipping-highlights/415-arctic-marine-tourism.

Ráðherranefnd um málefni norðurslóða (2015). *Hagsmunir Íslands á norðurslóðum: Tækifæri og viðsjár- Drög*. Tæknileg skýrsla. Stjórnarráð Íslands. URL: https://www.stjornarradid.is/media/forsaetisraduneyti-media/media/frettir2/hagsmunir-nordurslod-drog.pdf.

Rounce, David R, Regine Hock, Fabien Maussion, Romain Hugonnet, William Kochtitzky, Matthias Huss, Etienne Berthier, Douglas Brinkerhoff, Loris Compagno, Luke Copland, Daniel Farinotti, Brian Menounos og Robert W McNabb (2023). „Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters“. Í: *Science* 379.6627, bls. 78–83. DOI: 10.1126/science.abo1324.

Sigurður Sigurðarsson (2018). „Lágsvæði – viðmiðunarreglur fyrir landhæð“. Í: *Vegagerðin*.

Skýrsla starfshóps (2023). *Vindorka á hafi*. Tæknileg skýrsla. Reykjavík: Stjórnarráð Íslands: Umhverfis-, orku og loftslagsráðuneytið.

Sverrir Guðmundsson María J. Gunnarsdóttir, Sigrún Tómasdóttir (2023). *Vatnsveitur: Loftslagsáhættur og aðlögun að loftslagsbreytingum*. Kynning á málstofu um Vinnustofa um vatn og fráveitu vegna landsáætlunar um aðlögun.

Sædís Ólafsdóttir Kári Helgason, Hólmfríður Sigurðardóttir Hólmfríður Bjarnadóttir Hildigunnur H. Thorsteinsson Hlöðver S. Þorgeirsson Sverrir Guðmundsson Sigrún Tómasdóttir Arna Pálsdóttir Egill Maron Þorbergsson (2021). *Aðlögun OR samstæðunnar að loftslagsbreytingum Fyrsti áfangi í átt að auknum viðnámsþrótti*. Orkuveita Reykjavíkur. URL: https://arsskyrsla2020.or.is/documents/565/A%C3%B0l%C3%B6gun_OR_samst%C3%A6%C3%B0unnar_a%C3%B0_loftslagsbreytingum___Fyrsti_%C3%A1fangi_%C3%AD_%C3%A1tt_a%C3%B0_auknum_ACUe986.pdf.

Thorsteinsson, Thorsteinn og Halldór Björnsson (2012). *Climate Change and Energy Systems*. Nordic Council of Ministers.

Tryggvadóttir, Bryndís (2020). „Adaption of Multivariate Extreme Value Modeling for Extreme Coastal Flood Events“. Master's thesis. University of Iceland.

Veitur (2021). *Gróðureldar á vatnsverndarsvæðinu í Heiðmörk*. URL: https://samorka.is/grodureldar-a-vatnsverndarsvaedinu-i-heidmork.

Vilhjálmur Egilsson, Ari Trausti Guðmundsson og Sigríður Mogensen (2022). *Staða og áskoranir Íslands í orkumálum*. Tæknileg skýrsla. Starfshópur um áskoranir Íslands í orkumálum. Stjórnarráð Íslands: Umhverfis- orku og loftslagsráðuneytið. URL: https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit--skyrslur-og-skrar/St%C3%B6%C3%B0usk%C3%BDrsla%20%C3%A1skoranir%20%C3%AD%20orkum%C3%A1lum%2008032022.pdf.

Vollertsen, G.E., H.Ó. Andradóttir og H. Ingvarsdóttir (2009). „Removal of heavy metals in a wet detention pond“. Í: *Proceedings of the 11th Nordiske/NORDIWA Wastewater Conference*. Odense, Denmark.

Wang, Kun, Xianghua Peng, Bo Dan, Haiwen Liu, Shanjun Cheng, Ning Fu, Hongli Fu og Cong Liu (2023). „Decreased Aircraft Takeoff Performance under Global Warming“. Í: *Atmosphere* 14.1. DOI: 10.3390/atmos14010106.

Zaqout, Tarek, Halla Ólafsdóttir Andradóttir og Ólafur Arnalds (2022). „Infiltration capacity in urban areas undergoing frequent snow and freeze-thaw cycles: Implications on Sustainable Urban Drainage Systems“. Í: *Journal of Hydrology* 607, bls. 127495. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127495.

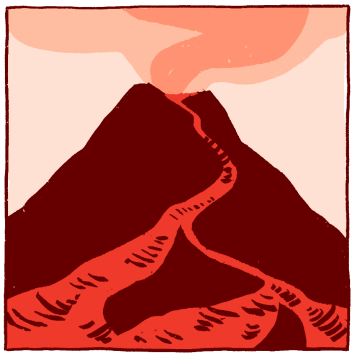
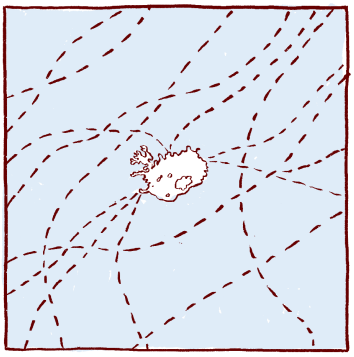
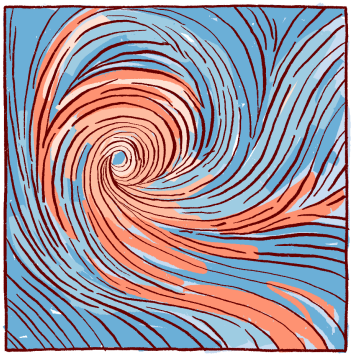
Zaqout, Tarek, Hrund Ólöf Andradóttir og Johanna Sörensen (2023). „Trends in soil frost formation in a warming maritime climate and the impacts on urban flood risk“. Í: *Journal of Hydrology* 617, bls. 128978. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128978.

Zaqout, Tareq og Halla Ólafsdóttir Andradóttir (2021). „Hydrologic performance of grass swales in cold maritime climates: Impacts of frost, rain-on-snow and snow cover on flow and volume reduction“. Í: *Journal of Hydrology*, bls. 126159. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126159.

KAFLI

10

ÁHÆTTUR, NÁTTÚRUVÁ OG ÁSKORANIR ÞVERT Á LANDAMÆRI

Efnisyfirlit kafla

10.1 Inngangur 310
10.2 Áhætta – helstu hugtök 310
10.2.1 Tegund áhættu 312
10.3 Flókin og kerfislæg áhætta í íslensku samhengi 313
10.3.1 Áhrif loftlagsbreytinga á samsetningu þjóða 316
10.3.2 Áhrif loftslagsbreytinga á alþjóðleg viðskipti og völuflutninga 317
10.3.3 Áhrif loftslagsbreytinga á fæðukerfi 317
10.3.4 Samantekt um flókna og kerfislæga áhættu í íslensku samhengi 318
10.4 Náttúruvá – bein áhætta 319
10.4.1 Einstakir áhættuþættir 319
10.4.2 Aftakaveður 320
10.4.3 Flóð í ám 321
10.4.4 Sjávarflóð 322
10.4.5 Ofanflóð 325
10.4.6 Gróðureldar 326
10.4.7 Eldgos 326
10.5 Stýring áhættu vegna loftslagsbreytinga 327
10.5.1 Viðbrögð við kerfislægri áhættu 327
10.5.2 Áhættustýringar og náttúruvá 329
10.5.3 Viðbrögð við beinni áhættu 329
10.5.4 Almenn atriði varðandi áhættustýringu 330

Samantekt

1. Íslenskt samfélag kann að vera berskjaldað gagnvart flókinni kerfislægri áhættu sem tengist afleiðingum loftslagsbreytinga. Slíkar áhættur kunna m.a. að vera til staðar í matvæla- og fjármálakerfum og aðfangakeðjum. Ónægar rannsóknir hafa farið fram á þessu og mikilvægar upplýsingar vantar.

2. Íslenskt samfélag kann að verða fyrir afleiðingum loftslagsbreytinga í fjarlægum löndum, sem m.a. getur birst í komu loftslagsflóttamanna. Yfirleitt eru margar ástæður fyrir því að aðstæður heima fyrir verða það óbærilegar að fólk leggi á flótta, en vitað er að loftslagsbreytingar geta haft áhrif.

3. Þörf er á átaki til þess að greina flókna kerfislæga áhættu vegna áfalla utan landsteina á íslenskt samfélag. Þessi áhætta er illa þekkt en í ljósi tjónnæmis og varnarleysis samfélagsins gagnvart hættunni kann hún þó að vera mikil.

4. Hnattræn hlýnun kann að draga úr tíðni fyrirstöðuhæða við Grænland að vetri sem gæti aukið lægðagang til Íslands og álag vegna óveðra.

5. Þó að vindhraði minnki að meðaltali á miðlægum breiddargráðum kunna vindar við yfirborð að aukast norðan og vestan við landið, þar sem áhrifa samdráttar hafísþekju gætir. Þetta getur aukið hættu á foktjóni á landi.

6. Rakaelfur og úrkomukerfi sem fara hægar yfir geta aukið úrkomu og flóðahættu.

7. Líklegt er að aftakaúrkoma aukist í takt við hlýnun sem getur aukið álag á fráveitukerfi og valdið flóðum.

8. Flóð í ám munu taka breytingum við aukna úrkomu og bráðnun jökla.

9. Ný jaðarlón munu myndast og nýr áhættuþáttur er hættan á berghruni í jaðarlón.

10. Bráðnun sífrera og hop jökla getur gert hlíðar óstöðugar tímabundið. Umtalsverðar rannsóknir á þessari vá á síðustu árum sýna að tíðni skriðufalla hefur aukist þó ekki verði þau öll rakin til loftslagsbreytinga.

11. Gróðurfarsbreytingar samfara loftslagsbreytingum og minnkandi beit hafa í för með sér aukna hættu af gróður- og skógareldum ef til þurrka kemur. Einungis virðist tímaspursmál hvenær útbreiddur gróðureldur veldur alvarlegu tjóni í byggð.

12. Með hækkandi sjávarstöðu mun hætta vegna sjávarflóða aukast. Lagt hefur verið mat á útbreiðslu verstu flóða við núverandi aðstæður og að gefnum sviðsmyndum um loftslagsbreytingar og bráðnun jökla.

13. Fargléttíng vegna bráðnunar jökla eykur, að öðru óbreyttu, kvikumyndun í jarðskorpunni sem kann að leiða til stærri eða tíðari eldgosa.

14. Á Íslandi hefur skapast víðtæk þekking og reynsla varðandi viðbrögð við náttúruvá. Mikilvægt er að áhættustýringu sé beitt og hún taki mið af áhrifum loftslagsbreytinga. Þannig er hægt að draga úr líkum þess að alvarlegt tjón verði.

15. Eðlilegt er að viðbrögð vegna aukinnar náttúruvár verði skipulögð í tengslum við áhættustýringu á núverandi vá og aðgerðir til þess að mæta henni efldar.

16. Mikilvægt er að horft sé til aukinnar náttúrvár við gerð skipulags.

10.1 Inngangur

Í fyrri skýrslum vísindanefndar er fjallað um náttúruvá á Íslandi og áhættustýringu (sjá grein 4.6 í V2008 og kafla 12 í V2018). Einstakir atburðir á síðustu árum hafa beint athyglinni sérstaklega að samfélagslegu tjóni vegna náttúruvár og viðbragðsgetu vegna þess (Forsætisráðuneytið, 2019). Í ljósi áhrifa loftslagsbreytinga á náttúruvá (Seneviratne o.fl., 2021) hefur skilningur aukist á mikilvægi þess að bæta áfallaþol þjóðfélagsins. Einnig hefur athyglin beinst að flóknum og kerfisbundum áhættu. Orsakir þeirra geta verið af innlendum toga en ekki síður tengdar áhrifum loftslagsbreytinga utan landsins. Sem dæmi má nefna að hitabylgjur og þurrkar hafa haft áhrif á fjölda flóttamanna (Abel o.fl., 2019) og að veðuröfgar hafi truflað aðfangakeðjur örgjörvaframleiðslu (Kamasa, 2021). Skilningur á þeirri vá sem fylgir áhættu þvert á landamæri hefur aukist vegna Covid-19 heimsfaraldursins og vegna stríðsátaka í Úkraínu. Kerfislæg áhætta og áhætta þvert á landamæri eru ólíkar þeirri áhættu sem fjallað var um í fyrri skýrslum, og sem stafaði af einstökum atburðum á Íslandi. Eftir sem áður er margt sammerkt við mat á þessum ólíku áhættum auk viðbragaða og áhættustýringu.

Í þessum kafla verður leitast við að beita samskonar nálgun á þessar ólíku tegundir áhættu. Fyrst verða hugtök tengd áhættu og áhættustýringu útskýrð. Næst verður rætt um kerfisbundna áhættu, m.a. eins og hún birtist í fjármálageiranum, og síðan verður rætt um áhættu þvert á landamæri. Þá verður fjallað um náttúruvá og einstaka áhættuþætti á Íslandi. Í lokin verður fjallað um viðbrögð og áhættustýringu þessara ólíku þátta.

Þessi kafli byggir að hluta á upplýsingum sem komu fram komu fram á málstofum sem vísindanefndin hélt árið 2022. Sérstaklega má nefna að grein 10.2 byggir á erindum Láru Jóhannsdóttur og Sigrúnar Karlsdóttur, grein 10.3 byggir á erindum Mikaels Mikaelssonar Önnu Karlsdóttur, Fridu Lager og Ólafs Ögmundarssonar, grein 11.6 byggir á erindi Ásdísar Hlakkar Theódórsdóttur.

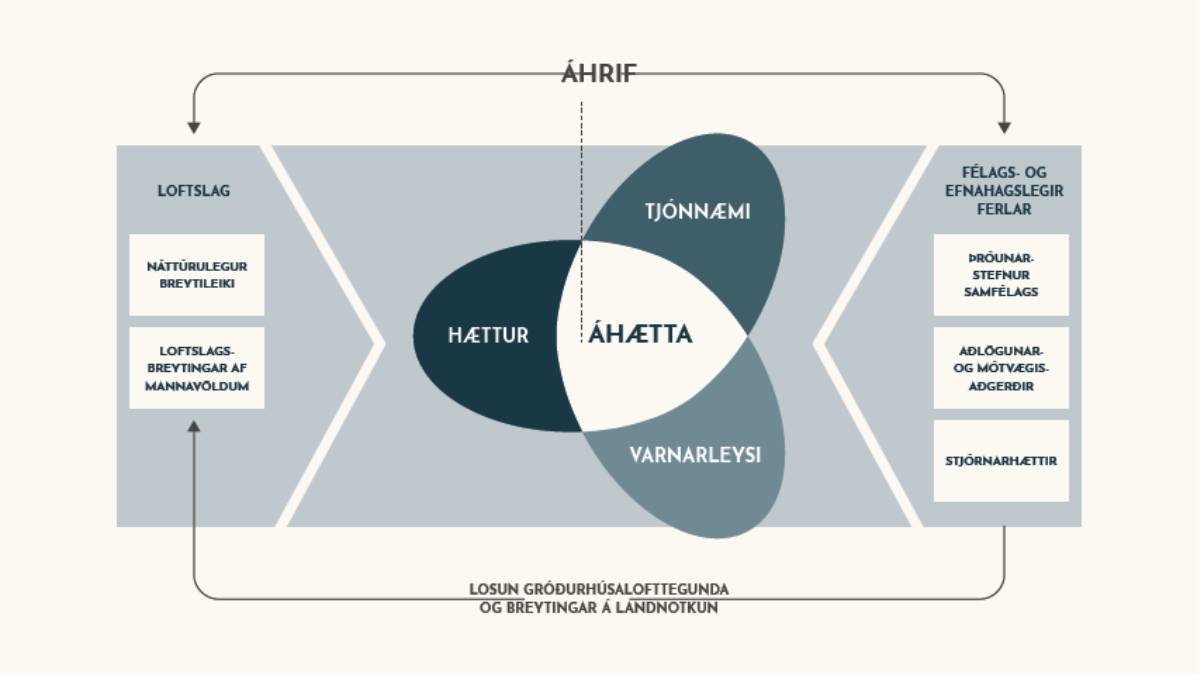
10.2 Áhætta – helstu hugtök

Í skýrslu V2008, grein 4.6.2, er rætt um áhættustýringu vegna loftslagsbreytinga og hugtök útskýrð í sérgrein 4A. Sú nálgun byggir á vinnu Sameinuðu þjóðanna, en samtal þeirra um það hvernig auka megi þekkingu á náttúruvá og finna leiðir til þess að draga úr henni hefur leitt til staðlaðrar hugtakanotkunar. Í því samhengi hafa Sameinuðu þjóðirnar einnig mótað vinnubrögð sem hafa að miklu leyti verið tekin upp af viðbragðsaðilum á Íslandi. Í þessari skýrslu er byggt á yfirliti sem Loftslagsráð birti árið 2020 (Magnús Örn Sigurðsson, 2020). þar sem viðeigandi hugtök voru tekin saman. Auk þess er byggt á orðasafni Almannvarna (*Hugtök og skilgreiningar* án árs) og tillögum að áhættuviðmiðum fyrir vatnsflóð (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022). Samhengi helstu hugtaka er sýnt á mynd 10.1 sem byggir á mynd úr skýrslum IPCC (Oppenheimer o.fl., 2015).

Hætta (*e. hazard*) eða **vá** er sá möguleiki að atburður eða þróun eigi sér stað sem geti valdið manntjóni, líkamstjóni, heilsufarskvillum sem geta skaðað eða valdið tjóni á eignum, innviðum, lífsviðurværi, þjónustu, vistkerfum og auðlindum.

Varnarleysi (*e. exposure*) eða **berskjöldun** lýsir því þegar fólki, lífsviðurværi, lífverum eða vistkerfum, náttúrulegum ferlum, þjónustu og auðlindum, innviðum eða efnahagslegum, félagslegum eða menningarlegum verðmætum er stefnt í voða. Það fer eftir samhengi hvort eðlilegra mál sé að tala um *viðveru* eða *útsetningu* fyrir tjóni frekar en berskjöldun eða varnarleysi.

Tjónnæmi (*e. vulnerability*) vísar til stöðu eða fyrirkomulags sem bendir til að ákveðnar líkur séu á tjóni. Skylt orð er **tjónmætti** sem vísar til stærðar atburðarins en ekki mögulegs tjóns. Tjónnæmi vísar til þess sem váin beinist að en tjónmætti vísar til atburðarins. Hvað



Mynd 10.1: Skýringarmynd sem tengir lykilhugtök í umfjöllun um áhættu vegna áhrifa loftslagsbreytinga: hættu, tjónnæmi og varnarleysi og ytri þætti sem þeim tengjast úr skýrslu Loftslagsráðs (Magnús Örn Sigurðsson, 2020)

einstaka atburði varðar fylgjast þessi hugtök ekki alltaf að. Þannig fylgir yfirleitt lítið tjónnæmi af stóru snjóflóði utan alfaraleiðar en tjónnæmi berskjaldaðra innviða getur verið verulegt jafnvel gagnvart litlu snjóflóði.

Áhrif (*e. impacts*) eða **afleiðingar**, er þegar fyrirbæri breytir skilyrðum fyrir líf manna og lífvera, t.d. heilsu, vistkerfum, efnahag, samfélögum, menningu, þjónustu eða innviðum. Í ljósi afleiðinga vegna loftslagsbreytinga er talað um **loftslagsvá** í tengslum við þau fyrirbrigði þar sem **loftslagstengt tjón** getur átt sér stað. Í öfgafullum tilvikum, þar sem afleiðingarnar eru af þeirri stærðargráðu að neyðarástand skapast, er talað um **loftslagshamfarir**.

Áhætta (*e. risk*) er það tjón sem ákveðin ógn veldur á tilteknu svæði yfir ákveðið tímabil. Áhætta er oft útskýrð sem samspil hættu, tjónmættis, tjónnæmis og varnarleysis og sett fram á stærðfræðilegan hátt sem margfeldi hættu (að teknu tilliti til tjónmættis) og tjónnæmis (að teknu tilliti til varnarleysis). Áhætta felur einnig í sér **óvissu** um áhrif og óformlega má lýsa henni sem samspili ógnar, veikleika og varna (sjá mynd 10.1).

Áhættuviðmið eru einnig kölluð **ásættanleg áhætta** (*e. acceptable risk*). Þau eru viðmiðunarmörk fyrir ásættanlega áhættu og eru mismunandi eftir eðli áhættunnar og hvernig tjóni hún getur valdið. Svo dæmi sé tekið eru ofanflóð vá sem í mörgum tilvikum veldur manntjóni. Viðmið um ásættanlega áhættu eru því allt önnur en t.d. fyrir sjávarflóð á hafnarsvæði sem getur valdið tryggjanlegu eignatjóni en er ólíklegt að valda manntjóni. Áhættuviðmiðin taka því mið af samfélagsaðstæðum. Aðgerðir til að draga úr áhættu eru oft kostnaðarsamar og áhættuviðmiðin leiðbeina um hversu miklu er ráðlegt að kosta. Ákvörðun um áhættuviðmið er stjórnmálalegs eðlis og endurspeglar bæði verðmætamat, viðhorf og aðstæður í þjóðfélagi.

Áhætta byggist á líkum á þess að ákveðinn atburður gerist og afleiðingum hans. Það byggir því á mati á hættu og afleiddum samfélags- og efnahagslegum afleiðingum. Það gerir samfélögum kleyft að meta þörf á aðlögunaraðgerðum og hjálpar til við forgangsröðun þeirra. Þegar reynt er

að stýra áhættu er ekki einungis reynt að draga úr hættu, tjónnæmi og varnarleysi heldur þarf líka að huga að því hversu vel samfélög ráða við áföll.

Áfallaþol eða **viðnámsþróttur** (*e. resilience*) hefur verið skilgreint sem geta kerfis eða samfélags sem stendur andspænis hættu, til þess að forðast, draga úr eða komast yfir áföll vegna hvers konar vár, með viðbúnaði jafnt sem fyrirbyggjandi aðgerðum eða viðbrögðum. Orðin þol, þanþol eða seigla hafa einnig verið notuð yfir þetta hugtak. Áfallaþol segir til um möguleika samfélags til að takast á við, jafna sig á og komast yfir hamfarir með viðbúnaði. Til dæmis spám um náttúruhamfarir, innviðum almannavarna, tryggingum og varnaraðgerðum, svo sem varnargörðum.

Hugtökin hér fyrir ofan eru almenn hugtök tengd áhættu og stýringu hennar, en lýsa ekki tegund áhættunnar frekar. Á undanförnum árum hefur bæst við skilningur á mikilvægi þess að greina áhættu og athyglin færst frá einstökum atburðum yfir í flóknari áhættu sem kann að ná yfir kerfi, samfélög og á milli slíkra kerfa. Þegar kemur að áhættustýringu skiptir tegund áhættu því miklu máli.

10.2.1 Tegund áhættu

Algengt er að skipta áhættu í beina áhættu, flókna eða afleidda áhættu og kerfistengda áhættu. **Bein áhætta** er áhætta tengd einstökum atburðum. Í samhengi við loftslagsbreytingar er hún tengd einstökum áhrifum, svo sem vegna sjávarstöðuhækkunar eða aukinnar úrkomuákefðar. Mikill hluti umfjöllunar um náttúrvá, t.d. í V2008 og V2018 fjallar um þessa beinu áhættu sem oft er auðgreinanlegri en **óbein áhætta**, sem í mörgum tilvikum er bæði víðfeðm og flókin.

Flókin eða afleidd áhætta (*e. cascading risk*) er þegar horft er á áhættu sem hluta af stærra samhengi eða kerfi og því einn áhættuþáttur leiðir til frekari áhrifa annars staðar í kerfinu. Við mat á flókinni áhættu er mikilvægt að taka til greina áhrif á mismunandi berskjaldaða hópa eða á samfélagsinnviði. Tímarammi áhættu getur einnig haft áhrif á það hversu flókin áhrifin eru. Þannig getur áhætta safnast upp í samsetta áhættu þar sem heildaráhrifin magnast eftir því sem að atburðurinn gerist oftar, eða fleiri váatburðir gerast samtímis. Dæmi um samsetta áhættu er þegar aftakaúrkoma, hvassviðrði og sjávarflóð veldur rafmagnstruflunum og rofi á aðfangakeðjum.

Kerfislæg áhætta (*e. systemic risk*) er nátengd flókinni áhættu og lýsir því þegar áhætta felst í samspili þátta innan sama kerfis eða á milli kerfa. Orðið er stundum stytt í **kerfisáhættu** en mikilvægt er að hafa í huga að slík áhætta beinist ekki bara að einstökum áhættuþáttum heldur eiginleikum kerfisins. Í sumum kerfum getur einn atburður haft í för með sér keðjuverkandi áhrif (dóminó áhrif) og jafnvel leitt til kerfishruns að lokum. Greiningar á kerfislægri áhættu snúast oft að samfélagslega mikilvægum fyrirtækjum svo sem orkufyrirtækjum, efnaverksmiðjum, fjármála- og fjarskiptakerfum og þá metið hvað gerist ef þau falla (Roberts og Bea, 2001). Í tilvikum kerfislægrar áhættu er oft talað um **vendipunkta** (*e. tipping points*). Þeir lýsa hættumörkum ástands, ferlis eða kerfis þar sem óafturkræfar og hraðar breytingar geta átt sér stað, þróist kerfið umfram þessi mörk. Vendipunktar hafa verið ræddir í tengslum við loftslagsbreytingar (Lenton o.fl., 2019), til dæmis í tengslum við faraldra og fjármálakerfi. Í þeim tilfellum er hugtakið notað þegar afleiðingar geta verið alvarlegar og víðtækar, hvort sem þær eru efnahagslegar, félagslegar, tæknilegar eða í náttúrulegum kerfum (Schwarcz, 2008).

Á Íslandi hefur kerfislæg áhætta aðallega verið rædd í samhengi fjármálakerfa. Dæmi um umfjöllun um kerfislæga áhættu og kerfishrun á Íslandi er að finna m.a. í skýrslu rannsóknarnefndar Alþingis og víðar (Rannsóknarnefnd Alþingis, 2010; VB.is, 2011):

- .... engin ábyrgð aðildarríkis á innstæðutryggingakerfi sínu væri til staðar í tilviki kerfishruns (*e. system breakdowns*) (Rannsóknanefnd Alþingis, e.d., kafli 17, bls. 266).



Mynd 10.2: Dæmi um mismunandi kvarða áhættu.

- .... þeim sé ekki ætlað að standast kerfishrun heldur fyrst og fremst að takast á við fall einstakra, og þá minni og meðalstórra, banka (Rannsóknanefnd Alþingis, e.d., kafli 17, bls. 270).
- Kerfislæg áhætta fólst í gjaldþroti Sjóvár (fyrirsögn úr Viðskiptablaðinu, 9. desember 2011)

Áhætta vegna loftslagsbreytinga nær frá einstaklingum, fyrirtækjum, stofnunum og nærsamfélögum yfir í samfélags- og efnahagskerfi, lífríki og vistkerfi og getur jafnvel verið tilvistarlegs eðlis fyrir suma hópa (mynd 10.2). Loftslagsbreytingar hafa fjölþætt áhrif um allt samfélagið og því hefur færst í vöx að horfa á að horfa á áhrif loftslagsbreytinga sem kerfislæga áhættu (Sillmann o.fl., 2022; Dafermos, 2022).

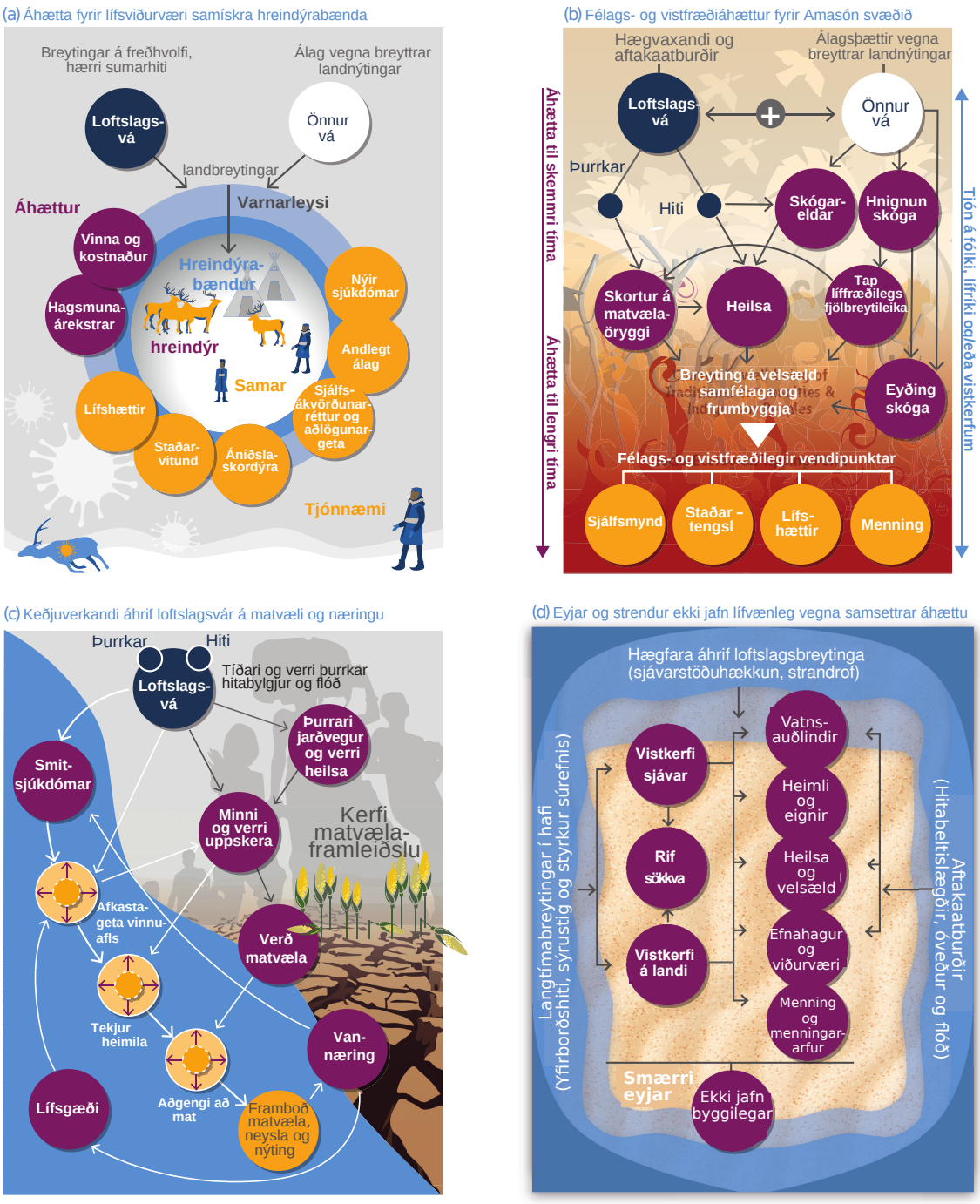
Mat á kerfisáhættu vegna loftslagsbreytinga er ekki einfalt vegna þessara víðtæku tenginga en greina þarf hvernig áhrif loftslagsbreytinga geta hrint af stað keðju atburða (Menk o.fl., 2022). Myndir 10.3 og 10.4 sýna dæmi um þessar flóknu tengingar og mögulega kerfislæga áhættu í tengslum við loftslagsbreytingar (Pörtner o.fl., 2022a). Myndirnar sýna að kerfislæg áhætta liggur frekar í tengslum þátta kerfisins en í einstökum áhættuþáttum.

10.3 Flókin og kerfislæg áhætta í íslensku samhengi

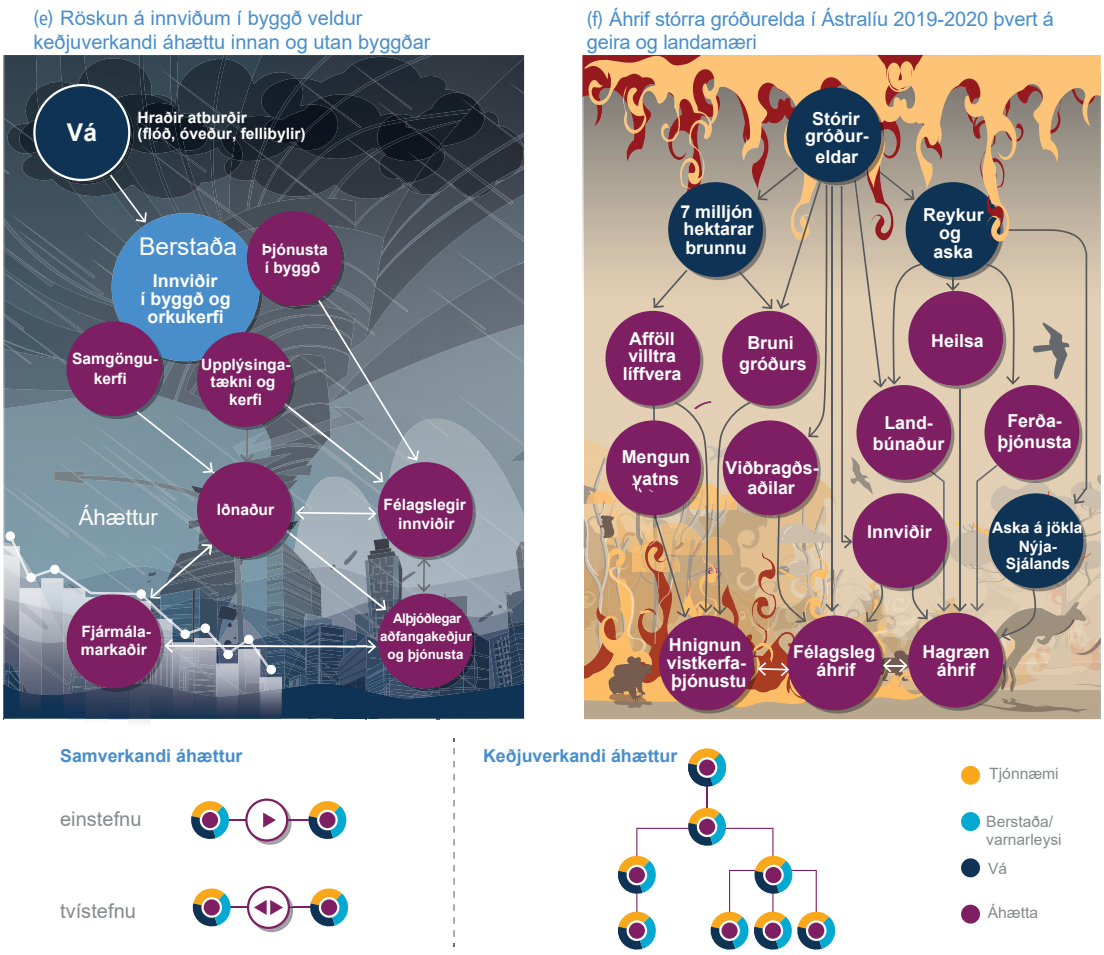
Loftslagsbreytingar virða engin landamæri og afleiðingar þeirra ekki heldur. Ónægur skilningur er á því hvernig loftslagsbreytingar og afleiðingar þeirra hafa áhrif á lönd og svæði sem tengd eru gegnum viðskipti, fólksflutninga, fjarskipti og árstíðabundnar ferðir dýrategunda, svo örfá dæmi séu nefnd. Í alþjóðavæddum heimi geta tengingar átt sér stað yfir langar vegalengdir. Ísland er afar háð tengingum við umheiminn og því er ljóst að það getur orðið fyrir áhrifum, neikvæðum sem jákvæðum, af atburðum og ferlum sem eiga sér stað í fjarlægum löndum.

Eins og fram kom í 10.2.1 hefur kerfislæg áhætta á Íslandi helst verið greind í tengslum við fjármálageirann. Hugtakið hefur þó líka verið skoðað í norrænu samhengi og áhættunni þá skipt í 6 flokka eftir mögulegum áhrifum: þjóðaröryggi, alþjóðaviðskipti, fólksflutninga, fæðuöryggi, heilsu og orkuöryggi (Chatham House, 2021). Hér verður fjallað um þrjá þessara flokka: fólksflutninga, fæðuöryggi og alþjóðaviðskipti.

Flókin víxlverkun loftslagsvár, tjónnæmis og varnarleysis leiðir til áhættu fyrir vistkerfi og samfélög. Áhættan er samsett, keðjuverkandi og gengur þvert á landamæri.



Mynd 10.3: Flókin áhætta: Samverkandi, flókin áhætta sem gengur þvert á landamæri hefur áhrif á vistkerfi og samfélög. Slík áhætta stafar af varnarleysi gagnvart flóknu samspili (i) margskonar loftslagsvár, og einnig þátta sem ekki tengjast loftslagi beint (sjá hluta a, b, c, d), (ii) margskonar tjónnæmi sem saman magnar afleiðingar áhættunnar (sjá hluta a, b, c) og (iii) margskonar áhrif/áhættur sem tvinnast saman og dreifast þvert á geira og landamæri (b, c, d, e, f, sjá einnig næstu mynd)



Mynd 10.4: Framhald af mynd 10.3. (Byggt á mynd TS.10 í Pörtner o.fl., 2022b)

10.3.1 Áhrif loftlagsbreytinga á samsetningu þjóða

Loftslagstengdir atburðir geta haft áhrif á ferli sem teygja sig þvert á landamæri í flóknu samspili umhverfisþátta auk pólitískra og efnahagslegra, samfélags- og menningarlegra þátta. Sem dæmi má nefna að margar ástæður geta gert aðstæður heima fyrir svo óbærilegar að fólk leggur á flótta. Í þeim tilfellum er oft talað um loftslagsflóttamenn, en undirliggjandi ástæður geta verið flóknari.

Fólksflutningar eru nefndir hér því ljóst er að loftslagsbreytingar og ýmis náttúruvá er þegar farin að hafa áhrif á fólkflutninga. Þar sem Norðurlöndin eru nátengd samfélags- og efnahagslega verður hér fjallað stuttlega um lýðfræðilega þætti loftslagsbreytinga í norrænu samhengi. Það sama á við um umfjöllun um aðföng og viðskipti, þ.m.t. matvæli og fæðuöryggi.

Rannsóknastofnunin NORDREGIO hefur á sinni könnu nokkur verkefni sem snúast að einhverju eða miklu leyti um lýðfræðilega þróun og búsetumynstur, náttúruvá og afleiðingar loftslagsbreytinga þvert á landamæri. Þá einkum í landfræðilegu samhengi Norðurlandanna. Meðal þeirra er þverfaglegt samvinnuverkefni náttúru- og félagsvísinda sem fjallar um bráðnun sífrera og afleiðinga þess á samfélög á norðurslóðum (NUNATARYUK, 2022, 2017). Á Norðurskautssvæðinu búa um 5 milljónir manna í um 1200 samfélögum sem eru byggð á sífrera. Stór hluti þeirra mun verða fyrir mikilli röskun á lífi sínu vegna bráðnunar sífrerans sem hefur í för með sér eyðilagningu á undirstöðum húsa, vegum og öðrum innviðum (Jungsberg o.fl., 2019). Líklegt er að þessar breytingar muni ýta undir fólksflutninga, m.a. til Norðurlanda.

Við athuganir á lýðfræðilegri þróun á Norðurlöndunum, og á Íslandi sérstaklega, er ekki auðvelt að koma auga á tengingu fólksflutninga við afleiðingar loftslagsbreytinga. Orsakasamhengið er sjaldan augljóst og ýmsir aðrir þættir nærstæðari en loftslagsbreytingar. Dæmi um slíka þætti eru tækifæri til mennta og atvinnu, betri lífsskilyrði o.s.frv. Frá um 1990 hefur íbúum fjölgað á Norðurlöndunum, bæði vegna náttúrulegrar fjölgunar innan hvers lands og innflutnings fólks frá öðrum heimssvæðum. Ísland er í engu undanskilið þessu og fylgir sama mynstri og sést í nágrannalöndunum. Helsta einkenni þessarar þróunar er þéttbýlisvæðing sem talin er eiga eftir að halda áfram næstu ár (Grunfelder o.fl., 2020; Timothy Heleniak og Gassen, 2020; Karlsdóttir o.fl., 2020; T. Heleniak og Sanchés Gassen, 2019; Stjernberg og Penje, 2019; Karlsdóttir o.fl., 2018).

Erfitt er að greina hvort straumur loftslagsflóttamanna sé þegar að berast til Íslands. Ljóst er að lífsafkoma fólks á sumum hnattsvæðum verður sífellt ótryggari vegna neikvæðra áhrifa loftslagsbreytinga. Við það bætist aukin samkeppni um náttúruauðlindir, stríðsógnir og pólitískur órói sem veldur því að fleiri færa sig um set. Í þessu samhengi er oft talað um að loftslagbreytingar margfaldi aðrar ógnir (Huntjens og Nachbar, 2015). Það er því líklegt að meðal flóttamanna sem til Íslands koma í leit að öruggri afkomu sé fólk sem er á flótta undan afleiðingum loftslagsbreytinga á lífsbjargir eða að flýja ástand þar sem loftslagsbreytingar eiga einhverja sök á aðstæðum.

Mikilvægt er að hafa í huga að fólksflutningar til Norðurlanda tengjast einnig þörf fyrir vinnuafli þar. Norðurlöndin eiga það sameiginlegt að leggja ríka áherslu á græn umskipti en þeim tengist aukin mannaflaþörf í grænum iðnaðarverkefnum. Það er því ljóst að þar kann að vanta þúsundir starfsfólks á næstu árum sem gæti kallað á aukinn innflutning fólks.

Hvað áhrif loftslagsbreytinga varðar þarf einnig að skoða áhrif aðgerða gegn loftslagsvá. Annars vegar þarf að greina á milli áhrifa loftslagsbreytinga á samfélög, byggðaþróun og skipulag, þ.e. náttúrutengdar breytingar. Hins vegar þarf að skoða hvaða áhrif stefnumótun og pólitískar aðgerðir í loftslagsmálum hafa á ólíka hópa og samfélög og hegðunarmynstur fólks. Ávallt þarf að taka mið af réttlátum umskiptum þegar stjórnvöld marka stefnu í átt að grænna hagkerfi og samfélagi. Huga þarf að afdrifum ólíkra hópa, starfsstétta, fólks í þéttbýli og dreifbýli, mismunandi aldurshópa o.s.frv. Mikilvægt er að leitast við að ná jafnvægi milli ábata og ama svo einstakir hópar séu ekki ósáttir eða beri skarðan hlut. Sem dæmi má nefna að tryggja staðbundinn hagnað af umskiptum í endurnýjanlega orkuframleiðslu (Cedergren o.fl., 2022; Karlsdóttir, 2022).

10.3.2 Áhrif loftslagsbreytinga á alþjóðleg viðskipti og völuflutninga

Norræna ráðherranefndin stóð nýlega fyrir rannsóknaverkefni þar sem loftslagstengdar áskoranir þvert á landamæri (*e. transboundary climate risk*) á Norðurlöndunum voru skoðaðar (NKL, 2022). Covid-faraldurinn og eftirmálar hans hafa dregið fram áhættuþætti í hnattrænum aðfangakeðjum og sýnt fram á að Norðurlöndin geta orðið fyrir áhrifum vegna atburða fjarri þeim. Loftslagsbreytingar geta haft neikvæð áhrif á hagræna ferla á einum stað og valdið með því truflun á viðskiptum og öflun aðfanga á öðrum stað. Slík kerfisáhætta er iðulega flókin og erfitt getur verið að henda reiður á orsakasamhenginu.

Mikilvægt er að gera sér grein fyrir að loftslagsáhætta þvert á landamæri varðar ekki aðeins beinar afleiðingar loftslagsbreytinga heldur líka til hvaða aðgerða þjóðríki þurfa að grípa til þess að bregðast við þeim. En þær aðgerðir geta haft áhrif langt út fyrir landamæri. Dæmi um slíkt eru útflutningshömlur í kjölfar uppskerubrests (Anisimov og Magnan, 2023).

Náttúruleg áhrif loftslagsbreytinga ganga oft þvert á landamæri og það sama gildir um áhrif aðgerða á náttúrukerfi. Ýmis viðskiptakerfi, m.a. fjármálakerfi búa einnig við áhættu þvert á landamæri. Aðfangakeðjur, meðal annars hvað varðar eldsneyti, tæki, tækni, fjármagn og flutninga einkennast af flæði þvert á landamæri víða um heim. Þessar aðfangakeðjur geta auðveldlega geta orðið fyrir röskun vegna loftslagsbreytinga á fjarlægum svæðum. Dæmi um slíkt er öflun nauðsynlegra málma og íhluta frá fjarlægum slóðum sem nýttir eru til framleiðslu á tæknivörum á öðrum svæðum. Skemmst er að minnast flóða í Bankok sem höfðu áhrif á framleiðslu íhluta í tölvur í Japan sem í kjölfarið höfðu áhrif á framleiðslukeðjur víða um heim (Anisimov og Magnan, 2023).

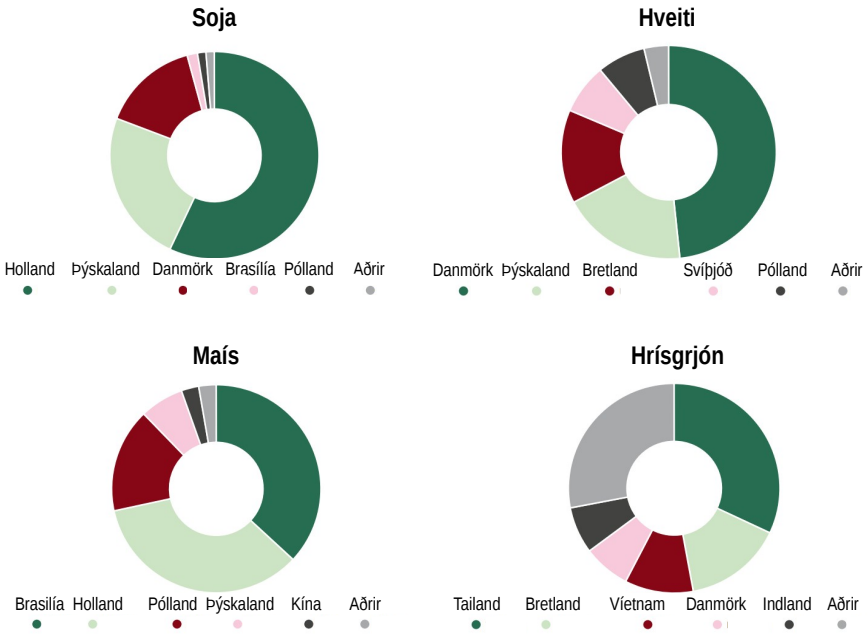
Ekki eru til aðgengilegar greiningar á aðfangakeðjum til Íslands. Þó er vitað að þær geta verið viðkvæmar fyrir truflun þar sem innflutningur er rakinn til tiltölulega fárra landa. Auk þess er umsjón og ábyrgð á aðfluttum varningi á höndum fárra aðila. Það flækir greiningar á aðfangakeðjum að vörur eru oft raktar til síðasta ríkis sem þær fóru um en ekki til upprunalands þeirra, sbr mynd 10.5. Vegna skorts á upplýsingum fyrir Ísland er það oftast skoðað í samhengi við hin Norðurlöndin, enda aðstæður um margt líkar (sjá t.d. NKL, 2022).

Loftslagsáhætta þvert á landamæri er meiri eftir því sem þjóðir eru háðari tengslum við umheiminn hvað varðar lífsnauðsynlega hluti. Staða Íslands getur því verið viðkvæm gagnvart áföllum, hvort sem um er að ræða óvænta pólitíska og efnahagslega atburði eða raskanir af völdum loftslagsbreytinga. Hagkerfi landsins er lítið og opið og mjög háð innflutningi og útflutningi og það sama á við um hin Norðurlöndin. Sem dæmi má nefna um helmingur af öllum matvælum Norðurlandanna eru innflutt og einnig eru landbúnaðarkerfin háð aðföngum annars staðar frá, einkum hvað varðar eldsneyti, áburð og dýrafóður. Þar að auki eru Norðurlöndin háð aðfluttu vinnuafli í nánast öllum atvinnugeirum og er matvælaframleiðsla þar ekki undanskilin. Nánar er fjallað um landbúnaðargeirann í næstu grein.

10.3.3 Áhrif loftslagsbreytinga á fæðukerfi

Neysla Íslendinga er mjög háð innflutningi. Í skýrslu starfshóps um neyðarbirgðir (2022) kemur fram að fæðuöryggi á Íslandi sé m.a. háð innflutningi á aðföngum til innlendrar framleiðslu og innflutningi matvæla. Samkvæmt skýrslu norræns starfshóps um fæðuöryggi á Norðurlöndum(Ormstrup Vestergård o.fl., 2022) er innlend matvælaframleiðsla metin nærri helmingur af neyslu landsmanna. Mikill innflutningur neysluvarnings og aðfanga til hans þýðir að rúm 70% af útblæstri gróðurhúsalofttegunda af völdum neyslu Íslendinga fer fram erlendis (Clarke o.fl., 2017).

Þessar tölur um neyslu og losun gróðurhúsalofttegunda varpa ljósi á hið flókna net fæðukerfis Íslendinga og ljóst að það nær langt út fyrir landsteinana. Skýrt dæmi er notkun kjarnfóðurs í landbúnaði. Mjólk er ein mikilvægasta landbúnaðarafurð til manneldis hér á landi. Aukningu í mjólkurframleiðslu má fyrst og fremst rekja til aukinnar notkunar kjarnfóðurs í framleiðslunni. Kjarnfóður inniheldur sojamjöl og því er ljóst að mjólkurframleiðsla er háð innflutningi á sojamjöli



Mynd 10.5: Innflutningur til Íslands á nokkrum flokkum matvöru. Vörur eru oft raktar til þess ríkis þar sem þær síðast fóru um eða voru meðhöndlaðar en ekki upprunalands, t.d. hrísgrjón frá Danmörku og soja frá Hollandi. Slíkar upplýsingar rugla greiningu á áhættu vegna loftslagsbreytinga í viðskiptalegu samhengi. (Byggt á mynd 10 í NKL, 2022).

og annarri fóðurvöru (Erla Sturludóttir o.fl., 2021).

Lykilspurning fyrir matvælaöryggi tengt landbúnaði er hvað til bragðs skuli taka ef innflutningur á hráefni í dýrafóður bregst. Þó hér megi rækta gróffóður þarf til þess tæki og eldsneyti sem að stærstum hluta er innflutt. Spurningin snýr því líka að aðfangakeðjum fyrir innflutning sem landbúnaður er háður, s.s. tilbúins áburðar. Fiskeldi er einnig hluti af fæðukerfi Íslendinga sem háð er innfluttum aðföngum og því viðkvæmt fyrir rofi í aðfangakeðjum (Erla Sturludóttir o.fl., 2021).

Fyrirliggjandi gögn veita ekki heilstæða mynd af hinum mörgu þáttum fæðukerfis Íslendinga. Engum einum aðila er falið að halda utan um slíkar upplýsingar, þekking er dreifð um stofnanir og fyrirtæki og mikið um eyður. Vegna þessa er erfitt að leggja mat á möguleg áhrif loftslagsbreytinga á fæðukerfi Íslendinga en ofangreindar upplýsingar sýna þó að full ástæða er til að hafa varann á. Til þess að auka matvælaöryggi Íslands er mikilvægt að koma í veg fyrir sóun, gera fæðukerfið sjálfbærara og greina hversu mikið af innfluttum aðföngum megi framleiða hér á landi, m.a. í ljósi umtalsverðra beinna áhrifa loftslagsbreytinga á innlenda matvælaframleiðslu (sjá greinar 4.2 og 8.2).

10.3.4 Samantekt um flókna og kerfislæga áhættu í íslensku samhengi

Flókin og kerfislæg áhætta var ekki rædd sérstaklega í fyrri skýrslum vísindanefndar. Þar sem þetta er nýtt efni er við hæfi að draga saman helstu niðurstöður um flókna og kerfislæga áhættu sem verður að teljast veruleg í íslensku samhengi. Í fyrsta lagi má nefna innlenda kerfislæga áhættu sem getur stafað af áföllum innanlands sem hafa víðtæk áhrif. Dæmi um þetta eru sjávarstöðubreytingar sem geta haft áhrif á virði fasteigna á lágsvæði, það hafi áhrif á lánshæfi þeirra sem leiði til áhrifa á greiðslugetu eigenda og fjármálafyrirtæki. Flóknari áhætta getur verið fólgin í aðfangakeðjum vegna tenginga á milli fyrirtækja heimshorna á milli.

Áhrif loftslagsbreytinga á þjóðfélög og vistkerfi geta einnig teygt sig á milli landa. Veðuröfgar í einu landi geta haft áhrif á framleiðslu matvöru þar eða áhrif á framboð hráefnis til framleiðslu matvöru í öðru landi. Slíkt geti valdið verðhækkunum og þjóðfélagslegum óróa (Anisimov og Magnan, 2023). Hnignun vistkerfa eykst með loftslagsbreytingum og ágangi á þau. Neikvæð áhrif á lífsbjargir ýta undir fólksflutninga sem geta valdið verulegu álagi og þjóðfélagsóróa í móttökulöndum.

Kerfisbundnar og flóknar áhættur vegna áfalla utan landssteina hafa lítið verið skoðaðar á Íslandi og því erfitt að meta áhættuna. Það er því þörf á átaki til þess að greina hana til hlítar. Þó er ljóst að íslenskt þjóðfélag kann að vera mjög berskjaldað gangvart sumum þessara áhættuþátta, m.a. þeim sem tengjast matvælaframleiðslu innanlands. Þegar áhættan er metin þarf að hafa í huga að í sumum tilvikum kann hættan að þykja ólíkleg en ef til vill vaxandi vegna loftslagsbreytinga. Í ljósi tjónnæmis og varnarleysis þjóðfélagsins gagnvart hættunni kann áhættan þó að vera mikil.

10.4 Náttúruvá – bein áhætta

10.4.1 Einstakir áhættuþættir

Í nýlegri stöðutöku á áhættumati vegna náttúruvár (Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið, 2023) segir:

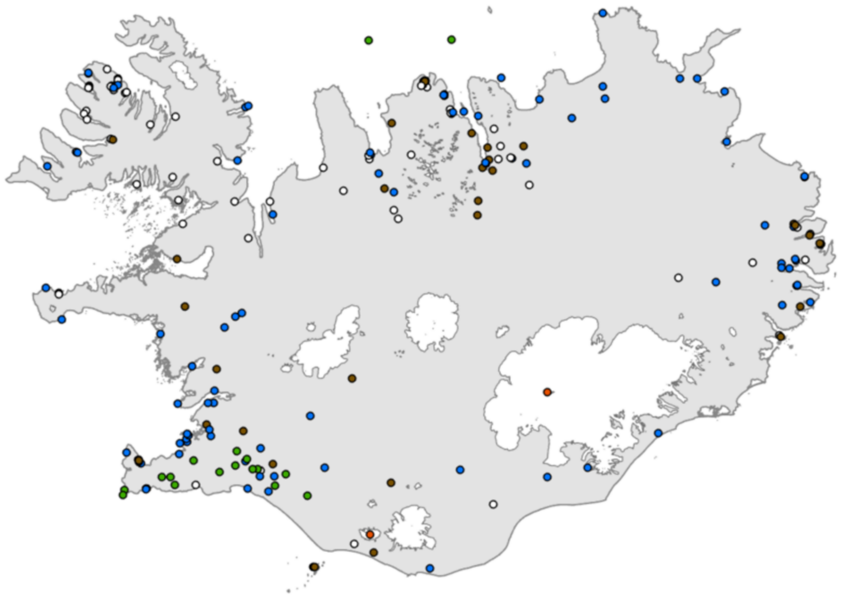
> *Heimsbyggðin stendur nú frammi fyrir afleiðingum loftslagsbreytinga, sem flokkast getur sem ein stærsta náttúruváin sem samfélagið þarf að takast á við. Búast má við aukinni tíðni ofsaveðra, aftaka úrkomu, þurrkum sem geta haft áhrif á tíðni gróðurelda, breytingar á sífrera og hopun jökla sem valdið geta auknum skriðum og berghlaupum, hopun jökla á eldvirkum svæðum getur jafnframt aukið tíðni eldsumbrota, breytingar á sjávarstöðu og margra afleiddra þátta s.s. fæðuöryggi.*

Ísland býr við margvíslega náttúruvá sem hefur í gegnum tíðina valdið miklu mann- og eignatjóni. Eins og rakið er í V2018 drógu breyttir útróðrarhættir, bætt veðurspá og skipuleg áhættustýring mjög úr manntjóni á sjó vegna óveðra á 20. öldinni. Auk þess sem efnahagsleg veðurtengd áhætta var meiri á tímum landbúnaðarþjóðfélags en nú er.

Ofanflóð (samheiti fyrir snjóflóð og skriður) er sú náttúruvá þar sem einstakir atburðir hafa valdið mestum mannskaða á Íslandi, en jarðskjálftar eru sú vá sem valdið hefur hvað mestu eignatjóni. Þá hafa eldgos valdið miklu tjóni frá því að land byggðist og geta eldgos nærri þéttbýli valdið miklu eignatjóni, samanber Vestmannaeyjagosið árið 1973 (Tómas Jóhannesson og Þorsteinn Arnalds, 2001a; Júlíus Sólnes o.fl., 2013).

Mynd 10.6 sýnir dreifingu tjóna sem Náttúruhamfaratrygging hefur bætt á undanförnum áratugum og greinilegt er að engir landshlutar eru undanskildir hvað náttúruvá varðar (Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið, 2023). Þrátt fyrir að þjóðfélagsbreytingar og áhættustýring hafi dregið úr sumum tegundum áhættu er nútímasamfélag á margan ákaflega berskjaldað. Samfélagið reiðir sig á mikilvæga innviði, t.d. raforkuframleiðslu og -dreifingu, samskiptakerfi og samgöngur. Í gegnum tíðina hafa verulegir annmarkar komið í ljós hvað varðar þol þessara innviða gagnvart óveðrum. Sem dæmi má nefna fárviðri í desember 2019 sem olli því að á sumum svæðum lögðust samgöngur af og atvinnulíf lamaðist auk þess sem verulegar truflanir í flutningskerfi leiddu til áhrifa á fjarskiptakerfi (Stjórnarráðið, 2023).

Í kafla 12 í V2018 er rætt um einstaka áhættuþætti vegna náttúruvár. Eftirfarandi þættir voru ræddir og stuttlega farið yfir mat á áhrifum loftslagsbreytinga á þá: Hvassviðri og rigningarflóð, flóð í ám, sjávarflóð, ofanflóð, skógareldar og eldgos. Á síðustu árum hefur þekking á loftslagstengdri áhættu vegna þessara þátta aukist og er hún rædd hér að neðan.



Mynd 10.6: Staðsetning atburða sem Náttúruhamfaratrygging hefur bætt frá 1987 fram á mitt ár 2022. (Mynd byggð á gögnum NTÍ)

10.4.2 Aftakaveður

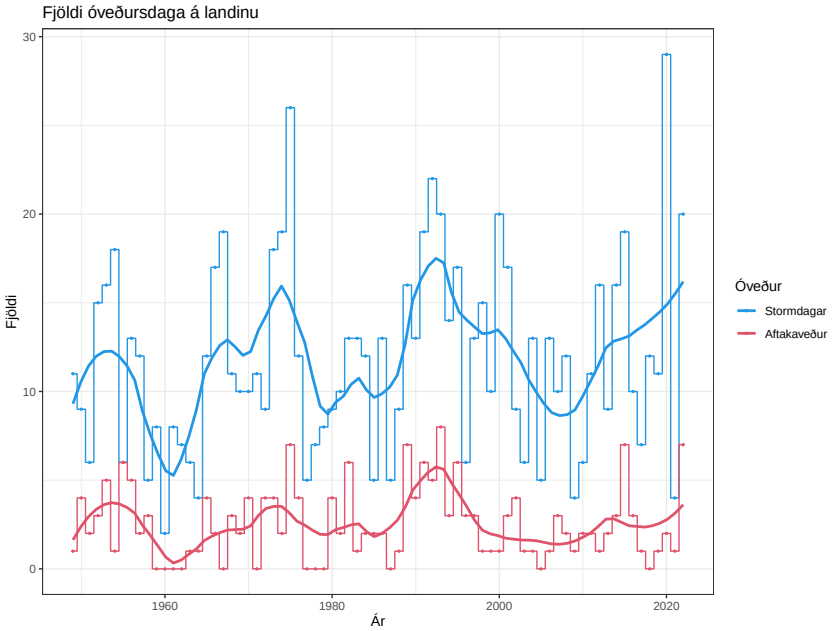
Eins og bent var á í grein 10.4.1 er þanþol íslensk þjóðfélags gagnvart aftakaveðri nú meira en á tímum landbúnaðarþjóðfélags og eldri útróðrarhátta. Eftir sem áður hefur nútímaþjóðfélag reynst berskjaldað fyrir óveðrum sem raska starfsemi mikilvægra innviða.

Ísland er hvassviðrasamt og foktjón hér á landi tiltölulega algengt, en fjöldi óveðursdaga á Íslandi sveiflast verulega milli ára og áratuga. Mynd 10.7 sýnir árstalningu á stormdögum (dögum þar sem vindhraði fer yfir 20 m/s á a.m.k. 25% veðurstöðva) og dögum með aftakaveðri (þar sem hlutfall stöðva er a.m.k. 45%) . Myndin, sem er endurgerð á mynd 12.2 í V2018, sýnir áratugalangar sveiflur á fjölda stormdaga, en sú litla langtímahneigð sem sést í fjölda þeirra (ársauking um 3 daga á 70 árum) er ekki tölfræðilega marktæk. Álíka sveiflur (og engin marktæk hneigð) sjást í fjölda aftakaveðra. Síðustu ár hafa þó verið óvenju óveðrasöm samkvæmt þessari talningu.

Á liðnum áratugum hefur líklega dregið úr styrk yfirborðsvinds yfir landi á hnattræna vísu en gagnasöfn sýna misvísandi niðurstöður yfir sjó. Mikilvægt er að hafa í huga að á svæðum þar sem hafísþekja minnkar eykst vindur að jafnaði og á þetta m.a. við svæði nærri Íslandi. Þannig eru merki um að vindur hafi aukist austan Grænlands (Gulev o.fl., 2021, sjá mynd 2.19). Dragi áfram úr útbreiðslu hafíss getur það aukið vindhraða í norðan- og norðvestanáttum. Í AR6 kemur fram að norður af 60°N séu ummerki um að styrkur aftakavinda hafi aukist þó reyndar sé *lítil vissa* fyrir aukingunni.

Annað atriði sem hefur áhrif á gang lægða við Ísland eru fyrirstöðuhæðir. Ólíkar samantektir um breytingar í tíðni fyrirstöðuhæða gefa mismunandi niðurstöður (sjá grein 8.3.2.7 í Douville o.fl., 2021). Nærri Grænlandi hefur tíðni fyrirstöðuhæða þó aukist að sumarlagi og vísbendingar eru um að breytingar á hitamun milli norðurslóða og hlýrri breiddargráða hafi breytt loftstraumum í háloftum þannig að fyrirstöðuhæðir og langvarandi afbrigði í veðri (t.d. hitabylgjur) aukist (Coumou o.fl., 2015; Kornhuber o.fl., 2020). Þó breytingar á fyrirstöðu hæðum séu almennt ekki marktækar geta fyrirstöðuhæðir yfir Grænlandi haft áhrif á lægðagang til Íslands. Niðurstöður sviðsmyndareikninga benda til þess að þeim geti fækkað að vetri til í framtíðinni, en IPCC telur *miðlungs vissu* fyrir fækkun fyrirstöðuhæða yfir Grænlandi að vetri (Lee o.fl., 2021, sjá mynd 4.28).

Á síðustu árum hefur athyglin beinst að rakaelfum *(e. Atmospheric Rivers)* en þær eru



Mynd 10.7: Fjöldi óveðursdaga á Íslandi á hverju ári frá 1949. Til að dagur teljist stormdagur þarf vindhraði að fara yfir 30 m/s á a.m.k. 25% veðurstöðva. Ef hlutfallið fer yfir 45% telst það aftakaveður.

rakar vindrastir í háloftunum sem geta borið vatnsgufu langar leiðir og valdið miklum rigningum. Haustið 2017 voru mikið um fellibyli á Norður-Atlantshafi og gætti áhrifa rakaelfa á hafsvæðinu, og m.a. urðu þá umtalsverð flóð austan lands og sunnan. IPCC telur *mikla vissu* fyrir því úrkoma tengd rakaelfum muni aukast með hlýnun (Douville o.fl., 2021; Seneviratne o.fl., 2021).

Í greinum 2.1.3.1 og 3.2.3 var fjallað um aftakaúrkomu og sérstaklega mestu úrkomu hvers sólarhrings (RXD1) og mestu fimm daga uppsafnaða úrkomu (RXD5). Síðari stærðin tengist hraða lægða sérstaklega, en hægfara kerfi geta skilað meiri úrkomu. Sárlega vantar rannsóknir á hraðabreytingum lægðakerfa á miðlægum breiddargráðum. Þó er vitað að hægfara kerfi tengjast samsettri áhættu þar sem nokkrir áhættuþættir fara saman (Sjá umfjöllun í 10.2.1 auk Seneviratne o.fl., 2021; Raymond o.fl., 2020).

Niðurstöður um tíðni óveðra má draga saman af eftirfarandi hátt. Þrátt fyrir hnattræna tilfærslu lægðabrauta í átt að pólsvæðum er ekki líklegt að slík tilfærsla eigi sér stað á Norður-Atlantshafi. Breytingar á tíðni fyrirstöðuhæða við Grænland gætu haft áhrif á tíðni lægða á Íslandi, en það fer eftir styrk þeirra og staðsetningu. Ekki er loku fyrir það skotið að færri fyrirstöðuhæðir við Grænland að vetri til leiði til aukins lægðagangs hérlendis. Yfirborðsvindar munu líklega verða sterkari við norður og vestur af landinu þar sem dregur úr hafís. Það getur haft áhrif á vindstyrk í norðanstæðum óveðrum. Líkanreikningar benda til þess að aftakaúrkoma geti aukist í takt við hlýnun, m.a. rakaelva og langvinnari úrkomukafla.

10.4.3 Flóð í ám

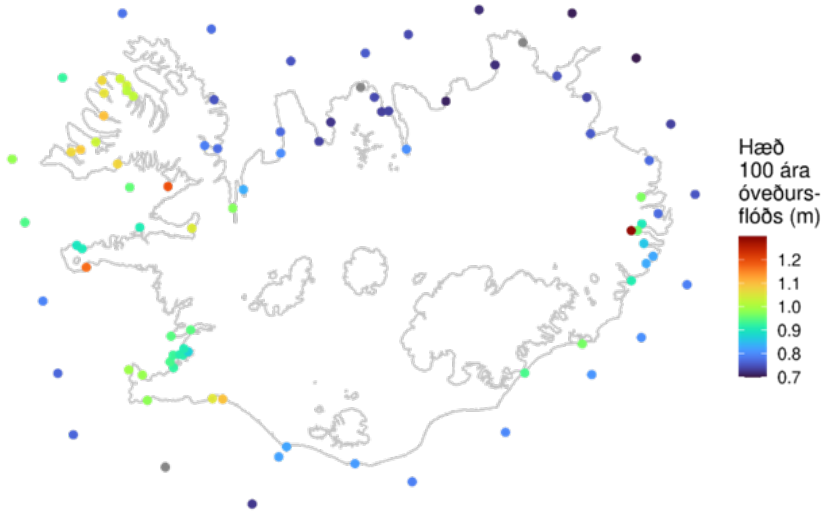
Fjallað er um flóð í ám í grein 12.2.1 í V2018 og í köflum 4.2 og 4.6 í V2008. Þar kemur fram að ásamt breytingum á flóðum vegna tíðari eða ákafari úrkomu skipta snjóalög og leysingar að vetri máli. Megináhersla fyrri vísindaskýrsla er að með hlýnun geti rigninga- og leysingaflóð færst ofar í landið og framar í árið. Á svæðum þar sem vorflóð eru nú algengari verði vetrarflóð algegnari. Þá er mikilvægt að hafa í huga að tíðni jökulhlaupa breytist líklega samfara því sem jöklar þynnast og hopa. Þetta er samhljóma umræðu í greinum 2.2.2 og 2.2.1, en þar er fjallað um þessar niðurstöður í meiri smáatriðum en í fyrri skýrslum. Eins bætir umfjöllun í 2.4 við fyrri skýrslur.

Niðurstaða samantekta í köflum 2 og 3 er sú að gera verður ráð fyrir meiri aftakaúrkomu og aukningu á árflóðum. Þá munu breytingar á hlutfalli rigningar og snævar í úrkomu hafa í för með sér tilfærslu flóða á milli árstíða. Tafla 3.9 sýnir að líkur á aftakaúrkomu sem nú telst sjaldgæf muni aukast. Tafla 2.3 sýnir samband stærðar sjaldgæfra flóða og algengari flóða. Af henni má ráða að mikilvægt sé að fylgjast með breytingum á stærð algengari flóða í ám því þær geti verið vísibending um líklegar breytingar á stærð sjaldgæfari flóða.

Mörg dæmi eru um jökulhlaup vegna eldgosa undir jöklum, úr jökulstífluðum lónum við jökuljaðra og undan jöklum. Umfang slíkra flóða mun taka breytingum í takt við massatap jökla. Aukin flóðahætta getur einnig tengst nýjum jaðarlónum en nýr áhættuþáttur er hættan á berghruni í jaðarlón sem getur valdið verulegu flóði. Í V2018 er m.a. rætt um slíkt flóð sem átti sér árið 1967 þegar stórt bergflóð féll á Steinsholtsjökul og í jaðarlón hans. Nýleg sprunga sem fannst í Svínafelli sýnir þá hættu sem kann að stafa af því að hrun falli á Svínafellsjökul og flóð verði frá jaðarlóninu sem myndast hefur fyrir framan jökulinn. Svæðið er ákaflega vinsælt meðal ferðamanna og byggð hefur verið upp aðstaða fyrir ferðamenn fyrir framan jökulöldunar á svæðinu.

10.4.4 Sjávarflóð

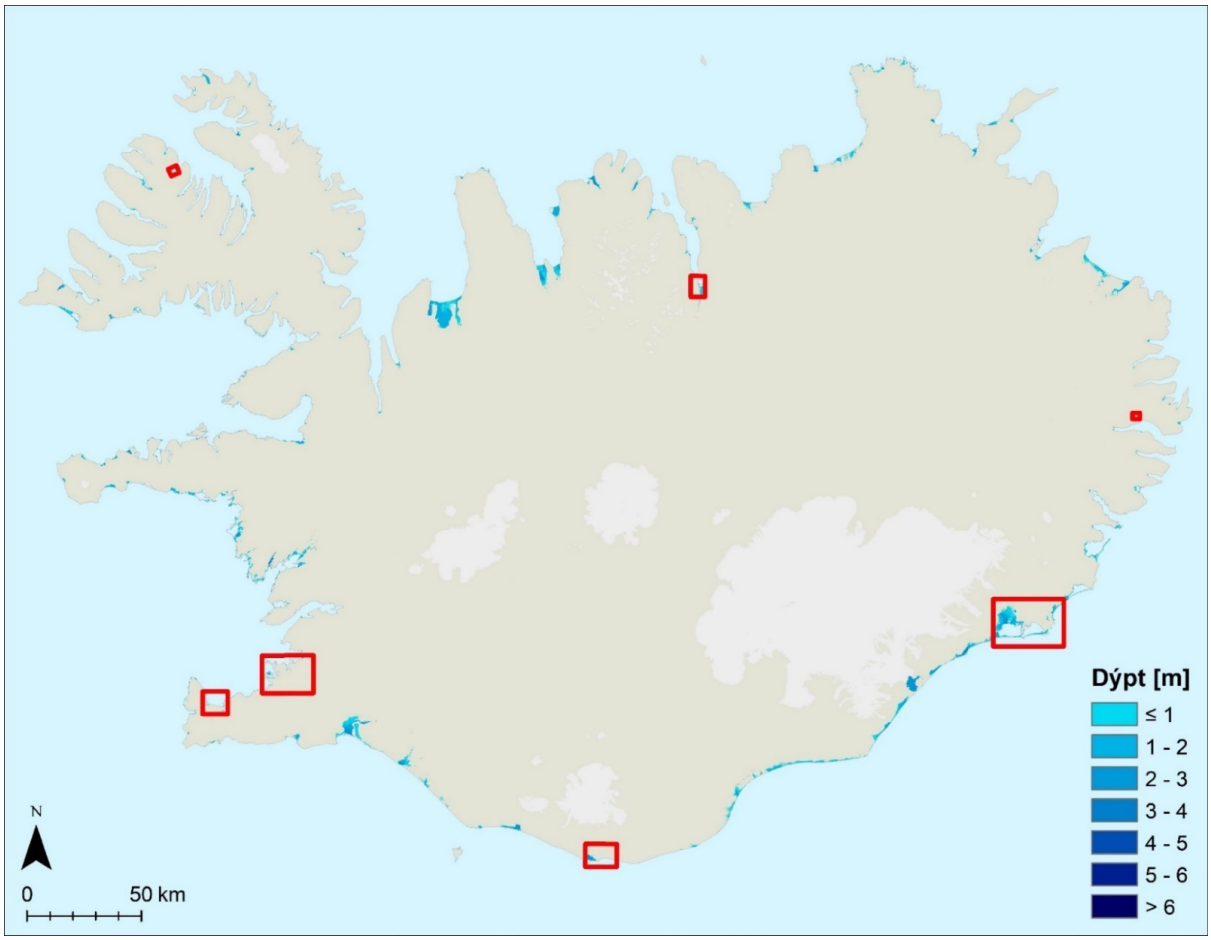
Grein 12.1.3 í V2018 fjallaði nokkuð ítarlega um stöðu þekkingar á sjávarflóðum á Íslandi; söguleg flóð, tíðni markverða flóða og alvarlegustu flóð. Ýmiss náttúrvá er þess eðlis að hægt er að meta hundrað ára gildi og fyrir aftakasjávarflóð er metið 100 ára flóð, eða sú flóðahæð sem hefur 1% árslíkur. Það þýðir þó ekki endilega að flóðið hendi á 100 ára fresti, t.d. eru rúmlega fjórðungslíkur á að 100 ára atburður hendi tvisvar á hverju 100 ára tímabili (sjá grein 12A í V2018).



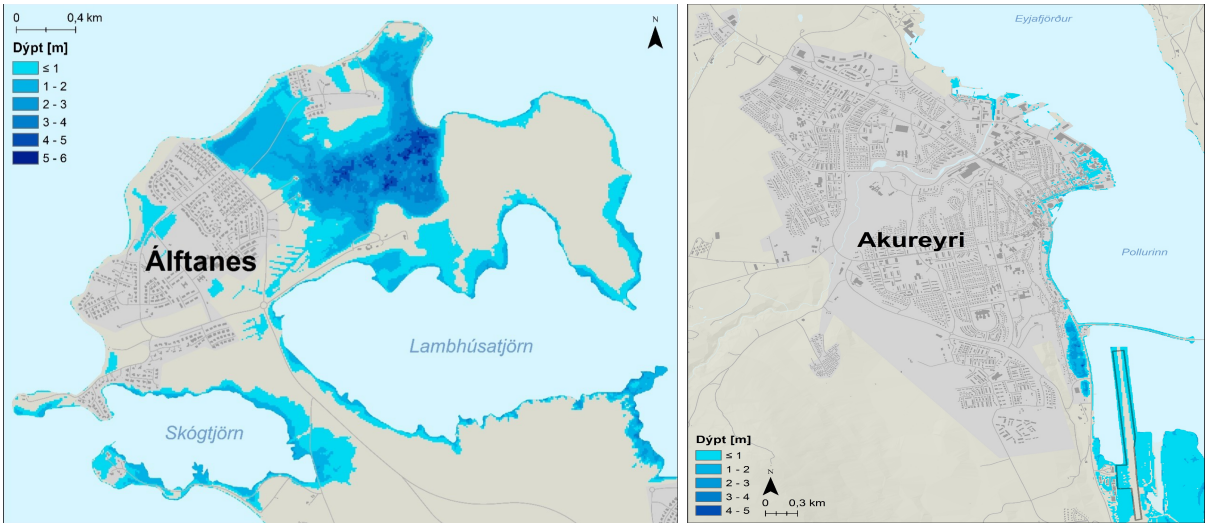
Mynd 10.8: Hæð flóðs með 1% árslíkur (100 ára flóð) umhverfis landið samkvæmt útreikningum með Delft3D-FM líkaninu. (Halldór Björnsson o.fl., 2022, mynd A7))

Þegar síðasta vísindaskýrsla kom út lá einungis fyrir gott mat á 100 ára flóðahæðar fyrir Reykjavík þar sem ekki voru til nægilega langar góðar mæliraðir til þess að vinna slíkt mat fyrir önnur svæði landsins. Nýlega kom út mat á hæð 100 ára flóða umhverfis landið byggt á líkanreikningum (Halldór Björnsson o.fl., 2022) og sýnir mynd 10.8 niðurstöður matsins fyrir reiknapunkta umhverfis landið. Eins og sjá má er hæð 100 ára óveðursflóðs um 1 m víða vestanlands en á bilinu 0.7 til 0.8 m við ströndina norðanlands og nær 0.9 m austan- og sunnanlands.

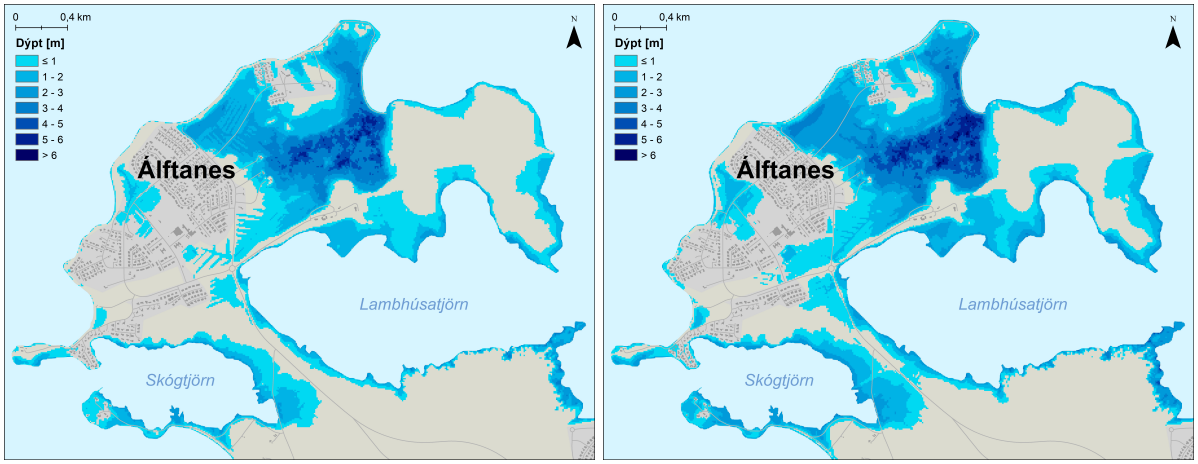
Til þess að leggja mat á hversu langt á land flóð af þessu tagi gengur var tekið tillit til sjávarfalla og líkur metnar á því að óveðursflóð af þessari stærðargráðu eigi sér stað nærri háflæði. Einnig var reiknað úr hversu langt á land flóð af þessari stærðargráðu geti náð en til þess var notað kort byggt á IslandDEM hæðargögnum (Landmælingar Íslands, 2020). Mynd 10.9 sýnir yfirlitsmynd yfir svæði í flóðahættu í 100 ára flóði við núverandi aðstæður. Eins og gefur að skilja mun 100



Mynd 10.9: Yfirlit um þau svæði þar sem 100 ára flóðið gengur nokkuð á land. (Halldór Björnsson o.fl., 2022, mynd 2).



Mynd 10.10: Svæði á Álftanesi og Akureyri sem geta flætt í 100 ára flóði miðað við núverandi sjávarstöðu (Halldór Björnsson o.fl., 2022, myndir 4 og 9).



Mynd 10.11: Svæði á Álftanesi sem geta flætt í 100 ára flóði árið 2150 eftir að sjávarstöðuhækkun samkvæmt sviðsmyndum SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC.

ára flóð aðeins ganga á land á láglendissvæðum. Eigi slíkt sér stað í byggðakjörnum getur það valdið vandræðum. Mynd 10.10 sýnir dæmi um flóðahættu í þéttbýli en með niðurstöðum rannsóknarinnar voru birt sambærileg kort fyrir alla byggðakjarna við strönd Íslands.

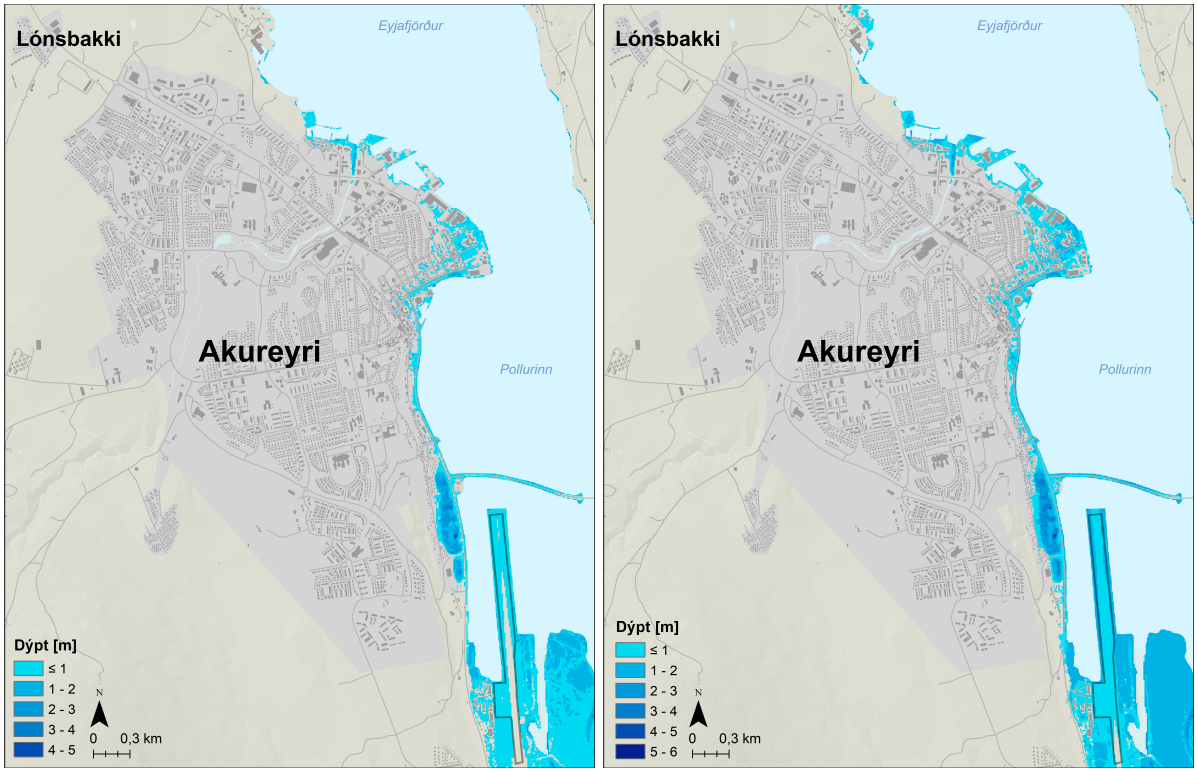
Í grein 2.5 voru sjávarstöðubreytingar við Ísland ræddar og töflur 2.10 og 2.11 sýndu mat á afstæðri sjávarstöðuhækkun fyrir 17 staði umhverfis landið í lok aldarinnar og árið 2150. Í nýlegri skýrslu (Halldór Björnsson o.fl., 2023) eru niðurstöður í grein 2.5 lagðar við flóðin á mynd 10.9 og útbreiðsla aftakaflóða árin 2100 og 2150 reiknuð fyrir tvær ólíkar sviðsmyndir og alla byggðakjarna við strönd Íslands. Dæmi um niðurstöður má sjá á myndum 10.11 og 10.12 sem sýna kort af útbreiðslu 100 ára flóðs á Álftanesi og Akureyri árið 2150 fyrir sviðsmyndir SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC. Þetta eru sviðsmynd mestu losunar og sviðsmynd þar sem viðbótarmassatap á sér stað Suðurskautslandi og Grænlandi sem leiðir til enn meiri sjávarstöðuhækkunar (sjá töflu 2.11). Myndin er af útreikningum fyrir árið 2150, en kortin sýna núverandi byggð og strandlínu.

Það kemur ekki á óvart að myndir 10.11 og 10.12 sýna að flóðahætta aukist með hækkun sjávar. Það vekur hinsvegar athygli að oft er hæðarsnið lágsvæðis í byggð þannig að svæði sem kann að flæða við núverandi aðstæður stækkar lítið þó sjávarstaða hækki. Þetta hefur áhrif á áhættumat og stýringu, en raunveruleg áhætta vegna sjávarflóða árið 2150 fer eftir því hversu mikið sjávarstaða hækkar og ekki síður þróun byggðar. Til að draga úr framtíðartjóni þarf þróun byggðar á næstu 130 árum að vera í samræmi við þá áhættu sem byggð á lágsvæðum kann að hafa í för með sér.

Í síðustu vísindaskýrslum er ítrekað að loftslagsbreytingar munu hafa mikil áhrif á þróun hættu vegna sjávarflóða og í grein 12.1.3.6 í V2018 er fjallað um áhættustýringu vegna sjávarflóða. Eins og kemur fram í 1. kafla munu hnattrænar sjávarstöðubreytingar halda áfram öldum saman og því ljóst að taka verður hættu á sjávarflóðum alvarlega á flestum lágsvæðum hér á landi. Aðferðir við áhættumat vegna strandflóða og sjávarstöðuhækkunar í nágrannalöndum og yfirfærsla þeirra á íslenskar aðstæður er rædd í nýlegri skýrslu (Guðrún Elín Jóhannsdóttir, 2020). Í grein 11.6 er fjallað um sjávarstöðubreytingar og skipulagsmál, og í grein 2.5 er lögð áhersla á að sjávarstöðuhækkun vegna loftslagsbreytinga mun halda áfram öldum saman.

Í Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum (2021) er fjallað um áhrif sjávarflóða á fráveitur og skipulagsmál og bent á mikilvægi þess að sveitarstjórnir setji sér stefnu um aðlögun byggðar að afleiðingum loftslagsbreytinga. Hvað varðar skipulag strandsvæða er í landsskipulagsstefnu 2015 – 2026 tekið fram að bráðnun jökla og hækkun sjávarborðs geri það að verkum að skipulag þurfi að hafa til að bera seiglu til að geta svarað breyttum þörfum og aðstæðum(Skipulagsstofnun, 2016).

Á síðustu árum hefur sífellt meiri áhersla verið lögð á sveigjanlegar leiðir til þess að bregðast



Mynd 10.12: Svæði á Akureyri sem geta flætt í 100 ára flóði árið 2150 eftir að sjávarstöðuhækkun samkvæmt sviðsmyndum SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC.

við sjávarstöðubreytingum. Í skýrslu IPCC (2022) er rætt um mikilvægi þess að skipulag geti aðlagast breytingum (sjá box 11.6 í Lawrence o.fl. (2022) og Bednar-Friedl o.fl. (2022)). Dæmi um slíkt er aðferðafræði, sem kennd er við kvika aðlögun, þar sem gert er ráð fyrir nokkrum leiðum við landnýtingu og fyrirfram ákveðnar vörður ráða því hvar skipt er á milli leiða (Kool o.fl., 2020). Þessa aðferðafræði mætti til dæmis nýta fyrir uppbyggt hverfi þar sem hætta á sjávarflóðum vex með tíma. Í þessu hverfi væru þrjár leiðir færar til þess að bregðast við afleiðingum loftslagsbreytinga: byggja sjóvarnir, auka flóðaþol hverfisins og yfirgefa svæðið (og/eða færa byggðina). Með því að skipuleggja fyrirfram hvernig farið er frá einu viðbragði yfir í annað er reynt að komast hjá ósveigjanlegu skipulagi sem gæti endað í öngstræti.

10.4.5 Ofanflóð

Snjóflóð og skriðuföll hafa valdið mörgum slysum og stórfelldu fjárhagslegu tjóni hér á landi. Á tuttugustu öld fórust samtals 193 af þessum völdum, þar af 69 eftir 1974. Beint fjárhagslegt tjón vegna snjóflóða og skriðufalla frá 1974 til 2000 hefur verið metið yfir 3,3 milljarðar kr. (Tómas Jóhannesson og Þorsteinn Arnalds, 2001b). Ofanflóð og loftslagsbreytingar voru ræddar í fyrri skýrslum vísindanefndar (V2008 og V2018). Þar kom fram að ekki eru forsendur til að ætla að loftslagsbreytingar dragi úr snjóflóðahættu á næstu áratugum. Aukin aftakaúrkoma gæti valdið meiri skriðuhættu, en rætt er um aftakaúrkomu í tengslum við skriðuföllin á Seyðisfirði í 2.1.3.1. Þá getur hætta á skriðuföllum aukist við bráðnun sífrera (Morino, 2018) eins og rætt er nokkuð ítarlega í grein 12.1.4 í V2018. Þar er bent á að útbreiðsla sífrera á Íslandi er illa þekkt, sérstaklega í fjallendi. Á síðustu árum hafa verið birtar nokkrar rannsóknir á jarðvegsskriði í fjallshlíðum mælt með fjarkönnun (Cao o.fl., 2023; Dittrich o.fl., 2022). Í ljós hefur komið að skrið jarðvegs í fjallshlíðum virðist vera nokkuð viðvarandi en þessar rannsóknaniðurstöður sýna að beita má fjarkönnun til þess að hafa stöðugt eftirlit með fjallshlíðum og kanna hraðabreytingar í skriði, m.a. þær sem kunna að stafa af bráðnun sífrera.

V2018 ræðir einnig að við hop og þynningu skriðjökla geti skapast aðstæður þar sem fjallshlíðar umhverfis þá verða óstöðugar með aukinni hættu á skriðuföllum. Rakin eru dæmi um slík skriðuföll og í grein 10.4.3 var minnst á Svínafellsheiði og hættuna á því að þar falli skriða í jaðarlón Svínafellsjökuls (Sæmundsson o.fl., 2019). Slík skriðuföll hafa verið rannsökuð nokkuð á undanförnum árum (Ben-Yehoshua o.fl., 2022; Lacroix o.fl., 2022) og skilningur á hættunni því aukist. Rannsóknir á skriðuföllum almennt (Elíasson og Sæmundsson, 2021) og tíðni þeirra á Íslandi sýna að tíðni stærri skriðufalla ($> 300.000m^3$) hefur aukist á síðustu 20 árum miðað við síðari hluta 20. aldar. Þó ekki sé hægt að rekja öll ofanflóð til loftslagsbreytinga er ljóst að þær skapa aðstæður sem geta leitt til þess að skriðuföll verða tíðari (Sæmundsson og Helgason, 2022).

Aukning áhættu af skriðuföllum vegna loftslagsbreytinga gerir kröfur um áframhaldandi eftirlit og rannsóknir. Þá er mikilvægt að gert sé ráð fyrir áhættumati og eftirfylgni þess við gerð skipulags, eins og rætt er í greinum 10.4.1 og 10.5.3.

10.4.6 Gróðureldar

Rætt er um gróðurelda og hættu á þeim í kafla 12.1.5 í V2018 og í kafla 4.6 V2008. Þar er meðal annars bent á að með meiri framleiðni gróðurs, aukinni útbreiðslu skóga og minnkandi beit aukist hætta á gróður- og skógareldum. Á síðustu árum hafa þessar aðstæður raungerst. Náttúrufræðistofnun hefur haldið utan um kortlagningu á stærri gróðureldum frá árinu 2006 (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023) og lista yfir þá má sjá í töflu 10.1.

Í nýlegri greinargerð stýrihóps um forvarnir gegn gróðureldum kemur fram að skógar- og kjarreldar séu nýr veruleiki sem takast þurfi á við á Íslandi og hætta á gróðureldum hafi margfaldast á undanförnum áratugum. Kröfur til varna og viðbúnaðar hafi ekki aukist með breyttu veðurfari og landnýtingu, m.a. landvernd og skógrækt. Skráningar á gróðureldum leiði í ljós að algengustu orsakir séu eldingar, atvinnustarfsemi, frístundaiðkun og íkveikja, þ.e. að orsakir séu langoftast af mannavöldum (Stýrihópur, 2018). Öflug trjárækt í sumarhúsabyggðum eykur áhættuna þar en á síðustu árum hefur verið gefið út fræðsluefni til almennings um gróðurelda, m.a. sniðið að sumarhúsaeigendum (Stýrihópur um forvarnaaðgerðir gegn gróðureldum á Íslandi, 2020). Efnið var gefið út í samstarfi nokkurra stofnana en hafði ekki lögformlega stöðu innan stjórnkerfisins.

Aukin hætta á skógareldum er rædd í Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum (2021) og í landsskipulagsstefnu (Skipulagsstofnun, 2016) er lögð áhersla á að við gerð aðalskipulags sé m.a. tekið tillit til náttúruvár, s.s. gróðurelda. Í stefnunni er tekið fram að sveitarfélög skuli byggja á bestu fáanlegum upplýsingum.

Einungis virðist tímaspursmál að það komi til stórbruna í sumarhúsabyggð eða á öðrum upprættuðum svæðum. Í ljósi ofanskráðs er mikilvægt að áhættumat vegna gróðurelda fái samskonar farveg og aðrar náttúruvár og tryggt sé að sérfróðir aðilar um þessa vá hafi formlegan samstarfsvettvang.

10.4.7 Eldgos

Stuttlega er fjallað um eldgos og áhrif loftslagsbreytinga á þau í grein 12.1.6 í V2018 og í grein 4.6 í V2008. Viðamikil umfjöllun er um þá náttúruvá sem stafar af íslenskum eldfjöllum í nýlegri bók (Júlíus Sólnes o.fl., 2013). Síðan V2018 kom út hefur aðgengi að upplýsingum um íslensk eldfjöl verið stórbætt með vefsjá (Íslands o.fl., 2014) þar sem finna má ítarlegar upplýsingar um eldfjöll Íslands. Rýrnun jökla veldur farglosun neðarlega í jarðskorpunni sem eykur að öðru óbreyttu kvikuframleiðslu og nái kvikan yfirborði gæti það aukið tíðni eldgosa eða valdið umfangsmeiri gosum. Rætt er um mat því hversu mikil kvika kann að myndast vegna þessa í V2018 og bent á að eðlilegt sé að áhætta vegna hugsanlegrar aukningar á eldgosum sem tengist þynningu jökla sé meðhöndluð sem hluti þess mats á eldgosasáhættu sem þegar er í gangi, sjá grein 10.4.1. Rætt er um jökulhaup í 10.4.3 en þau geta stafað af eldgosi undir jökli og unnið hefur verið að því að meta áhættu vegna þeirra (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2016; Einarsson o.fl., 2022).

Ár	Dagsetning	Svæði	Flatarmál lands sem brann (ha)
2021	11. maí	Gosstöðvar við Fagradalsfjall	31
2021	4. maí	Heiðmörk, Reykjavík	56.5
2021	15. apríl	Vífilsstaðir, Fljótsdalshéraði	–
2021	2. febrúar	Við Korpúlfsstaðaveg	–
2020	18. maí	Norðurárdalur, Borgarfirði	13.2
2020	6. maí	Vestaraland II, Öxarfirði	49.6
2020	5. maí	Vík, Kjalarnesi	1.35
2017	11. maí	Dalur, Eyja- og Miklaholtshreppi	42.4
2017	15. apríl	Grótta	0.14
2017	14. apríl	Ketilsstaðir, Dalabyggð	16.9
2015	13. maí	Almannadalur, Reykjavík	0.25
2015	2. maí	Fáskrúðarbakki, Snæfellsnesi	319
2015	1. maí	Norðan Stokkseyrar	18
2013	31. mars	Merkihvoll á Landi	2
2013	30. mars	Hvammur í Skorradal	0.3
2013	25. mars	Gröf í Lundarreykjadal	39
2012	3. ágúst	Hrafnabjörg í Laugardal í Ísafjarðardjúpi	15
2012	16. júní	Ásland í Hafnarfirði	1
2012	6. júní	Heiðmörk	0.4
2010	26. maí	Jarðlangsstaðir á Mýrum	13
2009	22. júlí	Við Helgafell ofan Hafnarfjarðar	8
2009	5. júní	Víðivallargerði í Fljótsdal	0.5
2008	29. apríl	Útmörk Hafnarfjarðar	13
2008	16. apríl	Kross og Frakkanes á Skarðsströnd	105
2007	23. júní	Miðdalsheiði	9
2006	30. mars	Mýrar	6700

Tafla 10.1: Kortlagðir gróðureldar frá árinu 2006 - 2021 (Náttúrufræðistofnun Íslands, 2023).

10.5 Stýring áhættu vegna loftslagsbreytinga

Eins og fram hefur komið í þessum kafla hafa loftslagsbreytingar í för með sér margskonar áhættu. Annars vegar áhættu sem stafar af svörun flókinna kerfa innanlands sem utan við mögulegri röskun. Hins vegar áhættu frá innlendri náttúruvá. Hér verður stuttlega rætt um aðferðir til að stýra áhættu, annars vegar kerfisáhættu og hins vegar náttúruvá. Í lokin er stutt samantekt um það sem er sammerkt í stýringu þessarar ólíku áhættu.

10.5.1 Viðbrögð við kerfislægri áhættu

Stýring áhættu gagnvart því tjóni sem loftslagsbreytingar kunna að valda fellur undir það sem kallað er aðlögun að loftslagsbreytingum. Síðan V2018 kom út hafa verið tekin stór skref til þess að hefja undirbúning aðlögunar hér á landi, meðal annars með útgáfu Hvítbókar um aðlögun að loftslagsbreytingum (Hvítbók, 2021). Þar er meðal annars fjallað um kerfislæga áhættu og mælt með eftirtöldum atriðum í því samhengi:

- ... greiningum, áhættumati til skemmri og lengri tíma sem tekur bæði til beinnar áhættu og kerfislægrar eða afleiddrar áhættu vegna áhrifa loftslagsbreytinga (Hvítbók, bls. 18).
- Ekki nægir að horfa til beinna áhrifa loftslagsbreytinga hér á landi heldur þarf einnig að horfa til afleiddra áhrifa breytinganna sem eiga sér stað bæði hér á landi og erlendis. Slík

afleidd áhrif, einnig nefnd kerfislæg áhætta, geta t.a.m. birst í breytingum á búsetuþróun sem rekja má til breyttra forsendna í landbúnaði vegna hlýnunar veðurfars eða breytinga á nýtingu sjávarauðlinda vegna súrnunar sjávar (Hvítbók, bls. 26).

- Kanna ætti sérstaklega nauðsyn á aðgerðum vegna afleiddra áhrifa loftslagsbreytinga, t.d. vegna áhrifa utan landsteinanna, á svæði eða geira sem áætlanagerð snýr að, samanber umræðu um kerfislæga áhættu í inngangi og heildræna sýn á slík áhrif í kafla 11 um samfélagslega innviði og þjóðarhag (Hvítbók, bls. 66).
- Skoða þarf einnig afleidd áhrif loftslagsbreytinga á atvinnulífið. Hér er einkum átt við kerfislæga áhættu eins og fjallað er um í kafla 2.5 (Hvítbók, bls. 43).
- Kanna ætti sérstaklega kerfislæga áhættu fyrir ferðaþjónustu vegna áhrifa loftslagsbreytinga innan annarra geira eða utan landsteinanna (Hvítbók, bls. 48).
- Kanna þarf kerfislæga áhættu fyrir aðra félagslega innviði á Íslandi ef vera skyldi að fjöldi ferðamanna ykist eða drægist saman vegna áhrifa loftslagsbreytinga innanlands eða utan (Hvítbók, bls. 49).

Aðlögun án landamæra (AWB, 2023) er alþjóðlegt verkefni sem miðar að samstarfi hópa frá ólíkum þjóðum og geirum. Nýleg skýrsla þeirra um hnattrænar áhættur þvert á landamæri (Anisimov og Magnan, 2023) fjallar meðal annars um til hvaða aðgerða megi grípa til að greina og stýra áhættunni. Þar kemur fram að almennt sé lítið til af ítarlegum vísindalegum rannsóknum á eðli þeirrar loftslagsáhættu sem gengur þvert á landamæri, hvort sem um er að ræða eðli, tímakvarða eða hvernig áhættan liggur þvert á kerfi eða á milli þeirra.

Í skýrslunni er bent á að til staðar sé nálgun á því hvernig rannsaka megi þessar áhættur með að það markmiði að draga úr þeim (Harris o.fl., 2022). Þar er verkefnið brotið niður í sjö skref. Í því fyrsta er umfang áhættunnar skilgreint með því að marka hversu langt rannsóknin nær og hversu víðfeðm áhættan sé. Þessar niðurstöður eru svo notaðar til þess að flokka áhættuna samkvæmt fyrirfram ákveðinni aðferðafræði (Harris o.fl., 2022). Því næst er áhættan metin með tæknilegri áhættugreiningu þar sem reynt er að fylgja áhrifaþáttum í gegnum kerfið og með því að skoða hvert viðhorf og skilningur hagsmunaaðila er gagnvart henni. Að þessari greiningu lokinni er reynt að ákvarða hver ber ábyrgð á áhættunni, hver ber tjónið og hver á að stýra henni. Þá er gerð samantekt þar sem niðurstöður fyrri skrefa eru teknar saman og mat lagt á hversu mikil áhættan sé, hversu auðvelt sé að glíma við hana og hverjar afleiðingar hennar séu. Í kjölfarið eru möguleikar til aðlögunar skoðaðir og greint hvernig áhættan liggur gagnvart ólíkum aðilum og hverjir möguleikar þeirra séu til að bregðast við. Loks eru niðurstöður kynntar hagaðilum, farið yfir möguleika til viðbragða með þeim og ferlið jafnvel ítrað í ljósi nýrra upplýsinga.

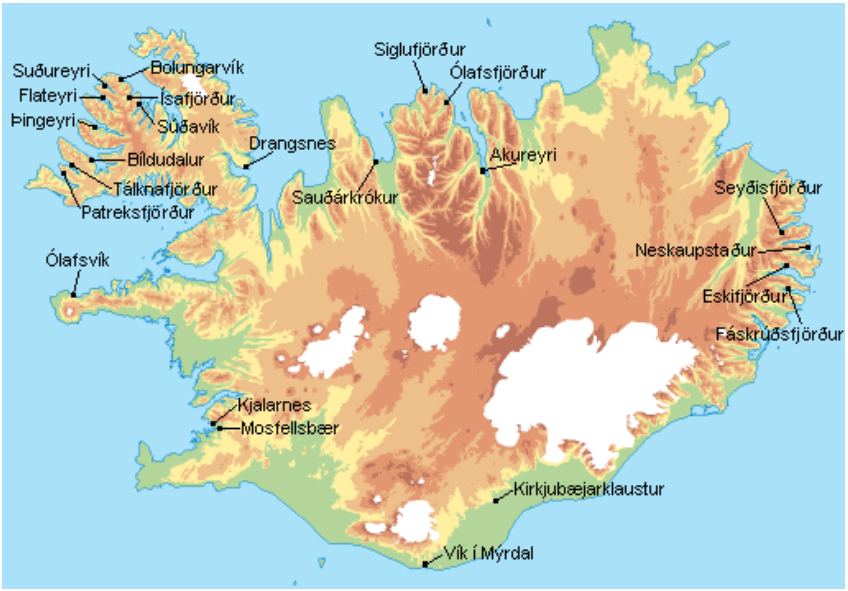
Í skýrslu Anisimov og Magnan (2023) er bent á að þegar áhættur þvert á landamæri eru metnar sé mikilvægt að gæta þess að jafnvægi sé á milli ítarlegra og nákvæmra niðurstaðna og einfaldra og skiljanlegra niðurstaðna svo að stefnumótendur geti nýtt sér þær. Einnig skipti máli að greina hvaða stefnum eða málaflokkum áhættur tilheyra. Loks skipti máli að stefnumótendur vinni í samráði við sérfróða aðila um það hvernig nýta megi sviðsmyndir af þróun loftslags og hagrænni þróun til þess að skipuleggja viðbrögð í samræmi við tímaramma áhættunnar. Nýleg aðferð til að nálgast greiningu á því hverjar afleiðingar atburðar geta verið er söguaðferðin (Shepherd og Truong, 2023). Þar er lagt upp með ítarlega lýsingu á atburði sem sérflóðir aðilar nota til þess að greina hvaða röð atburða hann gæti sett af stað. Dæmi gæti verið uppskerubrestur og aðfangakeðja, aftakaveður og orkuflutningskerfi eða önnur slík atvik þar sem einn atburður hefur keðjuverkandi áhrif. Slíka úrvinnslu er hægt að gera formlegri, m.a. með því að nota svokallað Bayesísk orsakarnet (Kunimitsu o.fl., 2023), sem getur hjálpað við að forgangsraða aðgerðum sem grípa þarf til.

10.5.2 Áhættustýringar og náttúruvá

Eins og rakið var að framan hafa Sameinuðu þjóðirnar haft forystu um skipulagða áhættustýringu sem ætlað er að draga úr áhrifum náttúruvár á heimsvísu og hefur skrifstofa þeirra UNDRR (2023) stýrt því starfi. Hluti þess er Sendai sáttmálinn (UNDRR, 2015) sem Ísland er aðili að. Á Íslandi er hættu- og áhættumat vegna náttúruvár unnið í samræmi við hann með það að markmiði að gera samfélagið betur í stakk búið til að takast á við náttúruvá (Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið, 2023). Hættu- og áhættumat vegna náttúruvár eru sífelluverkefni sem endurskoða þarf reglulega og þarf að taka mið af þróun loftslagsbreytinga, sviðsmyndum, tækniþróun, betri gagnasöfnum, niðurstöðum rannsókna, aðlögunaraðgerðum, þróun samfélagsins og áhættuviðmiðum (Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið, 2023).

Reynslan sýnir að mikilvæg forvörn vegna náttúruvár er gott skipulag sem byggir á hættu- og áhættumati og miðar að því að draga úr tjónnæmi samfélags og auka seiglu þess. Í tilfelli skipulagsgerðar þarf hættu- og áhættumat að taka tillit til margra þátta, s.s fyrirliggjandi sviðsmynda um loftslagsbreytingar, líklegrar fjölgunar íbúa og breytinga á búsetu og landnotkun. Þetta krefst samstarfs og samvinnu á milli fagstofnanna og sveitarfélaga svo áhættumat nýtist samfélaginu sem best.

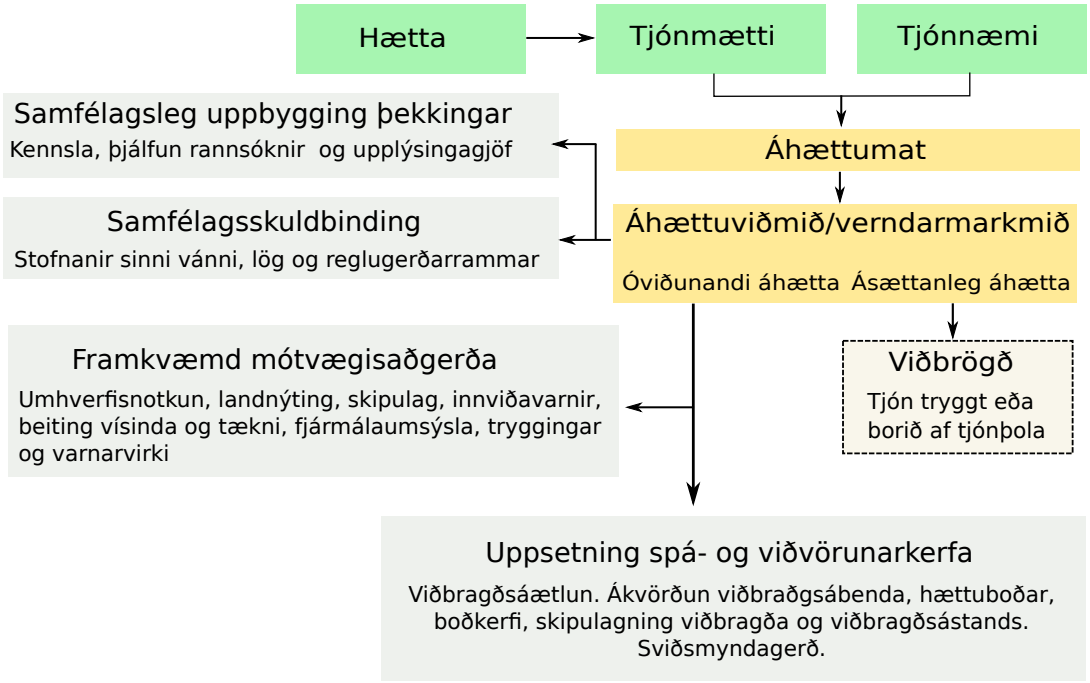
Veðurstofa Íslands hefur lengi unnið að áhættumati vegna náttúruvár sem byggir á aðferðafræði UNDRR (sjá mynd 10.14). Í þessari vinnu er einnig byggt á reynslu af mati á snjóflóðahættu og öðrum ofanflóðum þar sem leitast er við að yfirfæra vinnubrögð og þekkingu fyrir þessa áhættuþætti yfir á aðra þætti, m.a. þá sem tengjast loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra. Markmið þessarar vinnu er að draga úr tjónnæmi sem minnkar líkur á manntjóni, eignatjóni og neikvæðum fjárhagslegum afleiðingum fyrir samfélagið. Með viðeigandi mótvægisaðgerðum er jafnframt unnt að auka viðnámsþrótt samfélagsins til að takast á við náttúruhamfarir og afleiðingar þeirra og síðast en ekki síst að bæta hæfni þess til að takast á við og aðlagast loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra. Unnið er að hættumati fyrir ofanflóð, vatnsflóð, sjávarflóð og eldgos. Greiningu hefur verið lokið fyrir alla þéttbýlisstaði landsins sem búa við ofanflóðahættu (sjá mynd 10.13). Verið að endurskoða áhættumatið og bæta við greiningum fyrir Hveragerði og Stöðvarfjörð, gera úttekt á ofanflóðahættu í dreifbýli, gera áhættumat fyrir skíðasvæði og kortleggja óstöðugar hlíðar. Áhættumat vegna eldgosa og afleiddra áhrifa hófst árið 2012 og áhættumat vegna vatns- og sjávarflóða hófst árið 2015 (Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið, 2023).



Mynd 10.13: Staðir á landinu þar sem áhættumati hvað ofanflóðahættu varðar er lokið.

10.5.3 Viðbrögð við beinni áhættu

Hér að framan var rætt um óveður og aftakaúrkomu, flóð í ám, sjávarflóð, ofanflóð, skógarelda og eldgos. Þessar vár hafa mismikið tjónmætti auk þess sem tjónnæmi samfélagsins og berstaða er ákaflega mismunandi. Margt er þó sammerkt í vinnulagi við áhættumat og áhættustýringu



Mynd 10.14: Ferli áhættustýringar byggt á ramma Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar og Sameinuðu þjóðanna.

þessara þátta. Í hverju tilfelli þarf að greina hættuna, samfélagslega hagsmuni, ákvarða hvaða atriði skipta mestu og er mikilvægast að horfa til við áhættumat. Ákveða þarf viðmiðunarmörk fyrir ásættanlega eða viðunandi áhættu og móta aðgerðir í samræmi við það. Án viðmiðs um ásættanlega áhættu getur stýring áhættu orðið ómarkviss og stórir áhættuþættir jafnvel gleymst. Umræða um áhættuna þarf að eiga sér stað á víðari vettvangi en á vegum þeirra tækniaðila sem meta áhættu várinnar.

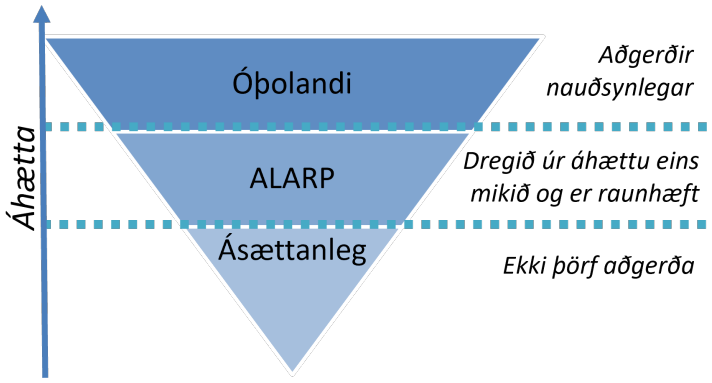
Í þessu samhengi er mikilvægt að hafa í huga að sum áhætta er þess eðlis að hún er líkleg til að valda efnahagslegu tjóni en ekki manntjóni. Í slíkum tilvikum geta tryggingar verið mikilvæg leið til að stýra áhættu. Á Íslandi veitir Náttúrhamfaratrygging Íslands tryggingavernd gegn náttúruhamförum og tryggingafélög tryggja áhættu sem ekki er tryggð hjá Náttúruhamfaratryggingu. Dæmi um það síðara er brunatrygging sem er lögboðin fyrir alla eigendur fasteigna. Aukin áhætta varðandi skógarelda getur haft áhrif á brunatryggingar og eðlilegur farvegur áhættustýringar því viðbragðsáætlanir (sjá 12.1.5 í V2018), fræðsla (sjá t.d. Stýrihópur, 2018) og tryggingar. Mikilvægt er að ábyrgð ólíkra stjórnsýslustiga, byggingaraðila og eigenda sé skýr svo ekki skapist hætta á því að mistök á lægra stjórnsýslustigi valdi skaðabótaábyrgð á hærra stjórnsýslustigi. Í því samhengi er rétt er að ítreka þá ábendingu sem kom fram í V2018 að skýra þurfi ábyrgð til þess að koma í veg fyrir að kostnaður sem fellur til vegna tjóns á vanhönnuðum eða illa staðsettum mannvirkjum falli á Náttúruhamfaratryggingu Íslands.

Áður var minnst á mikilvægi skipulags sem hluta af áhættustýringu. Með því er bæði átt við skilgreiningu hönnunarstaðla fyrir mannvirki, þ.m.t. samgöngu-, samskipta- og orkukerfi og skipulag byggða. Fjallað er um byggðaskipulag og loftslagsbreytingar í grein 11.6 en mikilvægt er að tekið sé mið af náttúruvá við skipulagsgerð. Í greinum 10.4.4 og 10.4.5 er fjallað um einstök bæjarfélög, en almennt er ljóst að illa ígrundað skipulag getur aukið áhættu en gott skipulag getur dregið úr henni.

10.5.4 Almenn atriði varðandi áhættustýringu

Áhættuviðmið skilja á milli þeirrar áhættu sem er óásættanleg og þeirrar áhættu sem er ásættanleg. Ein þeirra aðferða sem notaðar eru til að stýra áhættu er ALARP (*e. As-Low-As-*

Reasonably-Practicable) aðferðin (Melchers, 2001), sjá mynd 10.15.



Mynd 10.15: Í ALARP aðferðafræðin er greint á milli óþolandi áhættu og ásættanlegrar áhættu. ALARP svæðið er milli þessara tveggja flokka og þar er leitast við að draga úr áhættu eins mikið og telja má raunhæft miðað við kostnað aðgerða og tjóns.

ALARP aðferðafræðin greinir áhættu í þrjá flokka, byggt á fyrirliggjandi áhættuviðmiðum. Undir minnst krefjandi flokkinn fellur ásættanleg áhætta þar sem ekki þarf viðamiklar aðgerðir til þess að draga úr áhættu. Dæmi um atburði sem falla í þennan flokk eru ýmisskonar amaatburðir vegna veðurs, þar sem fyrirliggjandi aðferðir, svo sem aðvaranir eða lokanir, þykja nægilega áhrifaríkar. Mest krefjandi flokkurinn er sá sem felur í sér óþolandi áhættu, svo sem manntjón. Dæmi um atburði sem falla í þann flokk er ofanflóðahætta í byggð. Þar er nauðsynlegt að grípa til einarðra aðgerða til þess að draga úr áhættu og færa hana niður að ásættanlegum mörkum. Það veltur á tegund vár hvernig best sé draga úr áhættu en hvað ofanflóð varðar skiptir skipulag með tilliti til náttúruvár máli, en hefur verið dregið úr áhættu með varnarmannvirkjum. Á milli þessara tveggja fyrrnefndu flokka fellur hið svokallaða ALARP svæði þar sem áhætta er hvorki talin ásættanleg né óþolandi. Í þeim tilfellum miðar áhættustýring að því að draga úr áhættu eins og raunhæft þykir. Vá í þessum flokki tekur yfirleitt til efnahagslegrar áhættu, það er eignatjóns en ekki manntjóns. Dæmi um slíkt gæti verið byggð á lágsvæði sem reynt væri að verja fyrir sjávarflóðum með áhættustýringu (Kool o.fl., 2020) þar sem varnir drægju úr áhættu að settu marki. Óraunhæf áhættustýring í þessum flokki væri til dæmis ef reynt væri að útrýma áhættu alfarið eða grípa til aðgerða sem væru dýrari en tjónið sem váin gæti valdið.

Í 4. kafla vinnuhóps II í 5. matskýrslu IPCC (Wong o.fl., 2014) var mælt með því að nota sveigjanlegar aðferðir við áhættustýringu. Skoðað væri hvernig áhættan gæti þróast og reynt að hafa í huga ólíkar leiðir til þess að bregast við henni. Þessi aðferðafræði á jafnt við um flókna áhættu og náttúruvá. Í skýrslunni kemur fram að sveigjanlegar og afturkræfar aðgerðir séu betri en ósveigjanlegar og óafturkræfar. Almennt sé best að halda sem flestum möguleikum opnum. Mikilvægt sé að hafa fyrirfram skilgreind mörk þegar skipt sé um braut og önnur aðferð tekin upp við að lágmarka áhættu. Tekið er fram að ekki sé átt við tímamörk hverrar aðferðar, heldur eigi mörkin við tilteknar afleiðingar sem knýi ákvarðanaferlið. Í dæminu hér að ofan væri sveigjanleg áhættustýring fólgin í því að hafa nokkrar ólíkar leiðir flóðavarna og fyrirfram ákveðin mörk um það hvernær skipta skyldi á milli þeirra með hækkandi sjávarstöðu. Þegar ekki væri lengur raunhæft að draga úr hættu á sjávarflóðum þyrfti að hefja brottfluttning (Kool o.fl., 2020).

Mynd 10.14 sýnir samband hættu, tjónmættis, tjónnæmis, áhættumats, áhættuviðmiða og viðbragða til að draga úr áhættu. Á myndinni sjást einnig atriði sem oft fá ekki næga umfjöllun, annarsvegar samfélagsskuldbinding um að stýra áhættunni og hinsvegar uppbygging þekkingar til þess að takast á við hana. Í nýlegri úttekt á náttúruvá (Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið, 2023) er bent á mikilvægi þess að viðhalda og auka þekkingu á náttúruvá og viðbrögðum við henni. Það á einnig við um flókna og kerfislæga áhættu og áhættu þvert á landamæri. Aðferðir til áhættustýringar eiga það sammerkt að margir aðilar þurfa að koma að mati á áhættu og leiðum til að stýra henni. Flestar, ef ekki allar tegundir áhættu, krefjast samfélagsskuldbindingar

um að áhættunni verði stýrt. Til þess að slíkt raungerist þarf að byggja upp menntun og fræðslu til að tryggja skilning á mikilvæginu.

Heimildir

Abel, Guy J., Michael Brottrager, Jesus Crespo Cuaresma og Raya Muttarak (2019). „Climate, conflict and forced migration“. Í: *Global Environmental Change* 54, bls. 239–249. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.12.003.

Anisimov, A. og A.K. Magnan (2023). *The Global Transboundary Climate Risk Report*. The Institute for Sustainable Development, International Relations og Adaptation Without Borders, bls. 114. URL: https://adaptationwithoutborders.org/.

AWB (2023). *Adaptation Without Borders*. URL: adaptationwithoutborders.org.

Bednar-Friedl, B., R. Biesbroek, D.N. Schmidt, P. Alexander, K.Y. Børsheim, J. Carnicer, E. Georgopoulou, M. Haasnoot, G. Le Cozannet, P. Lionello, O. Lipka, C. Möllmann, V. Muccione, T. Mustonen, D. Piepenburg og L. Whitmarsh (2022). „Europe“. Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 1817–1927. ISBN: 9781009325844. DOI: 10.1017/9781009325844.015.1817.

Ben-Yehoshua, Dorit, Þorsteinn Sæmundsson, Jón Kristinn Helgason, Joaquim M.C. Belart, Jón Víðir Sigurðsson og Sigurður Erlingsson (2022). „Paraglacial exposure and collapse of glacial sediment: the 2013 landslide onto Svínafellsjökull glacier, Southeast Iceland“. Í: *Earth Surface Processes and Landforms*, bls. 1–16. DOI: 10.1002/esp.5398.

Cao, Yunmeng, Sigurjón Jónsson og Sigrún Hreinsdóttir (2023). „Iceland Kinematics From InSAR“. Í: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 128.3, e2022JB025546.

Cedergren, E., C. Tapia, A. Lundgren og Sanchéz Gassen (2022). *Just Green Transition – Key concepts and implications*. Discussion Paper 2022:2. Nordregio.

Chatham House (2021). *Climate Change Risk Assessment 2021*. URL: https://www.chathamhouse.org/2021/09/climate-change-risk-assessment-2021.

Clarke, Jack, Jukka Heinonen og Juudit Ottelin (2017). „Emissions in a decarbonised economy? Global lessons from a carbon footprint analysis of Iceland“. Í: *Journal of Cleaner Production* 166, bls. 1175–1186. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.108.

Coumou, Dim, Jascha Lehmann og Johanna Beckmann (2015). „The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes“. Í: *Science* 348.6232, bls. 324–327. DOI: 10.1126/science.1261768.

Dafermos, Yannis (2022). „Climate change, central banking and financial supervision: beyond the risk exposure approach“. Í: *The Future of Central Banking*. Edward Elgar Publishing, bls. 175–194.

Dittrich, Julian, Daniel Hölbling, Dirk Tiede og Þorsteinn Sæmundsson (2022). „Inferring 2D Local Surface-Deformation Velocities Based on PSI Analysis of Sentinel-1 Data: A Case Study of Öræfajökull, Iceland“. Í: *Remote Sensing* 14.13, bls. 3166. DOI: 10.3390/rs1413316.

Douville, H, K Raghavan, J Renwick, R P Allan, P A Arias, M Barlow, R Cerezo-Mota, A Cherchi, T Y Gan, J Gergis, D Jiang, A Khan, W Pokam Mba, D Rosenfeld, J Tierney og O Zolina (2021). „Water Cycle Changes“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 1055–1210. DOI: 10.1017/9781009157896.010.

Einarsson, Bergur, Einar Hjörleifsson, Tinna Þórarinsdóttir og Matthew J Roberts (2022). *Áhættumat vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli*.

Elíasson, Jónas og Þorsteinn Sæmundsson (2021). „Physics and Modeling of Various Hazardous Landslides“. Í: *Geosciences* 11.3. DOI: 10.3390/geosciences11030108.

Erla Sturludóttir, Guðni Þorvaldsson, Guðríður Helgadóttir, Ingólfur Guðnason, Jóhannes Sveinbjörnsson, Ólafur Ingi Sigurgeirsson og Þóroddur Sveinsson (2021). *Fæðuöryggi á Íslandi*. Gefið út af Erla Sturludóttir og Jóhannes Sveinbjörnsson. Rit LBHÍ nr 139. Landbúnaðarháskóli Íslands.

Forsætisráðuneytið (2019). *Um aðdraganda og afleiðingar óveðurs 9.–11. desember 2019, viðbúnað og úrbætur*. URL: https://www.althingi.is/altext/pdf/150/s/1487.pdf.

Grunfelder, J., G. Norlén, L. Randall og N. Sanchez Gassen, ritstj. (2020). *State of the Nordic Region 2020*. NORD 2020:001. Nordic Council of Ministers, bls. 28–40.

Guðrún Elín Jóhannsdóttir (2020). *Methods for Coastal Flooding Risk Assessments - An Overview of Methods used in Scandinavia and the UK and a discussion of their suitability for Iceland*. Report VÍ 2020-005. Icelandic Met Office.

Gulev, S K, P W Thorne, J Ahn, F J Dentener, C M Domingues, S Gerland, D Gong, D S Kaufman, H C Nnamchi, J Quaas, J A Rivera, S Sathyendranath, S L Smith, B Trewin, K von Schuckmann og R S Vose (2021). „Changing State of the Climate System“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 287–422. DOI: 10.1017/9781009157896.004.

Halldór Björnsson, Guðrún Elín Jóhannsdóttir, Angel Ruiz Angulo, Kevin Dubois og Elmi Snorri Árnason (2022). *Mat á endurkomutíma óveðursflóða reiknað með Delft3D-FM*. VI 2022-009. Veðurstofa Íslands.

Halldór Björnsson, Guðrún Elín Jóhannsdóttir, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Berglind Pétursdóttir og Ragnar Þröstur Heiðarsson (2023). *Mat á sjávarstöðuhækkun og 100 ára flóðahæð*. Óbirt handrit. Veðurstofa Íslands.

Harris, Katy, Frida Lager, Marta K. Jansen og Magnus Benzie (2022). „Rising to a New Challenge: A Protocol for Case-Study Research on Transboundary Climate Risk“. Í: *Weather, Climate, and Society* 14.3, bls. 755–768. DOI: https://doi.org/10.1175/WCAS-D-21-0022.1.

Heleniak, T. og N. Sanchés Gassen (2019). *The Nordic Population in 2040 – Analysis of past and future demographic trends*. Report 2019:6. Nordregio.

Heleniak, Timothy og Nora Sánchez Gassen (2020). „The demise of the rural Nordic region? Analysis of regional population trends in the Nordic countries, 1990 to 2040“. Í: *Nordisk välfärdsforskning* 5.1, bls. 40–57. DOI: 10.18261/issn.2464-4161-2020-01-05.

Hugtök og skilgreiningar (án árs). Almannavarnir. URL: https://www.almannavarnir.is/almannavarnir/hugtok/.

Huntjens, Patrick og Katharina Nachbar (2015). „Climate change as a threat multiplier for human disaster and conflict“. Í: *The Hague Institute for Global Justice*, bls. 1–24.

Hvítbók (2021). *Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum - Drög að stefnu*. Starfshópur um stefnu stjórnvalda varðandi aðlögun að loftslagsbreytingum. Stjórnarráð Íslands: Umhverfis- og auðlindaráðuneytið.

Íslands, Jarvísindastofnun Háskóla, Veðurstofa Íslands og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra (2014). *Íslensk eldfjallavefsjá*. URL: https://islenskeldfjoll.is/.

Jungsberg, L. o.fl. (2019). *Atlas of population, society and economy in the Arctic*. Working Paper 2019:3. Nordregio.

Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason, ritstj. (2013). *Náttúruvá á Íslandi: eldgos og jarðskjálftar*. Viðlagatrygging Íslands.

Kamasa, Julian (2021). „Microchips: Small and Demanded“. Í: *CSS Analyses in Security Policy* 295.

Karlsdóttir, A. (2022). *A Just Green Transition for Rural Areas in the Nordic Region: key concepts and implications*. Discussion Paper 2022:1. Nordregio.

Karlsdóttir, A., T. Heleniak og M. Kull (2020). „Chapter 2. Births, Children and Young People“. Í: *State of the Nordic Region 2020*. Gefið út af J. Grunfelder, G. Norlén, L. Randall og N. Sanchez Gassen. NORD 2020:001. Nordic Council of Ministers, bls. 28–40.

Karlsdóttir, A., L. Rispling, G. Norén og L. Randall, ritstj. (2018). *State of the Nordic Region 2018 – Immigration and Integration Edition*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.

Kool, Rick, Judy Lawrence, Martin Drews og Robert Bell (2020). „Preparing for sea-level rise through adaptive managed retreat of a New Zealand stormwater and wastewater network“. Í: *Infrastructures* 5.11, bls. 92.

Kornhuber, Kai, Dim Coumou, Elisabeth Vogel, Corey Lesk, Jonathan F. Donges, Jascha Lehmann og Radley M. Horton (2020). „Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions“. Í: *Nature Climate Change* 10, bls. 48–53. DOI: 10.1038/s41558-019-0637-z.

Kunimitsu, Taro, Marina Baldissera Pacchetti, Alessio Ciullo, Jana Sillmann, Theodore G Shepherd, Mehmet Ümit Taner og Bart van den Hurk (2023). „Representing storylines with causal networks to support decision making: Framework and example“. Í: *Climate Risk Management* 40, bls. 100496.

Lacroix, Pascal, Joaquin MC Belart, Etienne Berthier, Þorsteinn Sæmundsson og Jónsdóttir Kristín (2022). „Mechanisms of landslide destabilization induced by glacier-retreat on Tungnakvíslarjökull area, Iceland“. Í: *Geophysical Research Letters* 49.14, e2022GL098302.

Landmælingar Íslands (2020). *IslandDEM Útgáfa 1.0*. Lýsigagnagátt LMI.

Lawrence, J., B. Mackey, F. Chiew, M.J. Costello, K. Hennessy, N. Lansbury, U.B. Nidumolu, G. Pecl, L. Rickards, N. Tapper, A. Woodward og A. Wreford (2022). „Australasia“. Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 1581–1688. ISBN: 9781009325844. DOI: 10.1017/9781009325844.013.1581.

Lee, J.-Y., J Marotzke, G Bala, L Cao, S Corti, J P Dunne, F Engelbrecht, E Fischer, J C Fyfe, C Jones, A Maycock, J Mutemi, O Ndiaye, S Panickal og T Zhou (2021). „Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.

Lenton, Timothy M, Johan Rockström, Owen Gaffney, Stefan Rahmstorf, Katherine Richardson, Will Steffen og Hans Joachim Schellnhuber (2019). „Climate tipping points—too risky to bet against“. Í: *Nature* 575.7784, bls. 592–595.

Magnús Tumi Guðmundsson, Emmanuel Pagneux, Matthew J. Roberts, Ásdís Helgadóttir, Sigrún Karlsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Þórdís Högnadóttir og Ágúst Gunnar Gylfason (2016). *Jökulhlaup í Öræfum og Markarfljóti vegna eldgosa undir jökli. Forgreining áhættumats*. Jarðvísindastofnun Háskólans, Veðurstofa Íslands, Ríkislögreglustjóri. URL: https://www.vedur.is/gogn/vefgogn/jokulhlaup/haettumat/oraefajokull_markarfljotsaurar/samantekt_is/jokulhlaup_haettumat_138MB.pdf.

Magnús Örn Sigurðsson (2020). *Að búa sig undir breyttan heim – Aðlögun vegna loftslagsvár í ljósi stefnumótunar og stjórnarhátta*. Gefið út af Anna Sigurveig Ragnarsódttir, Brynhildur Davíðsdóttir, Halldór Þorgeirsson og Hrönn Hrafnsdóttir. Loftslagsráð. ISBN: 978 9935 24 679 0.

Melchers, Robert E (2001). „On the ALARP approach to risk management“. Í: *Reliability Engineering & System Safety* 71.2, bls. 201–208.

Menk, Linda, Stefano Terzi, Marc Zebisch, Erich Rome, Daniel Lückerath, Katharina Milde og Stefan Kienberger (2022). „Climate change impact chains: a review of applications, challenges, and opportunities for climate risk and vulnerability assessments“. Í: *Weather, Climate, and Society* 14.2, bls. 619–636.

Morino, Costanza (2018). *The Hidden Hazard of Melting Ground Ice in Northern Iceland*. Open University (United Kingdom).

Náttúrufræðistofnun Íslands (2023). *Vöktun og rannsóknir - Gróðureldar*. URL: https://www.ni.is/is/rannsoknir/voktun-og-rannsoknir/grodureldar (skoðað 01.06.2023).

NKL (2022). *Nordic Perspectives on Transboundary Climate Risk*. Publication 2022:531. Nordic Working Group for Climate and Air, Nordic Council of Ministers.

Nunataryuk (2022). URL: https://nunataryuk.org/.

Nunataryuk (2017). *Nunataryuk - permafrost thaw and changing arctic coast: science for socio-economic adaptation*. URL: https://archive.nordregio.se/en/Nordregio-Research/Nunataryuk/index.html.

Oppenheimer, Michael, Maximiliano Campos, Rachel Warren, Joern Birkmann, George Luber, Brian O'Neill, Kiyoshi Takahashi, Mike Brklacich, Sergey Semenov, Rachel Licker o.fl. (2015). „Emergent risks and key vulnerabilities“. Í: *Climate change 2014 impacts, adaptation and vulnerability: part a: global and sectoral aspects*. Cambridge University Press, bls. 1039–1100.

Ormstrup Vestergård, Louise, Mari Wøien Meijer, Mads Svennerud og Lars Johan Rustad (2022). *Selvforsyning af fødevarer i fem nordiske øsamfund: Bornholm, Færøerne, Grønland, Island og Åland*. TemaNord 2022:528. Copenhagen: Nordic Ministerråd, bls. 204.

Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, H. Adams, I. Adelekan, C. Adler, R. Adrian, P. Aldunce, E. Ali, R. Ara Begum, B. Bednar- Friedl, R. Bezner Kerr, R. Biesbroek, J. Birkmann, K. Bowen, M.A. Caretta, J. Carnicer, E. Castellanos, T.S. Cheong, W. Chow, G. Cissé G. Cissé og Z. Zaiton Ibrahim (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Technical Summary. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 37–118. ISBN: 9781009325844.

— (2022b). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Technical Summary. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 37–118.

Rannsóknarnefnd Alþingis (2010). *Aðdragandi og orsakir falls íslensku bankanna 2008 og tengdir atburðir*.

Raymond, Colin, Radley M Horton, Jakob Zscheischler, Olivia Martius, Amir AghaKouchak, Jennifer Balch, Steven G Bowen, Suzana J Camargo, Jeremy Hess, Kai Kornhuber o.fl. (2020). „Understanding and managing connected extreme events“. Í: *Nature climate change* 10.7, bls. 611–621.

Roberts, Karlene H og Robert G Bea (2001). „When systems fail“. Í: *Organizational dynamics* 29.3, bls. 179–179.

Schwarcz, Steven L (2008). „Systemic risk“. Í: *Georgetown Law Journal* 9, bls. 193.

Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner og B. Zhou (2021). „Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate“. Í: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 1513–1766. DOI: 10.1017/9781009157896.013.

Shepherd, T. G. og C. H. Truong (2023). „Storylining climes“. Í: *Storying Multipolar Climes of the Himalaya, Andes and Arctic*. Gefið út af D. Smyer Yü og J. J. P. Wouters. London: Routledge, bls. 157–183. ISBN: 9781032388267. DOI: 10.4324/9781003347026-12.

Sillmann, Jana, Ingrid Christensen, Stefan Hochrainer-Stigler, J Huang-Lachmann, Sirkku Juhola, Kai Kornhuber, M Mahecha, Reinhard Mechler, Markus Reichstein, Alex C Ruane, Pia-Johanna Schweizer og Scott Williams (2022). *ISC-UNDRR-RISK KAN Briefing note on systemic risk*.

Skipulagsstofnun (2016). *Landsskipulagsstefna 2015–2026 ásamt greinargerð*. Skipulagsstofnun. URL: https://www.landsskipulag.is/media/pdf-skjol/Landsskipulagsstefna_2015-2026_asamt_greinargerd.pdf.

Skýrsla starfshóps um neyðarbirgðir (2022). Forsætisráðuneytið.

Stjernberg, M. og O. Penje (2019). *Population change dynamics in Nordic municipalities – grid data as a tool for studying residential change*. Report. Nordregio.

Stjórnarráðið (2023). *Uppbygging Innviðir*. URL: http://www.stjornarradid.is/innvidir/.

Stýrihópur (2018). *Gróðureldar: Varnir og viðbrögð: Greinargerð stýrihóps*. Tæknileg skýrsla. Stýrihópur um forvarnaaðgerðir gegn gróðureldum á Íslandi. URL: http://grodureldar.is.

Stýrihópur um forvarnaaðgerðir gegn gróðureldum á Íslandi (2020). *Gróðureldar - Varnir og viðbrögð, Greinargerð stýrihóps vegna vinnu 2018-2019*. Tæknileg skýrsla. Útgefið af stýrihópi um forvarnaaðgerðir gegn gróðureldum á Íslandi. URL: http://grodureldar.is.

Sæmundsson, Þorsteinn og Jón Kristinn Helgason (2022). „Climate change and slope stability in Iceland“. Í: *EGU General Assembly 2022*. EGU22-11330. Vienna, Austria. URL: https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-11330.

Sæmundsson, Þorsteinn, Jón Kristinn Helgason, Daniel Ben-Yehoshua, Bergur H Bergsson, Benedikt Ófeigsson, Eyjólfur Magnússon, Ásta Rut Hjartardóttir, Vincent Drouin, Joaquin Munoz Cobo Belart, Harpa Grímsdóttir, Gro Birkefeldt Møller Pedersen, Finnur Pálsson, Snævarr Guðmundsson og Halldór Geirsson (2019). „Risk of major rock slope failure at the Svínafellsheiði mountain, SE Iceland.“ Í: *Geophysical Research Abstracts*. Bd. 21.

Tinna Þórarinsdóttir, Matthew J. Roberts og Bergur Einarsson (2022). *Tillögur að áhættuviðmiðum fyrir vatnsflóð*. VI 2022-005. URL: https://www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2022/VI_2022_005_ahaettuvidmid.pdf.

Tómas Jóhannesson og Þorsteinn Arnalds (2001a). „Accidents and economic damage due to snow avalanches and landslides in Iceland“. Í: *Jökull* 50, bls. 81–94.

— (2001b). „Slys og tjón af völdum snjóflóða og skriðufalla“. Í: *Sveitarstjórnarmál* 61.6, bls. 474–482. URL: http://vedur.is/gogn/snjoflod/haettumat/sveitarstjornarmal-2001.pdf.

Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið (2023). *Náttúruvá, stöðumat og áskoranir varðandi mat og endurmótun á tillögum hættumats og vöktunar vegna náttúruvár*. Tæknileg skýrsla. Stjórnarráð Íslands.

UNDRR (2015). *What is the Sendai Framework?* URL: https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sendai-framework.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (2023). *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*. URL: http://www.undrr.org.

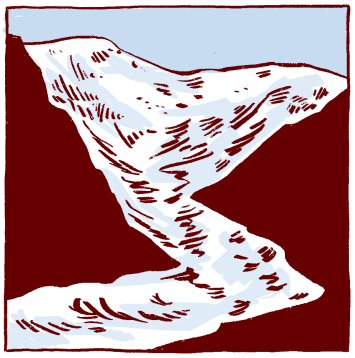
VB.is (2011). *Kerfislæg aðhætta fólst í gjaldþroti sjóvar*. URL: https://www.vb.is/frettir/kerfislaeg-ahaetta-folst-i-gjaldthroti-sjovar.

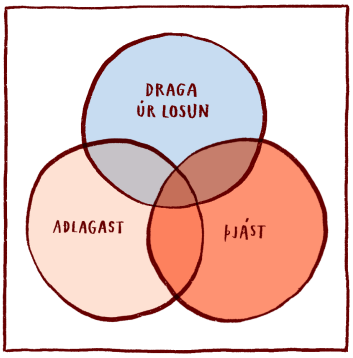
Wong, P.P., I.J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K.L. McInnes, Y. Saito og A. Sallenger (2014). „Coastal systems and low-lying areas“. Í: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Gefið út af C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea og L.L. White. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 361–409.

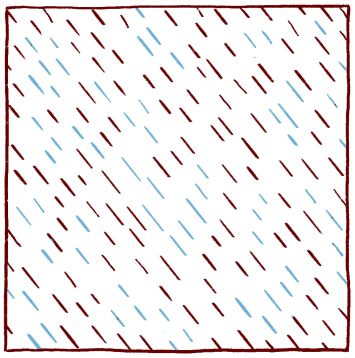
KAFLI

11

AÐLÖGUN AÐ LOFTSLAGSBREYTINGUM







Efnisyfirlit kafla

11.1 Inngangur 342
11.2 Hvað er aðlögun? 342
11.3 Aðlögun í alþjóðlegu samhengi 345
11.4 Aðlögun í norrænu samhengi 347
11.5 Staða aðlögunar á Íslandi 347
11.5.1 Loftslagsþjónusta og starfsemi tengd aðlögun 350
11.5.2 Samráðsvettvangur um þekkingarsköpun vegna áhrifa loftslagsbreytinga . 350
11.6 Skipulag í þágu aðlögunar 351
11.6.1 Skipulagsmál og sveitarfélög 352
11.7 Viðbrögð við loftslagsvá: Dæmi um aðlögunaraðgerðir 354
11.7.1 Fjármálastarfsemi og tryggingar 354
11.7.2 Ferðaþjónusta 356
11.7.3 Sjávarútvegur 358
11.7.4 Vatns- og fráveitur 360
11.7.5 Samgöngur 360
11.8 Niðurlag 361

Samantekt

1. Aðlögun að loftslagsbreytingum er staðbundin aðgerð sem felst í því að undirbúa samfélög, fólk, kerfi og náttúru undir áhrif loftslagsbreytinga, lágmarka skaðlegar afleiðingar þeirra og nýta möguleg tækifæri.

2. Tillögu að landsáætlun um aðlögun að loftslagsbreytingum var skilað í september 2023. Slík áætlun á að skilgreina ábyrgðaraðila aðlögunaraðgerða. Innleiðing slíkrar áætlunar mun gegna lykilhlutverki í að gera aðlögun að loftslagsbreytingum markvissari.

3. Íslenskur lagagrunnur varðandi aðlögun að loftslagsbreytingum er almennt veikur og tekur lögbundið umboð ríkis og sveitarfélaga hvað varðar loftslagsmál nánast eingöngu til mótvægisaðgerða.

4. Skipulag er lykilstjórntæki til að vinna farsællega að aðlögun byggða og samfélags. Tryggja þarf undirstöður loftslagsþolins skipulags með skýrum markmiðum, leiðbeiningum, hvatningu og stuðningi við skipulagsyfirvöld í héraði.

5. Fjárhagslega hvata og fjármögnunaraðgerðir vantar til þess að hraða aðlögunaraðgerðum. Mikilvægt er að skilgreina hvar ábyrgðin liggur og gæta þarf jafnræðis þegar kemur að kvöðum á mismunandi aðila, svo sem almenning, sveitarfélög eða fyrirtæki.

6. Stjórnvöldum ber að tryggja að hægt sé að byggja ákvarðanir varðandi aðlögun á áreiðanlegum gögnum og rannsóknum. Slíkt krefst aukins fjármagns til rannsókna og vöktunar á áhrifum loftslagsbreytinga á íslenska náttúru og samfélag.

7. Miðlun upplýsinga til að brúa bil á milli vísindafólks, stefnumótenda og almennings varðandi áhrif og afleiðingar loftslagsbreytinga er lykilatriði.

8. Leggja þarf mat á hversu berskjaldað Ísland er gagnvart áhættum þvert á landamæri og skilgreina mælikvarða fyrir viðbragðsáætlanir og langtímastefnur.

9. Þrátt fyrir að aðlögunaraðgerðir taki almennt mið af umhverfi og aðstæðum á hverjum stað er hægt að læra af reynslu annarra. Það er því mikilvægt að efla samvinnu innan lands og á alþjóðlegum vettvangi.

10. Heildstæður rammi til áhættumats og gerð aðlögunaráætlana vegna mögulegra áhrifa loftslagsbreytinga á sjávarútveg og fiskeldi hefur verið settur fram. Með honum er hægt að kortleggja áhættu og tækifæri tengdum loftslagsbreytingum, forgangsröðun og innleiðingu aðlögunaraðgerða.

11. Seðlabankar víða um heim eiga í samstarfi við að meta loftslagsáhættu á fjármálakerfi. Viðbrögð við áhrifum loftslagsbreytinga hafa áhrif á bæði hlutverk og umboð Seðlabanka Íslands, t.d. í samhengi fjármálastöðugleika, fjármálaeftirlits og peningaeftirlits.

12. Aðlögun í jökultengdri ferðaþjónustu á sér þegar stað í formi tæknilegrar-, skipulagslegrar-, viðskiptalegrar- og stofnanalegrar aðlögunar. Aðlögunin er ýmist venjubundin eða sem viðbrögð við sýnilegri áhættu eða tækifærum. Getu til aðlögunar þarf að styrkja.

11.1 Inngangur

Þegar kemur að þeirri vá sem stafar af áhrifum loftslagsbreytinga hefur verið bent á að þjóðfélög hafi þrjá kosti (Holdren, 2008): að þola afleiðingarnar, draga úr losun eða aðlagast. Þó að auknar hamfarir geri atburði, sem flokka má til fyrsta kostsins, algengari getur aðlögun dregið úr afleiðingunum og samdráttur í losun minnkað umfang þeirra og tíðni.

Áhrifa loftslagsbreytinga er þegar farið að gæta á Íslandi og ljóst að um er að ræða áskorun til framtíðar. Dæmi um slíkt eru tíðari veðuröfgar, svo sem þurrkar og aftakaúrkoma, aukin hætta á ofanflóðum og gróðureldum, breytingar á vistkerfum á landi og í hafi og aukinn ágangur sjávar vegna hækkandi sjávaryfirborðs. Samfélagið stendur frammi fyrir mögulegum afleiðingum, svo sem fyrir efnahag, innviði, atvinnugreinar, öryggi og lýðheilsu. Það verður því sífellt mikilvægara að horfa til loftslagsbreytinga við skipulagsgerð og stefnumótun svo unnt sé að búa samfélagið undir gjörbreyttan veruleika. Í því felst aðlögun.

Hér á eftir verður fjallað um aðlögun að loftslagsbreytingum. Stuttlega verður fjallað um stöðu aðlögunar hnattrænt og í nágrannalöndum Íslands en fyrst og fremst verður fjallað um málaflokkinn í íslensku samhengi. Sérstaklega verður fjallað um skipulagsmál sem lykilstjórntæki til að vinna að aðlögun að loftslagsbreytingum. Í lok kaflans eru tekin dæmi um aðlögunaraðgerðir meðal mismunandi geira samfélagsins.

Að hluta byggir kaflinn á erindum frá málstofum vísindanefndar. Í grein 11.7 er byggt á erindum Gunnars Jakobssonar, Láru Jóhannsdóttur og Reynis Smára Atlasonar um tryggingar og fjármálastarfsemi (sjá 11.7.1), á erindi Jóhannesar Welling um ferðaþjónustuna (sjá 11.7.2) og á erindum Daða Más Kristóferssonar, Erlu Sturludóttur og Ragnhildar Friðriksdóttur um sjávarútveg (sjá 11.7.3). Grein 11.7.5 byggir að hluta á erindi Ingibjargar Jónsdóttur og Ásgríms Ásgrímssonar. Að auki hafa verið nýttar upplýsingar sem komu fram á málstofu samráðavettvangs um þekkingarsköpun vegna loftslagsbreytinga ((Veðurstofa Íslands, 2023)) og vinnustofum sem fram fóru fram í tengslum við mótun tillagna fyrir landsáætlun um aðlögun ((Alta, 2023a)). Vitnað er beint í þessar upplýsingar þar sem það á við. Frekari umfjöllun um áhrif loftslagsbreytinga á atvinnuvegi er að finna í kafla 8.

11.2 Hvað er aðlögun?

Loftslagsaðgerðum er almennt skipt í tvo flokka; aðlögunaraðgerðir og mótvægisaðgerðir.

Aðlögunaraðgerðir felast í því að undirbúa samfélög, fólk, kerfi og náttúru undir áhrif loftslagsbreytinga, lágmarka skaðlegar afleiðingar þeirra og nýta möguleg tækifæri. Aðlögun er lykilþáttur í því að tryggja langtímaviðbrögð við loftlagsbreytingum með það að markmiði að vernda fólk, lífsviðurværi og vistkerfi (Stjórnarráð Íslands, 2015). Aðlögunaraðgerðir miðast oft að tilteknum geirum, hópum og kerfum og eru því staðbundnar aðgerðir.

Mótvægisaðgerðir fela í sér kolefnisbindingu og samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda. Mótvægisaðgerðir eru skilgreindar sem hnattrænar.

Mikilvægt er að ná fram samlegð á milli mótvægis- og aðlögunaraðgerða til þess að koma í veg fyrir að þær vinni hvor á móti annarri (sjá mynd 11.1).

Með **aðlögun** er hægt að draga úr tjónnæmi og varnarleysi gagnvart loftslagsbreytingum. Aðlögun í vistkerfum á sér stað með breytingum gegnum vist- og þróunarfræðilega ferla, oft sjálfkrafa en inngrip manna getur flýtt fyrir (Pörtner o.fl., 2022, box TS.1).. Hvað mannleg kerfi varðar getur aðlögun verið viðbragð við atburði eða breytingum eða fyrirfram skipulögð. Aðlögun getur verið stigvaxandi eða á formi umbyltingar (IPCC, 2022).

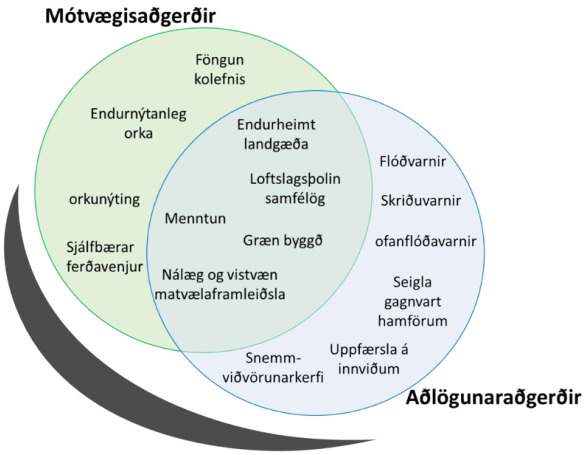
Oft er talað um að byggja upp **loftslagsþol** með aðlögunaraðgerðum. Loftslagsþol, í samhengi aðlögunar, er getan til að snúa aftur til fyrra horfs í kjölfar röskunar. Í víðara samhengi er hugatakið notað um getu til að viðhalda nauðsynlegri starfsemi og/eða einkennum en hafa um leið möguleikann á því að taka breytingum (IPCC, 2022).

Við mat á árangri aðgerða er skoðað að hvað leiti þær hafa (1) dregið úr tjónnæmi og loftslagstengdri áhættu, (2) aukið loftslagsþol og hvort þær hafi (3) endað í **slæmri aðlögun** (*e. maladaption*). Með slæmri aðlögun er vísað til aðgerða sem geta leitt til aukinnar loftslagsáhættu, meðal annars vegna aukinnar losunar gróðurhúsalofttegunda, aukins tjónnæmis vegna loftslagsbreytinga, ranglátra umskipta eða minnkandi velferðar, núna eða í framtíðinni. Slæm aðlögun á sér yfirleitt stað án ásetnings (IPCC, 2022).

Nýjasta skýrsla Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar beinir, á meira afgerandi hátt en áður, sjónum sínum að samspili loftslags, vistkerfa, líffræðilegs fjölbreytileika og samfélags manna. Með því að beina sjónum að samspili þessara þátta er unnt að greina betur áhættu vegna loftslagsbreytinga og þau tækifæri sem mögulega skapast.

Mynd 11.2a) sýnir hvernig þessir þættir hafa áhrif hver á annan.

Losun gróðurhúsalofttegunda af mannavöldum veldur loftslagsbreytingum. Vegna aukinnar vár og tjónnæmis verður hættan sem skapast meiri en unnt er að aðlagast og afleiðingarnar valda tjóni. Hægt er að draga úr losun, aðlagast eða aðlagast með slæmum hætti, og það er á ábyrgð mannsins. Vistkerfi geta einnig aðlagast og brugðist við, en þó innan ákveðinna marka. Heilbrigð vistkerfi með líffræðilegum fjölbreytileika eru manninum mikilvæg sem lífsviðurværi. Maðurinn hefur áhrif á þau og getur endurheimt þau og verndað.



Mynd 11.1: Mikilvægt er að ná fram samlegðaráhrifum milli mótvægisaðgerða og aðlögunaraðgerða með það að markmiði að þær vinni ekki hvor á móti annarri. Sjá dæmi um sniðmengi loftslagsaðgerða á myndinni

Mynd 11.2b) lýsir leiðum til þess að draga úr áhættu tengdri loftslagsbreytingum og byggja upp loftslagsþol. Til þess að svo megi verða þurfa umskipti að eiga sér stað á samfélagi og vistkerfum í átt að aukinni seiglu. Viðurkenning á loftslagsáhættu getur stutt við aðlögun og mótvægisaðgerðir og umbreytingar dregið úr áhættu. Stjórnhættir, fjármagn, uppbygging þekkingar og getu, tækni og hvatar auðvelda aðgerðir. Frekari umfjöllun um niðurstöður nýjustu skýrslu Milliríkjanefndarinnar í samhengi aðlögunar má finna í viðauka A og kafla 1.

Umhverfisstofnun Evrópu (*e. European Environment Agency, EEA*) skiptir aðlögunaraðgerðum í lykilflokka eftir því í hverju aðgerðirnar felast, sjá töflu 11.1.

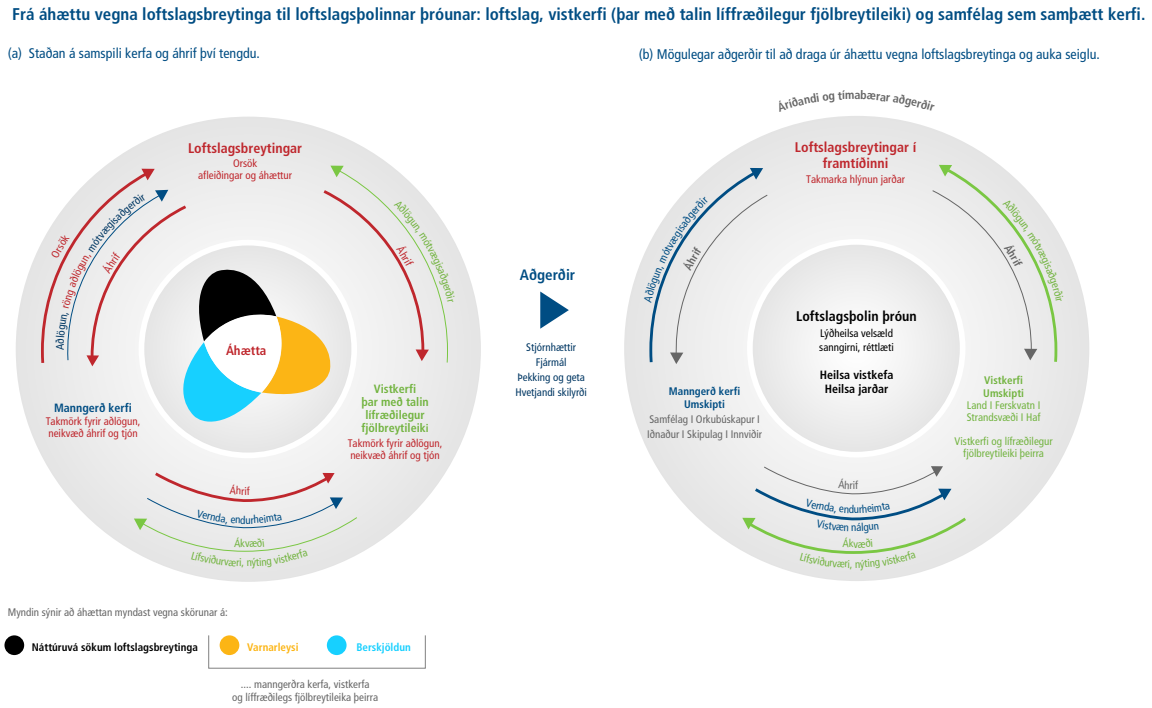
Til einföldunar er einnig oft talað um þrjá meginflokka aðlögunaraðgerða: gráar, grænar og mildar lausnir.

- **Gráar lausnir** felast í tækni- og verkfræðilegum úrlausnum, svo sem byggingu varnargarða eða stífla. Slíkar lausnir geta verið nauðsynlegar þar sem öðrum aðgerðum verður ekki við komið.

- **Grænar lausnir** felast í styrkingu náttúrulegra ferla og stuðningi við þjónustu vistkerfa.

Tafla 11.1: Tafla frá Evrópsku umhverfisstofnunninni um flokkun aðgerða (Stýrihópur, 2023).

Lykilflokkar aðgerða	**Undirflokkar/Tegund**	**Nánari skýring**
A: Stjórnhættir og stofnanir	A1: stjórntæki	Gerð/endurskoðun stefnu
		Gerð/endurskoðun stefnu
	A2: Stjórnun og skipulag	Samþætting aðlögunar inn í aðra geira
		Gerð/endurskoðun tæknilegra reglna og staðla
	A3: Samhæfing, samvinna og tengslanet	Gerð/endurskoðun samstarfshátta ráðuneyta
		Stofnun/endurskoðun á tengslaneti hagsmunaaðila
B: Hagrænar og fjárhagslegar aðgerðir	B1: Fjármögnun og fjárhagslegir hvatar	Stofnun/endurskoðun á fjárhagslegu hvatakerfi
		Uppsetning/endurskoðun fjármögnunarleiða
	B2: Tryggingar og áhættumiðlun	Uppsetning/endurskoðun vátrygginga
		Stofnun/endurskoðun viðbragðssjóða vegna neyðartilvika
C: Gráar og tæknilegar aðgerðir	C1: Gráar aðgerðir	Nýir innviðir
		Endurbætur, uppfærsla og/eða endurnýjun innviða
	C2: Tæknilegar aðgerðir	Snemm-viðvörunarkerfi
		Greining á, og kortlagning hættu og áhættu
		Þjónusta og ferlar
D: Náttúru-vistkerfismiðaðar lausnir	D1: Grænar aðgerðir	Innleiðing/uppfærsla á grænum innviðum
		Náttúruleg og/eða hálfnáttúruleg stjórnun landnotkunar
	D2: Bláar aðgerðir	Innleiðing/uppfærsla á bláum innviðum
		Náttúruleg og/eða hálfnáttúruleg stjórnun vatns og hafsvæða
E: Þekking hegðun og atferli	E1: Upplýsingar og vitundarvakning	Rannsóknir og nýsköpun/þróun
		Samskipti, fræðsla og miðlun
		Verkfæri og gagnagrunnar til stuðnings ákvarðanatöku
	E2: Uppbygging getu, valdefling og hegðun/lífstíll	Greining og miðlun góðra starfshátta/aðferða
		Þjálfun og þekkingarmiðlun
		Miðlun um lífstíl og hegðun



Mynd 11.2: Samspil loftslagsbreytinga, mannlegra kerfa og vistkerfa (þ.m.t. líffræðilegs fjölbreytileika) . Mynd a) sýnir helstu tengingar á milli kerfa. Mannlegar athafnir valda loftslagsbreytingum. Bláar örvar merkja áhrif mannlegra kerfa á önnur kerfi, grænar örvar merkja áhrif vistkerfa og rauðar örvar merkja áhrif loftslagsbreytinga. Mynd b) sýnir leiðir til loftslagsþolinnar þróunar. Bláar örvar tákna áhrif mannlegra kerfa, grænar örvar áhrif vistkerfa og gráar örvar sýna minnkuð áhrif loftslagsbreytinga (eftir aðlögun) og athafna manna. Byggt á mynd SPM.1 (IPCC, 2022).

Til dæmis með því að auka fjölbreytni nytjaplantna og styrkja náttúrulegar varnir, svo sem votlendi. Uppbygging grænna innviða og aukin kolefnisbinding falla einnig undir grænar lausnir.

- **Mildar lausnir** snúa að breytingum á lögum og reglugerðum og gerð skipulags sem miðar að því að hafa áhrif á hegðun. Undir mildar lausnir fellur einnig fyrirkomulag tryggingamála, gerð hættumats og vöktun á umhverfinu.

Grænum og mildum lausnum fylgir yfirleitt ekki mikil áhætta þar sem þær aðgerðir sem gripið er til nýtast til góðs, hvort sem áhrif loftslagbreytinga verða veruleg eða lítil. Vegna þessa er oft lögð áhersla á slíkar lausnir og möguleika þess að innleiða þær áður en gripið er til grárra lausna.

11.3 Aðlögun í alþjóðlegu samhengi

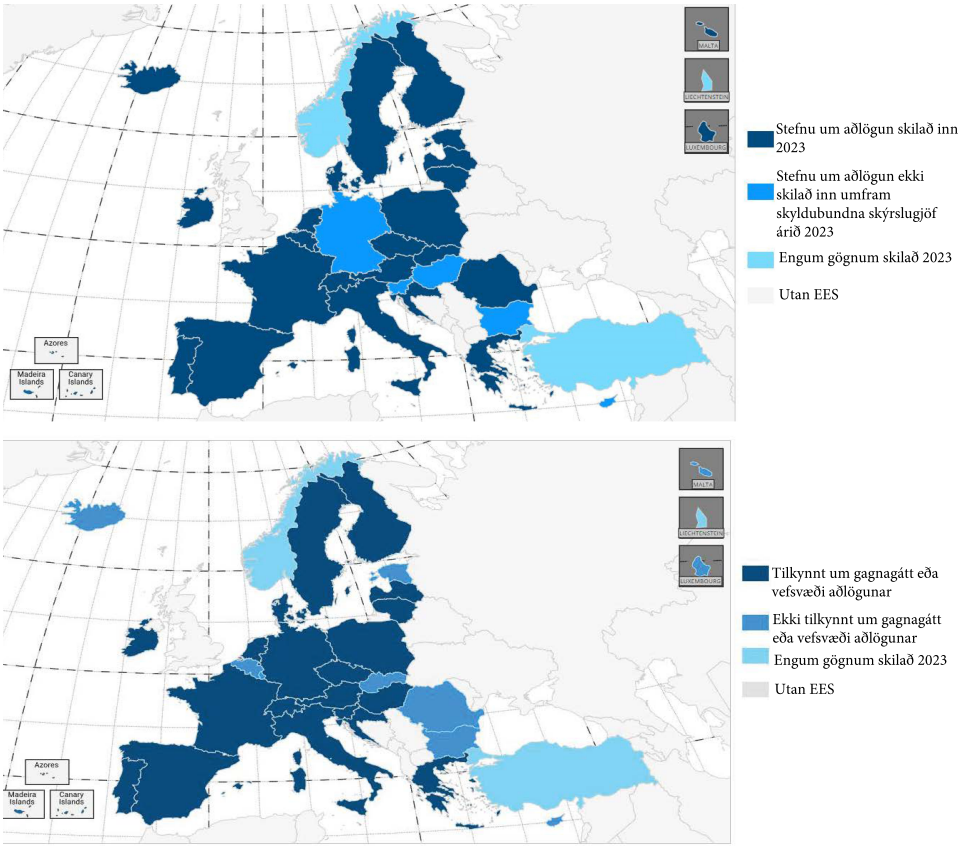
Í V2018 er fjallað um aðlögun í alþjóðlegu samhengi. Þar kom fram að á Íslandi þyrfti að taka aðlögun mun fastari tökum en gert var á þeim tíma. Hér að neðan verður nýlegri umfjöllum varðandi aðlögun í alþjóðlegu samhengi gerð skil og rakið hvað gerst hefur á Íslandi frá útkomu V2018.

Í 7. grein Parísarsamningsins er sérstaklega fjallað um aðlögun (Stjórnarráð Íslands, 2015). Þar setja aðildarríkin fram heimsmarkmið um aðlögun (*e. Global Goal on Adaptation*). Tilgangur

þess er að auka aðlögunarhæfni og seiglu og draga um leið úr tjónnæmi gagnvart loftslagsbreytingum með það að leiðarljósi að styðja við sjálfbæra þróun og tryggja fullnægjandi aðlögunaraðgerðir. Samkvæmt samkomulaginu skulu aðildarríki taka þátt í aðlögunarferlum og innleiða aðgerðir. Tekur sú vinna meðal annars til mótunar og innleiðingar aðlögunaráætlana, mats á áhrifum loftslagsbreytinga og tjónnæmi með forgangsröðun aðgerða í huga. Að auki er lögð áhersla á að mæla og meta árangur aðgerða við að byggja upp loftslagsþol.

Aðildarríkjum Evrópusambandsins ber að skila skýrslu um aðlögun að loftslagsbreytingum í gegnum gagnaskilagátt Umhverfisstofnunar Evrópu skv. reglugerð (ESB) 2018/1999. Ákvæði um þau skil voru ekki tekin inn í EES-samninginn og hafa því ekki verið innleidd í íslenskt regluverk. Af þeim sökum er valkvætt hvort Ísland skilar upplýsingum um aðlögun í gáttina. Skýrslugjöfin er tengd við framsetningu á upplýsingum um stöðu aðlögunar í álfunni. Þar sem Ísland hefur horft til aðlögunarvinnu í Evrópu við skipulag sinna gagna og áætlana var upplýsingum um aðlögun skilað á valkvæðum grundvelli í gegnum evrópsku gáttina árið 2023. Litið var á þau skil sem tilraun til þess að kynnast fyrirkomulaginu og ávinningi af því að taka þátt í formlegum skilum. Næstu skil í gáttina verða árið 2025.

Mynd 11.3 sýnir stöðu Evrópuþjóða hvað varðar undirbúning, þróun og innleiðingu á stefnu um aðlögun (*e. National Adaptation Strategy, NAS*) og landsáætlun um aðlögun (*e. National Adaptation Policy, NAP*). Á efri hluta myndarinnar er Ísland dökk blátt að lit sem merkir að stefna um aðlögun hafi verið til staðar árið 2023. Á neðri hluta er Ísland merkt með ljósari lit sem merkir að ísland hafi ekki innleitt gagnagátt eða vefsvæði tileinkað aðlögun árið 2023 (European Environment Agency, 2023).



Mynd 11.3: Sambandsríki Umhverfisstofnunar Evrópu eru komin mislangt á veg hvað varðar undirbúning, þróun og innleiðingu á stefnu um aðlögun (e. National Adaptation Strategy, NAS) og landsáætlun um aðlögun (e. National Adaptation Policy, NAP).

11.4 Aðlögun í norrænu samhengi

Þrátt fyrir að aðlögunaraðgerðir taki almennt mið af umhverfi og aðstæðum á hverjum stað er hægt að læra af reynslu annarra. Norrænn vinnuhópur um loftslag og andrúmsloft (Den Nordiske Arbejdsgruppe for Klima og Luft) starfar á vegum Norrænu ráðherranefndarinnar. Hlutverk hans er meðal annars að stuðla að því að Norðurlöndin mæti markmiðum um aðlögun að loftslagsbreytingum og samdrátt í losun. Einnig er til staðar óformlegur samráðsvettvangur á milli fulltrúa Norðurlandanna sem starfa á sviði aðlögunar og hefur sá hópur meðal annars verið ráðgefandi fyrir Norrænu ráðherranefndina við val á greiningum og rannsóknaverkefnum á málefninu.

Samkvæmt nýlegri samanburðarrannsókn á stöðu aðlögunar á Norðurlöndunum, með tilliti til stefnumótunar, lagaramma og fjárhagslegra kerfa, (Gram-Hanssen o.fl., 2023) eru Norðurlöndin almennt ágætlega á veg komin með að hrinda í framkvæmd aðlögunaraðgerðum. Nú þegar hafa flest landanna lokið að minnsta kosti einum hring stefnumótunar vegna aðlögunar 11.4. Niðurstöðurnar sýna þó að enn er skortur á heildrænu kerfi til þess að framkvæma áhættumat og mæla, vakta og meta árangur aðgerða. Þetta á sérstaklega við í tilfelli loftslagsáhættu sem gengur þvert á landamæri.

Árið 2022 kom út greining á stöðu Norðurlandanna gagnvart loftslagsáhættum sem ganga þvert á landamæri. Hún sýnir að vegna þess hversu mikið Norðurlöndin reiða sig á alþjóðlegar tengingar eru þau einkar berskjölduð gagnvart slíkum áhættum. Niðurstöðurnar benda til þess að tækifæri séu til að auka norrænt samstarf þegar kemur að greiningu á þessum áhættum og því því hvernig takast skuli á við þær. Stjórnvöld ríkjanna leiki þar stórt hlutverk en verkefnið kallar á víðtækt samstarf fyrirtækja og annarra hagaðila, innan Norðurlandanna og utan þeirra (NKL, 2022).

Árið 2023 kom út skýrsla um loftslagsáhættur sem ganga þvert á landamæri (Anisimov og Magnan, 2023). Skýrslan fjallar um viðfangsefnið í alþjóðlegu samhengi og samkvæmt henni er að finna eyður í loftslagsstefnum þegar kemur að flóknum og samverkandi áhættum sem ganga þvert á landamæri. Samkvæmt skýrslunni deilir alþjóðasamfélagið ábyrgð hvað varðar aðlögun vegna þessara þátta og þegar aðlögun hættir að vera staðbundin og verður hnattræn kallar það á nýjar lausnir í alþjóðlegu samstarfi (Anisimov og Magnan, 2023). Frekari umfjöllun um skýrsluna og loftslagsáhættu þvert á landamæri í kafla .



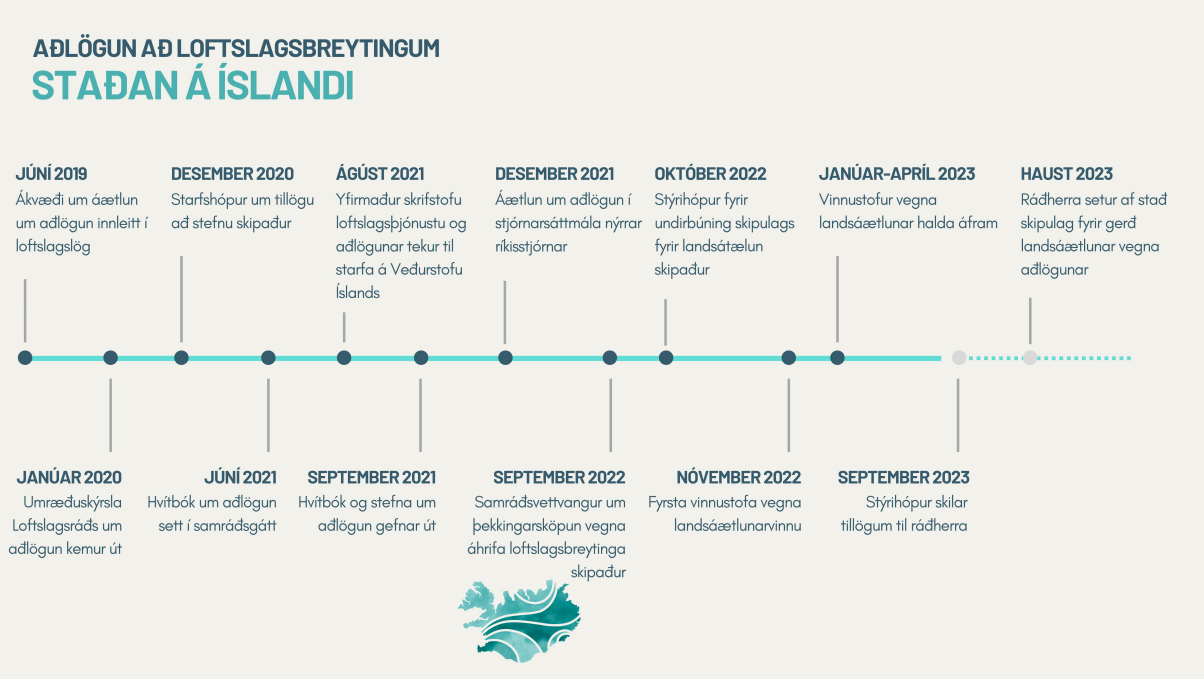
Mynd 11.4: Sjónræn framsetning á stigunum í stefnuferli aðlögunar, byggt á sambærilegri framsetningu frá ClimatAdapt Adaptation Support Tool *2023*

Á síðastu árum hefur byggst upp óformlegur samstarfsvettvangur sérfræðinga á sviði aðlögunar á Norðurlöndunum á formi ráðstefnu, *Nordic Conference on Climate Change Adaptation*, NOCCA. Sex slíkar ráðstefnur hafa verið haldnar og fór sú síðasta fram í Reykjavík vorið 2023. Tilgangur ráðstefnanna er að brúa bilið á milli vísindamanna og stefnumótenda á sviði aðlögunar. Í skýrslu sem birt var í kjölfar ráðstefnunnar í Reykjavík var lagt til að ráðstefnan yrði fest í sessi innan Norðurlandaráðs þar sem um mikilvægan vettvang til þekkingarmiðlunar um aðlögunaraðgerðir væri að ræða (Theódóra Matthíasdóttir o.fl., 2023).

11.5 Staða aðlögunar á Íslandi

Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneyti fer með loftslagsmál á Íslandi, þar á meðal mál er snerta aðlögun að loftslagsbreytingum. Eitt af markmiðum laga um loftslagsmál nr. 70/2012 er að

stuðla að aðlögun að afleiðingum loftslagsbreytinga. Lögin tóku breytingum árið 2019 með innleiðingu 5. gr. a en samkvæmt henni skal ráðherra láta vinna áætlun um aðlögun íslensks samfélags að loftslagsbreytingum og setja reglugerð um gerð og eftirfylgni hennar.

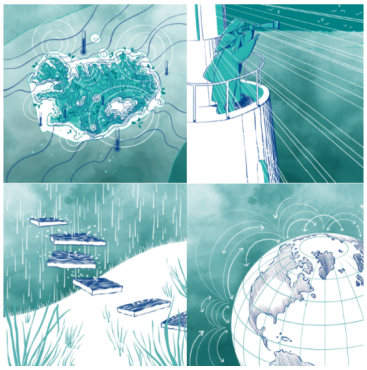


Mynd 11.5: Aðlögun að loftslagsbreytingum. Staðan á Íslandi til dagsins í dag

Landsáætlun er efsta stig áætlunargerða þar sem hún er stefnumarkandi og grundvöllur fyrir fjármögnun frá ríkisvaldinu. Landsáætlun um aðlögun á að skilgreina ábyrgðaraðila aðlögunaraðgerða. Einnig er hún rammi utan um eftirfylgni og mat aðgerða og tryggir þannig aðlögunarvinnu í landinu ásamt því að tryggja upplýsingagjöf og gefa yfirsýn yfir málaflokkinn (Stýrihópur, 2023). Innleiðing slíkrar áætlunar mun gegna lykilhlutverki í að gera aðlögun að loftslagsbreytingum markvissa (NKL, 2022).

Fyrsta stefna íslenskra stjórnvalda um aðlögun að loftslagsbreytingum, *Í ljósi loftslagsvár*, var birt í september 2021. Síðan hefur verið unnið að undirbúningi aðlögunar á Íslandi og skilaði stýrihópur tillögu að landsáætlun um aðlögun að loftslagsbreytingum, *Loftslagsþolið Ísland*, í september 2023 (Stýrihópur, 2023).

IPCC hefur skilgreint sex þátta stefnumótunarferli aðlögunar 11.4. Markmið þess er að auðvelda stefnumótendum og öðrum sem vinna að aðlögun á landsvísu við að þróa, innleiða, vakta og meta aðlögunaráætlanir. Segja má að nú, þegar tillögu að landsáætlun hefur verið skilað, sé fyrstu þremur skrefum ferlisins lokið; *1) Undirbúningi fyrir aðlögun*, *2) Mati á áhættuþáttum og veikleikum* með vísindaskýrslum, hvítbók og stefnu og *3) Greiningu á valkostum fyrir aðlögun*.



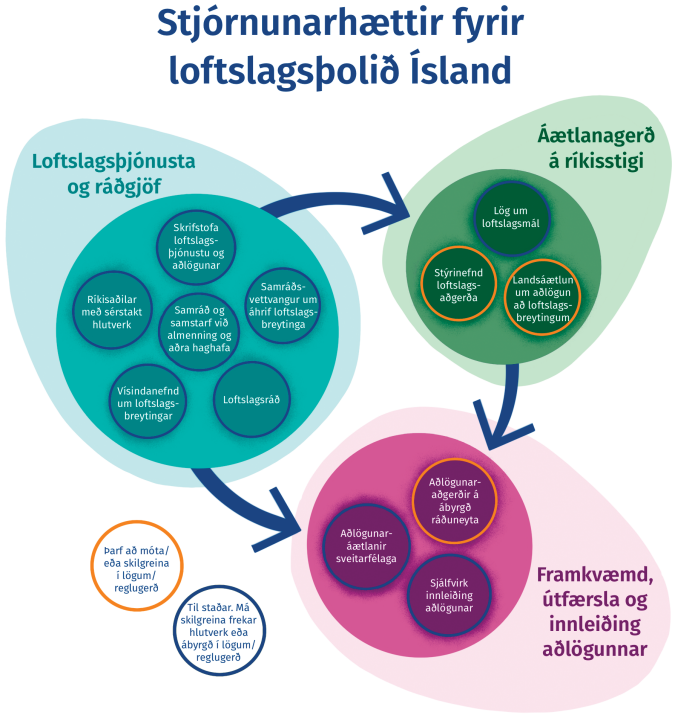
Mynd 11.6: Tillögur stýrihóps um fjórar forgangsaðgerðir

Sú tillaga sem skilað var um landsáætlun í september 2023 felur í sér að (1) settar verði af stað fjórar forgangsaðgerðir, (2) að landsáætlun um aðlögun verði skilgreind í reglugerð og (3) að stýrinefnd vegna tillögu að þingsáætlun um landsáætlun verði skipuð. Lagt er til að forgangsaðgerðirnar fjórar verði innleiddar samhliða ferli áætlunargerðar, en þær eru (sjá mynd 11.6):

1. Loftslagsatlas Íslands

2. Vöktunaráætlun – átak í rannsóknum
3. Tilraunaverkefni um gagnagátt fyrir náttúruvá með áherslu á vatns- og sjávarflóð
4. Loftslagsáhættuvísar fyrir Ísland

Samkvæmt tillögunni munu aðgerðirnar fjórar auðvelda og bæta áætlanagerð og innleiðingu fyrstu landsáætlunar þar sem þær leggja allar grunn að mikilvægum upplýsinga- og þekkingarinnviðum fyrir ákvarðanatöku vegna aðlögunarvinnu. Nánar má lesa um aðgerðirnar í tillögunni (Stýrihópur, 2023).



Mynd 11.7: Sýn stýrihópsins á stjórnunarhætti fyrir aðlögun að loftslagsbreytingum úr Loftslagsþolið Ísland: Tillögur fyrir gerð landsáætlunar um aðlögun að loftslagsbreytingum

Þrátt fyrir að minnst sé á aðlögun að loftslagsbreytingum í lögum um loftslagsmál er íslenskur lagagrunnur varðandi aðlögun að loftslagsbreytingum almennt veikur og tekur lögbundið umboð ríkis og sveitarfélaga hvað varðar loftslagsmál nánast eingöngu til mótvægisaðgerða. Að auki skortir á samþætta nálgun hvað varðar aðlögun á Íslandi. Mikilvægt er að skoða samþættingu á milli ráðuneyta og stefnu ríkisins sem tengist málaflokknum, svo sem um líffræðilegan fjölbreytileika, sjálfbæra þróun og almannavarnir. Þrátt fyrir að mörg ráðuneyti hafi sett sér stefnu um loftslagsmál er getan til þess að framfylgja henni oft lítil og yfirleitt er aðgerðum beint að samdrætti í losun (Gram-Hanssen o.fl., 2023). Landsáætlun um aðlögun er verkfæri til þess að ná fram nauðsynlegri samþættingu þvert á stefnu og störf stjórnvalda.

Í tillögu að landsáætlun er sett fram hugmynd að stjórnunarháttum fyrir loftslagsþolið Ísland (11.7). Hún sækir innblástur í fyrirkomulag á Írlandi þar sem landsáætlun er skilgreind í samhengi þriggja sviða; loftslagsþjónustu og ráðgjöf, áætlanagerð á ríkisstigi og framkvæmd ásamt útfærslu og innleiðingu.

Áhættumat og áhættustýring er mikilvægur hluti af aðlögun og greina þarf loftslagsáhættu fyrir alla geira og samfélagshópa. Samkvæmt nýlegri rannsókn sem unnin var af Umhverfissetri

Stokkhólms *(e. Stockholm Environment Institute, SEI)* fyrir Norrænu ráðherranefndina hefur ekki verið hugað nægilega vel að því hvaða áhrif loftslagsbreytingar sem ganga þvert á landamæri hafa á efnahag og samfélag á Íslandi. Stefna Íslands um aðlögun að loftslagsbreytingum einblínir mestmegnis á staðbundin áhrif. Þörf er á að skoða áskoranir þvert á landamæri á fólksflutninga tengdum loftslagsbreytingum, matvælaframleiðslu og fyrirtæki (NKL, 2022).

Engar ítarlegar greiningar á loftslagsáhættu þvert á landamæri hafa enn verið gerðar á Íslandi. Slíkar greiningar eru grunnur fyrir viðbragðsáætlanir og langtímastefnur vegna þeirra áskorana sem áhættur þvert á landamæri hafa í för með sér. Skilgreina þarf hvar ábyrgðin varðandi aðlögun á þessu sviði liggur og gæta þarf jafnræðis þegar kemur að kvöðum á mismunandi aðila, svo sem almenning, sveitarfélög eða fyrirtæki. Sem dæmi má nefna að fólksflutningar í tengslum við loftslagsbreytingar munu fela í sér samstarf og samninga á milli ríkis og sveitarfélaga um móttöku þessara hópa (Gram-Hanssen o.fl., 2023).

11.5.1 Loftslagsþjónusta og starfsemi tengd aðlögun



Mynd 11.8: Aðlögun að loftslagsbreytingum teygir anga sína um allt samfélagið

Í skýrslu V2018, umræðuskýrslu Loftslagsráðs auk Hvítbókar um aðlögun (Halldór Björnsson o.fl., 2018; Magnús Örn Sigurðsson, 2020; Hvítbók, 2021) og víðar var kallað eftir samþættingu og miðlun upplýsinga tengdum loftslagsbreytingum og aðlögun; bæði innan geira, á milli geira og til almennings.

Skrifstofa loftslagsþjónustu og aðlögunar (SLA) var stofnuð í ágúst 2021 og er hún staðsett á Veðurstofu Íslands. Skrifstofunni er ætlað að vera vettvangur til að styðja við stefnu stjórnvalda um aðlögun vegna loftslagsbreytinga og ákvarðanatöku varðandi aðlögun. Hún skal þjónusta brýn verkefni á sviði aðlögunar, miðla sviðsmyndum um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra og sinna vöktun á afleiðingum.

Skrifstofan er ábyrg fyrir samræmingu og miðlun upplýsinga sem tengjast áhrifum loftslagsbreytinga. Hún starfar náið með háskólasamfélaginu, fagstofnunum og hagaðilum og þjónar þannig sem brú á milli vísinda og samfélags. Skrifstofan þjónustar og starfar með þverfaglegri vísindanefnd um loftslagsbreytingar sem skipuð er af ráðherra og kemur að útgáfu reglubundinna skýrslna um afleiðingar loftslagsbreytinga, aðlögunarþörf og áhættugreiningar.

Skrifstofan er einnig tengiliður Íslands (*e. National Focal Point*) við Milliríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (*e. IPCC*) og sinnir loftslagsþjónustu í samvinnu við erlenda aðila, svo sem Alþjóðaveðurfræðistofnunina (*e. WMO*) og loftslagsþjónustu Evrópu, Copernicus. Auk ofangreinds starfrækir skrifstofan samráðsvettvang um þekkingarsköpun vegna áhrifa loftslagsbreytinga.

11.5.2 Samráðsvettvangur um þekkingarsköpun vegna áhrifa loftslagsbreytinga

Fyrsta stjórn samráðsvettvangs um þekkingarsköpun vegna áhrifa loftslagsbreytinga var skipuð af umhverfis-, orku- og loftslagsráðherra í september 2022 og hóf störf í október sama ár.

Vettvangurinn skal þjóna sem rými fyrir fundi, vinnustofur og fræðslu vegna rannsókna og greininga á áhrifum loftslagsbreytinga. Honum er ætlað að undirbyggja vinnu skrifstofu loftslagsþjónustu og aðlögunar við samantekt gagna og upplýsinga frá fagstofnunum og öðrum

samstarfsaðilum og miðlun þeirra til almennings og hagaðila m.a. með vefþjónustum, skýrslum og fræðslu.

Stjórn samráðsvettvangsins stóð fyrir málþingi sem bar heitið „*Aðlögun að loftslagsbreytingum: Hvað vitum við og hvað þurfum við að gera?*"(Samráðsvettvangur, 2023). Tilgangur viðburðarins var að öðlast yfirsýn yfir stöðu þekkingar á sviði loftslagsbreytinga og aðlögunar en ekki síður að leggja grunn að tengslaneti á milli aðila sem starfa á þessu sviði. Á málþinginu kom fram að staða þekkingar á áhrifum loftslagsbreytinga og aðlögunar er misjöfn á milli viðfangsefna, greina og sviða. Það sem meðal annars hefur staðið í vegi fyrir þekkingarsköpun er sú staðreynd að viðfangsefnið er tiltölulega nýtt í umræðunni og fjármagn til rannsókna er oft af skornum skammti (Veðurstofa Íslands, 2023).

Sú reynsla og þekking sem hefur byggst upp á fyrsta ári samráðsvettvangsins mun nýtast til þróunar vettvangsins til framtíðar. Í vinnustofum sem fóru fram í tengslum við mótun tillagna fyrir landsáætlun um aðlögun var áberandi ákall eftir slíkum þverfaglegum vettvangi. Í tillögum stýrihóps um landsáætlun var lagt til að nýrri stjórn vettvangsins væri falið aukið umboð til að vinna að skipulagi og samhæfingu loftslagsþjónustu með það að markmiði að styðja við þróun og innleiðingu loftslagsaðgerða. Það væri til dæmis hægt að gera með því að tryggja stjórninni aðkomu að þróun vöktunaráætlunar (Stýrihópur, 2023).

11.6 Skipulag í þágu aðlögunar



Mynd 11.9: Merki samráðsvettvangs um þekkingarsköpun um áhrif loftslagsbreyting

Skipulag og umhverfismat eru lykilstjórntæki til að vinna farsællega að aðlögun byggða og samfélags. Skipulagsgerð felur meðal annars í sér að horfa til langs tíma við mótun og ákvarðanatöku um ráðstöfun lands í samráði við almenning og hagsmunaaðila. Með skipulagi eru settar staðbundnar reglur um staðsetningu og útfærslu mannvirkja og annarrar landnýtingar, meðal annars með öryggi og sjálfbærni að leiðarljósi.

Þegar kemur að lögum og reglugerðum sem tengjast skipulagi er misjafnt hvernig náttúruvá, loftslagsvá og aðlögun eru tekin fyrir. Í skipulagslögum nr. 123/2010 á Íslandi er mælt fyrir um skipulagsáætlanir sem eigi að hafa öryggi langsmanna að leiðarljósi og í þeim skuli marka stefnu um landnotkun og byggðaþróun, meðal annars út frá náttúrvá. Í skipulagsreglugerð frá 2013, sem staðfest var á grundvelli skipulagslaga, eru sett fram ýmis ítarleg fyrirmæli um hvernig taka skal tillit til náttúruvár en ekki er minnst á loftslagsvá né aðlögun sérstaklega. Lög nr. 88/2018 um skipulag haf- og strandsvæða hefur meðal annars þau markmið að tekið sé mið af áhrifum loftslagsbreytinga við skipulag fjarða og flóa. Í lögum um umhverfismat framkvæmda og áætlana nr. 111/2021 segir að við gerð umhverfismats skuli leggja mat á næmi framkvæmda og áætlana fyrir hættu á náttúruhamförum. Samkvæmt lögum um almannavarnir nr. 82/2018 ber sveitarfélögum, í samvinnu við ríkislögreglustjóra, að kanna áfallaþol í sínu umdæmi. Ekki er talað um loftslagsþol í því samhengi.

Í september 2023 voru drög að hvítbók um skipulagsmál (Innviðaráðuneyti, 2023) birt í samráðsgátt stjórnvalda. Þar er lögð fram endurskoðuð landsskipulagsstefna til fimmtán ára ásamt aðgerðaáætlun til fimm ára. Í hvítbókinni eru skilgreind níu lykilviðfangsefni í landsskipulagsstefnu og tekur eitt þeirra sérstaklega til loftslagsbreytinga. Í aðgerðaáætluninni eru settar fram 17 aðgerðir sem ætlað er að ná fram markmiðum stefnunnar og snýr sú fyrsta að

því að „*efla viðnámsþrótt byggðar og samfélags gagnvart afleiðingum loftslagsbreytinga*". Það verði meðal annars gert í gegnum verkefni sem skilgreint er í núverandi Byggðaáætlun og er þegar hafið (sjá nánar grein 11A).

Í samhengi aðlögunar má benda á að í gildandi landsskipulagsstefnu frá 2016 (Skipulagsstofnun, 2016) er lögð áhersla á að það annars vegar að skipulag sé sveigjanlegt og stuðli að seiglu gagnvart samfélags- og umhverfisbreytingum og öryggi almennings gagnvart náttúruvá og loftslagsbreytingum og hins vegar að við skipulagsgerð sveitarfélaga sé tekið tillit til áhrifa loftslagsbreytinga og þeirrar hættu sem stafar af náttúruvá, svo sem flóðum.

11.6.1 Skipulagsmál og sveitarfélög

Sveitarfélög fara með skipulagsvald og veita bygginga- og framkvæmdaleyfi. Skipulagsáætlanir sem unnið er með innan sveitarfélaga eru þrenns konar: (1) Svæðisskipulag (sem er valkvætt annarsstaðar en á höfuðborgarsvæðinu), (2) aðalskipulag (þar sem stefna er mótuð af hverju sveitarfélagi um uppbyggingu og landnotkun á öllu landi innan sveitarfélagsins) og (3) deiliskipulag (sem tekur til minni svæða innan sveitarfélagsins).

Í deiliskipulagi eru til dæmis skilgreindar götur og lóðir og í því tilfelli þarf að vera unnt að sjá fyrir breytingar til framtíðar, svo sem hækkun á yfirborði sjávar. Á þeim grundvelli er svo hægt að setja reglur um hversu nálægt strandlengju má byggja, hvernig má nýta þær byggingar og hversu hátt þær þurfa að standa.

Með vel ígrunduðu skipulagi er hægt að tryggja að ákvarðanir taki mið af þekktri náttúruvá og að ráðstafanir séu gerðar til að bregðast við væntum afleiðingum loftslagsbreytinga. Það er meðal annars hægt að gera með því að:

- Laga staðsetningu og útfærslu byggðar og nýtingu lands að fyrirséðum atburðum og breytingum.
- Hagnýta græna innviði eins og blágrænar ofanvatnslausnir í bland við hefðbundnar tæknilegar lausnir, meðal annars til að mæta aukinni úrkomuákefð.
- Samþætta aðlögunaraðgerðir við aðrar áherslur í skipulagsgerð til að ná margþættum ávinningi. Það er hægt að gera með því að velja aðlögunaraðgerðir sem jafnframt miða að:
  - Varðveislu náttúrulegra svæða og líffræðilegrar fjölbreytni, t.d. með notkun grænna innviða sem binda gróðurhúsalofttegundir, styðja við líffræðilegum fjölbreytileika og bregðast við aukinni úrkomuákefð.
  - Vönduðu og aðlaðandi byggðu umhverfi, t.d. með útfærslu 20 mínútna hverfa þar sem áhersla er á þétta byggð, nærþjónustu, virka ferðamáta og græna innviði. Því er ætlað að stuðla að kolefnishlutleysi, viðnámsþrótti, lífsgæðum og bættri lýðheilsu.

Þegar má sjá dæmi um samþættingu aðlögunaraðgerða og annarra áherslna í skipulagsgerð á Íslandi. Í Grundarfirði var árið 2021 staðfest nýtt aðalskipulag þar sem sett var fram stefna um að blágrænar ofanvatnslausnir verði innleiddar í þéttbýli. Það var meðal annars gert vegna fyrirséðs aukins álags á veitukerfi vegna rigningar og asahláku en líka til þess að gera Grundarfjörð grænan, heilsuvænan og ákjósanlegan til búsetu, sjá mynd 11.10

Dæmi eru um að áskoranir tengdar loftslagsbreytingum hafi tafið vinnu við skipulagsgerð. Í Öræfasveit, Sveitarfélaginu Hornafirði, tengjast áskoranir við skipulagsgerð að miklu leyti hopun jökla. Sóst hefur verið eftir uppbyggingu íbúðar- og atvinnuhúsnæðis neðan við Svínafellsjökul. Við jökulinn er þekkt hætta á berghlaupi vegna óstöðugra hlíða í tengslum við hopun jökulsins. Við skipulagsgerð á svæðinu þarf því að skoða óskir um uppbyggingu útfrá þessari þekktu náttúruvá.

Varanleiki skipulagsákvarðana skiptir máli þegar kemur að sjávarstöðubreytingum. Fyrstu viðmiðunarreglur um skipulag á lágsvæðum voru settar fram árið 1992 (Gísli Viggósson, 1992) og



Mynd 11.10: Í stefnu aðalskipulags Grundarfjarðarbæjar hefur stefna um blágrænar ofanvatnslausnir verið innleidd í tengslum við verkefnið „Grænn og heilsuvænn Grundarfjörður“, birt með leyfi.

tóku mið af líklegri sjávarstöðuhækkun árið 2100, eða tæplega 110 árum eftir að reglurnar voru gefnar út. Í grein 2.5 er birt mat á sjávarstöðubreytingum til loka þessarar aldar og fyrir miðbik þeirrar næstu. Fyrri mörkin eru eftir tæplega 80 ár og þau seinni eftir tæplega 130 ár. Þegar skipulagt er á lágsvæðum þarf því að taka tillit til þess í forsendum að hækkandi sjávarstaða verður líklegast viðvarandi öldum saman (sjá umfjöllun í greinum 2.5 og 10.4.4).

Það er ljóst að víða á landinu munu sjávarstöðubreytingar hafa áhrif á hverfi sem byggð eru á lágsvæðum. Í þessu samhengi skiptir máli að afskriftatími bygginga er mun styttri en eðlilegur líftími þeirra. Sjávarflóð í íbúðabyggð getur falið í sér eignatjón fyrir einstaklinga og samfélagsleg áhrif, m.a. á trygginga- og lánastofnanir.

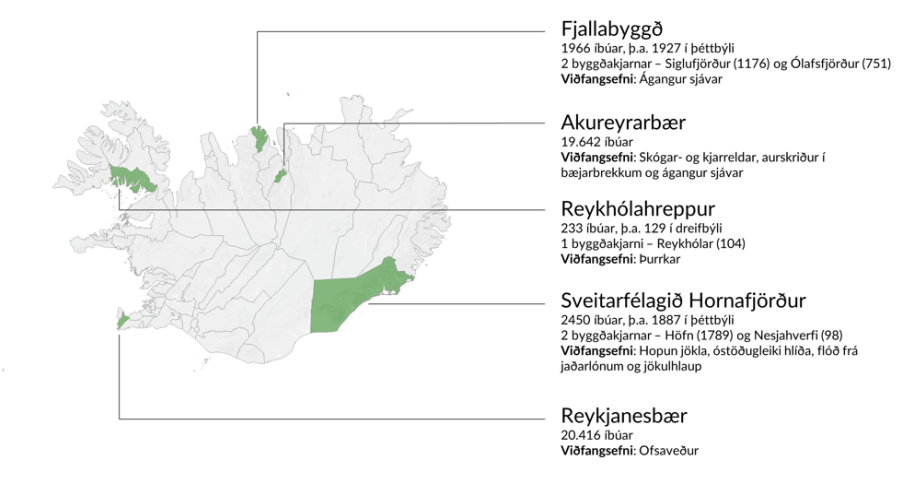
Nýlega hófst verkefni sem skilgreint er á byggðaáætlun og ætlað er að móta aðferðafræði fyrir gerð aðlögunaráætlana sveitarfélaga. Aðgerðin er á ábyrgð umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytis undir byggðaáætlun og framkvæmd af Veðurstofu Íslands, Byggðastofnun og Skipulagsstofnun (sjá umfjöllun í sérgrein 11A).

11A Aðlögunaráætlanir sveitarfélaga

Í byggðaáætlun 2022-2026 er skilgreint verkefni um að *móta heildræna nálgun á aðlögun sveitarfélaga að áhrifum loftslagsbreytinga*. Í þessu felst að gera sveitarfélög reiðubúin til þess að takast á við loftslagsbreytingar, svo sem með því að greina áskoranir, ógnanir og tækifæri til framtíðar og samræma við skipulagsáætlanir, viðbragðsáætlanir eða einstaka framkvæmdir. Aðgerðin er á ábyrgð umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytisins og er framkvæmd í samstarfi við Byggðastofnun, Skipulagsstofnun og skrifstofu loftslagsþjónustu og aðlögunar hjá Veðurstofu Íslands.

Fimm sveitarfélög taka beinan þátt í verkefninu, Akureyrarbær, Sveitarfélagið Hornafjörður, Fjallabyggð, Reykhólahreppur og Reykjanesbær. Lögð er áhersla á mismunandi nálgun innan hvers sveitarfélags; víð nálgun tekur til margra áhættuþátta og þröng nálgun til einnar eða færri tegunda áhættu. Á mynd 11.11 má sjá yfirlit yfir þátttökusveitarfélög verkefnisins og þá áhættuþætti sem skoðaðir verða í hverju sveitarfélagi. Verkefnið kallar á víðtækt þverfaglegt samstarf, svo sem við Samband íslenskra sveitarfélaga, fulltrúa sveitarfélaga, Almannavarnir og aðrar fagstofnanir.

Unnið verður með fulltrúm sveitarfélaganna við að greina áhrif og afleiðingar loftslagsbreytinga og móta aðgerðir til aðlögunar. Ferlar slíkrar vinnu eru enn óljósir og skýra þarf aðferðafræði, hlutverkaskiptingu, boðleiðir og fjármagn. Vinnan mun skila aðlögunaráætlunum sem miða að því að auka loftslagsþol innviða, atvinnugreina, efnahags og samfélags í þátttökusveitafélögunum. Samhliða vinnunni fer fram mótun almenns leiðarvísis sem nýtast mun öðrum sveitarfélögum á Íslandi við gerð aðlögunaráætlana óháð stærð, staðsetningu og mannafla.



Mynd 11.11: Þátttökusveitarfélögin fimm og helstu viðfangsefni innan verkefnsins.

11.6.1.1 Framtíðarsýn skipulagsmála

Sveitarfélög á Íslandi eru enn sem komið er ekki nægilega vel í stakk búin til þess að takast á við áskoranir sem felast í loftslagsbreytingum (Samráðsvettvangur, 2023). Sveitarfélög og ríki þurfa að vinna saman að aðlögunarmálum. Sveitarfélögin fara með skipulagsvaldið en það er hlutverk ríkis að styðja við með fjármagni og lagasetningu (Theódóra Matthíasdóttir o.fl., 2023). Ekki er til staðar skýr rammi um fjárhagslega aðstoð og hagnýtan stuðning fyrir sveitarstjórnastigið til að aðstoða við framkvæmd áhættumats og aðlögunaraðgerða sem byggjast á því (Gram-Hanssen o.fl., 2023).

Mikilvægt er að tryggja betur undirstöður loftslagsmiðaðs skipulags með skýrum markmiðum og fyrirmælum í skipulagslögum, skýrum áherslum í landsskipulagsstefnu og með leiðbeiningum, hvatningu og stuðningi við skipulagsyfirvöld í héraði og þeirra ráðgjafa og hönnuði.

Svo að skipulagsgerð verði markviss og árangursrík og aðlögun verði að almennri nálgun í skipulagsmálum þarf að skýra hvað ber að leggja til grundvallar skipulagsákvörðunum varðandi mat á hættu tengdum loftslagsbreytingum og hvaða viðmið ber að leggja til grundvallar um uppbyggingu og nýtingu svæða þar sem tiltekinnar hættu eða atburða er að vænta.

11.7 Viðbrögð við loftslagsvá: Dæmi um aðlögunaraðgerðir

Í V2018 var fjallað um aðgerðir innan nokkurra geira til þess að aðlagast mögulegum afleiðingum loftslagsbreytinga. Með vaxandi áhættu vegna loftslagsbreytinga er ljóst að nær allir geirar samfélagsins þurfa að huga að aðlögun á einhvern hátt. Vísindanefnd um loftslagsbreytingar hélt málstofur um þetta efni árið 2022 og verður hér stuttlega fjallað um þá aðlögunarþörf og stöðu aðlögunar innan nokkurra efnahagsgeira. Efnistök byggjast að verulegu leiti á erindum sem flutt voru á málsstofunum.

11.7.1 Fjármálastarfsemi og tryggingar

Eins og rætt er í kafla 8 er vátrygginga- og fjármálastarfsemi mikilvæg þegar kemur að því að stýra veðurtengdri áhættu.

Í grein 10.5.2 er fjallað um áhættustýringu og Sendai sáttmálann. Þar kemur fram að það sé hlutverk ríkja að haga áhættustýringu þannig hún dragi úr hörmungum. Þar þurfi þó að deila ábyrgðinni með öðrum hagaðilum, t.d. sveitarstjórnum og einkageiranum, svo sem

vátryggingafélögum (L. Jóhannsdóttir og Wallace, 2021). Því er mikilvægt að efla samstarf hagaðila, t.d. á sviði mannvirkjagerðar og skipulagsmála, með það fyrir sjónum að draga úr tjóni og skilgreina hvar ábyrgðin liggur.

Fjármálafyrirtæki eru háð áhættumati til framtíðar. Þau eru í sífellt auknum mæli farin að kalla eftir upplýsingum um loftslagsbreytingar og taka tillit til þeirra við sviðsmyndagreiningar. Að auki eru fjárfestingar á sviði loftslagsmála og aðlögunar að verða algengari, sem er í samræmi við greiningar Milliríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar.

Seðlabankar víða um heim eiga í samstarfi um að meta loftslagsáhættu á fjármálakerfi. Í grein 8.6 er fjallað sérstaklega um áhrif loftslagsbreytinga á fjármálakerfi. Eins og þar kemur fram voru sett fram nokkur ráð til seðlabanka heimsins í samhengi loftslagsbreytinga. Þau ráð sem sérstaklega tengjast aðlögun snúa að því að efla skilning á loftslagsáhættu fjármálafyrirtækja, þróa loftslagsáhættu í álagsprófum fjármálamarkaða og loftslagsáhættuviðmið fyrir varðveislu gjaldeyrisforða auk þess að efla færni og þekkingu starfsfólks á loftslagstengdum áhættuþáttum (NGFS, 2019).

Eins og fram kemur í grein 8.6.1 eru loftslagsbreytingar á verksviði Seðlabanka Íslands (Gunnar Jakobsson o.fl., 2021). Viðbrögð við áhrifum loftslagsbreytinga snerta bæði hlutverk og umboð bankans, t.d. í samhengi fjármálastöðugleika, fjármálaeftirlits og peningaeftirlits. Til þess að bregðast við því þarf sviðsmyndagreiningu, álagspróf og mat á loftslagsáhættu og haglíkana. Seðlabankinn hefur sett fram skuldbindingar vegna loftslagsáhættu sem snúa bæði að eigin rekstri og starfsemi ábyrgðarsviða bankans (Gunnar Jakobsson o.fl., 2021). Sjá frekari umfjöllun í grein 8.6.1.

11.7.1.1 Viðbrögð tryggingafélaga við loftslagsvá

Hvötum til viðbragða við loftslagsvá má skipta í innri og ytri hvata og óbeinan þrýsting. Ráðast hvatarnir nokkuð af staðsetningu, eðli og stærð tryggingafélaga (Hvítbók, 2021; Jóhannsdottir o.fl., 2015; Lára Jóhannsdóttir, 2015). Fjallað var um hvata til aðgerða í V2018 og því er hér aðeins stiklað á stóru.

Ytri hvatar eru t.d. lög, reglugerðir, alþjóðlegir staðlar og sáttmálar og leiðbeiningar. Sem dæmi má nefna að ákvæði um ófjárhagslega upplýsingagjöf er þegar að finna í lögum nr. 3/2006 um ársreikninga. Kallað er eftir breytingum á starfsemi vátryggingarfélaga og annarrar fjármálastarfsemi vegna loftslagsbreytinga. Fyrirtækin þurfa í auknum mæli að upplýsa um umhverfis- og loftslagsáhættu sem tengist rekstri þeirra, til dæmis hvernig loftslagsáhætta er skilgreind, metin og hvernig henni er stýrt. Þá má nefna að áherslur á ábyrgar fjárfestingar hafa aukist. Til að mynda var samþykkt ákvæði um siðferðileg viðmið í fjárfestingum lífeyrissjóða þegar lög nr. 29/1997 um skyldutryggingu lífeyrisréttinda og starfsemi lífeyrissjóða voru endurskoðuð árið 2017.

Innri hvatar svo sem fjárhagslegur ávinningur geta leitt af sér aukna áherslu á aðlögun að loftslagsbreytingum.

Óbeinn þrýstingur getur orðið til vegna krafa stjórnvalda á viðskiptavini vátryggingafyrirtækja sem kalla eftir nýjum lausnum. Auk þess sem fjárhagslegur þrýstingur frá endurtryggingafélögum til skaðatryggingafélaga getur haft áhrif.

Í Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum kemur fram að þörf sé á ýmsum umbótum á sviði vátrygginga (Hvítbók, 2021). Byggja þarf verðlagningu vátrygginga og upplýsingagjöf á áhættumati. Þar sem ekki allt tjón fæst bætt þarf einnig að hvetja kaupendur til að huga að forvörnum. Í því samhengi er mikilvægt að auka upplýsingagjöf til almennings um nauðsynlegar forvarnir, lögboðna vernd og þá vernd sem í boði er hjá einkareknum félögum.

Upplýsingar skortir um tíðni og alvarleika veðurfarstengdra tjóna og áhrif þeirra á vátryggingarkjör og skilmála. Einnig er óvíst hvort og hvernig tjónaupplýsingar eru nýttar til að draga úr áhættu af veðurfarstjónum. Því þarf að efla rannsóknir sem snúa að vátryggingafélögum og loftslagsáhættu, svo sem getu vátryggingafélaga að mæta slíkri áhættu og hvernig þau stýri

henni. Hægt væri að innleiða loftslagstengd álagspróf á vátryggingaskuld og nýta þau til þess að bæta áhættumat og verðlagningu vátrygginga. Skýra þarf áhrif aðlögunar á vátryggingataka í nútíð og framtíð hvað varðar forvarnir, vátryggingakjör, skilmála og vátryggingaskuld (Hvítbók, 2021).

Fjallað var um tryggingafélög í kafla 8 og vatnsveitur í kafla 9.2.1. Þrátt fyrir að tryggingafélög bjóða vernd gegn vatnstjóni er ekki ljós hvort um fullnægjandi vernd sé að ræða gagnvart flóðahættu vegna leysingavatns, flóða sem verða vegna brests mannvirkja eða sjávarflóða. Í samhengi aðlögunar er mikilvægt að ábyrgð hvers aðila sé skýr, eins og fram kemur í Sendai sáttmálanum.

11.7.2 Ferðaþjónusta

Ferðaþjónusta er umsvifamikil á Íslandi og stjórnvöld, viðbragðsaðilar og fulltrúar ferðaþjónustunnar eiga í stöðugum samskiptum vegna náttúruvár, öryggis ferðamanna, áhættumats og viðbragðsáætlana. Vinna við aðgerðaráætlun fyrir ferðamálastefnu til ársins 2030 stendur yfir. Þar eru samgöngur og öryggismál tekin fyrir, en þessir þættir eru háðir loftslagsbreytingum (sjá 11.7.5). Þannig felst aðlögun innan ferðaþjónustunnar meðal annars í því að gera atvinnugreinina betur í stakk búna til þess að takast á við áskoranir með öryggi ferðamanna í huga (Alta, 2023b).

Eins og rakið er í kafla 8 geta loftslagsbreytingar haft áhrif á eftirspurn innan ferðaþjónustunnar, auk þess sem breytingar á náttúrufari geta haft bein áhrif á rekstur. Augljósasta dæmið er jöklatengd ferðaþjónusta þar sem aðlögun hefur átt sér stað á formi tæknilegrar-, skipulagslegrar-, viðskiptalegrar- og stofnanalegrar aðlögunar. Hún er ýmist venjubundin eða sem viðbrögð við sýnilegri áhættu eða tækifærum (sjá umfjöllun í sérgrein 11B).

11B Aðlögun í ferðaþjónustunni

Í rannsókn Jóhannesar Welling (Welling og Árnason, 2016; Welling og Abegg, 2019), sem fjallað er um í kafla 8.5, var meðal annars skoðað hvernig aðlögun að loftslagsbreytingum á sér stað innan smárra og meðalstórra fyrirtækja í jöklaferðamennsku. Um leið var metið hvaða þættir það eru sem hafa áhrif á aðlögun þessara fyrirtækja. Samkvæmt viðtölum við sjö mismunandi aðila í ferðaþjónustu við Vatnajökul voru skilgreindar 63 mismunandi aðlögunaraðgerðir sem skipt var í eftirfarandi flokka:

- **Tæknileg aðlögun**, svo sem uppbygging brúa eða kaup á nýjum bílum.
- **Skipulags- og stjórnunarlega aðlögun**, svo sem breytingar á staðsetningu ferðamannastaða, vöktun og viðhaldi.
- **Viðskiptaleg aðlögun**, svo sem þegar fjölbreytileiki ferða breytist, til dæmis með tilkomu hellaferða.
- **Stofnanaleg aðlögun** , til dæmis þjálfun starfsmanna og samvinna milli aðila.

Skoðað var hvort aðgerðir væru framsýnar (*e. proactive adaptation*), það er skipulagðar með tilliti til loftslagsbreytinga, eða tilfallandi. Niðurstöður sýndu að meirihluti aðgerða reyndist tilfallandi, sjá töflu 11.2.
Af þeim aðgerðum sem voru skipulagðar með loftslagsbreytingar í huga var einkum um að ræða viðbrögð við því sem þegar hafði átt sér stað fremur en undirbúning undir framtíðarvá. Aðlögunaraðgerðirnar virtust því annars vegar vera viðbrögð við þegar sýnilegri áhættu eða tækifærum vegna loftslagsbreytinga og hins vegar hluti af venjubundinni þróun.
Viðhorf til áhættunnar reyndist helsti áhrifaþátturinn á aðlögunaraðgerðir. Þannig töldu forsvarsmenn fyrirtækjanna að loftslagsbreytingar væru ekki að auka áhættu þeirra. Þeir töldu greinina sveigjanlega og hafa getu til þess að aðlagast breyttum aðstæðum og

landslagi. Þeir bentu einnig á hversu flókið það væri að beita framsýnni aðlögun þar sem jöklar eru síbreytilegir.
Í ljós kom að ýmsar hindranir standa í vegi fyrir framsýnni aðlögun; skammtímahugsun, togstreita á milli mismunandi hagsmuna og ólíkar þarfir hvað varðar þjónustu, rannsóknir og umgjörð sem fyrirtækin þurfa á að halda frá stjórnvöldum, stofnunum og vísindasamfélaginu.
Í rannsóknum Jóhannesar voru haghafar fengnir til þess að taka þátt í hönnun sviðsmynda í samhengi mögulegra aðlögunaraðgerða (*e. participatory scenario planning*) auk þess sem aðlögunarhæfni þeirra var greind. Í ljós kom að þátttakendur búa ekki yfir nægilegri getu til aðlögunar, ekki síst í samhengi ferla við ákvarðanatöku og stjórnsýslu. Aftur á móti getur aðferðafræði sem felur í sér þátttöku í sviðsmyndagreiningu aukið aðlögunarhæfni.

Tilfallandi aðlögun	**Skipulögð aðlögun**	
	Viðbrögð	*Framsýn*
55%	44%	1%

Tafla 11.2: Aðlögunaraðgerðir sem voru innleiddar samkvæmt rannsókn (Welling og Árnason, 2016)

11.7.3 Sjávarútvegur

Ekkert var fjallað um aðlögun í sjávarútvegi í V2018. Frá því að V2018 kom út hafa farið fram rannsóknir á möguleikum til aðlögunar innan geirans.

En til að bregðast við áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg þarf að fylgjast með þróun vistkerfisbreytinga með það að markmiði m.a. að geta brugðist við til að draga úr mögulegum neikvæðum áhrifum og til þess þarf að marka rannsóknarstefnu og skilgreina þarf og skipuleggja nauðsynlegar rannsóknir á vistkerfi hafsins (Alta, 2023c). Einnig þarf að skoða líffræðilegar afleiðingar af loftslagsbreytingum í samhengi við aðrar umhverfisbreytingar (Hrönn Egilsdóttir, 2023). Gera þarf heildstæða áætlun um hafrannsóknir um endurmat og endurskipulag núverandi rannsókna með aukinni áherslu á að aflað verði nauðsynlegrar þekkingar sem þörf er á til að svara hvernig helstu nytjastofnum muni farnast í framtíðinni. Forsenda sjálfbærar nýtingar á sjávarauðlindum inn í framtíðina, byggir á umhverfis- og vistkerfisvöktun og öflugum hafrannsóknum, og því eru þær þjóðhagslega mikilvægar.

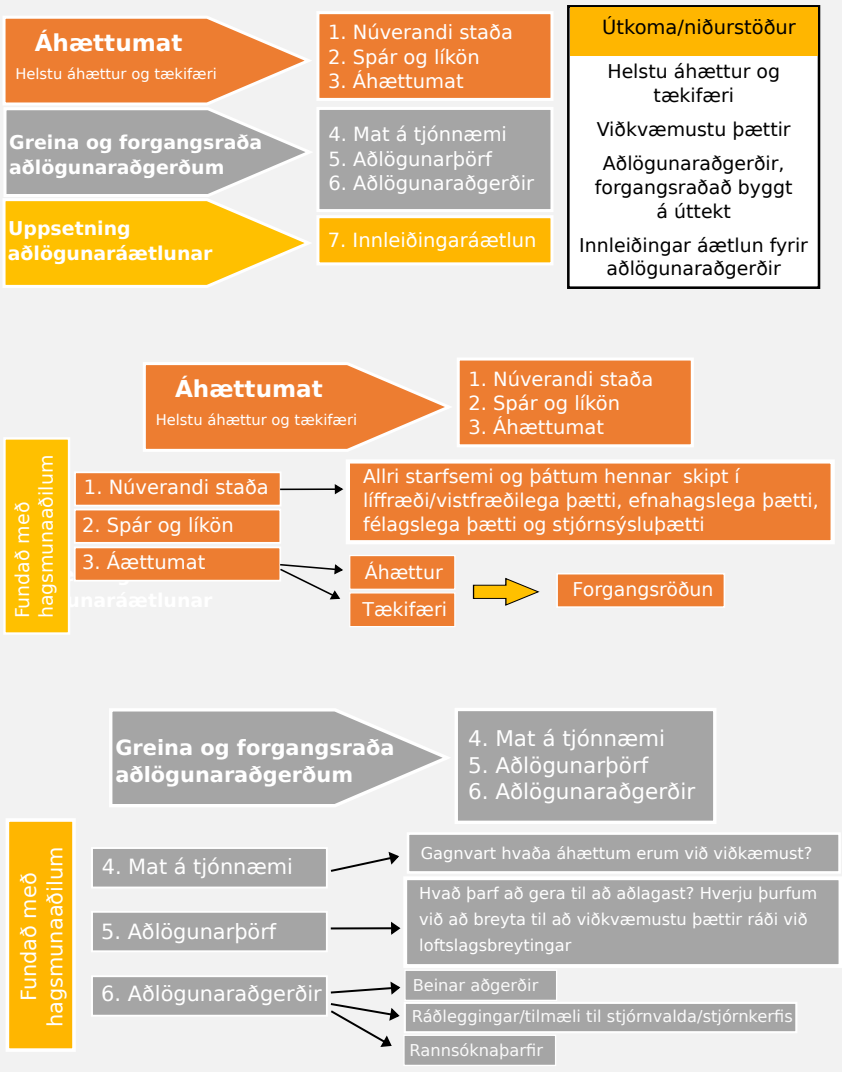
Heildstæður rammi hefur verið settur fram til áhættumats og gerð aðlögunaráætlana vegna mögulegra áhrifa loftslagsbreytinga á sjávarútveg og fiskeldi (sjá umfjöllun í sérgrein 11C).

11C Aðlögun í sjávarútvegi

ClimeFish verkefnið (sjá nánar í kafla 8) fjallar um áhættumat og aðlögunaráætlanir sjávarútvegsins. Aðferðafræðin sem mótuð var byggir á vistkerfisnálgun og felur í sér áherslu á samvinnu og samtal við hagaðila. Hún felur í sér þrjú meginskref; áhættumat, greiningu og forgangsröðun aðlögunaraðgerða og uppsetningu aðlögunaráætlunar með skilgreindum ábyrgðarðailum, kostnaðarmati og tímaramma (mynd 11.2). Aðferðafræðin er yfirfæranleg á aðrar atvinnugreinar og byggir valkvæður aðlögunarstaðall ESB meðal annars á niðurstöðum verkefnisins.

Ferlið hefst á fundum með hagaðilum þar sem staðan er greind með tilliti til líf- og vistfræðilegra þátta, efnahags- og félagslegra þátta og stjórnsýslulegra þátta. Þannig fæst yfirsýn yfir allar víddir sjálfbærni og mat á því hvaða þættir verða fyrir raunverulegum áhrifum. Í kjölfarið eru spár og líkön notuð til þess að greina áhættuþættina frekar. Loks er sett fram áhættumat fyrir hvern þátt og tækifæri greind, séu þau til staðar.
Þeir þættir sem taldir eru hvað viðkvæmastir fyrir loftslagsáhættu eru greindir áfram með svokölluðu mati á tjónnæmi (*e. vulnerability assessment*) og aðlögunarþörf skoðuð. Á grundvelli þess eru aðlögunaraðgerðir mótaðar og skiptast þær í þrjá flokka; (1) beinar aðgerðir, (2) ráðleggingar og tilmæli til stjórnvalda og (3) rannsóknir. Að lokum er innleiðingaráætlun sett fram þar sem aðgerðir eru meðal annars metnar út frá kostnaði, fjármögnun, tíma innleiðingar og ábyrgð.

Í ljósi samfélagslegs og efnahagslegs mikilvægis sjávarútvegs, er mikilvægt að unnið verði að áhættumati fyrir íslenskan sjávarútveg í heild sinni og aðlögunaráætlun af þessu tagi sett fram.



Mynd 11.12: Efst:Framkvæmd áhættumats og uppsetning aðlögunaráætlana. Miðja: Framkvæmd áhættumats. Neðst: Greining og forgangsröðun aðlögunaraðgerða (Myndir: Ragnhildur Friðriksdóttir)

11.7.4 Vatns- og fráveitur

Fjallað er um vatns- og fráveitur í kafla 9. Loftslagsbreytingar leiða af sér ýmsar áskoranir á þessu sviði. Sem dæmi má nefna breytt úrkomumynstur og úrkomuákefð, skriðuföll, þurrka, gróðurelda, flóð og hærri sjávarstöðu, örverur í neysluvatni og yfirfullar skólplagnir (Alta, 2023d). Hér á eftir verður fjallað um vatns- og fráveitur í samhengi aðlögunar en umfjöllunin byggir að mestu leyti á málstofum vísindanefndar.

11.7.4.1 Neysluvatn

Sveitarfélög þurfa að leggja mat á áhrif loftlagsbreytinga á afhendingu vatns auk þess sem almannavarnanefndir sveitarfélaga þurfa að taka möguleg áhrif loftslagsbreytinga á neysluvatnsafhendingu inn í sínar viðbragðsáætlanir. Kostnaður vegna öflunar neysluvatns, svo sem með borunum, getur verið mikill og eiga stærri rekstrareiningar auðveldar með slíkar fjárfestingar. Sem viðbrögð við loftslagsbreytingum þarf að huga að sameiningu smærri vatnsveitna, eins og aðstæður leyfa.

Hægt er að auka öryggi vatnsbóla með því að tryggja aðgengi að varavatnsbóli og marka stefnu um neysluvatn og vatnsgæði með tilliti til nýrra áskorana, svo sem áhrifa loftslagsbreytinga. Eins og fram kom í kafla 9 eru skriðuföll, þurrkar og mengunarhætta áhættuþættir fyrir allar vatnsveitur og því mikilvægt að framkvæma áhættumat á öllum vatnsbólum og gera endurbætur í samræmi við það.

Á grundvelli aðlögunar er mikilvægt að vinna að endurbótum á dreifikerfi og greina hvar endurnýjunar lagna er þörf. Það á til dæmis við þar sem neysluvatnslagnir liggja í sama skurði og fráveitulagnir.

11.7.4.2 Fráveitur

Huga þarf að loftslagsbreytingum við hönnun fráveitna og greina flutningskerfi með tilliti til aukins álags vegna þeirra. Hægt er að draga úr álagi á fráveitur og minnka flóðahættu með því að aðgreina skólpkerfi og regnsvatnskerfi. Tryggar undankomuleiðir fyrir ofanvatn, t.d. blágrænar ofanvatnslausnir, draga einnig úr flóðahættu. Í þessu samhengi skiptir skipulag miklu máli, svo sem með ákvæðum um blágrænar ofanvatnslausnir og öðrum viðeigandi aðgerðum (sjá grein 11.6).

11.7.5 Samgöngur

Líkt og rakið er í grein 9.4 hafa loftslagsbreytingar áhrif á samgöngukerfi, m.a. vegna breytinga á úrkomumynstri og úrkomuákefð, skriðufalla, þurrka, gróðurelda, flóða, hærri sjávarstöðu, landriss og landsigs.

Umbreyta þarf samgönguinnviðum sem þegar eru til staðar svo að þeir verði loftslagsþolnir. Við nýframkvæmdir þarf að huga að mögulegum áhrifum loftslagsbreytinga við hönnun.

Þær áskoranir sem samgöngur á landi standa frammi fyrir eru raktar í grein 9.4 auk þess sem fjallað er um aðgerðir til þess að mæta áskorunum í rekstri í V2018 og í Skúli Þórðarsson (2012). Hægt er að endurskoða rekstur og breyta skipulagi í samræmi við breytingar í álagi. Slíkt kallar á skráningu, skipulag og vöktun svo hægt sé að bregðast við í tíma.

Í grein 9.4.3.2 er fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á samgöngur á sjó. Aðlögun á því sviði tekur helst til þess að lágmarka neikvæð áhrif hafíss og borgaríss. Það kallar á öflugt eftirlit og markvissa miðlun upplýsinga til sjófarenda og annarra notanda hafísupplýsinga. Alþjóðasamstarf, svo sem á vegum IICWG (*International Ice Charting Working Group*) (IICWG, 2023) er mikilvægt til að tryggja staðlaða miðlun rauntímaupplýsinga, þróunar hafíss og skráninga hafíss og borgarísjaka. Veðurstofa Íslands hefur lögbundið hlutverk um að sinna hafíseftirliti og miðlun. Mikilvægt er að tryggja samfellu í vöktun hafíss, að sérþekking sé til staðar, staðlar séu virtir og að tekið sé þátt í erlendu samstarfi.

11.8 Niðurlag

Í kafla 8 er fjallað um verkefnið ARCPATH, þar sem sjónum er beint að áhrifum stórviðra á samfélög á Vestfjörðum. Í verkefninu er leitað svara við spurningum um upplifun og reynslu fólks af slíkum veðrum, viðbrögðum og leiðum til að auka viðnámsþrótt samfélagsins, sem er eitt lykilatriði aðlögunar.

Í niðurstöðum kom fram að mikilvægt sé að tekið sé tillit til þekkingar og reynslu heimafólks. Aðlögun er verkefni sem tekur til ólíkra stjórnsýslustiga auk fyrirtækja, stofnana og almennings. Því skipti traust á milli þessara aðila miklu máli. Rétt eins og fram kemur í grein 11.6 er samstarf ólíkra aðila mikilvægt svo aðlögun heppnist vel. Niðurstöður ARCPATH drógu einnig athyglina að mikilvægi þess að eftirliti og spám sé vel sinnt, sérstaklega ef óveður verða tíðari vegna loftslagsbreytinga. Slík þjónusta er hluti af aðlögun og sérstaklega mikilvæg fyrir samfélög sem eru háð veðurtengdum gæðum.

Í inngangsorðum þessa kafla var bent á að aðlögun er staðbundin aðgerð til undirbúa samfélög, fólk, kerfi og náttúru undir áhrif loftslagsbreytinga. Hér að ofan hefur verið rakið hversu viðamikið verkefnið er og hvernig það nær víða um þjóðfélagið. Aðlögun felur í sér breytingar á byggðum innviðum og skipulagi en getur einnig snúið að félagslegum innviðum, atvinnuháttum og efnahagsstarfsemi. Þá tengist hún áhættustýringu bæði vegna flókinnar áhættu þvert á landamæri og beinnar náttúrvár, sem loftslagsbreytingar munu auka.

Í lokaorðum ágripskafla skýrslunnar kemur fram að þessi skýrsla staðfestir, svo ekki verði um villst, að loftslagsbreytingar hafa þegar haft áhrif á náttúrufar og lífsskilyrði á Íslandi. Aðlögunar er þörf til að mæta þeim áskorunum sem afleiðingum loftslagsbreytinga fylgir. Afleiðingarnar fara vaxandi og því mikilvægt að aðlögun sé í brennidepli hjá ríki og sveitarfélögum.

Heimildir

Adaptation Support Tool (2023). Accessed on July 23, 2023. URL: https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/tools/adaptation-support-tool.

Alta (2023a). *Aðlögun að loftslagsbreytingum*. Skoðað: 2023-10-02. URL: https://adlogun.alta.is/heim.

— (2023b). *Ferðaþjónusta og aðlögun að loftslagsbreytingum: Samráðsferli til undirbúnings landsáætlunar*. Skoðað: October 1, 2023. URL: https://adlogun.alta.is/vinnustofur/vinnufundur-um-fer%C3%B0a%C3%BEj%C3%B3nustu.

— (2023c). *Sjávarútvegur og fiskeldi - aðlögun að loftslagsbreytingum. Samráðsferli til undirbúnings landsáætlunar*. Skoðað: 2023-10-02. URL: https://adlogun.alta.is/vinnustofur/vinnufundur-um-sj%C3%A1var%C3%BAtveg-og-fiskeldi.

— (2023d). *Vatns og fráveita og aðlögun að loftslagsbreytingum: 5. vinnustofa í samráðsferli til undirbúnings landsáætlunar*. Skoðað: October 1, 2023. URL: https://adlogun.alta.is/vinnustofur/vinnustofa-um-vatn-og-fr%C3%A1veitu.

Anisimov, A. og A.K. Magnan (2023). *The Global Transboundary Climate Risk Report*. The Institute for Sustainable Development, International Relations og Adaptation Without Borders, bls. 114. URL: https://adaptationwithoutborders.org/.

European Environment Agency (2023). *Iceland*. URL: https://reportnet.europa.eu/public/dataflow/113.

Gísli Viggósson (1992). *Skipulags- og byggingarreglur á lágsvæðum þar sem hætta er á flóðum*. Tæknileg skýrsla. Fjarhitun verkfræðistofa fyrir Skipulag Ríkisins.

Gram-Hanssen, Irmelin, Carlo Aall, Martin Drews, Sirkku Juhola, Alexandra Jurgilevich, Richard J.T. Klein, Mikael Allan Mikaelsson og Villy Lyngtorp Mik-Meyer (2023). *Comparative Analysis of Adaption Policy Landscape in the Nordic Region*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers. URL: https://pub.norden.org/temanord2023-525/.

Gunnar Jakobsson, Ragnheiður Jónsdóttir og Sigrún María Einarsdóttir (2021). „Seðlabankar hafa hlutverki að gegna í loftslagsmálum“. Í: *Kalkofninn rit Seðlananka Íslands*. URL: https://www.sedlabanki.is/utgefid-efni/kalkofninn/grein/2021/11/03/Sedlabankar-hafa-hlutverki-ad-gegna-i-loftslagsmalum/.

Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson og Trausti Jónsson (2018). *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018*. Veðurstofa Íslands. URL: https://www.vedur.is/media/loftslag/Skyrsla-loftslagsbreytingar-2018-Vefur-NY.pdf.

Holdren, John P. (2008). „Science and Technology for Sustainable Well-Being“. Í: *Science* 319.5862, bls. 424–434. DOI: 10.1126/science.1153386.

Hrönn Egilsdóttir (2023). *Loftslagsbreytingar, súrnun sjávar og lífríki hafs. Vinnufundur um aðlögun að loftslagsbreytingum í samhengis jávarútvegs og fiskeldis*. Skoðað: 2023-10-02. URL: https://drive.google.com/file/d/1BaUfiJjH2KgjMYcStlimN0uwZBTBW-N4/view.

Hvítbók (2021). *Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum - Drög að stefnu*. Starfshópur um stefnu stjórnvalda varðandi aðlögun að loftslagsbreytingum. Stjórnarráð Íslands: Umhverfis- og auðlindaráðuneytið.

IICWG (2023). *International Ice Charting Working Group*. National Snow og Ice Data Center, University of Colorado Boulder. URL: https://nsidc.org/ (skoðað 2023).

Innviðaráðuneyti (2023). *Staða og þróun skipulagsmála á Íslandi*. Skoðað: 01-10-2023. URL: https://samradsgatt.island.is/oll-mal/$Cases/Details/?id=3539#:~:text=Innvi%C3%B0ar%C3%A1%C3%B0uneyti%C3%B0%20kynnir%20til%20umsagnar%20hv%C3%ADtb%C3%B3k%20um%20skipulagsm%C3%A1l%20%E2%80%93,til%2015%20%C3%A1ra%20og%20a%C3%B0ger%C3%B0a%C3%A1%C3%A6tlun%20til%20fimm%20%C3%A1ra..

IPCC (2022). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001.

Jóhannsdottir, Lára, Snjólfur Ólafsson og Brynhildur Davíðsdóttir (2015). „Leadership role and employee acceptance of change: Implementing environmental sustainability strategies within Nordic insurance companies“. Í: *Journal of Organizational Change Management* 28.1, bls. 72–96.

Jóhannsdóttir, L. og J. Wallace (2021). „The Instrumental Role of Insurance in Recovery, Development Programs, Resilience, and Place-Based Reconstruction Policy“. Í: *Handbook of Disaster Risk Reduction for Resilience*. Gefið út af Saeid Eslamian og Faezeh Eslamian. Springer. ISBN: 978-3-030-61277-1.

Jóhannsdóttir, Lára (2015). „Drives of proactive environmental actions of small, medium and large Nordic non-life insurance companies–and insurers as a driving force of actions“. Í: *Journal of Cleaner Production* 108, bls. 685–698.

Magnús Örn Sigurðsson (2020). *Að búa sig undir breyttan heim – Aðlögun vegna loftslagsvár í ljósi stefnumótunar og stjórnarhátta*. Gefið út af Anna Sigurveig Ragnarsódttir, Brynhildur Davíðsdóttir, Halldór Þorgeirsson og Hrönn Hrafnsdóttir. Loftslagsráð. ISBN: 978 9935 24 679 0.

NGFS (2019). *NGFS Annual Report 2019*. URL: https://www.greenfinanceplatform.org/research/ngfs-annual-report-2019.

NKL (2022). *Nordic Perspectives on Transboundary Climate Risk*. Publication 2022:531. Nordic Working Group for Climate and Air, Nordic Council of Ministers.

Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, H. Adams, I. Adelekan, C. Adler, R. Adrian, P. Aldunce, E. Ali, R. Ara Begum, B. Bednar- Friedl, R. Bezner Kerr, R. Biesbroek, J. Birkmann, K. Bowen, M.A. Caretta, J. Carnicer, E. Castellanos, T.S. Cheong, W. Chow, G. Cissé G. Cissé og Z. Zaiton Ibrahim (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Technical Summary. Cambridge, UK og New York, USA: Cambridge University Press, bls. 37–118.

Samráðsvettvangur (2023). *Upptaka frá málstofu: "Aðlögun að Loftslagsbreytingum: Hvað vitum við og hvað þurfum við að gera"*. Samráðsvettvangur um þekkingarsköpun um áhrif loftslagsbreytinga, Skoðað: 01-10-2023. URL: https://vimeo.com/807424103.

Skipulagsstofnun (2016). *Landsskipulagsstefna 2015–2026 ásamt greinargerð*. Skipulagsstofnun. URL: https://www.landsskipulag.is/media/pdf-skjol/Landsskipulagsstefna_2015-2026_asamt_greinargerd.pdf.

Skúli Þórðarsson (2012). *Loftslagsbreytingar og vegagerð: tillögur um aðgerðir til aðlögunar, Vegagerðin og Vegsýn*. Skoðað: 2023-10-02. URL: https://www.vegagerdin.is/vefur2.nsf/Files/Loftslagsbreytingar_vegagerd/$file/Loftslagsbreytingar_vegagerd.pdf.

Stjórnarráð Íslands (2015). *Parísarsamningurinn*. URL: https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit--skyrslur-og-skrar/Par%C3%ADsarsamningurinn.pdf.

Stýrihópur, um tillögu að efnisþáttum og skipulagi fyrir gerð landsáætlunar um aðlögun að loftslagsbreytingum (2023). *Loftslagsþolið Ísland: Tillögur fyrir gerð landsáætlunar um aðlögun að loftslagsbreytingum*. URL: https://www.bbl.is/frettir/allt-idandi-af-lifi.

Theódóra Matthíasdóttir, Anna Hulda Ólafsdóttir og Magnús Agnesar Sigurðsson (2023). *Policy brief: Stronger together for a climate resilient north – Mainstreaming adaptation to climate change at the local level in the Nordic Countries*. Nord 2023:017. Nordic Council of Ministers, bls. 22. ISBN: 978-92-893-7612-9. DOI: 10.6027/nord2023-017. URL: https://pub.norden.org/nord2023-017.

Veðurstofa Íslands (2023). *Misjöfn staða þekkingar á áhrifum loftslagsbreytinga og aðlögunar vegna þeirra*. Skoðað: 2023-10-02. URL: https://vedur.is/um-vi/frettir/misjofn-stada-thekkingar-a-ahrifum-loftslagsbreytinga-og-adlogunar-vegna-theirra.

Welling, J. og B. Abegg (2019). „Following the ice: adaptation processes of glacier tour operators in Southeast Iceland“. Í: *International Journal of Biometeorology*. DOI: 10.1007/s00484-019-01779-x.

Welling, J. og Þ. Árnason (2016). „External and Internal Challenges of Glacier Tourism Development in Iceland“. Í: *Mountain Tourism: Experiences, Communities, Environments and Sustainable Futures*. Gefið út af H. Richins og J. S. Hull. Wallingford: CAB International, bls. 186–195.

VIÐAUKI

A

VIÐAUKI: YFIRLIT YFIR NIÐURSTÖÐUR 6. MATHRINGS (AR6)

AA Kvarðað orðalag

Skýrslur IPCC nota kvarðað orðalag til þess að tilgreina líkur á tiltekinni atburðarás eða niðurstöðu. Þessi skilgreining gefur lesmáli frá IPCC ákveðnari merkingu en ella. Slík orð eru skáletruð í textanum. Orðin eru alþekkt en nákvæmlega hefur verið skilgreint við hvað er átt og er sá lykill gefinn hér.
Eftirfarandi tafla sýnir merkingu orða sem notuð eru fyrir staðhæfingar þar sem hægt er að leggja mat á líkindi.

Orðalag	Líkindi
Nánast öruggt	99–100%
Mjög líklegt	90–100%
Líklegt	66–100%
Óráðið	33–66%
Ólíklegt	0–33%
Mjög ólíklegt	0–10%
Afskaplega ólíklegt	0–1%

Hvað vísbendingar (*evidence*) varðar er notað orðalagið: Takmarkaðar, miðlungs eða traustar (*limited, medium & robust*) eftir því hversu eindregnar þær eru. Hversu sammála vísindamenn eru um niðurstöður er táknað með þremur stigum: lítt sammála, í meðallagi sammála og mjög sammála (*low, medium and high agreement*). Vissa (*confidence*) hefur eftirfarandi fimm stig: mjög lítil, lítil, miðlungs, mikil og mjög mikil (*very low, low, medium, high, very high confidence*). Stærðir eru oft gefnar upp með 90% öryggisbili. Þannig þýðir 0.5 [0.4–0.6] að 0.5 sé líklegasta gildi, en 90% vissa sé fyrir því að rétt mat liggi á bilinu 0.4 til 0.6.

A AR6: Skýrslur frá 6. úttekt IPCC

Eins og fram kom í kafla 1 er Milliríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (*Intergovernmental panel on Climate Change, IPCC*) falið að gefa út skýrslur um stöðu þekkingar hvað varðar loftslagsbreytingar. Í ágúst 2021 kom út skýrsla þess sérfræðingahóps IPCC sem fjallar um náttúruvísindi og vísindalega þekkingu á breytingum á veðurfari og loftslagskerfinu (IPCC Working Group I, 2021). Þessi skýrsla var fyrsti hluti 6. úttektar IPCC á loftslagsvísindum (svokallaðar AR6 skýrslur), en fyrsta úttektin kom út 1990. Árið 2022 kom út skýrsla þess vinnuhóps sem leggur mat á mat á áhrif á félags-, efnahags- og náttúruleg kerfi og möguleika til aðlögunar (IPCC Working Group II, 2022) auk hópsins sem leggur mat á leiðir til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og aðrar leiðir til að koma í veg fyrir loftslagsbreytingar (IPCC Working Group III, 2022). Árið 2023 kom út samantektarskýrsla þar sem niðurstöður allra vinnuhópa voru dregnar saman (IPCC, 2023b). Í kafla 1 er yfirlit yfir helstu niðurstöður AR6, en hér verða aðalatriðum hverrar skýrslu gerð ítarlegri skil.

IPCC notar *kvarðað* orðalag þar sem mögulegt er og gefur það lesmáli ákveðnari merkingu en hefðbundið er. Sérgrein **AA** fjallar nánar um þessa tegund orðalags. Hér er farið í stuttu máli yfir niðurstöður hvers vinnuhóps og notast við kvarðað orðalag þar sem þess þarf. Yfirleitt er vísað til 6. úttektar IPCC sem AR6 og til vinnuhópanna í þeirri röð sem skýrslurnar koma út: vinnuhópur eitt (WG1), vinnuhópur tvö (WG2) og vinnuhópur þrjú (WG3). Þegar þessar vísanir eru teknar saman er vísað í fyrstu skýrslu 6. úttektar sem *AR6-WG1*, og svo *AR6-WG2*, *AR6-WG3* fyrir hina hópana og þessar nafngiftir verða notaðar hér að neðan. Þar sem minnst er á AR5 í textanum er verið að vitna í skýrslur frá 5. matshring IPCC, en þær komu út árin 2013 og 2014. Lesa má um niðurstöður AR5 í kafla 3 í síðustu skýrslu vísindanefndar (V2018,2018).

A.1 AR6-WG1 (2021): Veðurfar og loftslagskerfið

Það er yfir vafa hafið að athafnir manna hafa ótvírætt hitað lofthjúpinn, haf- og landsvæði. Víðtækar og hraðar breytingar í lofthjúpi, hafi, freðhvolfi og lífríki hafa átt sér stað. Aukning gróðurhúsalofttegunda frá 1750 er tvímælalaust af mannavöldum. Frá útkomu 5. úttektarskýrslu IPCC (AR5, mælingar frá árinu 2011) hefur styrkur gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpnum aukist og árið 2019 var styrkur koldíoxíðs (CO_2) að meðaltali 410 ppm, styrkur metans (CH_4) 1866 ppb og styrkur nituroxíðs (N_2O) 322 ppb[1]. Síðustu sex áratugi hafa höfin og vistkerfi á landi tekið upp frekar stöðugt hlutfall (um 56%) af því CO_2 sem mannkynið hefur losað (*mikil vissa*).

Síðustu fjóra áratugi hefur hver áratugur verið hlýrri en allir fyrri áratugir síðan samfelldar mælingar hófust (um 1850). Hnattrænn meðalhiti[2] fyrstu tvo áratugi 21. aldar (2001–2020) var 0.99 [0.84 til 1.10] °C hærri en 1850–1900 [3]. Árin 2011 til 2019 var hnattrænn meðalhiti 1.09 [0.95 til 1.20] °C hærri en 1850–1900. Landsvæði hitnuðu meira (1.59 [1,34 til 1.83] °C)

[1]Aukning frá 2011 til 2019 var 19 ppm fyrir CO_2 , 63 ppb fyrir CH_4 og 8 ppb fyrir N_2O. Þessar gróðurhúsalofttegundur eru vel-blandaðar í lofthjúpnum og ofangreindar breytingar í magni þeirra því mælanlegar hvar sem er á yfirborði jarðar. Einingarnar eru hluti af milljón (ppm) og hluti af milljarði (ppb). Annað dæmi um gróðurhúsalofttegundir eru ósóneyðandi gastegundir og skyldar manngerðar lofttegundir. Í þessum flokki var styrkur helstu lofttegundanna árið 2019: PFCs (109 ppt CF4 jafngildi); SF6 (10 ppt); NF3 (2 ppt); HFC (237 ppt HFC-134A jafngildi); aðrar lofttegundir sem falla undir Montreal-bókunina (helst CFC, HCFC, 1032 ppt CFC-12 jafngildi). Ef ekki er annað tekið fram er hér átt við vel-blandaðar lofttegundir þegar fjallað er um gróðurhúsalofttegundir.

[2]Tvær ólíkar tegundir gagna eru notuð til að leggja mat á hnattræna hitun yfirborðsins. Annarsvegar er hnattrænn meðalhiti yfirborðs (GMST) sem sameinar mælingar á sjávarhita. athuganir yfir landi og hafíssvæðum. Þessi stærð er notuð við flestar rannsóknir á hitabreytingum og athugunum á þeim. Einnig er unnið með meðalloftþiti við yfirborð í 2 m hæð (GSAT). Þessi stærð er reiknuð í endurgreiningum og loftslagslíkönum. Þessi gögn gefa sömu mynd af hnattrænum hitabreytingum og mikil vissa fyrir því að munurinn sé innan við 10%, en lítil vissa er fyrir því breytingum í hneigð mismunar á þessum ólíku gögnum. Vegna þessa er orðalagið hnattrænn hiti notaður jöfnum höndum fyrir báðar tegundir gagna.

[3]Nægilega þétt hnattrænt mælanet varð fyrst til staðar fyrir tímabilið 1850 – 1900, og er það hér og í fyrri skýrslum IPCC (AR5 og SR1.5) notað í stað tímans fyrir iðnbyltingu.

og hafsvæði minna (0.88 [0.68 til 1.01] °C). Þetta mat er hærra en í AR5 vegna hlýnunar frá 2003–2012 (um 0.19 [0.16–0.22] °C), auk þess sem bætt gögn og úrvinnsla hafa [4] hækkað matið um tæplega 0.1 °C.

Líklegt er að hlýnun af mannavöldum frá 1850–1900 til 2010–2019[5] liggi á bilinu 0.8 til 1.3 °C, með besta mat 1.07 °C. Það er *líklegt* að gróðurhúsalofttegundir hafi hitað lofthjúpinn um 1–2 °C, en sót, agnaúði og önnur slík mengun af mannavöldum hafi kælt lofthjúpinn um 0–0.8 °C, náttúrulegar þættir hafi breytt meðalhita jarðar um -0.1 til 0.1 °C og innri breytileiki lofthjúps hafi verið á bilinu -0.2 til 0.2 °C. Það er *mjög líklegt* að meginorsök[6] hlýnunar í veðrahvolfi síðan 1979 sé aukning gróðurhúsalofttegunda og *nánast öruggt* að þynning ózónlagsins af mannavöldum var meginorsök kólnunar í neðrihluta heiðhvolfsins milli 1979 og miðbiks 10. áratugarins.

Hnattrænt meðaltal úrkomu á landi hefur *líklega* aukist síðan 1950 og hefur aukist hraðar síðan 1980 *(miðlungs vissa)*. *Líklegt* er að athafnir mannkyns hafi haft áhrif á breytingar á úrkomumynstri frá miðbiki 20. aldar og *nánast öruggt* þær hafi haft áhrif á breytingar í seltu yfirborðssjávar. *Líklegt* er að lægðabrautir, bæði á norður- og suðurhveli hafi hnikast nær pólsvæðum síðan 1980, en hneigðin er ólík eftir árstíma *(miðlungs vissa)*. Nátengt þessu *er mjög líklegt* að á suðurhveli hafi afhafnir manna haft áhrif á suðlæga tilfærslu háloftastraumrastar að sumarlagi.

A.1.1 Breytingar á samsetningu lofthjúpsins og geislunarálagi

Eins og fram kom í fyrri skýrslum IPCC þá er umfang breytinga innan loftslagskerfisins og núverandi ástand kerfsins án fordæma, hvort sem litið er til margra alda eða árþúsunda.

Núverandi styrkur CO_2 í loftjúpnum er fordæmalaus, að minnsta kosti síðustu tvö milljón ár, og styrkur CO_2, CH_4 og N_2O er hærri en hefur verið í a.m.k. 800 þúsund ár. Aukning í styrk CO_2 (47%) og CH_4 (156%) síðan 1750 eru langt umfram það sem gerðist þegar skipti milli jökulskeiða og hlýskeiða síðustu 800 þúsund ár, en umfang breytinga í N_2O er sambærilegt *(mjög mikil vissa)*.

Árið 2019 var geislunarálag af mannavöldum um 2.72 [1.96 til 3.48] W/m^2 frá 1750, sem hitaði loftslagskerfið. Að megninu til stafar þetta af aukningu gróðurhúsalofttegunda, en meira ryk, sót og annar agnaúði dregur þó úr geislunarálaginu. Frá AR5 hefur mat á geislunarálagi aukist um 0.43 W/m^2 (19%) en 0.34 W/m^2 voru vegna aukningar á gróðurhúsalofttegundum síðan 2011. Mismunurinn stafar af bættri þekkingu og betra mati á áhrifum agnaúða, en nýtt mat tekur tillit til þess að minni mengun hefur dregið úr magni þessara efna.

Geislunarálag af mannavöldum verður til þess að varmi safnast upp í loftslagskerfinu, þó aukin varmageislun frá hlýrra yfirborði jarðar dragi úr uppsöfnuninni. Uppsöfnun varma jókst að meðaltali frá 0.50 [0.32 til 0.69] W/m^2 á tímabilinu 1970–2006 í 0.79 [0.52 til 1.06] á tímabilinu 2006–2018 *(mikil vissa)*. Af þessum varma fór 91% í að hita hafið, en 5%, 3% og 1% fóru í hlýnun yfirborðs, ísbráðnun og hlýnun andrúmsloftsins *(mikil vissa)*.

A.1.2 Breytingar á freðhvolfi og sjávarborði

Áhrif mannkyns eru *mjög líklega* orsök hnattrænnar hopunar jökla og ástæða samdráttar í hafísútbreiðslu á norðurhveli milli tímabilianna 1979–1988 og 2010–1019 (um 40% í september og 10% í mars). Það er engin sambærileg hneigð í hafísútbreiðslu umhverfis Suðurskautslandið frá 1979 til 2020, en þar er innri breytileiki mikill og þróun ólík milli svæða. *Mjög líklegt* er að áhrif mannkyns hafi átt þátt í minnkandi útbreiðslu snævar á norðurhveli síðan 1950. Það er *mjög líklegt* að þau eigi þátt í yfirborðsleysingu á Grænlandsjökli síðustu tvo áratugi, en það eru

[4] Síðan AR5 kom út hafa framfarir í úrvinnslu gagna og aukin gögn gefið bætta mynd af svæðisbundnum hitabreytingum m.a. á Norðurheimskautssvæðinu. Þessar og aðrar breytingar hækkuðu mat á lofthita um tæplega 0.1 °C en sú aukning endurspeglar ekki raunverulega hlýnun.

[5] Þetta tímabil er það sama og rannsóknir á osakarþáttum notuðu.

[6] Hér er orðalagið „meginorsök“ notað um orsakarþátt þegar amk. 50% breytinganna má rekja hans.

einungis *takmarkaðar vísbendingar* og *miðlungs vissa* um þátt athafna mannkyns á massatap ísbreiðunnar á Suðurskautslandi.

Það er *nánast öruggt* að yfirborðslög sjávar (0–700 m) hafa hlýnað síðan 1970 og *einstaklega líklegt* að áhrif manna séu megin orsökin. Það er *nánast öruggt* að losun CO_2 af mannavöldum er meginástæða súrnunar sjávarborðs úthafanna. *Mikil vissa* er fyrir því að styrkur súrefnis í efri lögum sjávar hefur fallið á mörgum hafsvæðum, að hluta vegna áhrifa mannkyns *(miðlungsvissa).*

Jöklar hopa um alla jörðu og stóru ísbreiðurnar á Suðurskautslandi og Grænlandi tapa massa. Rýrnun ísbreiðanna og jökla utan heimskautasvæða hefur hert mikið á sér á síðustu þrjátíu árum og hefur árlegt massatap margfaldast. Tafla A.2 sýnir að rýrnun Grænlandsjökuls hefur sexfaldast á síðustu þremur áratugum og mikil aukning er í massatapi á Suðurskautslandi. Massatap jökla og ísbreiða er einn drifkrafta sjávarstöðuhækkunar.

Tímabil	Staður	Massatap (Gt á ári)
1992–1999	Grænland	39 ± 25
2000–2009	Grænland	175 ± 27
2010–2019	Grænland	243 ± 28
1992–1999	Suðurskautslandið	49 ± 31
2000–2009	Suðurskautslandið	70 ± 30
2010–2019	Suðurskautslandið	148 ± 33
1992–2019	Allir jöklar utan stóru ísbreiðana	210 ± 50
2000–2009	Allir jöklar utan stóru ísbreiðana	240 ± 9
2010–2019	Allir jöklar utan stóru ísbreiðana	290 ± 10

Tafla A.2: Massatap íss á suðurhveli hækkar sjávarborð við Ísland meira en massatap á Grænlandi. Meðalrýrnun allra jökla á jörðinni síðustu þrjátíu árin samsvarar því að Hofsjökull og Langjökull hverfi árlega.

Hnattrænt sjávaryfirborð hækkaði að meðaltali um 0.2 [0.15 til 0.25] m milli 1901 til 2018. Að meðaltali var árleg hækkun 1.3 [0.6 til 2.1] mm/ári frá 1901 til 1971 en jókst í 1.9 [0.8 til 2.9] mm/ári milli áranna 1971 til 2006 og jókst aftur í 3.7 [3.2 til 4.2] mm/ári frá 2006 til 2018 (*mikil vissa).* Áhrif athafna manna var *mjög líklega* leiðandi þáttur í þessum breytingum a.m.k. síðan 1971.

Upphitun loftslagskerfisins veldur hækkandi sjávarstöðu vegna ísbráðnunar á landi og varmaþenslu hafsins. Rekja má um 50% af hækkandi sjávarstöðu frá 1970 til varmaþenslu en 22% til bráðnunar jökla, 20% til bráðnunar ísbreiða og 8% til breytinga vatnsgeyma á landi. Samanlagt var massatap jökla og ísbreiða ráðandi hvað varðar sjávarstöðuhækkun frá 2006 til 2018.

Hafísútbreiðsla á norðurhveli var minni áratuginn 2011 til 2020 en hún hefur verið síðan 1850 í það minnsta *(mikil vissa).* Síðsumars var hafísútbreiðsla í Íshafinu minni en síðustu 1000 árin *(miðlungs vissa).* Á hnattræna vísu hafa næstum allir jöklar hörfað samtímis síðan á 6. áratugnum, sem er án fordæma í a.m.k. 2000 ár *(miðlungs vissa).*

A.1.3 Breytingar á aftakaatburðum

Loftslagsbreytingar af mannavöldum hafa nú þegar áhrif á aftakaveður og veðurfar á öllum svæðum. Frá útkomu AR5 árið 2011 eru nú sterkari vísbendingar um breytingar á aftakaveðri, svo sem hitabylgjum, aftakaúrkomu, þurrkum og hitbeltislægðum. Áhrif athafna manna á þessar breytingar eru skýrari en fyrr.

Það er *nánast öruggt* að aftakahitar (þ.m.t. hitabylgjur) hafa orðið algengari og heitari á flestum landsvæðum frá 6. áratug síðustu aldar og að á sama tíma hafa aftakakuldar (þ.m.t.

kuldaköst) orðið fágætari. *Mikil vissa* er fyrir því að loftslagsbreytingar af mannavöldum eru meginorksök[7] þessara breytinga.

Tíðni og styrkur ákafra úrkomuatburða hefur aukist frá 6. áratug síðustu aldar á flestum svæðum, þar sem gögn eru nægilega ítarleg til að reikna megi hneigð þeirra *(mikil vissa)*, og *líklegt* er að athafnir manna séu meginorsökin. Athafnir manna hafa einnig átt þátt í aukningu landbúnaðar- og vistkerfaþurrka[8]. Merkjanlegar breytingar á veðurtengdum þurrkum, sem stafa af minni úrkomu, og þurrkum vegna minna rennslis í ám, eru aðgreinanlegar frá þeim breytingum sem merkjanlegar eru á þurrkum á landbúnaðarsvæðum og í vistkerfum á sumum svæðum sem stafa af aukningu í heildargufun. Loftslagsbreytingar af mannavöldum hafa einnig átt sinn þátt í auknum þurrkum á sumum svæðum vegna aukinnar heildargufunar, sem bæði hefur haft áhrif á landbúnað og náttúruleg vistkerfi[9] *(miðlungs vissa)*.

Samdráttur í monsúnrigningum[10] á landi frá 1950 til 1980 er að hluta til rakinn til losunar manna á sóti og agnaúða á norðurhveli, en aukning frá þeim tíma er rakin til aukins styrks gróðurhúsalofttegunda og breytileika milli áratuga *(miðlungs vissa)*. Kæling vegna sóts og agnaúða dró úr þeirri aukningu monsúnúrkomu á 20. öldinni í Suður-Asíu, Austur-og Vestur-Afríku sem stafar af aukningu gróðurhúsaáhrifa *(mikil vissa)*. Sú aukning sem orðið hefur í monsúnúrkomu í Vestur-Afríku síðan á 9. áratugnum stafar bæði af auknum gróðurhúsaáhrifum og minni kælingu frá sóti og losun agnaúða í Evrópu *(miðlungs vissa)*.

Hnattrænt er *líklegt* að það hlutfall hitabeltislægða sem ná að vaxa í fellibyl af stærðinni 3–5 hafi aukist á undanförnum fjórum áratugum. Í Norður-Kyrrahafinu ná fellibylir nú mesta styrk norðar en áður og er munurinn meiri en svo að innri breytileiki geti útskýrt hann *(miðlungs vissa)*. *Þegar til lengri tíma er litið (margra áratuga eða alda) er lítil vissa* um breytingar (aukningu eða samdrátt) í hnattrænni tíðni hitabeltislægða. Rannsóknir á einstökum óveðrum benda til þess að loftslagsbreytingar af mannavöldum auki úrkomuáfkefð samfara hitabeltislægðum *(mikil vissa)* en gögn eru ekki nægjanleg til þess að skera úr um langtímahneigð.

Áhrif mannkyns hafa *líklega* gert samsetta atburði algengari síðan á 6. áratug síðustu aldar. Til þessa má telja tíðari hitabylgjur samfara þurrkum á hnattræna vísu *(mikil vissa)*, tíðari gróðureldaveður víða um heim *(meðal vissa)* og flóðaveður á sumum svæðum *(meðal vissa)*.

A.1.4 Núverandi loftslagsbreytingar í sögulegu samhengi.

Aukin þekking á þeim ferlum sem hafa áhrif á loftslag, bætt gögn um fornveðurfar og svörun lofthjúpsins við auknu geislunarálagi hefur bætt mat á jafnægissvörun lofthjúpsins. Það er nú 3 °C og er óvissubilið minna en í síðustu matskýrslu IPCC (AR5).

Hnattrænt hlýnaði hraðar á síðustu 50 árum en á nokkru 50 ára tímabili í a.m.k. 2000 ár *(mikil vissa)*. Síðasta áratug (2011 – 2020) var heitara en fyrir um 6500 árum, þegar hlýjast var á núverandi hlýskeiði, [0.2 til 1 °C hlýrra en 1950–1900 að jafnaði yfir nokkurra alda tímabil] *(miðlungsvissa)*. Á síðasta hlýskeiði fyrir um 125 þúsund árum var álíka hlýtt, [1–1.5 °C, að jafnaði yfir nokkrar aldir] og á síðasta áratug *(miðlungs vissa)* (sjá nánar mynd 1.1).

Frá aldamótum 1900 hefur sjávarstaða hækkað hraðar en á nokkru 100 ára tímabili síðustu 3000 ár *(mikil vissa)*. Heimshöfin hafa hlýnað hraðar á síðustu öld en þau hafa gert frá lokum síðasta jökulskeiðs, fyrir um 11 þúsund árum *(miðlungs vissa)*. Langtímahækkun varð á sýrustigi yfirborðssjávar síðustu 50 milljón árin. Sýrustig yfirborðssjávar síðasta áratuginn er óvenjulegt í samanburði við a.m.k. síðustu tvær milljónir ára *(miðlungs vissa)*.

[7] Hér er orðalagið „meginorsök“ notað um orsakarþátt þegar amk. 50% breytinganna má rekja hans.

[8] Gerður er greinarmunur á þurrkum á landbúnaðarsvæðum, í náttúrulegum vistkerfum og þurrkum vegna minni úrkomu eða minna rennslis í ám. Þurrkar á landbúnaðarsvæðum og í náttúrulegum vistkerfum eru skilgreindir á eftirfarandi hátt: Tímabil með óeðlilega litlum jarðvegsraka, sem stafar bæði af lítillli úrkomu og mikilli heildargufun, sem dregur úr uppskeru og framleiðni landbúnaðar eða almennri virkni náttúrulegra vistkerfa.

[9] Heildargufun er öll uppgufun vatns frá yfirborði, þ.m.t. frá yfirborði vatns, íss og snævar, jarðvegi og plöntum.

[10] Hér er átt við hnattrænan monsún á landi. Hann er skilgreindur með hliðsjón af þeim svæðum þar sem spönn úrkomumunar sumar- og vetrarmánuða (á hverju svæði) er meiri en 2.5 mm á dag. Monsúnrigning á landi er meðalúrkoma á þessum svæðum.

Jafnvægissvörun loftslags er mikilvægur þáttur til þess að meta hvernig loftslag bregst við geislunarálagi. Margskonar ólík gögn benda til þess að jafnvægissvörunin liggi mjög líklega á bilinu 2 °C *(mikil vissa)* til 5 °C *(miðlungs vissa)*. Besta mat AR6 er 3 °C og líklega á bilinu 2.5 °C til 4 °C *(mikil vissa)*, sem er minna óvissubil en 1.5 til 4.5 °C í AR5.

Breytingar í vistkerfum á landi eru í samræmi við hlýnun á stórum kvarða: Loftslagssvæði hafa færst í átt til pólsvæða bæði á norður- og suðurhveli og frá 6. áratug síðustu aldar hefur vaxtartímabil gróðurs að meðaltali lengst um allt að tvo daga á áratug á norðurhveli utan hitabeltissvæða *(mikil vissa)*.

A.1.5 Næstu áratugir

Í skýrslum IPCC er notast við sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Í fimmtu úttekt (AR5) var notast við svokallaðar RCP sviðsmyndir (*e. Radiative Concentration Pathway*). Sviðsmyndirnar voru tölusettar eftir því hversu mikið losunin jók gróðurhúsaáhrif, þannig var losun í RCP2.6 minni en í RCP8.5. Í 6. úttekt var sami háttur hafður á, en kannaðar voru fimm ólíkar brautir hagrænnar og samfélagslegrar þróunar (*e. Shared Socio-economic Pathway, SSP*) sem voru tölusettar frá 1 til 5. Að auki var sú sviðsmynd um losun gróðurhúsalofftegunda sem féll best að hverri braut notuð til að reikna líklegar loftslagsbreytingar. Niðurstaðan voru fimm losunarsviðsmyndir: SSP1-1.9 (mjög lág), SSP1-2.6 (lág), SSP2-4.5 (miðlungs), SSP3-7.0 (há) og SSP5-8.5 (mjög há). Nánar er fjallað um hinar fimm ólíku brautir félagslegrar og hagrænnar þróunar í viðauka **C**. Mynd A.1 sýnir muninn á losun í þessum sviðsmyndum og hversu mikið hlýnar í hverri þeirra.

Mynd A.2 sýnir niðurstöður reikninga loftslagslíkana fyrir ofangreinar SSP sviðsmyndir. Í öllum SSP sviðsmyndum um losun gróðurhúsalofttegunda heldur hnattræn hlýnun áfram, að minnsta kosti fram að miðbiki aldarinnar.

- Í þeirri sviðsmynd þar sem mest er losað nær meðalhlýnun 2 °C fyrir miðbik aldarinnar og gæti orðið á bilinu 3.3 til 5.7 °C í lok aldarinnar.
- Í þeim sviðsmyndum þar sem gripið er til umfangsmikilla aðgerða til þess að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda hlýnar minna og ólíklegra er að hlýnun fari yfir 2 °C. Í þeirri sviðsmynd, þar sem mest er dregið úr losun, stöðvast hækkun hnattræns meðalhita eftir að hlýnun fer nokkuð yfir 1.5 °C. Meðalhitinn fellur svo aftur niður að 1.5 °C (umfram meðalhita tímabilsins 1850-1900) fyrir lok aldarinnar.

Þessar loftslagsbreytingar munu hafa í för með sér ýmsar raskanir á veðurlagi samfara hlýnun, t.d. tíðari hitabylgjur og aftakaúrkomu, óvenjuháan sjávarhita, sterkari fellibylji og þurrka. Mynd A.2 sýnir einnig mat á áhrifum á hafís, súrnun sjávar og á sjávarstöðu.

- Það er *nánast öruggt* að hlýnun á landi verður meiri en yfir hafi og að hlýnun á norður-skautssvæðinu verður meiri en hnattræn hlýnun.
- *Mjög líklegt* er að fyrir miðbik aldarinnar verði Norður-Íshafið íslaust að mestu að minnsta kosti einu sinni að sumarlagi. Hlýnun mun einnig auka bráðnun sífrera og minnka árstíðabundna snjóþekju og rúmmál jökulíss.
- *Nánast öruggt* er að sjávarstaða mun áfram hækka. Í þeirri sviðsmynd þar sem mest er losað eru efri mörk hækkunar um 1 m í lok aldarinnar en 1–2 m um miðbik næstu aldar. Ekki er hægt að útiloka að hækkunin verði mun meiri þar sem mikil óvissa ríkir um stöðugleika ísbreiða á Grænlandi og Suðurskautslandinu. Getur hækkunin því orðið allt að 2 m í lok þessarar aldar og 5 m um miðbik þeirrar næstu.

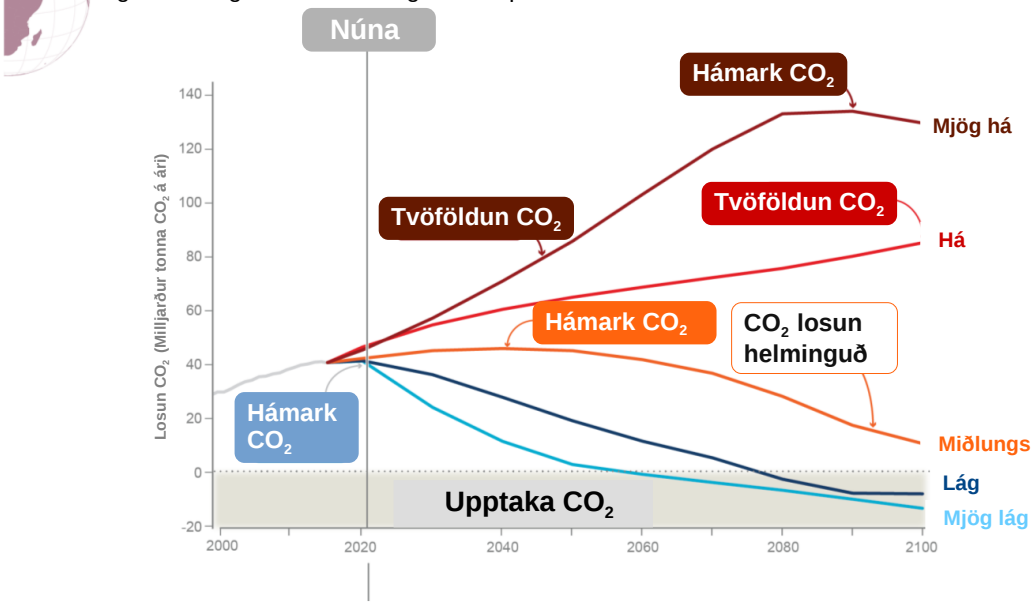
Eins og mynd A.3 sýnir er umfang hlýnunar í beinu hlutfalli við uppsafnaða losun CO_2. Því þarf að stöðva losun CO_2 svo hlýnun jarðar stöðvist, auk þess sem draga þarf úr losun annarra gróðurhúsalofttegunda.

Loftslag framtíðar

Það loftslag sem við og afkomendur okkar munu upplifa fer eftir losun gróðurhúsalofttegunda, hnattrænni hlýnun af þeim völdum og hvernig loftslagskerfið bregst við hlýnuninni

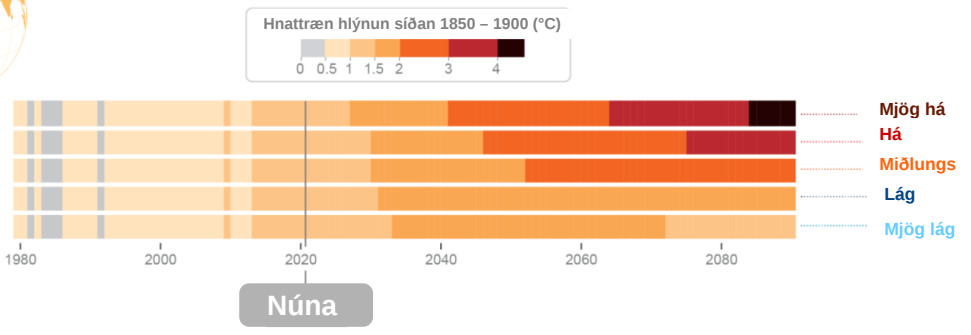
Sviðsmyndir um losun

Mismunandi efnahags- og þjóðfélagsþróun hefur mikil áhrif á losun CO_2 og annarra gróðurhúsalofttegunda út þessa öld



Áhrif á hnattrænan meðalhita

Til að stöðva hlýnun þarf heildarlosun CO2 að nálgast núll

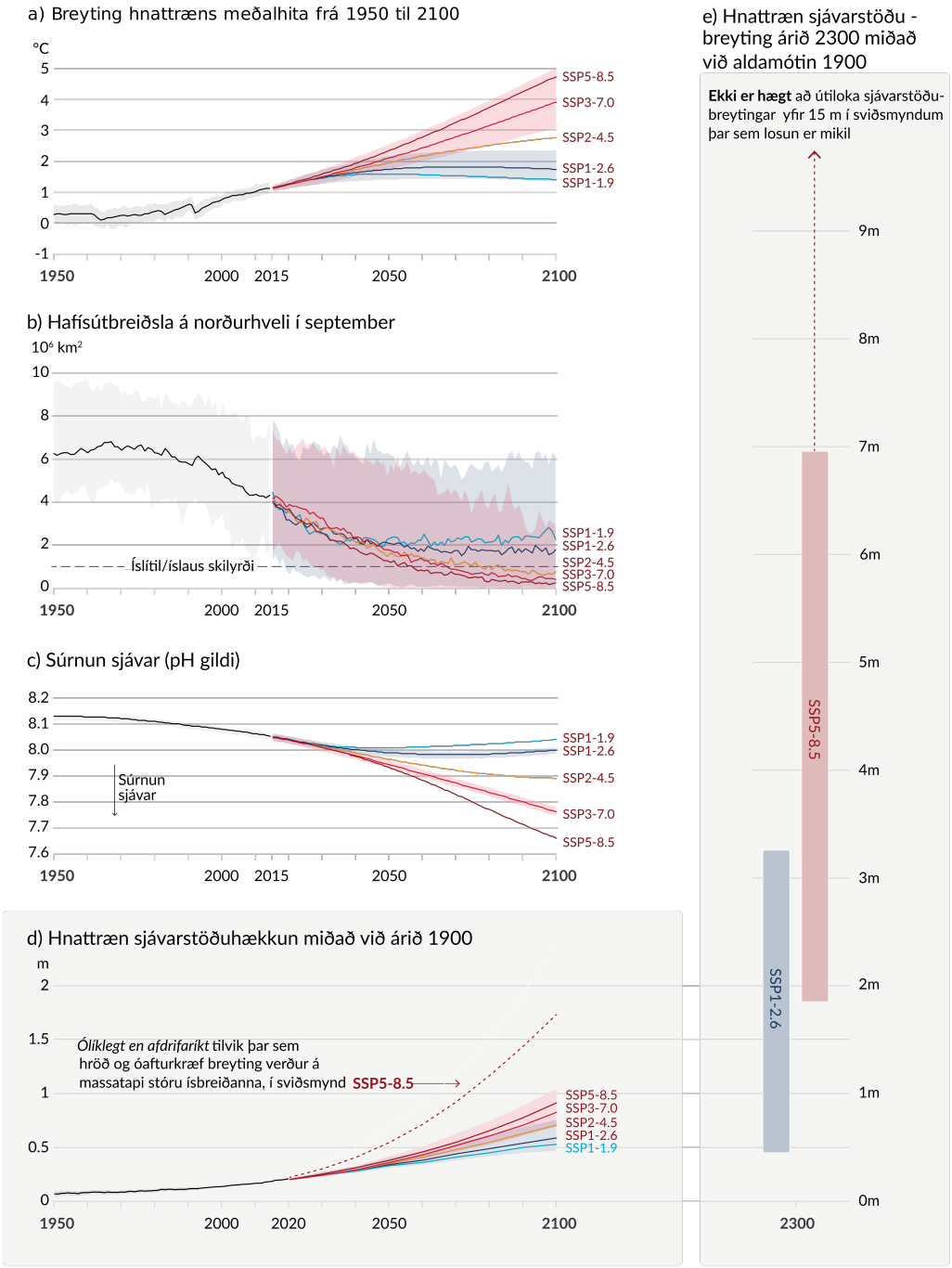


Skammtímaáhrif: Náttúrulegur breytileiki

Til skamms tíma litið (um áratug), getur náttúrulegur breytileiki dempað eða magnað hitafarsbreytingar sem stafa af losun gróðurhúsalofttegunda

Mynd A.1: Sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda og áhrif þeirra á hlýnun (Byggt á upplýsingamynd I-TS.1 í Arias o.fl., 2021).

Athafnir mannkyns hafa áhrif á alla þætti loftslagskerfisins en viðbrögðin taka áratugi eða jafnvel aldir



Mynd A.2: a) Hnattræn hlýnun frá 1950 til 2100. Svört lína sýnir söguleg gögn fyrir hnattrænan meðalhita 1950–2020 og litaðar línur og skyggð svæði sýna hlýnun og spönn líkana samkvæmt ólíkum sviðsmyndum. Myndir b), c) og d) sýna sambærilegar mælingar og niðurstöður líkana fyrir fimm sviðsmyndir (sjá viðauka ***C****) fyrir samdrátt hafísþekju í september, súrnun sjávar og sjávarstöðuhækkun. Mynd e) sýnir sjávarstöðuhækkun árið 2300 samkvæmt heitustu og köldustu sviðsmynd (IPCC, 2021, mynd SPM.8).*

- Frá 1850 til 2019 nam losun CO_2 með bruna jarðefnaeldsneytis samtals um 2390 +/- 420 $GtCO_2$. Því fer nærri að hlýnun sé í beinu hlutfalli við uppsafnaða losun. Þetta þýðir að hægt er að meta hversu mikið má losa af CO_2 frá 2020 áður en hlýnun verður meiri en kveðið er á um í Parísarsamningnum. Svarið fer þó nokkuð eftir því hversu örugg við viljum vera að ekki sé farið yfir sé farið yfir 1.5 °C eða 2 °C mörkin.

- Ef líkur á því að ekki verið farið yfir mörkin eiga að vera góðar má losun frá 2020 ekki vera meiri en 300 $GtCO_2$ fyrir 1.5 °C markið, en 900 $GtCO_2$ fyrir 2 °C hámarkið. Ef miðað er við helmingslíkur má losun frá 2020 ekki fara yfir 850 $GtCO_2$ fyrir 1.5 °C hlýnun og 1350 $GtCO_2$ fyrir 2 °C hlýnun. Árleg losun mannkyns er nú tæplega 40 $GtCO_2$ svo einungis örfáir áratugir eru til stefnu.

- Ljóst er að hlýnun vex með aukinni losun gróðurhúsalofttegunda. Aukin hlýnun leiðir til aukinna hnattræna og svæðisbundinna breytinga á mörgum loftslagstengdum áhrifaþáttum. Því fylgja hugsanlega skaðlegar afleiðingar, s.s. mun algengari hitabylgjur og aftakaúrkoma með mikilli áhættu fyrir samfélagsleg kerfi og vistkerfi, sérstaklega í þeim sviðsmyndum þar sem mest er losað.

A.1.6 Áhættuþættir og afdrifaríkar breytingar

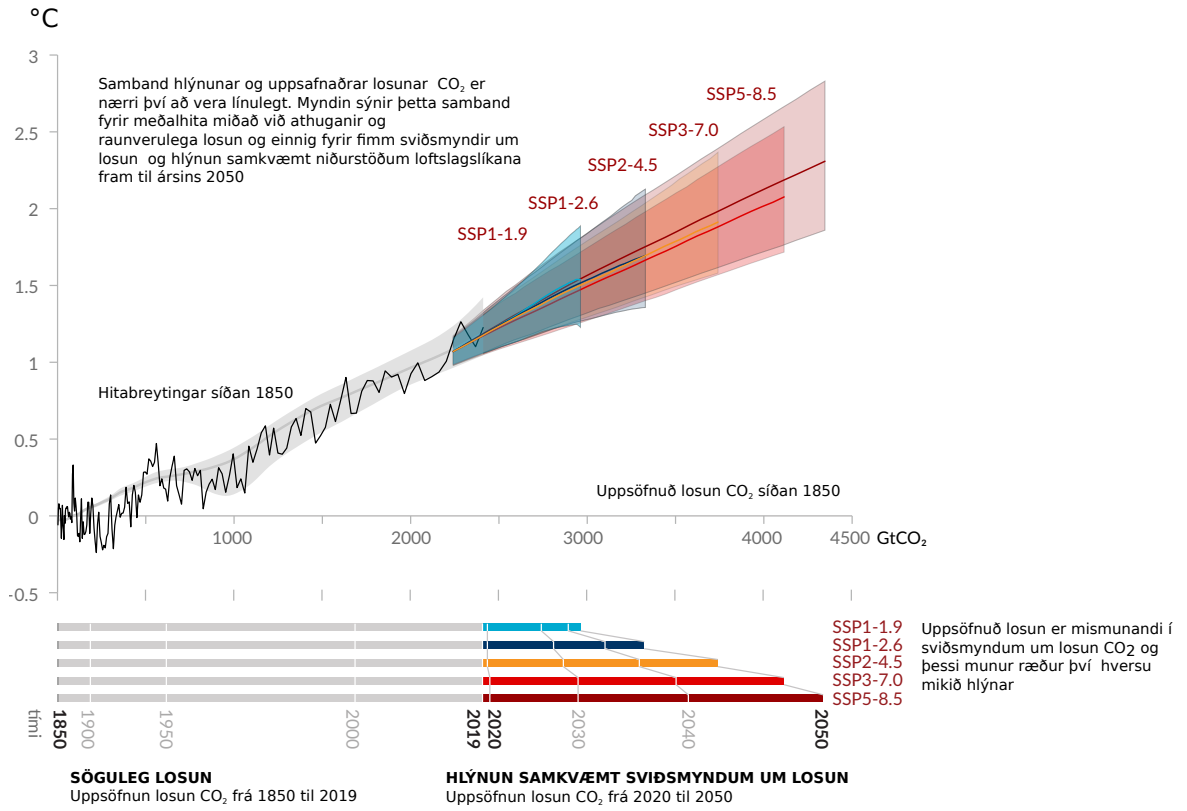
Í samantekt AR6-WG1 eru nokkrir þættir sem gætu haft sérstök áhrif á Íslandi og vekja má sérstaka athygli á.

- Ónæg þekking er á hröðum og hugsanlega óafturkræfum breytingum og því er ekki hægt að útiloka breytingar innan loftslagskerfisins sem eru afdrifaríkar en ólíklegar, t.d. í hringrás hafíss og massatapi íshvela. Líkur á hruni á ísbreiðum Suðurskautslandsins vaxa með tíma.

- *Mjög líklegt* er að það dragi úr styrk lóðréttrar hringrásar Atlantshafsins á 21. öldinni, en ekki er víst hversu mikið. *Miðlungs vissa* er fyrir því að hringrásin hrynji ekki, en slíkt myndi hafa mikil svæðisbundin áhrif á veðrakerfi og úrkomu. Það gæti falið í sér kólnun á sumum svæðum og meiri hlýnun á öðrum og jafnvel breytingar á monsúnkerfum og monsúnúrkomu.

- Ofangreindar breytingar á einstökum þáttum loftslagskerfisins geta haft afleiðingar á Íslandi. Meðal þess má nefna að hlýnun sífrera í fjöllum og hopi jökla fylgir aukin skriðuhætta. Auk þess getur aukin ákefð úrkomu eða rigning í stað snjókomu að vetrarlagi aukið skriðuhættu.

- Meðal ólíklegra en afdrifaríkra breytinga, sem gætu haft mikil áhrif á Íslandi, má nefna vaxandi óstöðugleika ísbreiðanna á Suðurskautslandi og Grænlandi, þar sem jöklarnir kelfa í s3jó fram. Eins geta breytingar á hafstraumum á Norður-Atlantshafi orðið afdrifaríkar hér á landi.



Mynd A.3: ***Efri mynd.*** *Breytingar í hnattrænum meðalhita frá 1850 – 1900 á móti uppsafnaðri losun CO_2 (svört lína) á sama tíma. Skyggða gráa svæðið sýnir mat á þeirri hlýnun sem uppsöfnuð losun CO_2 er líkleg til að valda. Lituðu svæðin og línurnar sýna sambærilegar niðurstöður fyrir hlýnun og uppsafnaða losun frá 2020 til 2050, fyrir fimm sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Styrkur gróðurhúsaáhrifa vex með losun og í nafni hverrar sviðsmyndar er tala sem lýsir því hversu mikið þau aukast. Þannig fylgja SSPS5-8.5 meiri gróðurhúsaáhrif og hlýnun en sviðsmynd SSPS3-7.0 o.s.frv. Lituðu svæðin sýna niðurstöður margra loftslagslíkana og litaðar línur sýna meðaltal líkana í hverri sviðsmynd. Myndin sýnir greinilega að hlýnun á tímabilinu vex í hlutfalli við uppsafnaða losun.* ***Neðri mynd.*** *Uppsöfnuð losun CO_2 frá 1850 til 2019 og losun hverrar sviðsmyndar á tímabilinu 2020 til 2050. Lárétti ásinn á myndinni er CO_2 hverrar sviðsmyndar og fellur að lárétta ás efri myndarinnar. Einnig hafa einstakir áratugir (2020, 2030 o.s.frv.) verið merktir inn á ásinn og fíndregnar línur tengja þá saman milli sviðsmynda. (IPCC, 2021, mynd 10).*

A.2 AR6-WG2 (2022): Áhrif á félags-, efnahags- og náttúruleg kerfi

Í febrúar 2022 kom út skýrsla (IPCC Working Group II, 2022) sérfræðingahóps IPCC sem leggur mat á áhrif loftslagsbreytinga á lífríki og samfélög. Hópurinn skoðar einnig möguleika á aðlögun og leggur grunn að nauðsynlegum aðlögunaraðgerðum vegna loftslagsbreytinga. Hér á eftir verður farið yfir helstu atriði sem koma fram í ágripi fyrir stefnumótendur (IPCC, 2022) sem byggir á niðurstöðum hópsins.

A.2.1 Aukið álag á lífríki og samfélög

Tíðni, kraftur og tímalengd aftakaatburða er í auknum mæli rakin til loftslagsbreytinga af mannavöldum. Sem dæmi má nefna öfgar á borð við aftakahita á landi og legi, flóð, svæðisbundna þurrka, bruna og aftakaveður *(mikil vissa)*.

Þessir atburðir hafa valdið víðtækum og langvarandi áhrifum á vistkerfi, fólk, byggðarlög og innviði *(mikil vissa)*. Þar á meðal er aukin dánartíðni fólks (*miðlungs vissa*) og fjöldadauði tegunda á landi og í hafi (*mjög mikil vissa*), dauði hlýsjávarkóralla *(mikil vissa)*, dauði þaraskóga *(mikil vissa)* og aukinn dauði trjáa *(mikil vissa)*. Þá hefur orðið svæðisbundin aukning gróðurelda, sem og aukning í afleiðingum slíkra atburða (*miðlungs til mikil vissa*).

Tap og tjón í náttúrlegum og manngerðum kerfum hefur aukist vegna aukningar á hitabeltisstormum af mannavöldum, hækkunar sjávarstöðu og mikillar úrkomu *(mikil vissa)*. Áhrif á náttúruleg og manngerð kerfi af völdum hæggengra ferla, svo sem súrnunar sjávar, hækkunar sjávarstöðu og minnkandi úrkomu, hafa einnig verið rakin til loftslagsbreytinga af mannavöldum *(mikil vissa)*.

Loftslagsbreytingar hafa valdið umtalsverðu tjóni, og óafturkræfu tapi á lífríki á landi, strandsvæðum, í ferskvatni og hafi *(mikil vissa)*. Samsetningu vistkerfa, virkni, seiglu og aðlögunarhæfni innan þeirra hefur hrakað *(mikil vissa)* sem hefur haft í för með sér neikvæðar hagrænar og félagslegar afleiðingar *(mikil vissa)*.

Um það bil helmingur þeirra tegunda, sem metnar voru á heimsvísu, hafa fært sig nær pólunum. Meðal þeirra tegunda sem eru á landi hafa sumar einnig fært sig í meiri hæð (*mjög mikil vissa*). Staðbundinn aldauða má í hundruðum tilfella rekja til aukinna hitaöfga (*mikil vissu*).

A.2.2 Óafturkræft tjón og hagræn áhrif

Sumt tjón, sökum loftslagsbreytinga af mannavöldum, er nú þegar óafturkræft, svo sem útdauði að minnsta kosti tveggja tegunda (*miðlungs vissa*). Önnur áhrif eru nálægt því að vera óafturkræf, svo sem breytingar á vatnafari vegna hörfunar jökla, breytingar á vistkerfum til fjalla (*miðlungs vissa*) og á norðurskauti vegna þiðnunar sífrera *(mikil vissa)*.

Neikvæð hagræn áhrif og tjón, sem rekja má til loftslagsbreytinga og öfga í veðurfari, hafa verið staðfest í auknum mæli (*miðlungs vissa*). Vart hefur orðið við fjárhagslegt tjón í greinum sem verða fyrir beinum áhrifum loftslags, með staðbundnum áhrifum á landbúnað, skógrækt, fiskveiðar, orkubúskap og ferðaþjónustu *(mikil vissa)* og með minnkandi framleiðni starfa utandyra *(mikil vissa)*. Sumir aftakaveðuratburðir hafa dregið úr hagvexti til skemmri tíma *(mikil vissa)*.

Mynstur þróunar og aðrir þættir, sem ekki tengjast loftslagi, hafa átt þátt í því að eignir eru í auknum mæli berskjaldaðar gagnvart váatburðum, sem eykur tjón *(mikil vissa)*. Uppskerubrestur, áhrif á heilsu manna og fæðuöryggi, eyðilegging heimila og innviða, tjón á eignum og tapaðar tekjur hafa haft áhrif á afkomu einstaklinga (*mikil vissa*) og leitt til neikvæðra áhrifa á félagsjöfnuð og jöfnuð milli kynja *(mikil vissa)*.

A.2.3 Tjónnæmi og varnarleysi vistkerfa og samfélaga jarðar er breytilegt á milli svæða og innan þeirra

Tjónnæmi lífkerfa og fólks gagnvart loftslagsbreytingum er mjög breytilegt innan svæða og milli þeirra *(mikil vissa)*. Það er drifið áfram af hagrænni og félagslegri þróun, misskiptingu, jaðarsetningu, heimsvaldastefnu og stjórnmálum *(mikil vissa)*.

Talið er að 3,3 milljarðar manna lifi við aðstæður sem gera þá mjög viðkvæma gagnvart loftslagsbreytingum *(mikil vissa)*. Hátt hlutfall dýrategunda er viðkvæmt fyrir loftslagsbreytingum *(mikil vissa)*. Varnarleysi mannagerðra kerfa og vistkerfa magna upp hvort annað *(mikil vissa)*. Ósjálfbær þróun eykur varnarleysi vistkerfa og manna gagnvart loftslagvánni *(mikil vissa)*.

A.2.4 Loftslagsbreytingar hafa í för með sér margskonar áhættu sem snertir vistkerfi og samfélög

Áhrif vegna loftslagsbreytinga, og sú áhætta sem þeim fylgir, verður sífellt flóknari og illviðráðanlegri. Margskonar hætta skapast samtímis og margskonar áhætta samtvinnast, sem mun leiða til samverkandi áhættu og keðjuverkandi áhættu milli geira og svæða. Sum viðbrögð við loftslagsbreytingum leiða af sér ný áhrif og nýjar áhættur.

Fari hlýnun jarðar yfir 1.5 °C í nálægri framtíð (2021-2040), mun óumflýjanleg fjölgun loftslagstengdra náttúrváratburða hafa í för með sér margskonar áhættu fyrir vistkerfi og fólk *(mjög mikil vissa)*. Áhættan mun ráðast af þróun tjónnæmis, þróun aðlögunar auk hagrænna og félagslegra þátta *(mikil vissa)*.

Umfang og hraði loftslagsbreytinga, og áhættan sem þeim breytingum fylgir, ræðst mjög af þeim aðlögunaraðgerðum sem gripið verður til í nálægðri framtíð (2021-2040) og hvað verður gert til að draga úr losun. Það tjón og þau neikvæðu áhrif sem spár gera ráð fyrir aukast við hverja gráðu hlýnunar (*mjög mikil vissa*).

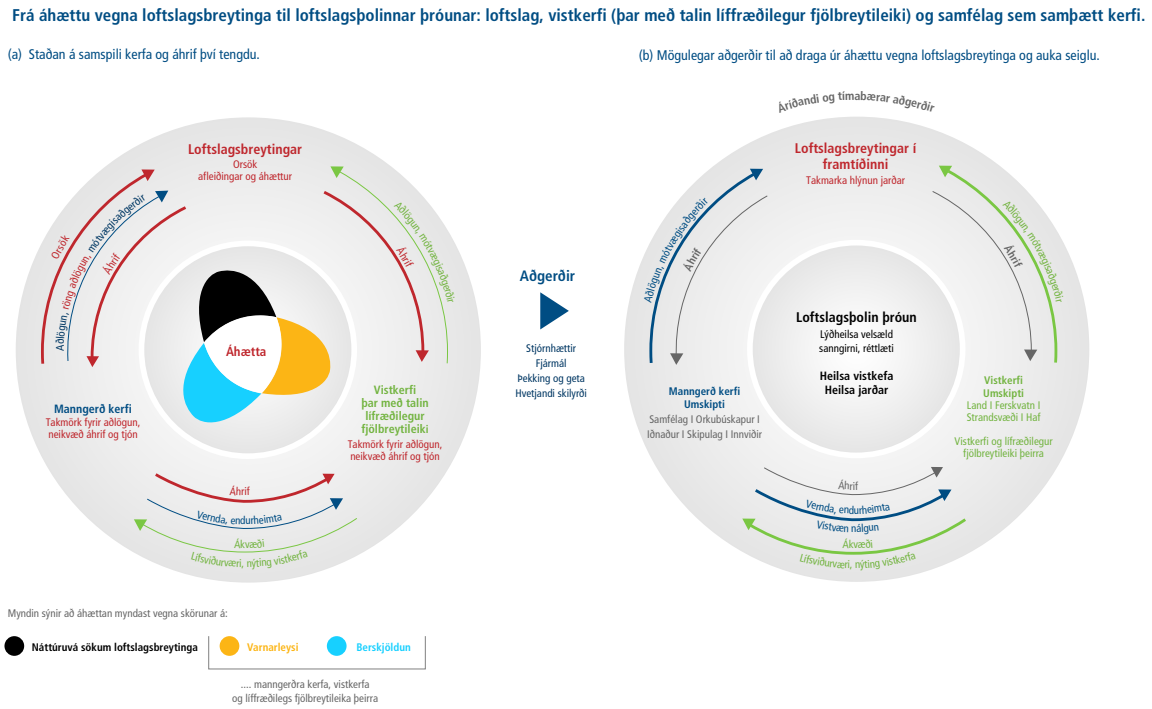
A.2.5 Neikvæð áhrif loftslagsvár og tilheyrandi áhætta hefur keðjuverkandi áhrif

Loftslagbreytingar munu hafa í för með sér aukin áhrif á framleiðslu matvæla og aðgang að þeim, sérstaklega á viðkvæmum svæðum. Það grefur undan fæðuöryggi og næringu *(mikil vissa)*. Aukning á þurrkum, flóðum og hækkun sjávarstöðu mun einnig minnka fæðuöryggi *(mikil vissa)*. Tíðari þurrkar og flóð og meiri hækkun sjávarstöðu, mun draga úr fæðuöryggi *(mikil vissa)*.

Hlýni um 2 °C eða meira verður áhætta varðandi fæðuöryggi allsráðandi, sem mun leiða til vannæringar og skorts á snefilefnum, einkum í Afríku sunnan Sahara, Suður-Asíu, Mið-Ameríku og smærri eyríkjum *(mikil vissa)*. Hlýnun mun í auknum mæli veikja virkni innan vistkerfa, svo sem frjóvgun og jarðefnasamsetningu, auka ágengni frá skaðvöldum og sjúkdómum, og minnka lífmassa sjávardýra. Það mun grafa undan fæðuöflun á landi og í hafi (*miðlungs vissa*). Við hlýnun um 3 °C eða meira mun tjónnæmi gagnvart loftslagsvá aukast til muna *(mikil vissa)* og misskipting á milli svæða vaxa *(mikil vissa)*.

Fólksflutningar aukast líklega með tíðari flóðum, hitabeltisstormum, þurrkum og hækkandi sjávarstöðu *(mikil vissa)*. Eftir sem áður verða fólksflutningar og átök, jafnvel til lengri tíma litið, áfram drifin af stjórnarfarslegum, hagrænum og félagslegum þáttum *(miðlungs vissa)*. Umfang fólksflutninga mun ákvarðast af getu til aðlögunar, fólksfjölgun og stefnumörkun er varðar þróun og fólksflutninga *(mikil vissa)*. Á sama hátt, munu loftslagsbreytingar hafa áhrif á þætti sem auka líkur á átökum, en hvort til átaka kemur ræðst af þróun stjórn- og efnahagsmála *(miðlungs vissa)*.

Neikvæð áhrif loftslagsvár, og tilheyrandi áhætta, hefur nú keðjuverkandi áhrif á milli geira og svæða *(mikil vissa)*. Þau munu leiða til vendipunkta í viðkvæmum vistkerfum og keðjuverkandi neikvæðra áhrifa og tjóns við strendur og í þéttbýli (*miðlungs vissa*) og til fjalla *(mikil vissa)*. Á mörgum svæðum hafa gróðureldar haft áhrif á vistkerfi, dýrategundir, fólk og eignir þeirra, efnahagsstarfssemi og heilsu (*miðlungs vissa*).



Mynd A.4: Samspil loftslagsbreytinga, mannlegra kerfa og viskterfa, en ýmsar yfirvofandi áhættur tengjast þessum kerfum og samspili þeirra. Meðal annars má nefna tegundadauða og tap líffræðilegs fjölbreytileika, hnignun viskerfa og færri tækifæri til aðgerða í framtíðinni. Mynd a) sýnir afleiðingar loftslagsbreytinga fyrir þessar tvær tegundir kerfa og tengingar milli þeirra. Áhrif mannlegra kerfa á önnur kerfi eru merkt með bláum örvum, áhrif vistkerfa með grænum örvum og áhrif loftslagsbreytinga með rauðum. Mynd b) sýnir leiðir til loftslagsþolinnar þróunar, bláar örvar tákna áhrif manngerðra kerfa, grænar örvar áhrif vistkerfa (þ.m.t. líffræðilegs fjölbreytileika) og minnkuð áhrif loftslagsbreytinga (eftir aðlögun) og athafna manna eru táknuð með gráum lit. (Byggt á mynd SPM.1 IPCC, 2022).

Í borgum og byggðarlögum hafa loftslagsbreytingar valdið tjóni og neikvæðum áhrifum á mikilvæga innviði svo sem vatnsveitur og fæðukerfi. Þau hafa einnig haft áhrif á efnahagsstarfsemi að því marki að áhrifa gætir utan þess svæðis sem varð fyrir loftslagsvánni *(mikil vissa)*.

Á Amazonsvæðinu munu keðjuverkandi áhrif, bæði frá loftslagstengdum áhrifaþáttum og annarskonar áhrifaþáttum, valda óafturkræfum og alvarlegum skaða á virkni vistkerfa og líffræðilegum fjölbreytileika þeirra við 2 °C hlýnun eða meira (*miðlungs vissa*).

Óumflýjanleg hækkun sjávarstöðu mun valda keðjuverkandi og samverkandi áhrifum með eyðileggingu á vistkerfum við strendur, seltu í grunnvatni, flóðum og tjóni á innviðum við strendur. Það hefur í för með sér keðjuverkandi áhrif á lífsviðurværi, heilsu, velferð, fæðu- og vatnsframboð, sem og gildismat og viðhorf innan samfélaga í nálægri og fjarlægri framtíð *(mikil vissa)*.

A.2.6 Enn mikilvægara en áður að grípa til aðlögunaraðgerða

Talið er enn mikilvægara en áður að þróa samfélög um heim allan þannig að þau auki þanþol sitt gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga. Þetta mat byggir á merkjanlegum áhrifum loftslagsbreytinga, horfum varðandi áhættu þeim tengdum, ásamt líklegu tjónnæmi samfélaga og aðlögunargetu þeirra. Mikilvægt er að skapa skilyrði fyrir þróun sem þolir áhrif loftslagsbreytinga, loftslagsþolna þróun.

Vísindaleg gögn leiða til ótvíræðrar niðurstöðu: Loftslagsbreytingar eru ógn við velferð fólks og heilsu jarðar. Við frekari seinkun á samhentum aðgerðum á heimsvísu glatast tækifærið til að skapa lífvænlegri sjálfbæra framtíð fyrir alla.

Stjórnvöld, almenningur og einkageirinn taka ákvarðanir sem fela í sér forgangsröðun þegar kemur að jafnræði, réttlæti og því að draga úr áhættu. Þannig er stutt við loftslagsþolna þróun. Það er einnig gert þegar ákvörðunarferli, fjármögnun og aðgerðir eru samþættar milli allra stiga stjórnsýslu og á milli atvinnugreina til langs og skamms tíma (*mjög mikil vissa*).

Loftslagsþolin þróun byggir á stuðningi stjórnvalda á öllum stigum með því að vinna með almenningi, félagasamtökum, menntageiranum, stofnunum, fjölmiðlum, fjárfestum og fyrirtækjum. Auk þess með því að þróa samvinnu á milli stofnana og jaðarsettra hópa, svo sem kvenna, ungs fólks, frumbyggja, smárra samfélaga og þjóðernisminnihluta *(mikil vissa)*. Slík samvinna er árangursríkust þegar á bak við hana er öflug stjórnmálaforysta, stofnunanir, fjármagn fjármagni, mannafli, búnaður, upplýsingar og hagnýtar lausnir *(mikil vissa)*.

A.2.7 Mikilvægt að standa vörð um vistkerfi og líffræðilegan fjölbreytileika

Að standa vörð um líffræðilegan fjölbreytileika og vistkerfi er grundvallaratriði loftslagsþolinnar þróunar *(mjög mikil vissa)*. Nýlegar rannsóknir sýna að til að viðhalda loftslagsþoli vistkerfa og líffræðilegs fjölbreytileika, þarf að vernda u.þ.b. 30% til 50% af landsvæði, ferskvatni og hafi á jörðinni, þar á meðal vistkerfa sem hafa orðið fyrir litlum áhrif af mannavöldum *(mikil vissa)*.

Loftslagbreytingar hafa nú þegar raskað manngerðum og náttúrulegum kerfum og sú þróun, sem nú á sér stað, ýtir ekki undir loftslagsþolna þróun *(mjög mikil vissa)*. Þær ákvarðanir sem verða teknar og framkvæmdar næsta áratuginn, munu ákvarða árangur loftslagsþolinnar þróunar til lengri tíma litið *(mikil vissa)*. Mikilvægt er að átta sig á því að horfur um árangur í loftslagþolinni þróun versna ef ekki verður dregið hratt úr losun gróðurhúsalofttegunda. Sérstaklega ef horft er til þess möguleika að hlýnun jarðar fari fram úr 1.5 °C í nálægri framtíð *(mikil vissa)*.

A.3 AR6-WG3 (2022): Losun gróðurhúsalofttegunda og mótvægisaðgerðir

Í apríl 2020 kom út skýrsla þriðja vinnuhóps (WG3) sem leggur mat á losun gróðurhúsalofttegunda og mótvægisaðgerðir, þ.e. leiðir til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda. Hér á eftir verður farið yfir helstu atriði sem koma fram í ágripi fyrir stefnumótendur (Shukla o.fl., 2022) í skýrslunni.

A.3.1 Staðan og nýleg þróun

Nettólosun gróðurhúsalofttegunda (GHL) á heimsvísu hélt áfram að aukast seinasta áratug og bætist við uppsafnaða losun frá 1850 (sjá mynd A.3). Meðaltal losunar GHL á ári síðasta áratuginn hefur aldrei verið hærra, en aukning í vexti losunar frá 2010-2019 var lægri en aukningin 2000-2009 *(mikil vissa)*.

Nettólosun GHL á heimsvísu hefur aukist síðan 2010 í öllum geirum losunar, þar sem hlutdeild þéttbýlis er 67-72%, ef miðað er við neyslutengda losun. Samdráttur í losun CO_2 frá jarðefnaeldsneyti og iðnaðarferlum, svo sem vegna samdráttar í orkukræfni vergrar landsframleiðslu sem og kolefniskræfni orkuframleiðslu, hefur ekki dugað til að vega upp á móti vaxandi umsvifum á heimsvísu í iðnaði, orkuöflun, samgöngum, landbúnaði og byggingum *(mikil vissa)*.

Losun er breytileg á milli landssvæða. Mismunur í losun á einstakling milli svæða og landa á að hluta rætur sínar að rekja til mismunandi stigs hag- og samfélagsþróunar, en breytileikinn er einnig mikill ef miðað er við sömu tekjur á einstakling. Hlutfall losunar þeirra sem hafa hæstar tekjur á heimsvísu, það er hæsta tekjutíundin, og sem losa mest á mann er um 34-45% af heildarlosun GHL, ef miðað er við neyslutengda losun. Að minnsta kosti 18 lönd hafa dregið úr losun GHL í meira en 10 ár og má rekja samdráttinn til orkuskipta, aukningar í skilvirkni í orkunotkun og samdráttar í eftirspurn eftir orku *(mikil vissa)*.

Einingakostnaður ýmis konar tæknilausna, sem draga úr losun GHL, svo sem sólar- og vindorku og rafhlaðna, sem nauðsynlegar eru rafvæðingu samgangna, hefur lækkað mikið síðan 2010. Lækkunin stafar m.a. af stjórnvaldsaðgerðum, t.d. stuðningi við rannsóknir og þróun sem hvetja til og styðja við nýsköpun og fjárfestingu í nýrri tækni. Tækniþróun er hægari í minna þróuðum löndum þar sem fjárfestingaumhverfið er minna þróað og minna styðjandi. Stafræn þróun getur eflt samdrátt í losun GHL en án viðeigandi skipulagningar getur hún einnig haft neikvæð ytri áhrif *(mikil vissa)*.

Síðan AR5 var birt hefur stefnumótun eflst og lögum og aðgerðum fjölgað sem beinast að samdrætti í losun GHL. Þessi þróun hefur komið í veg fyrir losun sem annars hefði átt sér stað og aukið fjárfestingu í innviðum og tækni, sem leiðir til samdráttar í losun GHL. Munur er þó á stefnumótun og aðgerðum milli geira. Samræming flæðis fjármagns á alþjóðavísu og markmiða Parísarsamningsins er hæg og dreifist flæði fjármagns ójafnt milli svæða og geira *(mikil vissa)*.

Stefna ríkja um losun næstu áratuga birtist í landsframlögum þeirra (*e. NDC*) til ársins 2030. Tilkynnt framlög fyrir COP26 (árið 2021) bendir til að líklegt sé að hitastigshækkun verði hærri en 1.5 °C árið 2100. Til að líklegt sé að halda megi hlýnun innan við 2 °C þarf árangur aðgerða að margfaldast eftir árið 2030. Núverandi framlög ná því ekki að uppfylla markmið Parísarsamningsins (sjá mynd 1.7). Stefna og aðgerðir sem þegar voru innleiddar árið 2020 munu leiða til meiri losunar GHL en stefnt er að ef miðað er við landsframlög sem tilkynnt voru fyrir COP26 *(mikil vissa)*.

A.3.2 Kerfisbreytingar til að takmarka hnattræna hlýnun

Til að takmarka hlýnun[11] við 1.5 °C (>50% líkur) eða 2 °C (>67% líkur), sem er í samræmi við markmið Parísarsamningsins, þarf að ráðast í auknar aðgerðir samstundis þannig að heimslosun GHL nái hámarki í síðasta lagi fyrir árið 2025. Í báðum losunarferlum er gert ráð fyrir hröðum

[11] Hér byggja prósentutölur um líkur hlýnunar á niðurstöðum ótal loftslagslíkana fyrir tiltekna þróun losunar . Samsetningin „takmarka hlýnun við 1.5 °C (>50% líkur)"vísar til þess að helmingslíkur eða meira séu að hægt verði að takmarka hlýnunina við þessi mörk.

og djúpum samdrætti til ársins 2050 (*mikil vissa*). Án aukins metnaðar í stefnumörkun og aðgerðum, umfram þær sem þegar voru innleiddar árið 2020, er gert ráð fyrir að losun GHL muni aukast framyfir árið 2025, sem gæti leitt til hitastigsaukningar uppá 3,2 °C (2,2-3,5) árið 2100 *(miðlungs vissa)*.

Nettólosun koldíoxíðs (CO_2) á heimsvísu þarf að fara niður í núll, ná þarf kolefnishlutleysi, sem næst árinu 2050 til að halda hitastigshækkun við 1.5 °C (>50% vissa) og í kringum 2070 ef halda á hitastigshækkun við 2 °C (>67% vissa). Nettólosun í mörgum sviðsmyndum mun síðan verða neikvæð (*e. net negative*). Allir losunarferlar gera einnig ráð fyrir miklum samdrætti í losun annarra GHL. Hæsta hitastigsaukning (*e. peak warming*) fer eftir uppsafnaðari losun CO_2 þar til kolefnishlutleysi er náð, sem og breytingum í losun annarra GHL. Mikill samdráttur í losun annarra GHL, þá sérstaklega metani, dregur úr líkum á hitastigsbreytingum umfram markmið Parísarsamningsins. Hann dregur einnig úr þörf á neikvæðri nettólosun CO_2 á seinni helmingi aldarinnar. Stöðugt kolefnishlutleysi dregur úr hækkun hitastigs *(mikil vissa)*.

Allar sviðsmyndir losunar sem takmarka hlýnun við 1.5 °C (>50%) og þær sem halda hlýnun innan við 2 °C , byggja á hröðum og djúpum samdrætti í losun allra GHL í öllum geirum. Þær aðgerðir sem stuðla að slíkum samdrætti eru orkuskipti í átt að lágkolefnaorku, svo sem endurnýjanlegum orkugjöfum, áframhaldandi notkun jarðefnaeldsneytis með föngun og förgun kolefnis (*e. carbon capture and storage*), breytingum á eftirspurn og aukningu í skilvirkni, samdrætti í losun annarra GHL sem og loftföngun (*e. direct air capture*) sem vinnur gegn áframhaldandi losun GHL. Margvíslegar sviðsmyndir sýna mismunandi leiðir til samdráttar í losun í öllum geirum *(mikil vissa)*.

Samdráttur í losun GHL í orkugeiranum krefst kerfisbreytinga og orkuskipta, svo sem mikils samdráttar í notkun jarðefnaeldsneytis, notkun lágkolefna orkugjafa, notkun nýrra orkubera ásamt aukinni skilvirkni og orkusparnaði. Áframhaldandi uppbygging innviða fyrir notkun jarðefnaeldsneytis, án föngunar kolefnis, mun festa í sessi losun GHL *(mikil vissa)*.

Að ná kolefnishlutleysi í iðnaði er áskorun, en þó mögulegt. Að draga úr losun frá iðnaði krefst samræmdra aðgerða í allri virðiskeðjunni. Aðgerða sem hafa áhrif á eftirspurn, orku- og efnakræfni, aukna hringrás efna og tækni sem dregur úr losun og umbyltir framleiðsluferlum. Innleiðing nýrra framleiðsluferla, sem byggja á lítilli eða engri losun, svo sem rafmagni og vetni, sem og kolefnisstjórnun, mun styðja við kolefnishlutleysi í iðnaði *(mikil vissa)*.

Kerfisbreytingar í borgarskipulagi sem miða að kolefnishlutleysi, svo sem tengdar innviðum geta aukið skilvirkni í auðlindanýtingu og samdrátt í losun GHL. Aukinn metnaður hvað varðar samdrátt í losun í ört stækkandi borgarumhverfi byggir á: i) að draga úr eða breyta efna- og orkunotkun ii) rafvæðingu og iii) föngun, förgun og/eða bindingu kolefnis í borgarumhverfi. Borgir geta aðeins náð kolefnishlutleysi ef dregið er út losun eftir allri virðskeðjunni, bæði innan og utan borgarmarka, sem mun hafa ruðningsáhrif á aðra geira *(mjög mikil vissa)*.

Sviðsmyndir sýna að byggingar, það er núverandi byggingar ef endurnýjaðar og byggingar framtíðarinnar, geta nálgast hlutleysi allra GHL árið 2050. Það á við ef stefnumörkun og aðgerðir eru innleiddar sem auka skilvirkni, innifela nægjusemi (*e: sufficiency*) og auka notkun endurnýjanlegra orkugjafa. Auk þess þarf að fjarlægja hindranir sem standa í vegi fyrir samdrætti í losun. Metnaðarlausar reglugerðir og aðgerðir læsa kolefni í byggingum í langan tíma vegna langs líftíma bygginganna. Vel úrfærðar aðgerðir geta stuðlað að samdrætti, því að heimsmarkmiðum Sameinuðu þjóðanna verði náð og að byggingar framtíðarinnar verði aðlagaðar að breyttu loftslagi *(mikil vissa)*.

Aðgerðir á eftirspurnarhlið og lág-GHL (*e. low-GHG*) tækni geta dregið úr losun frá samgöngum í þróuðum löndum og takmarkað aukningu í losun frá minna þróuðum löndum *(mikil vissa)*. Aðgerðir sem hafa áhrif á eftirspurn, svo sem á tíðni ferða, geta aukið skilvirkni samgangna *(miðlungs vissa)*. Rafvæðing samgangna, ef rafmagn er framleitt með lág-GHL orkugjöfum, gefur mestan samdrátt í losun GHL frá samgöngum á landi ef miðað er við allan lífsferilinn *(mikil vissa)*. Lífeldsneyti, sem uppfyllir skilyrði sjálfbærni, vetni og vetnisafleiður auk tilbúins eldsneytis geta stuðlað að samdrætti í losun GHL frá samgöngum á sjó, í lofti og frá

þungaflutningum á landi. Þessar lausnir krefjast þó framfara í frameiðslutækni og samdráttar í kostnaði (*miðlungs vissa*). Margir kostir til að draga úr losun frá samgöngum hafa ýmis jákvæð áhrif, svo sem minni loftmengun, heilsutengdan ávinning, aukið jafnræði í aðgengi að samgöngum, minni umferðarteppur og minni notkun efna *(mikil vissa).*

Sjálbær innleiðing samdráttar í losun frá landi og landbúnaði getur skilað umtalsverðum samdrætti í losun GHL og aukningu í bindingu. Hann getur þó ekki að fullu komið í stað samdráttar í öðrum geirum. Landbúnaðar- og skógarafurðir geta þó komið í stað afurða sem mikil losun fylgir (*e. GHG intensive*) í öðrum geirum. Hindranir fyrir innleiðingu aðgerða sem draga úr losun GHL eru t.d. samkeppni um land, áhrif á fæðuöryggi og flækjustig eignarhalds á landi auk menningartengdra hindrana. Fjölmörg tækifæri, þó mismunandi á milli landa, eru til hliðarábata (svo sem verndun líffræðilegs fjölbreytileika, vistkerfisþjónustu og lífsbjarga) og draga úr áhættu (t.d. með aðlögun að loftslagsbreytingum) *(mikil vissa).*

Samdráttur í losun GHL á eftirspurnarhlið felur í sér breytingar í notkun innviða, tæknilausnir og hegðunar- og þjóðfélagslegar breytingar. Samdráttur vegna breytinga í eftirspurn getur dregið úr samfélagslosun uppá 40-70% árið 2050, miðað við venjubundna þróun. Getur slíkur samdráttur aukið grunnlífsgæði allra *(mikil vissa).*

Til að ná kolefnishlutleysi eða hlutleysi allra GHL er loftföngun óhjákvæmileg til að vega á móti losun GHL sem eftir verður (*e. residual GHL*). Skölun og tímasetning notkunar á þessarri tækni mun byggja á samdráttarferlum losunar í mismunandi geirum. Loftföngun á iðnaðarskala er skilyrt aukningu í hagkvæmni og sjálfbærni *(mikil vissa).*

Aðgerðir til samdráttar í losun GHL sem kosta minna en 100 USD/tonn CO_2 jafngildi, gætu leitt til 50% samdráttar í losun árið 2030 miðað við losun ársins 2019 *(high confidence).* Sviðsmyndir sýna að þrátt fyrir aðgerðir heldur hagvöxtur á heimsvísu áfram að vera jákvæður. Sviðsmyndirnar taka þó hvorki til greina jákvæð efnahagsleg áhrif af því að forðast áhrif loftslagsbreytinga né minni kostnað vegna aðlögunar. Heimsframleiðsla árið 2050 verður nokkrum prósentum lægri í sviðsmynd með auknum samdrætti í samanburði við venjubundna þróun. Flestar rannsóknir sýna að hagrænn ávinningur á heimsvísu við að takmarka hitastigshækkun við 2 °C gæti verið hærri en áætlaður kostnaður við að draga úr losun GHL *(miðlungs vissa).*

A.4 AR6-SYR (2023): Samantektarskýrsla

Í mars 2023 gaf Millríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC) út samantektarskýrslu fyrir 6. matshring (AR6). Um var að ræða lokaskýrslu þessa matshrings nefndarinnar sem staðið hefur yfir frá því 2015. Skýrslan samþætti meginniðurstöður sjöttu matsskýrslu (AR6) nefndarinnar sem samanstendur af framlagi þriggja vinnuhópa og þriggja sérfræðiskýrslna. Niðurstöðurnar byggja á rýndum vísindalegum, tæknilegum og samfélagslegum vísindagreinum sem komið hafa út frá því að fimmta matsskýrsla nefndarinnar (AR5) var gefin út árið 2013–2014.

Hér verður farið yfir helstu niðurstöður í ágripi samantektarskýrslunnar, en mikið af þessu efni kom fram í greinum A.1, A.2 og A.3 og í kafla 1.

Hlýnun frá upphafi mælinga

Athafnir mannkyns, þá sérstaklega losun gróðurhúsalofttegunda, hafa ótvírætt leitt til hnattrænnar hlýnunar. Á tímabilinu 2011–2020 mældist meðalhiti jarðar um 1.1 °C hærri en meðalhiti árabilsins 1850–1900. Ósjálfbær orkunotkun, landnotkun og breytingar á landnotkun, lífsvenjur og neyslumynstur og framleiðsla svæða, ríkja og einstaklinga hefur leitt til og mun leiða til aukinnar losunar gróðurhúsalofttegunda *(mikil vissa)*.

Víðtækar og hraðar breytingar í lofthjúpi, hafi, freðhvolfi og lífhvolfi hafa átt sér stað. Öll svæði jarðar hafa þegar fengið að kenna á öfgum í veðurfari vegna loftslagsbreytinga af mannavöldum (sjá mynd A.5). Þær hafa haft í för með sér víðtækar neikvæðar afleiðingar og tap og tjón fyrir náttúru og íbúa *(mikil vissa)*. Viðkvæm samfélög, sem bera minnstu ábyrgð á hlýnun jarðar, hafa orðið hvað verst úti vegna áhrifa loftslagsbreytinga *(mikil vissa)*.

Framvinda á sviði aðlögunar, eyður og ákoranir

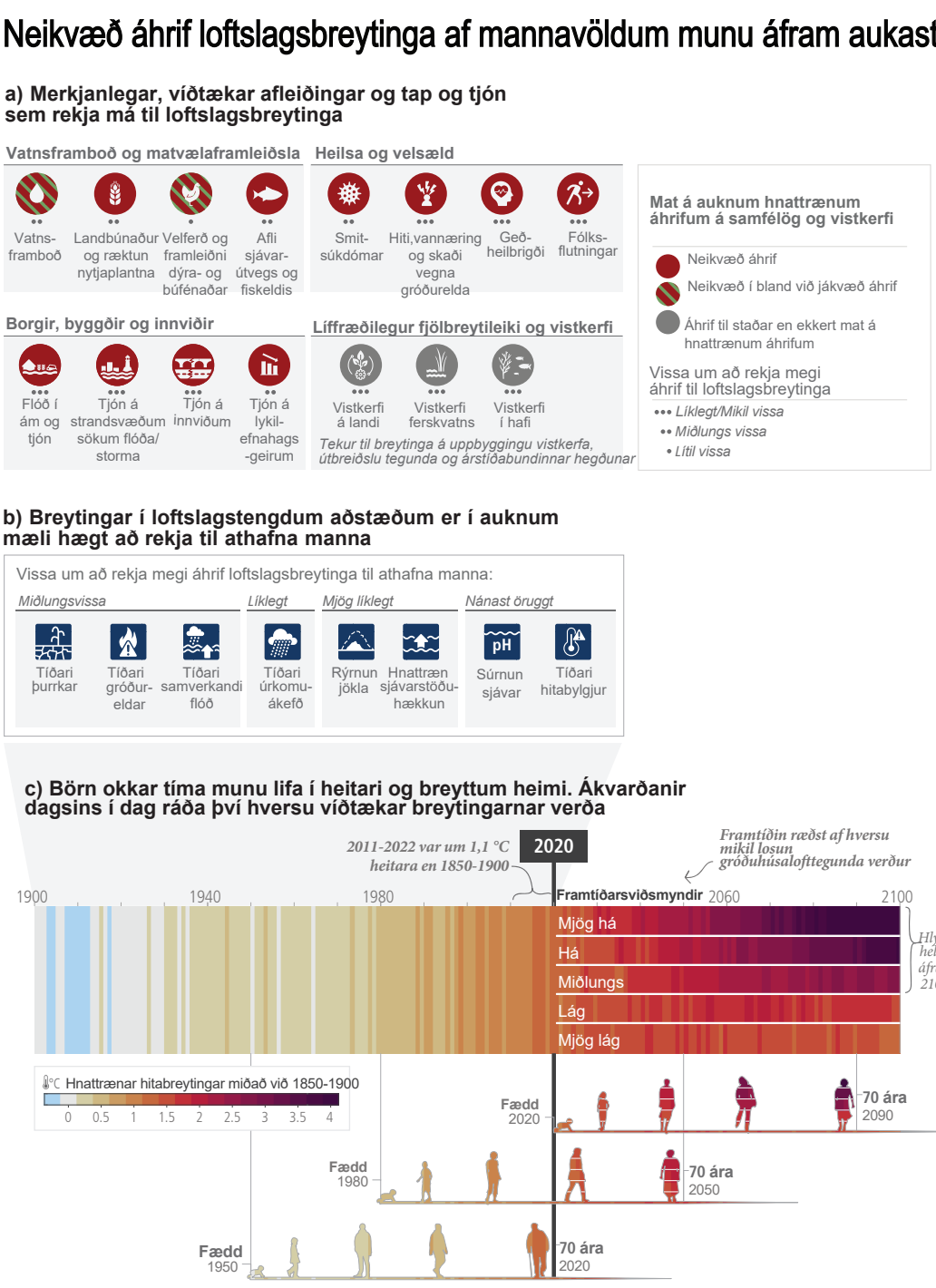
Áætlanagerð á sviði aðlögunar og innleiðingar hefur miðað áfram þvert á geira og svæði með greinilegum en misjöfnum árangri. Þrátt fyrir framfarir skilur enn í milli hvað aðlögun varðar og mun bilið halda áfram að aukast miðað við núverandi hraða innleiðingar. Mörkum aðlögunar hefur þegar verið náð innan ákveðinna vistkerfa og svæða. Slæmar aðlögunaraðgerðir eiga sér stað innan geira og svæða. Núverandi flæði fjármagns á hnattræna vísu er ekki nægjanlegt fyrir aðlögunaraðgerðir og heldur auk þess aftur af þeim, sérstaklega í þróunarlöndunum *(mikil vissa)*.

Mótvægisaðgerðir hafa fengið stærri sess í stefnum og lögum frá því að AR5 kom út. Samkvæmt tölum um landsframlag aðilarríkja, frá október 2021, er líklegt að losun gróðuhúsalofttegunda árið 2030 leiði til þess að hlýnun verði meiri en 1.5 °C á 21. öldinni og verði til þess að erfiðara reynist að halda hlýnun innan við 2 °C. Framreikningar sýna að nokkurt bil er milli reikninga sem taka mið af þeim aðgerðum til samdráttar sem hafa komið til framkvæmda og þeirra aðgerða sem lofað er í landsframlögm. Ónógu fjármagni er varið til að mæta loftslagsmarkmiðum bæði innan mismunandi geira og svæða *(mikil vissa)*.

A.4.1 Loftlagsbreytingar afleiðingar og áhættur

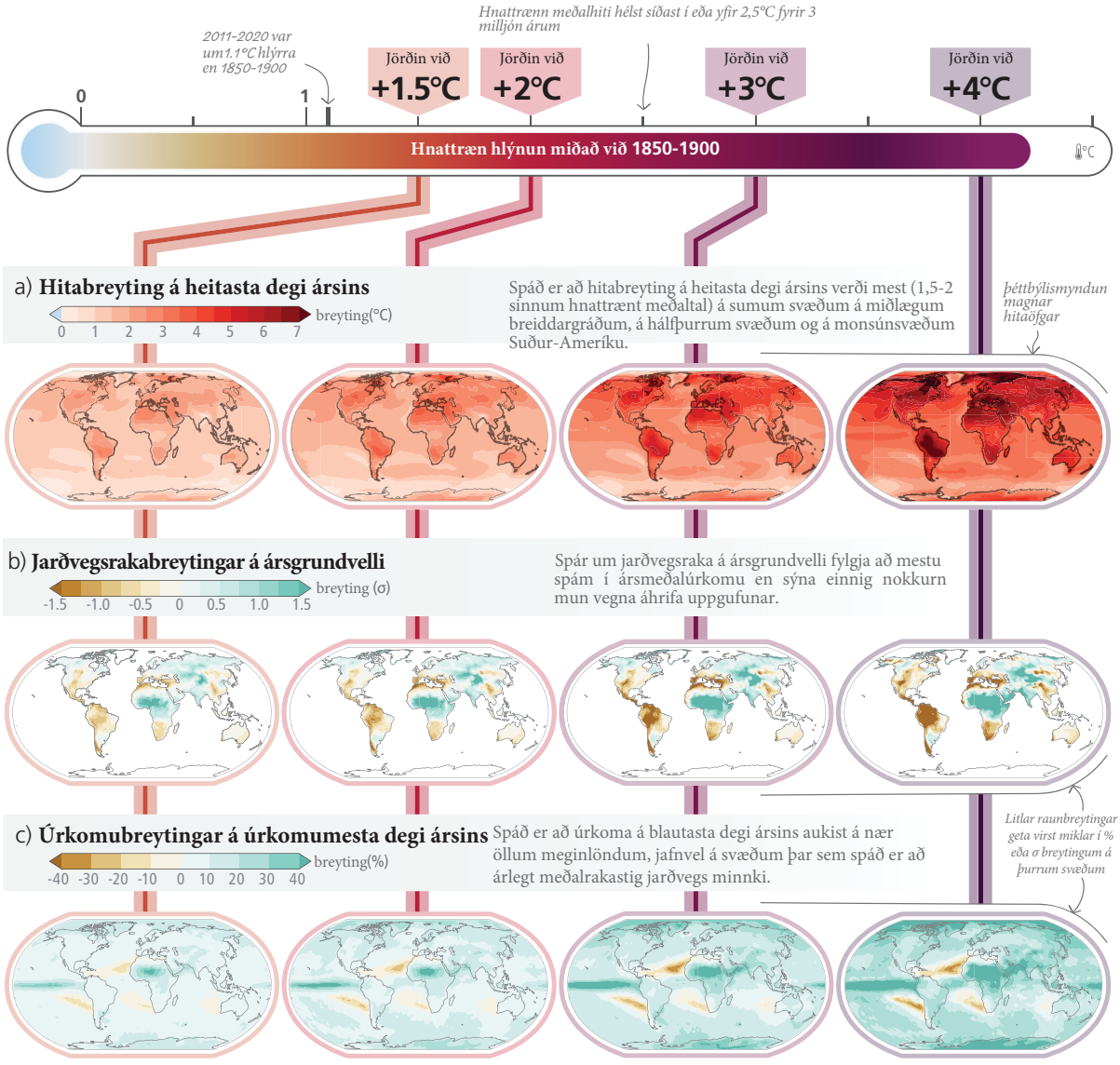
Reikningar með ólíkum sviðsmyndum af losun gróðurhúsalofttegunda sýna að áframhaldandi losun mun leiða til aukinnar hnattrænnar hlýnunar, í besta falli um 1.5 °C í nálægri framtíð (sjá mynd A.6). Hvert brot af gráðu hlýnunar mun magna margþætta og samverkandi vá *(mikil vissa)*. Mikill, hraður og viðvarandi samdráttur í losun gróðuhúsalofttegunda myndi draga merkjanlega úr hlýnun jarðar innan tveggja áratuga og leiða til greinilegra breytinga í samsetningu lofthjúpsins innan fárra ára *(mikil vissa)*.

Líkur á margskonar loftslagsáhættu aukast meira með hverju gráðurbroti hlýnunar en talið var í AR5. Auk þess er spáð fyrir um margfalt meiri áhrif til langs tíma en nú mælast *(mikil vissa)*. Áhættur, neikvæð áhrif og tilheyrandi tap og tjón vegna loftslagsbreytinga stigmagnast með hverju brotabroti af hlýnun *(mjög mikil vissa)* (sjá mynd A.7). Loftslagsáhætta mun í



*Mynd A.5: a) Loftslagsbreytingar hafa nú þegar haft víðtæk áhrif á manngerð kerfi og leitt til breytinga á vistkerfum á landi, í ferskvatni og hafi. b) Breytingar í loftslagstengdum aðstæðum er í auknum mæli hægt að rekja til athafna manna, eins og valdir loftslagsvísar sýna. c) Breytingar á meðalyfirborðshita jarðar á tímabilunum 1900–2020 og 2021–2100, fyrir fimm framtíðarsviðsmyndir (í samanburði við 1850–1900), samhliða líftíma þriggja kynslóða (fædd 1950, 1980 og 2020). Framtíðarsviðsmyndirnar fimm eru (2021–2100) sýndar: mjög lá (SSP1-1.9), lág (SSP1-2.6), miðlungs (SSP2-4.5), há (SSP3-7.0) og mjög há (SSP5-8.5). Þær ráðast af því hversu mikið er losað, sbr umfjöllun í viðauka **C**. (IPCC, 2023a, mynd SPM.1)*

Svæðisbundnar breytingar á bæði meðalloftslagi og öfgum verða útbreiddari og stigmagnast með aukinni hlýnun



Mynd A.6: Svæðisbundnar breytingar í (a) hita á heitasta degi ársins, (b) ársmeðaltali jarðvegsraka og (c) úrkomu á úrkomumesta degi ársins ef hlýnar um 1.5 °C, 2 °C, 3 °C eða 4 °C samanborið við 1850-1900. Hlýnun er svæðisbundin, sumstaðar verður þurrara, annars staðar rakara og úrkomubreytingar eru mestar við miðbaug og á norðurhveli jarðar. Sumstaðar verður þurrara, annars staðar rakara (IPCC, 2023a, mynd SPM.2).

auknum mæli samtvinnast annars konar áhættu sem leiðir til samverkandi og kerfislægrar áhættu sem er flóknara og erfiðara að takast á við *(mikil vissa)*.

Óhjákvæmilegar, óafturkræfar og óvæntar breytingar

Sumar breytingar til framtíðar eru óhjákvæmilegar og/eða óafturkræfar en unnt er að draga úr þeim með miklum, hröðum og viðvarandi samdrætti í losun gróðurhúsalofttegunda. Líkur á óvæntum og/eða óafturkræfum breytingum aukast með aukinni hlýnun. Á sama hátt aukst líkur á ólíklegum atburðum með miklum neikvæðum afleiðingum í samræmi við aukna hlýnun *(mikil vissa)*.

A.4.2 Aðgerðir til að stemma stigu við loftslagsbreytingum

Kolefniskvóti og nettó núll losun

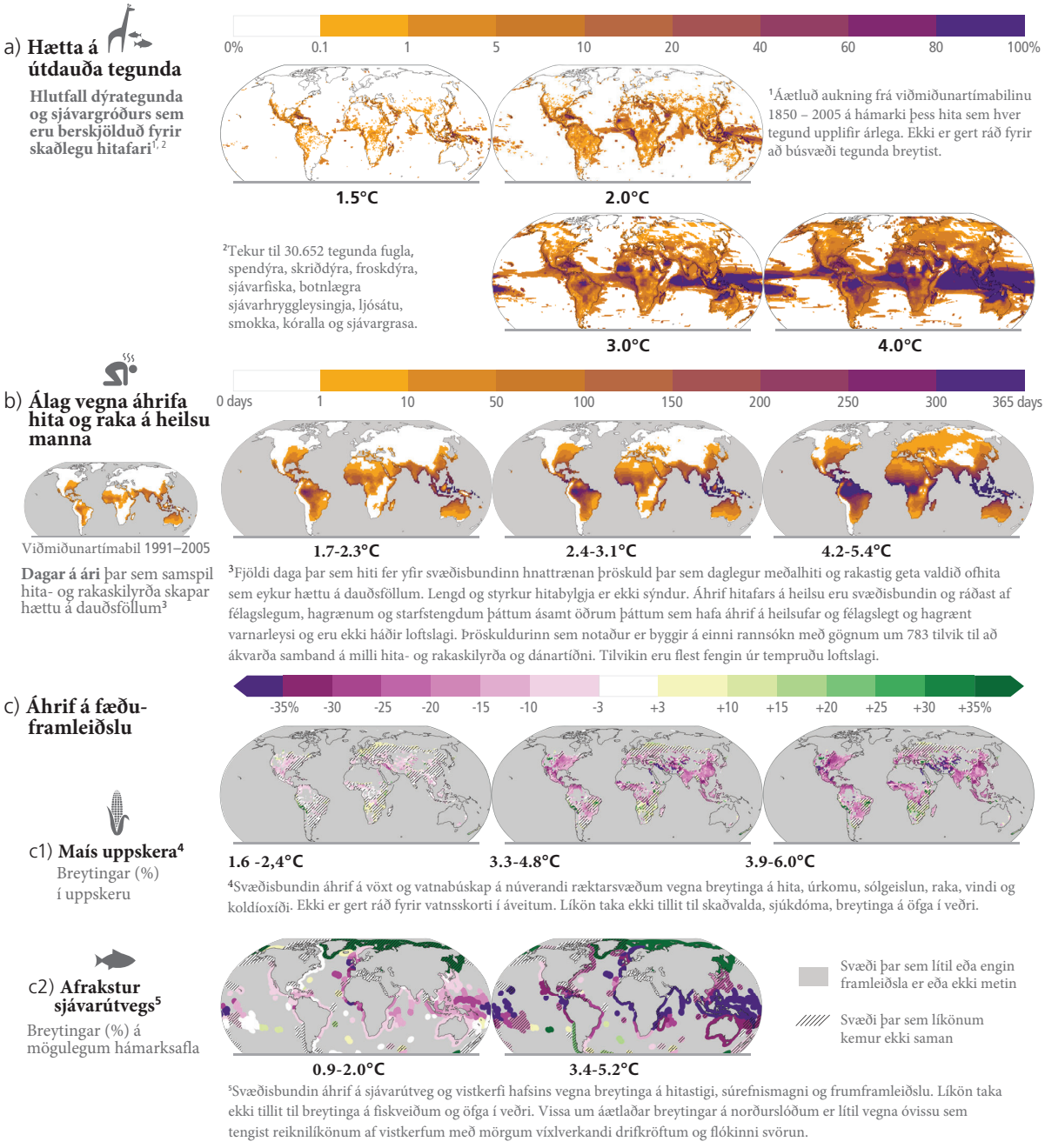
Nettólosun koldíoxíðs þarf að vera núll svo hægt sé að takmarka hnattræna hlýnun af mannavöldum. Uppsöfnuð kolefnislosun fram að því að nettó núll losun er náð og samdráttur í losun gróðurhúsalofttegunda á þessum áratug ávarðar að miklu leyti hvort hægt verði að takmarka hlýnun við 1.5 °C eða 2 °C (mikil vissa). Áætlað er að losun CO_2 frá núverandi innviðum jarðefnaeldsneytis fari fram úr eftirstandandi kolefniskvóta fyrir 1.5 °C (50%) án frekari förgunar og föngunar *(mikil vissa)*.

Brautir losunar

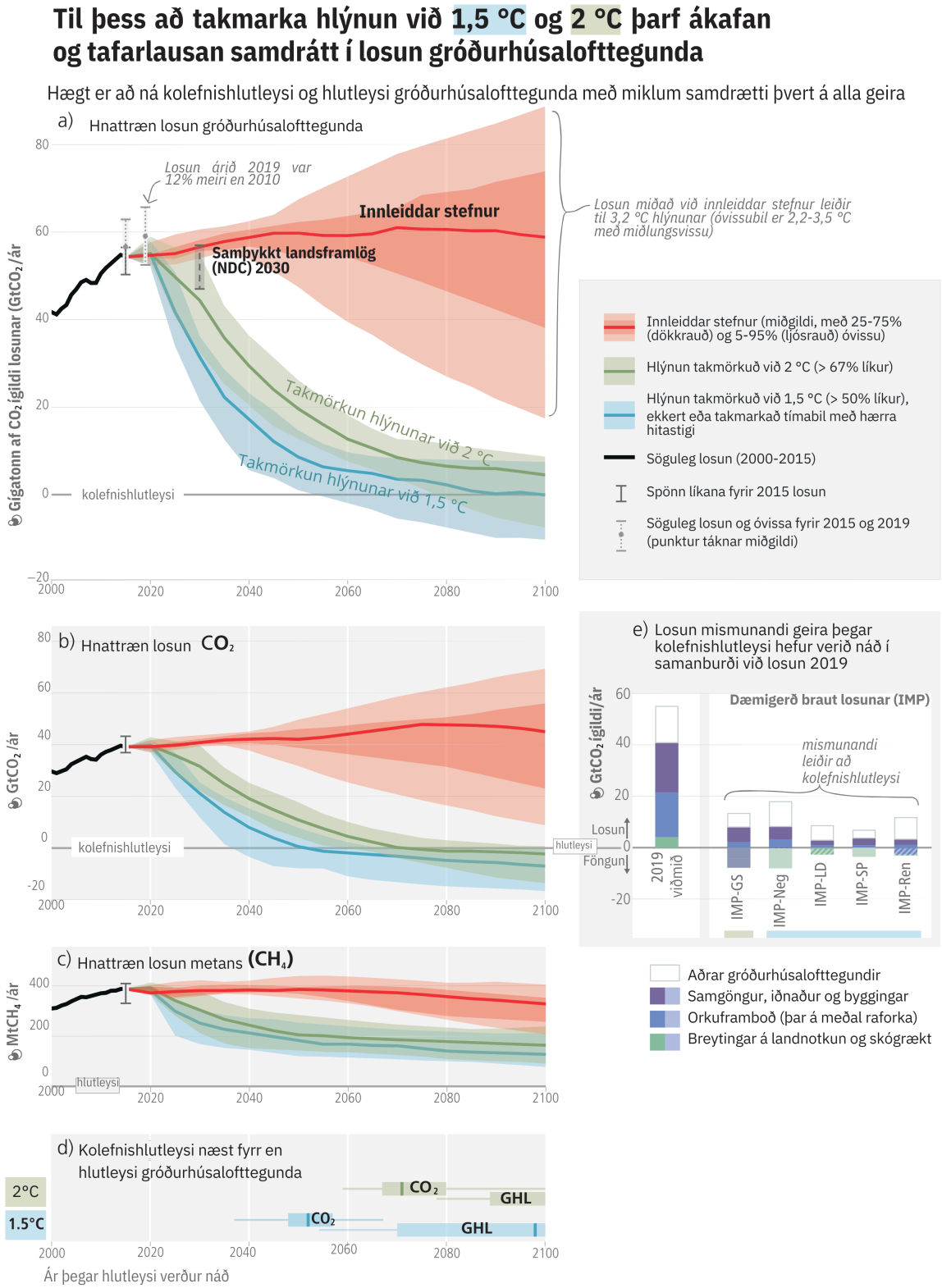
Allir útreikningar þar sem losun er slík að hlýnun takmarkast við 1.5 °C (>50%) og fer lítið sem ekkert umfram það og þar sem hlýnun er takmörkuð við 2 °C (67%) fela í sér hraðan eða, í flestum tilfellum, tafarlausan samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda í öllum geirum á þessum áratug. Nettó núll losun koldíoxíðs fyrir þessar brautir losunar er náð snemma á sjötta áratug þessarar aldar fyrir fyrri sviðsmyndina eða snemma á áttunda áratug þessarar aldar fyrir seinni sviðsmyndina *(mikil vissa)*.

Alvarleg áhrif loftslagsbreytinga á náttúruleg og manngerð kerfi aukast og svæðisbundinn munur magnast

Dæmi um áhrif án frekari aðlögunar



Mynd A.7: Loftslagsbreytingar hafa áhrif á náttúruleg og manngerð kerfi. Aðlögun getur dregið úr tjóninu en ekki komið alfarið í veg fyrir það. Myndn sýnir mat á áhættu og áhrifum loftslagsbreytinga á náttúruleg og mannleg kerfi við mismunandi stig hnattrænnar hlýnunar miðað við 1850-1900. Áhættu þættir eru a) Hætta á útdauða tegunda, b) hætta vegna heilsufarsáhrifa hita og raka og c) áhrif á fæðuframleiðslu (IPCC, 2023a, mynd SPM.3).



Mynd A.8: Sjá myndatexta á næstu síðu

Texti með mynd A.8 a) Hnattræn losun gróðurhúsalofttegunda frá aldamótum (svört lína) og sviðsmyndir um losun til loka aldarinnar. Rauðskyggt svæði sýnir innleiddar stefnur og rauð lína sýnir miðgildi þeirra. Grænskyggt svæði sýnir þá losun sem fellur að markmiði Parísarsamningsins um að hlýnun fari ekki yfir 2 °C og bláskyggt sýnir losunarsviðsmyndir þar sem hlýnun fer ekki yfir 1.5 °C. Til að þessi markmið náist þarf hnattræn losun að ná hámarki á milli áranna 2020 og 2025 og hraður og mikill samdráttur í losun gróðurhúsalofttegunda fylgi næstu tvo áratuga á eftir. Ef aðgerðir stjórnvalda verða ekki hertar umfram þær sem hafa verið innleiddar árið 2020 er útlit fyrir að losun gróðurhúsalofttegunda haldi áfram að aukast eftir 2025 sem mun leiða til þess að hlýnun verði 3.2 [2.2 – 3.5] °C árið 2100. b) og c) Hnattræn losun koldíoxíðs og metans ásamt sömu sviðsmyndum og litum eins og á mynd a). Á myndum a), b) og c) sýnir lárétt lína hlutleysi. d) Tímasetning kolefnishlutleysis og hlutleysi gróðurhúsalofttegunda fyrir 1.5 °C og 2 °C takmörkin. e) Losun mismunandi geira þegar kolefnishlutleysi hefur verið náð. (Byggt á mynd SPM.5 í IPCC, 2023a)

Framúrkeyrsla: Farið yfir mörk hlýnunar

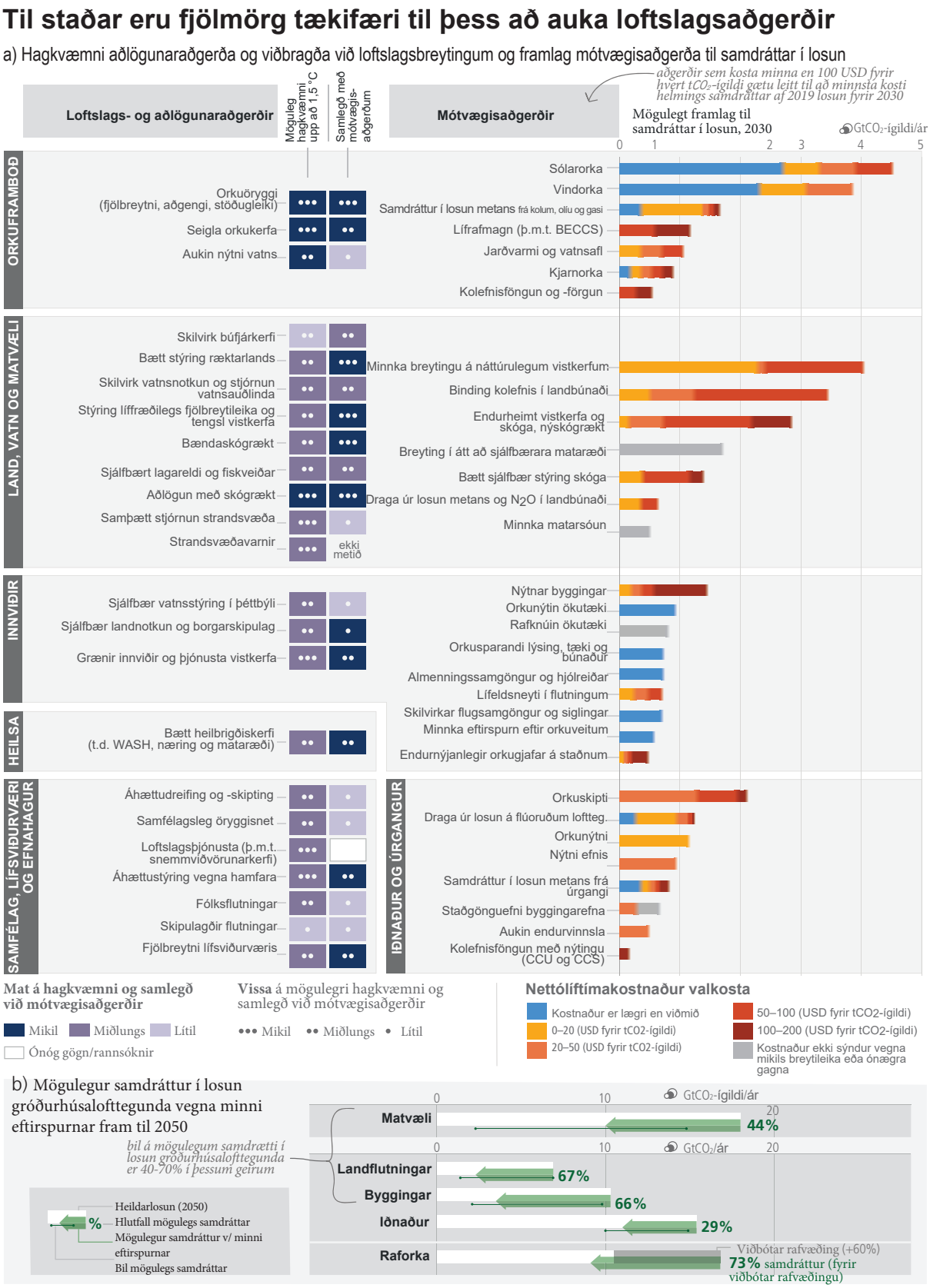
Ef hlýnun fer fram úr tilteknum gildum, svo sem 1.5 °C, er mögulegt að draga úr henni aftur með því að ná og viðhalda nettó neikvæðri losun koldíoxíðs. Það krefðist aukinnar föngunar og förgunar koldíoxíðs samanborið við þær sviðsmyndir þar sem hlýnun fer ekki yfir tiltekin gildi. Framúrkeyrsla felur í sér óhagstæð áhrif, sum óafturkræf, og aukna áhættu fyrir manngerð og náttúrleg kerfi, sem aukast með umfangi og tímalengd framúrkeyrslunnar *(mikil vissa)*.

A.4.3 Viðbrögð í náinni framtíð

Loftslagsbreytingar eru ógn við velsæld mannkyns og heilbrigði jarðar (*mjög mikil vissa*). Tækifæri til þess að tryggja byggilega og sjálfbæra framtíð fyrir alla er að glatast (*mjög mikil vissa*). Loftslagsþolin þróun samþættir aðlögun og mótvægisaðgerðir til þess að þoka áfram sjálfbærri þróun fyrir alla. Hún er gerð möguleg með auknu alþjóðlegu samstarfi sem felur í sér bætt aðgengi að fjármagni, sérstaklega fyrir berskjölduð svæði, geira og hópa, stjórnun sem tekur tillit til allra og samþættum stefnum *(mikil vissa)*. Þær aðgerðir sem innleiddar eru á þessum áratug munu hafa áhrif þegar í stað og til þúsunda ára *(mikil vissa)*.

Ávinningur af aðgerðum í nálægri framtíð

Miklar, hraðar og viðvarandi mótvægisaðgerðir og hraðari innleiðing aðlögunaraðgerða á þessum áratug myndu draga úr væntu tapi og tjóni fyrir mannkyn og vistkerfi (*mjög mikil vissa*) og hafa í för með sér samlegð, sérstaklega fyrir loftgæði og heilsu (*mikil vissa*). Ef mótvægis- og aðlögunaraðgerðir dragast á langinn munu innviðir sem fela í sér mikla losun festast í sessi, hætta á eignatjóni aukast og kostnaður fara stigvaxandi, fýsileiki aðgerða minnka og tap og tjón aukast (*mikil vissa*). Aðgerðir og viðbrögð í nálægri framtíð fela í sér miklar fyrirfram fjárfestingar og neikvæðar breytingar sem hægt er að takmarka með réttri stefnumótun *(mikil vissa)*. Mynd A.9 fer yfir nokkra kosti fyrir ólíka geira, bæði hvað varðar kostnað og ávinning mótvægisaðgerða auk samlegðar við aðlögunarðagerðir.



Mynd A.9: sjá myndatexta á næstu síðu

Texti með mynd A.9 Til staðar eru fjölmörg tækifæri til þess að auka loftslagsaðgerðir. Liður (a) sýnir hagkvæmni aðlögunaraðgerða og viðbragða við loftslagsbreytingum og framlag mótvægisaðgerða til samdráttar í losun í náinni framtíð. Vinstra megin eru loftslags- og aðlögunaraðgerðir metnar út frá hagkvæmni og samlegð við mótvægisaðgerðir á næstu áratugum, miðað við allt að 1.5 °C hlýnun. Hægra megin má sjá valdar mótvægisaðgerðir ásamt framlagi til samdráttar í losun (lengd súlunnar) og áætluðum kostnaði (litur súlunnar) miðað við núverandi viðmiðunarsviðsmyndir fyrir árið 2019. Liður (b) sýnir mögulegan samdrátt vegna minni eftirspurnar fram til 2050. Samdrátturinn er metinn út frá um það bil 500 rannsóknum víðsvegar að. Hvíta línan sýnir geirabundna meðallosun árið 2050, skv. sviðsmyndum sem eru í samræmi við loforð ríkisstjórna árið 2020 um losun til ársins 2050. Hlutfallstalan sýnir mögulegan samdrátt og græna örin sýnir þátt minni eftirspurnar. Bil mögulegs samdráttar er sýnt með línu á milli punktanna sem sýna mesta og minnsta samdrátt sem greint er frá í heimildum. Neðsta línan sýnir hvernig heildareftirspurn eftir raforku getur minnkað með samdrætti í öðrum geirum. Dökkgráa línan sýnir losun vegna aukinnar raforkueftirspurnar vegna aukinnar rafvæðingar í öðrum geirum. Hægt er að komast hjá þessari auknu losun með aðgerðum á sviði innviða og félagsmenningarlegra þátta sem hafa áhrif á raforkunotkun í iðnaði, landflutningum og byggingum (græna örin). (Byggt á mynd SPM.7 í IPCC, 2023a).

Aðlögunarkostir og takmörkun þeirra í hlýrri heimi

Með aukinni hlýnun verða aðlögunarkostir, sem eru framkvæmanlegir og árangursríkir í dag, takmarkaðir og síður vænlegir til árangurs. Tap og tjón mun aukast með aukinni hnattrænni hlýnun og manngerð og náttúruleg kerfi færast nær mörkum aðlögunar. Hægt er að forðast slæmar aðlögunaraðgerðir, þ.e. aðgerðir sem minnka loftslagsþol, með sveigjanlegum langtímaáætlunum sem taka mið af öllum og innleiðingu aðlögunaraðgerða þvert á geira með afleiddum ávinningi fyrir aðra geira og kerfi *(mikil vissa)*.

Mótvægis- og aðlögunaraðgerðir þvert á kerfi

Hraðar og víðtækar breytingar þvert á geira og kerfi eru nauðsynlegar til þess að ná miklum og viðvarandi samdrætti í losun og tryggja byggilega og sjálfbæra framtíð fyrir alla. Til þess að kerfisbreytingar eigi sér stað er mikilvægt að útvíkka mótvægis- og aðlögunarkosti. Þegar eru til staðar framkvæmanlegir, áhrifaríkir og ódýrir valmöguleikar fyrir mótvægis- og aðlögunaraðgerðir, mismunandi á milli kerfa og svæða *(mikil vissa)*.

Samlegðaráhrif og fórnarkostir

Það er mikilvægt fyrir sjálbæra þróun að réttlátum mótvægis- og aðlögunaraðgerðum vegna loftslagsbreytinga sé flýtt. Mótvægis- og aðlögunaðgerðir hafa meiri samlegðaráhrif en minni með sjálfbærnimarkmiðum Sameinuðu þjóðanna. Samlegðaráhrif og fórnarkostir eru háðir samhengi og umfangi innleiðingar *(mikil vissa)*.

A.4.4 Réttlæti, stjórnhættir og samstarf

Réttlæti og þátttaka

Með því að forgangsraða, með sanngirni, jöfnuð, þátttöku og réttlát umskipti að leiðarljósi, er unnt að stuðla að aðlögun, metnaðarfullum mótvægisaðgerðum og loftslagsþolinni þróun. Afrakstur aðlögunar er hægt að magna með auknum stuðningi við svæði og íbúa sem eru hvað berkjaldaðastir fyrir loftslagsvá. Með því að samþætta aðlögun vegna loftslagsbreytinga inn í verkefni sem snúa að félagslegri vernd byggist upp loftslagsþol. Margar leiðir, svo sem breytt hegðun og lífsstíll, eru til staðar til þess að draga úr neyslu með jákvæðum áhrifum á samfélagslega velsæld *(mikil vissa)*.

Stjórnarhættir og stefnur

Árangursríkum loftslagsaðgerðum verður náð með skuldbindingu stjórnvalda, samþættingu allra stiga stjórnsýslunnar, lögum, stefnum og áætlunum og bættu aðgengi að fjármagni og tækni. Skýr markmið, samræming á milli stefnumótenda og stjórnhættir, sem taka mið af öllum, greiða fyrir áhrifaríkum loftslagsaðgerðum. Regluverk og efnahagsleg stjórntæki geta stutt við mikinn samdrátt í losun og loftslagsþol ef þau eru útvíkkuð og notuð ríkulega. Með því að beita fjölbreyttri þekkingu er stutt við loftslagsþolna þróun *(mikil vissa)*.

Efnahagsmál, tækni og alþjóðlegt samstarf

Fjármagn, tækni og alþjóðlegt samstarf ráða úrslitum um hvort unnt sé að flýta loftslagsaðgerðum. Fjármagn til aðlögunar- og mótvægisaðgerða þarf að aukast margfalt ef ná á loftslagsmarkmiðum. Nægt fjármagn er til staðar til þess að koma til móts við fjármagnsþörf en enn eru hindranir í vegi fyrir því að fjármagni sé veitt í loftslagsaðgerðir. Áframhaldandi tækniþróun er lykillinn að því að unnt sé að flýta fyrir upptöku nýrrar tækni og starfshátta (*(mikil vissa)*.

Heimildir

Arias, P A, N Bellouin, E Coppola, R G Jones, G Krinner, J Marotzke, V Naik, M D Palmer, G.-K. Plattner, J Rogelj, M Rojas, J Sillmann, T Storelvmo, P W Thorne, B Trewin, K Achuta Rao, B Adhikary, R P Allan, K Armour, G Bala, R Barimalala, S Berger, J G Canadell, C Cassou, A Cherchi, W Collins, W D Collins, S L Connors, S Corti, F Cruz, F J Dentener, C Dereczynski, A Di Luca, A Diongue Niang, F J Doblas-Reyes, A Dosio, H Douville, F Engelbrecht, V Eyring, E Fischer, P Forster, B Fox-Kemper, J S Fuglestvedt, J C Fyfe, N P Gillett, L Goldfarb, I Gorodetskaya, J M Gutierrez, R Hamdi, E Hawkins, H T Hewitt, P Hope, A S Islam, C Jones, D S Kaufman, R E Kopp, Y Kosaka, J Kossin, S Krakovska, J.-Y. Lee, J Li, T Mauritsen, T K Maycock, M Meinshausen, S.-K. Min, P M S Monteiro, T Ngo-Duc, F Otto, I Pinto, A Pirani, K Raghavan, R Ranasinghe, A C Ruane, L Ruiz, J.-B. Sallée, B H Samset, S Sathyendranath, S I Seneviratne, A A Sörensson, S Szopa, I Takayabu, A.-M. Tréguier, B van den Hurk, R Vautard, K von Schuckmann, S Zaehle, X Zhang og K Zickfeld (2021). „Technical Summary“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, 33-144. DOI: 10.1017/9781009157896.002.

Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson og Trausti Jónsson (2018). *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018*. Veðurstofa Íslands. URL: https://www.vedur.is/media/loftslag/Skyrsla-loftslagsbreytingar-2018-Vefur-NY.pdf.

IPCC (2021). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou. Cambridge, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press, 3-32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.

— (2022). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3–33. DOI: 10.1017/9781009325844.001.

— (2023a). *Summary for Policymakers*. Gefið út af Hoesung Lee, Katherine Calvin, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter Thorne, Christopher Trisos, José Romero, Paulina Aldunce, Ko Barrett, Gabriel Blanco, William W. L. Cheung, Sarah L. Connors, Fatima Denton, Aïda Diongue-Niang, David Dodman, Matthias Garschagen, Oliver Geden, Bronwyn Hayward, Christopher Jones, Frank Jotzo, Thelma Krug, Rodel Lasco, June-Yi Lee, Valérie Masson-Delmotte, Malte Meinshausen, Katja Mintenbeck, Abdalah Mokssit, Friederike E. L. Otto, Minal Pathak, Anna Pirani, Elvira Poloczanska, Hans-Otto Pörtner, Aromar Revi, Debra C. Roberts, Joyashree Roy, Alex C. Ruane, Jim Skea, Priyadarshi R. Shukla, Raphael Slade, Aimée Slangen, Youba Sokona, Anna A. Sörensson, Melinda Tignor, Detlef van Vuuren, Yi-Ming Wei, Harald Winkler, Panmao Zhai og Zinta Zommers. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press.

— (2023b). „Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: The IPCC Sixth Assessment Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J.

Romero (eds.)]“ Í: IPCC, Geneva, Switzerland, bls. 1–34. DOI: doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.

IPCC Working Group I (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu og B. Zhou. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157896.

IPCC Working Group II (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem og B. Rama. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 3056. DOI: 10.1017/9781009325844.

IPCC Working Group III (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz og J. Malley. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.

Shukla, AR, Jim Skea, A Reisinger, R Slade, R Fradera, M Pathak, A Al Khourdajie, M Belkacemi, R van Diemen, A Hasija, G Lisboa, S Luz, J Malley, D McCollum, S Some og P Vyas (2022). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz og J. Malley. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157926.001.

VIÐAUKI

B

VIÐAUKI: SR – SÉRSKÝRSLUR IPCC 2018–2019

B SR1.5, SRCCL og SROCC

IPCC gaf út þrjár sérstakar skýrslur, sem eru ekki hluti af AR6, og vísar nafngift þeirra til þess að þær séu sérskýrslur (e. *Special Reports*, SR). Sú fyrsta, frá árinu 2018, er um leiðir til að takmarka hlýnun við 1,5 °C (IPCC, 2018) og er yfirleitt vísað til hennar sem *SR1.5*. Næsta skýrsla kom út árið 2019 en hún var um landnotkun og loftslagsbreytingar (IPCC, 2019a) og er vísað til hennar sem *SRCCL*. Þriðja skýrslan fjallaði um áhrif loftslagsbreytinga á freðhvolfið og hafið (IPCC, 2019b) og til hennar er vísað sem *SROCC*. Í eftirfarandi greinum eru þessar skammstafanir notaðar til að vísa til þessara skýrslna.

B.1 SR1.5 (2018): Leiðir að 1,5 °C markinu

Í Parísarsamningnum (Stjórnarráð Íslands, 2015)sem Ísland er aðili að segir í 2. grein að aðilar að samkomulaginu skuldbindi sig til að

> halda hækkun á hitastigi á heimsvísu vel undir 2 °C yfir gildum fyrir iðnvæðingu og fylgja eftir viðleitni til að takmarka hækkun hitastigs við 1.5 °C yfir gildum fyrir iðnvæðingu í viðurkenningu á því að þetta muni draga umtalsvert úr áhættu og áhrifum loftslagsbreytinga.

Til að kanna ástand þekkingar á leiðum til að takmarka hækkun hitastigs við 1,5 °C var IPCC falið að gefa út skýrslu um áhrif hlýnunar um 1,5 °C og leiðir til að takmarka hlýnun við þau mörk. Þegar skýrslan[1] (IPCC, 2018) kom út var hlýnun frá iðnbyltingu um 1 °C (með *líklegri* spönn á bilinu 0,8 °C til 1,2 °C) og samkvæmt skýrslunni var *líklegt* að hlýnun næði 1,5 °C að jafnaði á árabilinu 2030 til 2052 ef hlýnun héldi áfram á sama hraða.

Skýrslan nefndi einnig að ýmis loftslagstengd áhætta yrði meiri við 1,5 °C en við 1 °C, en þó minni en við 2 °C (*mikil vissa*). Þessir áhættuþættir fara eftir umfangi, hraða, landfræðilegri

[1] Enskt heiti skýrslunnar var *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, sem í umfjöllun er stytt í **SR15**

staðsetningu, stigi hagrænnar þróunar og tjónnæmis auk stöðu aðlögunar og mótvægisaðgerða (*mikil vissa*).

Munur á afleiðingum 1,5 °C og 2 °C hlýnunar var ræddur í skýrslunni og bent á að líkön sýni svæðisbundinn mun á loftslagsbreytingum frá 1 °C til 1,5 °C hlýnunar og einnig milli 1,5 °C og 2 °C. Meðal þess sem er ólíkt er meðalhiti flestra land- og hafsvæða *(mikil vissa)*, hitabylgjur í byggð *(mikil vissa)*, aftakaúrkoma sums staðar *(miðlungs vissa)* og líkindi þurrka og lítillar úrkomu á sumum svæðum *(miðlungs vissa)*.

Áætluð áhrif á vistkerfi og líffræðilegan fjölbreytileika, þ.m.t. útrýmingu tegunda, voru minni við 1,5 °C hlýnun en við 2 °C og áhrif á vistkerfi á landi, í ferskvatni og á strandsvæðum voru minni við 1,5 °C hlýnun sem þýddi að minni röskun varð á vistkerfaþjónustum sem samfélög manna nýta sér *(mikil vissa)*.

Loftslagstengdar áhættur á heilbrigði, lífsviðurværi, matvælaöryggi, vatnsframboð, öryggi og hagvöxt munu líklega aukast ef hlýnar um 1,5 °C og enn meira ef hlýnar um 2 °C. Þörf á aðlögun verður minni við 1,5 °C en 2 °C (*mikil vissa*). Ýmsir möguleikar til aðlögunar draga úr loftslagstengdri áhættu (*mikil vissa*) en sum kerfi, bæði náttúruleg og mannleg, hafa takmarkaða aðlögunargetu hlýni um 1,5 °C (*miðlungs vissa*).

Skýrslan lagið mat á hversu mikinn samdrátt þyrfti til þess að halda hlýnun innan 1,5 °C, eða a.m.k. með takmörkuðu yfirskoti, og niðurstaðan var sú að til þess þyrfti að draga losun saman um 45% milli áranna 2010 og 2030. Nokkar ólíkar leiðir voru skoðaðar og í helmingi tilfella þurfti 40 - 60 % samdrátt. Hnattræn losun þurfti síðan að stöðvast í kringum 2050 (í helmingi tilfella var árið á bilinu 2045 til 2055). Fyrir 2 °C hlýnun voru sambærilegar niðurstöður þær að draga þurfti úr losun um 25% 2030 og stöðva þurfti losun í kringum 2070.

Skýrslan benti á að allar leiðir til þess að takmarka hlýnun við 1,5 °C þyrftu víðtækar og tafarlausar breytingar á orkukerfum, samgöngum, byggingum, iðnkerfum og öðrum innviðum (*mikil vissa*). Umskipti af þessari stærðargráðu væru fordæmalaus hvað umfang varðar, en ekki endilega hvað hraða varðar. Til þess að ná þeim þyrfti mikinn samdrátt í losun í öllum geirum. Einnig þyrfti að vera til staðar stórt safn kosta til að draga úr losun og verulega þyrfti að auka fjárfestingu í þessum kostum (*miðlungs vissa*).

Í skýrslunni kom fram að ef halda eigi hlýnun innan tiltekinna marka, eins og kveðið er á um í Parísarsamningnum, setur það mörk á hversu mikil heildarlosun megi vera (*mikil vissa*). Miðað við losun til ársins 2017 var *miðlungs vissa* fyrir því að það mætti losa 580 $GtCO_2$ til viðbótar til að helmingslíkur væru á því að hlýnun héldist innan við 1,5 °C. Nokkuð mikil óvissa er í þessum niðurstöðum en árleg losun á þeim árum sem skýrslan var skrifuð var metin sem 42 ± 3 $GtCO_2$ (*mikil vissa*). Mat á því hversu mikið má losa af CO_2, sem oft er kallað *kolefniskvótinn*, fékk ítarlegri umfjöllun í heimi vísindanna á næstu árum.

B.2 SRCCL (2019): Landnotkun og loftslagsbreytingar af mannavöldum

Sérstök skýrsla[2] (IPCC, 2019a) um áhrif loftslagsbreytinga á landgæði og víxlverkan þess við landnotkun kom út árið 2019. Þar var fjallað um áskoranir sem loftslagsbreytingar valda fyrir vistkerfi, félagskerfi og landnýtingu. Fyrir framtíðarsviðsmyndir notaði þessi skýrsla bæði hinar nýju SSP þróunarbrautir og einnig eldri RCP sviðsmyndir. Í samantekt skýrslunnar (IPCC, 2019c) var farið yfir helstu álagsþætti og breytingar á þeim.

B.2.1 Álagsþættir og orðnar breytingar

Álagsþættir tengjast bæði loftslagsbreytingum og öðrum þáttum. Þannig hefur ósjálfbær landnýting þegar haft neikvæð efnahagsleg áhrif *(mikil vissa)* en loftslagsbreytingar munu líklega valda meiri neikvæðum áhrifum *(mikil vissa)*.

[2]Enskt heiti skýrslunnar er *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* en í umfjöllun er nafnið stytt í **SRCCL**.

Landgæði eru grunnur að lífsgæðum mannkyns, en þau hafa m.a. áhrif á efnahag, menningu, andlega - og líkamlega heilsu. Landið er bæði uppspretta og viðtaki gróðurhúsalofttegunda, vatns, orku og loftborinna efna og á þannig þátt í að stýra loftslagi og tempra eða magna breytingar þess. Vistkerfisþjónustur á landi, og sá fjölbreytileiki lífs á jörðu sem þær hvíla á, styðja í heild sinni við lífsviðurværi og velfarnað mannkyns *(mikil vissa)*.

Fólksfjölgun og neyslubreytingar hafa haft áhrif á ferskvatnsbúskap. Frá 1961 sýna gögn að nýting ferskvatns og gæða þeim tengdum hefur aukist hratt á liðnum áratugum og er nú víðtækari en áður hefur þekkst í sögu mannkyns *(mjög mikil vissa)*. Um 70% ferskvatnsnýtingar á hnattræna vísu er vegna landbúnaðar *(miðlungs vissa)*. Aukin útbreiðsla ræktarlands, aukin framleiðni landbúnaðar og skógarnýtingar hafa aukið fæðuframboð og neyslu fyrir vaxandi fólksfjölda *(mikil vissa)*. Í heildina séð hafa þessar breytingar aukið losun gróðurhúsalofttegunda *(mikil vissa)* og leitt til tegundadauða, rýrari vistkerfaþjónustu auk landeyðingar og eyðimerkurmyndunar *(mikil vissa)*.

Frá iðnbyltingu (1850–1900) fram á nýhafna öld (1999–2018) jókst hnattrænt meðaltal hita yfir landi nærri tvöfalt meira en hnattræni meðalhitinn. Áhrifa hlýnunar, m.a. aukning aftaka veðurs, gætir nú þegar á vistkerfi á landi, þiðnun sífrera, eyðimerkurmyndun, rýrnun landgæða og fæðuöryggi *(mikil vissa)*.

Hlýnun á landi er mun meiri en hnattræn hlýnun og vel ákvörðuð. Lengstu samfelldu gagnaraðir sýna að hlýnun á landi milli tímabilanna 1850–1900 og 1999–2018 var 1,53 °C [1,38–1,68 °C] *(mjög líklegt)*, en hnattræn hlýnun (land- og hafsvæði) fyrir sömu tímabil var 0,87 °C [0,75–0,99 °C]. Þetta hefur haft áhrif á veður á flestum landsvæðum.

Tíðni og ákefð sumra aftakaveðra hefur aukist vegna hnattrænnar hlýnunar *(mikil vissa)*. Á flestum landssvæðum hefur hlýnun af mannavöldum gert hitabylgjur verri eða tíðari. Umfang og tíðni þurrka hefur aukist á sumum svæðum, m.a. umhverfis Miðjarðarhafið, í vestur- og norðausturhluta Asíu, á mörgum svæðum í Suður-Ameríku og í mestallri Afríku *(miðlungs vissa)*. Tíðni og ákefð úrhellisúrkomu hefur aukist á hnattræna vísu *(miðlungs vissa)*.

Á síðustu þremur áratugum hefur aukin ljóstillífun leitt til grænkunar gróðurs víða um heim *(mikil vissa)*. Þetta má rekja til samþættra áhrifa lengri vaxtartíma, aukinnar upptöku CO_2 og niturs og landnýtingar *(mikil vissa)*. Á sumum svæðum sést minni grænkun og ljóstillífun sem rakin er til vatnsskorts *(miðlungs vissa)*, en þau svæði þar sem aukin grænkun hefur átt sér stað eru víðfeðmari en hin *(mikil vissa)*.

Tíðni og ákefð sandroks hefur aukist á síðustu áratugum vegna landbreytinga og áhrifa loftslagsbreytinga á þurrkasvæðum. Þetta hefur haft neikvæð áhrif á heilsufar, s.s. á Arabíuskaga og víða um Mið-Austurlönd og Mið-Asíu *(mikil vissa)*.

Á sumum þurrviðrasömum svæðum hefur hlýnun, aukin uppgufun, minni úrkoma, breytilegt veðurfar og athafnir manna leitt til eyðimerkurmyndunar. Meðal þessara svæða eru Afríka sunnan Sahara, hlutar Austur- og Mið-Asíu auk Ástralíu *(miðlungs vissa)*.

Hlýnunin hefur hliðrað loftslagsvæðum og gert sum búsvæðabelti útsettari fyrir breytileika í veðri og veðurfari, þ.m.t. aftakaatburðum, sem liggja utan þess sem þau ráða við *(mikil vissa)*. Í heildina hliðrast loftslagssvæði til pólsvæða á miðlægum breiddargráðum og ofar í hálendi. Þetta hefur einnig haft áhrif á árstíðabundnar breytingar í gróðurfari og atferli dýra *(mikil vissa)*.

Loftslagsbreytingar auka landeyðingu með meiri ákafa í úrkomu og flóðum, tíðari og umfangsmeiri þurrkum, meira álagi vegna hita, vinds og ölduróts, auk hærri sjávarstöðu. Afleiðingar mótast einnig af nýtingu lands *(mikil vissa)*. Strandrofs gætir á nýjum svæðum vegna breytinga á nýtingu strandsvæða og áhrifum loftslagsbreytinga, s.s. hækkandi sjávarstöðu *(miðlungs vissa)*.

Loftslagsbreytingar hafa nú þegar áhrif á fæðuöryggi vegna hærra hitastigs, úrkomubreytinga og aukinnar tíðni sumra aftakaatburða *(mikil vissa)*. Hlýnun hefur aukið framleiðni landbúnaðarvara á hærri breiddargráðum, m.a. á maís, hveiti, sykurrófum og bómull, en dregið úr framleiðslu á lægri breiddargráðum, m.a. á byggi, maís og hveiti. Meðal áhrifa á beitarlönd í Afríku er minni framleiðni og viðkoma beitardýra *(mikil vissa)*. Áreiðanleg gögn sýna að loftlagsbreytingar hafa þegar áhrif á pestir og plágur í landbúnaði sem getur bæði aukið og dregið úr tíðni sýkinga *(mikil*

vissa). Á þurrum svæðum, sérstaklega í Afríku og hálendum svæðum í Asíu og Suður-Ameríku, telja frumbyggjar og innfæddir að loftslagsbreytingar hafi nú þegar áhrif á fæðuöryggi.

Landbúnaður, skógarnýting og önnur landnýting er veruleg uppspretta gróðurhúsalofttegunda *(mikil vissa)*, í heildina um 23% af losun mannkyns á tímabilinu 2007 til 2016 *(miðlungs vissa).* Á tímabilinu 2007–2016 mátti rekja til þessara þátta um 13% af hnattrænni CO_2 losun, 44% af metanlosun (CH_4) og um 82% af losun N_2O.

Breytingar á ástandi lands, annaðhvort vegna breytinga á landnotkun eða sem svörun við loftslagsbreytingum, hafa áhrif á loftslag, bæði svæðisbundið og á hnattræna vísu. Breyting á ástandi lands getur aukið eða dregið úr svæðisbundinni hlýnun og haft áhrif á tíðni, ákefð og lengd aftakaatburða. Umfang og stefna breytinga er mismunandi milli árstíða og staða *(mikil vissa).*

B.2.2 Álagsþættir og breytingar á þeim

Varðandi framtíðarþróun kom fram í skýrslunni að loftslagsbreytingar munu auka álag á landræn kerfi og auka við fyrirliggjandi áhættuþætti tengda landeyðingu, eyðimerkurmyndun, tegundafjölbreytileika, heilbrigði vist- og samfélagskerfa, innviðum, lífsviðurværi og fæðuöryggi *(mikil vissa).* Í öllum sviðsmyndum aukast áhrif á landræn kerfi *(mikil vissa).* Á sumum svæðum mun fyrirliggjandi áhætta aukast en á öðrum svæðum koma nýir áhættuþættir til (*mikil vissa*). Keðjuverkunar áhættuþátta milli ólíkra efnahagsgeira og kerfa mun gæta á sumum svæðum *(mikil vissa).*

Með aukinni hlýnun á öldinni munu þurrkar og hitabylgjur verða tíðari, ákafari og vara lengur *(mikil vissa).* Umfang og tíðni þurrka mun aukast, sérstaklega umhverfis Miðjarðarhafið og í sunnanverðri Afríku *(miðlungs vissa).* Tíðni og ákefð aftakaregns mun aukast á mörgum svæðum *(mikil vissa).*

Áframhaldandi hliðrun loftslagssvæða er fyrirsjáanleg með frekari hlýnun *(mikil vissa).* Á norðlægum slóðum mun álag á skóga aukast, m.a. vegna þurrka, skógarelda og meindýra *(mikil vissa).* Í sviðsmyndum þar sem hlýnun er miðlungs eða mikil verða loftslagsskilyrði í hitabeltinu ólík nokkru því sem áður hefur þekkst á síðari hluta aldarinnar *(miðlungs vissa).*

Núverandi hraði hlýnunar jarðar eykur nokkuð hættu á vatnsskorti á þurrviðrasömum svæðum, jarðvegsrofi, gróðureyðingu, tjóni vegna gróðurelda, þiðnun sífrera, tjóni á strandsvæðum og minni uppskeru í hitabeltislöndum *(mikil vissa).* Ef hlýnar meira má gera ráð fyrir að flestir áhættuþættir verði verri (þ.m.t. keðjuverkandi áhættuþættir). Við 1,5 °C hlýnun á hnattræna vísu er veruleg hætta á vatnsskorti, tjóni vegna gróðurelda og þiðnun sífrera auk þess sem matvælaframboð verður óstöðugt *(miðlungs vissa).* Við 2 °C hlýnun verður áhætta vegna þiðnandi sífrera og óstöðugleika í framboði matvæla mjög mikil *(miðlungs vissa).* Að auki má gera ráð fyrir að við 3 °C hlýnun verði hætta á tjóni vegna gróðureyðingar, vatnsskorts og gróðurelda mjög mikil (*miðlungs vissa*). Áhætta vegna þurrka, vatnsskorts og hitabylgja samfara hnignun búsvæða eykst við hlýnun frá 1,5 °C til 3 °C *(lítil vissa).*

B.2.3 Áhrif á fæðuöryggi

Stöðugleiki matvælaframboðs mun minnka samfara aukningu í styrk og tíðni aftakaveðra sem geta truflað fæðukeðjuna *(mikil vissa).* Aukinn styrkur CO_2 getur einnig dregið úr næringarinnihaldi uppskeru og samkvæmt hagfræðilíkönum geta loftslagsbreytingar hækkað verð kornvöru um 7.6% (1 - 23%) fram til 2050. Þetta getur leitt til hærra matvælaverðs, minna fæðuöryggis og aukið hættu á hungursneyð *(miðlungs vissa)*, sérstaklega fyrir viðkvæma hópa *(mikil vissa).*

Á þurrkasvæðum er líklegt að loftslagsbreytingar og eyðimerkurmyndun dragi úr framleiðni kornræktar og búsmala *(mikil vissa)*, leiði til breytinga á tegundasamsetningu og dragi úr líffræðilegum fjölbreytileika *(mikil vissa).* Í sviðsmynd SSP2 verða um 178 milljónir íbúa þurrkasvæða fyrir álagi vegna vatnsskorts við hlýnun um 1,5 °C árið 2050 og þessi fjöldi eykst í 220 milljónir við 2 °C hlýnun og í 277 milljónir við 3 °C hlýnun *(lítil vissa).*

Hvað fjölda þeirra sem verða fyrir skakkaföllum varðar þá mun aukin eyðimerkurmyndun hafa mest áhrif í Asíu og Afríku en gróðureldar í Norður- og Suður-Ameríku, á Miðjarðarhafssvæðinu, suðurhluta Afríku og Mið-Asíu. Í hitabeltinu og nærliggjandi svæðum mun minni uppskera hafa áhrif á marga. Á fellibyljasvæðum mun landeyðing vegna hækkandi sjávarstöðu og verri fellibylja mun hafa neikvæð áhrif á lífsviðurværi og auka líkur á manntjóni *(mjög mikil vissa)*.

B.2.4 Áhætta ólíkra hópa

Í skýrslunni kom fram að kerfislæg áhætta bitnar yfirleitt verst á varnarlausum hópum og er sérstaklega nefnt að áhættan sé mest fyrir einstaka hópa kvenna, þá sem eru mjög ungir, aldraðir eða fátækir *(mikil vissa)*.

Loftslagsbreytingar geta aukið fólksflutninga vegna umhverfisálags, bæði innan þjóða og á milli þeirra *(miðlungs vissa)*. Það er háð margvíslegum orsakaþáttum, s.s. hreyfanleika og möguleika á aðlögun *(mikil vissa)*. Aftakaveður eða hægfara atburðir, s.s. þurrkar, geta aukið fólksflutninga, truflað fæðukeðjur, ógnað lífsviðurværi *(mikil vissa)* og aukið álagsþætti sem geta leitt til ófriðar *(miðlungs vissa)*.

Áhættan sem fylgir frekari loftslagsbreytingum ræðst ekki bara af umfangi hlýnunar heldur einnig neysluþróun og stýringu á nýtingu landgæða, auk annarra efnahags- og félagslegra þátta *(mikil vissa)*. Ólíkar leiðir samfélags- og efnahagsþróunar hafa í för með sér mismunandi áhættu, leiðir þar sem tekjur eru hærri, nýting gæða ekki jafn áköf og aukin tækniþróun er til staðar draga úr líkum á vatnsskorti á þurrkasvæðum, rýrnun landgæða og hnignandi fæðuöryggi *(mikil vissa)*.

B.2.5 Aðlögun og mótvægisaðgerðir

Í samantektinni (IPCC, 2019c) eru einnig nefndir ýmsir mögleikar til aðlögunar og mótvægisaðgerða. Margar aðlögunar- og mótvægisaðgerðir á landi hjálpa til við að sporna gegn landeyðingu og eyðimerkurmyndun, endurheimta landgæði og bæta fæðuöryggi. Mögulegar aðgerðir til að bregðast við og aðlagast loftslagsbreytingum á landi eru nokkuð háðar aðstæðum og aðlögunargetu svæða og samfélaga. Þó mögulegar aðgerðir á landi geti verið mjög mikilvægar til árangurs fyrir aðlögun og mótvægisaðgerðir draga ýmsar hindranir úr hnattrænum áhrifum þeirra *(mjög mikil vissa)*.

Margar aðgerðir til að hindra eyðimerkurmyndun geta auðveldað mótvægisaðgerðir og aðlögun að loftslagsbreytingum, auk þess að bæta möguleika til sjálfbærrar þróunar (*mikil vissa*). Með því að koma í veg fyrir, minnka og snúa við eyðimerkurmyndun eykst frjósemi jarðvegs og aukið kolefni binst í jarðvegi og gróðri. Það yrði auk þess til hagsbóta hvað varðar framleiðni í landbúnaði og fæðuöryggi (*mikil vissa*).

Sjálfbær landnýting getur komið í veg fyrir og minnkað landeyðingu, viðhaldið framleiðni á landi og stundum snúið við óhagstæðum áhrifum loftslagsbreytinga á landeyðingu (*mjög mikil vissa*). Með því að stunda sjálfbæra landnýtingu má leggja sitt af mörkum til að aðlagast og bregðast við loftlagsbreytingum (*mikil vissa*). Margvíslegur fjárhaglegur ávinningur til langs tíma fylgir því að minnka og snúa við landeyðingu, hvort sem um ræðir bújörð eða vatnasviðs. Það styður við hluta Heimsmarkmiðanna, auk þess að vera til hagsbóta fyrir aðlögun (*mjög mikil vissa*) og mótvægisaðgerðir (*mikil vissa*).

B.2.6 Stefnumótun til að auðvelda aðgerðir

Mótun stefnu stofnana og stjórnkerfa getur aukið tækifæri til aðlögunar og mótvægisaðgerða í landbúnaði og skyldum efnahagsgeirum, jafnframt því að leggja grunn að sjálfbærri þróun og auka þanþol gagnvart loftslagsbreytingum. Samfella í stefnumörkun hvað landkerfi og loftslag varðar getur bætt auðlindanýtingu, aukið þanþol þjóðfélaga, vistheimt og þátttöku hagsmunaaðila á hverjum stað og samstarf þeirra á milli (*mikil vissa*).

Með því að hvetja til skilvirkar matvælaframleiðslu, neyslu hollra matvæla, sem framleidd eru á sjálfbæran hátt, og að draga úr tjóni og sóun á matvælum má auka sjálfbæra landnýtingu og matvælaöryggi. Það leiðir auk þess til samfélagsþróunar sem losar minna af gróðurhúsalofttegundum *(mikil vissa)*. Valdeflandi stefnumörkun, eins og að bæta aðgengi að mörkuðum og tryggja ábúð á landi, getur aukið fylgi við sjálfbæra stýringu landgæða og dregið úr fátækt. Lýðheilsuviðmið sem miða að heilbrigðu og sjálfbæru mataræði geta lagt af mörkum til aðlögunar og mótvægisaðgerða (*mikil vissa*) auk þess að bæta almannaheilsu.

B.2.7 Aðgerðir í nánustu framtíð

Skýrslan ræddi einnig aðgerðir sem væri hægt að ráðast í fljótlega og myndu gera það kleift að aðlagast loftslagsbreytingum og milda áhrif þeirra til lengri tíma. Samtímis myndu þær auðvelda að takast á við landeyðingu, eyðimerkurmyndun og fæðuóöryggi. Meðal aðgerða er að afla þekkingar þar sem hana skortir og miðla henni, ásamt því auka þekkingu og færni í auðlindastýringu og stjórnsýslu og koma á viðvörunarkerfum til að vara við náttúruvá. Það hefur fjölþættan ávinning að hefja aðgerðir fljótlega til að sporna við landeyðingu og endurheimta landgæði. Það myndi minnka þann kostnað sem fer í mótvægisaðgerðir og aðlögun að loftslagsbreytingum (*mikil vissa*).

Félags- og efnahagslegur ávinningur getur hlotist að því að hefja strax aðgerðir til að aðlagast og milda áhrif loftslagsbreytinga og takast á við landeyðingu, eyðimerkurmyndun og fæðuóöruggi. Ávinningurinn felst í því að lífsviðurværi fólks verður tryggara og fátækt minnkar hjá jaðarsettum og fátækum þjóðfélagshópum. Það fé sem varið er í sjálfbæra landnýtingu ávaxtar sig þre- til sexfalt í formi vistkerfaþjónustu – öllum til hagsbóta. Landgræðsla bætir lífsviðurværi fólks, er til góðs fyrir efnahagslífið og hefur langtímaárhif sem milda áhrif loftslagsbreytinga og auðvelda aðlögun (*mikil vissa*).

Allur dráttur á því að aðlagast loftslagsbreytingum og grípa til mótvægisaðgerða á landi myndi hafa félagsleg áhrif og hækka kostnað, auk þess að draga úr möguleikum samfélaga til að fylgja braut minni losunar og aukins þols gegn loftslagsbreytingum. Með því að bregðast strax við loftslagsbreytingum má afstýra og minnka tjón af þeirra völdum og stuðla að hagsbótum fyrir samfélag manna sem mun borga sig fjárhagslega (*miðlungs vissa*). Með því að seinka aðgerðum eykst hætta á óafturkræfum áhrifum á fæðuröryggi og þau vistkerfi sem fólk reiðir sig á (*mikil vissa*).

B.3 SROCC (2019): Áhrif loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið

Sérstök skýrsla[3] um áhrif loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið (IPCC, 2019b) kom út árið 2019. Með freðhvolfinu er átt við allt vatn sem er á föstu formi, þ.m.t. jökla og ísbreiður, hafís og snjó, en áhrif loftslagsbreytinga á freðhvolfið eru auðsæ og víðfeðm. Í samantektarkafla skýrslunnar (IPCC, 2019d) voru þessi áhrif rædd í þaula auk áhrifa á hafið.

B.3.1 Hafið og freðhvolfið og mikilvægi þeirra

Til að styðja við umfjöllun um áhrif loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið byrjaði skýrslan með almennum inngangi um hafið og freðhvolfið, og mikilvægi þeirra fyrir vistkerfi og samfélög.

Hafið þekur 71% af yfirborði jarðar, nær heimskautasvæða á milli, og inniheldur um 97% af öllu vatni á jörðinni. Freðhvolfið er samheiti yfir frosið vatn á jörðinni, m.a. snjó, jökla, jökulbreiður, íshellur, hafís, borgarís, ís á vötnum og ám, sífrera og jarðvatn sem frýs hluta ársins. Um 10% af yfirborði jarðar er hulið ís eða jöklum sem binda samanlagt um 69% af ferskvatni á jörðinni.

[3]Enskt heiti skýrslunnar var *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* sem venjulega er stytt í **SROCC**

Hafið og freðhvolfið eru mikilvæg búsvæði lífs og tengjast öðrum hlutum loftslagskerfisins á ýmsa vegu, m.a. gegnum flæði orku, vatns og kolefnis. Allir íbúar jarðar eru ýmist beint eða óbeint háðir hafinu og freðhvolfinu. Hafið og freðhvolfið stuðla að miðlun ferskvatns og endurnýjanlegrar orku, dreifingu varma, upptöku kolefnis og dreifingu þess og matvælaframleiðslu. Hafið og freðhvolfið gegna einnig lykilhlutverki varðandi velferð, heilsu, varðveislu menningarverðmæta, efnahagsstarfsemi og í flutningum.

Hafið og freðhvolfið bregðast óhjákvæmilega við aukningu gróðurhúsalofttegunda og hlýnun á næstu áratugum og öldum. Sumar afleiðinganna verða óafturkræfar og geta gerst hratt. Til þess að stýra áhættu og koma í veg fyrir að hún aukist þarf að aðlaga þjóðfélög að breytingum og draga úr losun gróðurhúsalofttegunda. Meðal álags sem af breytingunum stafar er röskun á sífrera og freðhvolfi á heimskauta- og háfjallasvæðum, hækkandi sjávarstaða og breytingar á vatnafari.

Um 4 milljónir manna búa á heimsskautasvæðum og um tíundi hluti þeirra á ættir að rekja til þjóða sem þar hafa verið í þúsundir ára. Á lágsvæðum nærri ströndu búa um 680 milljón manns og mun líklega hafa fjölgað í milljarð eða meira um 2050. Álíka margir búa á háfjallasvæðum og kann þeim að fjölga í 740–840 milljónir um miðja öldina. Ástand og þróun hafsins og freðhvolfsins hefur áhrif á sjálfbæra þróun og skarast við þróunarmarkmið Sameinuðu þjóðanna og því skiptir framtíð þessara kerfa alla máli.

B.3.2 Framkomnar breytingar og árhif þeirra

B.3.3 Merkjanlegar breytingar á freðhvolfinu

Áhrif loftslagbreytinga á hafið og freðhvolfið eru þegar veruleg og skýrlan fer yfir þau helstu. Hvað freðhvolf varðar þá minnkar það vegna bráðnunar jökla og heimskautaíssins á Grænlandi og Suðurskautslandinu *(mjög mikil vissa),* minnkandi snjóalaga *(mikil vissa)* og hnignunar sífrera (*mjög líklegt*).

Allar ísbreiður og jöklar á jörðinni eru að minnka *(mjög mikil vissa).* Á tímabilinu 2006–2015 var rýrnun Grænlandsjökuls 278±11 Gígatonn á ári (Gt á ári) og ísbreiðu Suðurskautslandsins 155±19 Gt á ári. Þetta tap samsvarar hækkun í heimshöfunum um 0.77± 0.03 mm og 0.43±0.05 mm á ári. Massatap Suðurskautslandsins verður aðallega vegna þynningar og hörfunar kelfandi jökla sem ganga úr vesturhvelinu (*e. West Antarctic Ice Sheet*) (*mjög mikil vissa*). Á Grænlandi er rýrnunin aðallega vegna yfirborðsbráðnunar (*mikil vissa*). Jöklar á öðrum svæðum jarðar minnkuðu um 278±113 Gt á ári á tímabilinu 2006–2015, sem jafngildir hækkun í heimshöfunum um 0.77±0.31mm á ári.

Snjóþekja í júnímánuði á norðurskautssvæðinu minnkaði að meðaltali um 13.4±5.4% á áratug á tímabilinu 1967–2018 (*mikil vissa*). Minnkandi snjóþekja tengist hlýnun utan hitabeltisins, en snjóþekja minnkar um 800.000 km^2 á áratug fyrir hverja 1 °C hlýnun að hausti og vori *(mikil vissa*). Snjódýpi, útbreiðsla snjóþekjunnar og hversu lengi hún endist hefur á síðustu áratugum, sérstaklega á láglendi (*mikil vissa*).

Hiti í sífrera hefur farið hækkandi og hefur ekki mælst hærri frá því að mælingar hófust á níunda áratugi síðustu aldar *(mjög mikil vissa).* Til dæmis er hlýnun sífrera á heimskautasvæðum og í fjallendi um 0.29±0.12 °C á tímabilinu 2007–2016. Sífrerasvæði jarðar geyma 1440–1600 Gt af lífrænu kolefni *(miðlungs vissa)*, sem er nálega tvöfalt það magn sem finna má í lofthjúpnum. Gögn benda ekki ótvírætt til þess að hlýnun á sífrerasvæðum valdi nú aukinni losun gróðurhúsalofttegunda út í andrúmsloftið**.** Þiðnun sífrera og hop jökla hafa leitt dregið úr stöðugleika fjallshlíða *(mikil vissa).*

Útbreiðsla hafíss á norðurhveli hefur dregist saman alla mánuði ársins (*mikil vissa*). Á tíma samfelldra gervihnattagagna (1979–2018) var samdrátturinn í septembermánuði mjög líklega 12.8 ± 2.3% á áratug með þeirri afleiðingu að lágmarksútbreiðsla nú er minni en hefur verið í a.m.k. þúsund ár *(mikil vissa).* Það er *nánast öruggt* að norðurskautsísinn hefur þynnst og á sama tíma hefur hlutfall eldri íss minnkað. Frá árinu 1979 hefur það flatarmál þar sem þykkan

fjölæran (a.m.k. fimm ára) ís er að finna dregist saman um u.þ.b. 90%. Rekja má um helming af samdrættinum til hlýnunar af mannavöldum *(miðlungs vissa*). Á tímabilinu 1979–2018 var engin marktæk hneigð í breytingum á útbreiðslu hafíss umhverfis Suðurskautslandið en óvenjulítill ís hefur verið þar síðan 2016 *(mikil vissa).*

Merkjanlegar breytingar í hafi

Það er nánast öruggt að hafið hefur hlýnað samfleytt frá 1970 og tekið upp meira en 90% af umfram varma vegna hnattrænnar hlýnunar *(mikil vissa).* Frá 1993 er hlýnun sjávar um tvöfalt hraðari en fyrr. Einnig er hafið að tapa súrefni (*miðlungs vissa*) og upptaka CO_2 veldur súrnun yfirborðslaga (*nánast öruggt*). Hitabylgjur í hafi eru að verða algengari og alvarlegri *(mjög mikil vissa).*

Á undanförnum árum hefur sú sjávarhlýnun, sem rakin er í fimmtu matskýrslu IPCC, haldið áfram. *Nánast öruggt* er að órofa hlýnun hefur ríkt í hafinu frá 2005, en hlýnun fyrir þann tíma er vel skjalfest frá a.m.k. 1970. Þessi hlýnun er af mannavöldum, en hafið hefur tekið upp meira en 90% af umfram varma vegna hnattrænnar hlýnunar frá 1970 *(mikil vissa).* Það er *nánast öruggt* að frá 1970 til 2017 náði hlýnunin bæði til efri hluta (0–700 m) hafsins og til millilaga (700–2000 m). Suðurhöf tóku við stórum hluta (35–40%) þess varma sem hafið hefur tekið við *(mikil vissa)* og *mjög líklegt* er að hraði upptöku hafi verið meiri á tímabilinu 2005–2017 en fyrr. Hafdjúpin fyrir neðan 2000 m hafa *líklega* hlýnað frá 1992, sérstaklega í suðurhöfum.

Gögn frá gervihnöttum sýna að tíðni hitabylgna í hafi (þ.e. óvenju mikill sjávarhiti í nokkra daga samfleytt) hefur *mjög líklega* tvöfaldast á tímabilinu frá 1982 til 2016, bæði hafa slíkir atburðir orðið heitari auk þess sem þeir hafa varað lengur. Það er *mjög líklegt* að milli 84% og 90% hitabylgna sem áttu sér stað á tímabilinu 2006 til 2015 megi rekja til hlýnunar af mannavöldum *(mikil vissa).*

Frá 1970 hefur lagskipting yfirborðssjávar aukist *(mjög líklegt)* sem hefur áhrif á súrefnis- og næringarinnihald auk frumframleiðni. Hlýnun yfirborðssjávar og ferskari sjór við hærri breiddargráður létta yfirborðslögin í samanburði við dýpri lög *(mikil vissa),* sem hamlar blöndun milli yfirborðs og dýpri laga *(mikil vissa).* Samanburður langtímameðaltala frá 1971–1990 og 1998–2017 sýnir að lagskipting í efstu 200 m heimshafanna jókst þegar á heildina er litið um 2.30±0.12%.

Það er *mjög líklegt* að hafið hafi tekið upp 20–30% af því kolefni sem losað hefur verið síðan á 9. áratugi síðustu aldar og við það hefur hafið súrnað *(nánast öruggt). Mjög líklegt* er að á þessu tímabili hafi sýrustig yfirborðssjávar úthafanna hafi lækkað um 0.17–0.27 pH gildi á hverjum áratug. Vegna þessa er *mjög líklegt* að yfir megnið (95%) af yfirborði heimshafanna sé súrnunin nú þegar meiri en vænta má vegna náttúrulegs breytileika.

Heimshöfin tapa súrefni og *mjög líklegt* er að á tímabilinu frá 1970 til 2010 hafi tapið numið 0.5–3.3% í efstu 1000 m sjávar *(miðlungs vissa).* Þetta tap stafar aðallega af aukinni lagskiptingu, breytingum á flæði súrefnis um yfirborð auk jarð- og lífefnafræðilegra ferla sem auka við þann samdrátt sem stafar af minni leysni súrefnis í hlýjum sjó *(mikil vissa).* Súrefnissnauð svæði munu *líklega* stækka um 3–8%, sérstaklega á hitabeltissvæðum, en verulegar sveiflur eru milli áratuga sem valda erfiðleikum við að rekja minnkandi súrefnisinnihald hafsvæða í hitabeltinu til athafna manna *(mikil vissa).*

Athuganir frá tíma samfelldra mælinga, hermanir með loftslagslíkönum og niðurstöður fornveðurfræðilegra rannsókna benda til þess að dregið hafi úr hringrás yfirborðs- og djúpsjávar í Atlantshafinu (hinnar s.k. AMOC hringrásar) frá iðnbyltingu *(miðlungs vissa).* Fyrirliggjandi gögn eru ekki nægilega traust til þess að leggja tölulegt mat á *líklegan* samdrátt.

Merkjanlegar sjávarstöðubreytingar

Yfirborð heimshafanna fer hækkandi og hefur hraði hækkunarinnar aukist á liðnum áratugum. Þótt hækkunin sé breytileg milli heimshluta verður hún smám saman örari vegna aukinnar

rýrnunar Grænlandsjökuls og Suðurskautsjökulsins og af völdum varmaþenslu úthafanna *(mjög mikil vissa)*.

Hækkun hnattrænnar sjávarstöðu frá 1902–2015 er 0.16 m (*líklegt bil* 0.12–0.21 m) og frá 2006–2015 hækkaði það um 3.6 mm á ári (*mjög líklega* á bilinu 3.1–4.1 mm á ári). Þetta er um 2.5-falt hraðari hækkun en á tímabilinu 1901–2005, þegar hraðinn var 1.4 mm á ári (*mjög líklega* á bilinu 0.8–2.0 mm á ári).

Samanlögð árleg rýrnun hinna stóru jökulbreiða Grænlands og Suðurskautslandsins fer vaxandi (*nánast öruggt, mjög mikil vissa*). Massatap þeirra árin 2012–2016 var líklega meira en á árunum 2002–2011 og margfalt á við massatap áranna 1992–2001 (*nánast öruggt, mikil vissa*).). Samanlagt leysingarvatn frá jöklum og jökulbreiðum leggur nú til stærstan hlut hækkunar sjávarstöðu (1.8 mm á ári, *mjög líklegt* bil 1.7–1.9 mm á ári) og er umfram varmaþenslu hafsins (1.4 mm á ári, *mjög líklegt* bil 1.1–1.7 mm á ári) vegna hlýnunar (*mjög mikil vissa*). Breytingar af mannavöldum eru meginorsök hnattrænnar sjávarstöðuhækkunar síðan 1970 (*mjög mikil vissa).*

Í Amundsenflóa við vesturhvel Suðurskautslandsins og á Wilkeslandi á austurhlutanum hefur skriðhraði jökla aukist sem og kelfing í sjó fram (*mjög mikil vissa*). Mæligögn eru þó enn af skornum skammti á þessum svæðum og líkanreikningar ná ekki að herma ísskriðið nógu vel. Því er ekki ljóst hvort þarna megi greina upphaf óðahörfunar vegna óstöðugleika sem rekja má til þess að jöklar þessir (eða hlutar þeirra) mara í hálfu kafi í sjó.

Hækkun sjávarborðs er ekki jöfn um alla jörð. Varmaþensla, hafstraumar og rennsli leysingarvatns til sjávar leiða til breytileika sem numið getur ±30% miðað við hnattrænt meðaltal. Á allstórum svæðum í grennd við hörfandi jökla geta breytingar á þyngdarsviði jarðar haft mikil áhrif á sjávarstöðu og einnig lóðréttar jarðskorpuhreyfinga af völdum breytinga á jökulfargi. Að auki getur landsig af völdum umsvifa mannsins haft í för með sér breytingar á sjávarborði auk þess sem breytingar í ölduhæð hafa áhrif á strandsvæðum (*mikil vissa*).

Loftslagsbreytingar af mannavöldum hafa aukið úrkomu, vindstyrk og sjávarflóð tengd sumum lægðum bæði innan og utan hitabeltisins og átt þátt mörgum aftakaatburðum sem höfðu keðjuverkandi áhrif (*mikil vissa*). Á síðustu þremur áratugum hefur mesta ölduhæð aukist um 5% *(miðlungs vissa).*

Merkjanleg áhrif á vistkerfi

Frá miðbiki síðustu aldar hefur útbreiðsla plöntu og dýrahópa í hafi og árstíðabundin hegðan breyst vegna hlýnandi sjávar. Dæmi um þetta eru breytingar á útbreiðslu hafíss og lífefnafræðilegar breytingar, svo sem súrefnisinnihaldi sjávar *(mikil vissa).* Þetta hefur leitt til breytinga í samsetningu stofna og stærðar þeirra, framleiðni vistkerfa frá hitabeltinu að heimskautasvæðum. Áhrif þessa á samspil tegunda hafa svo skilað sér í keðjuverkandi áhrifum á uppbyggingu og virkni vistkerfa *(miðlungs vissa).* Í tilvikum sumra nytjastofna hefur orðið vart við bæði áhrif sóknar og loftslagsbreytinga *(miðlungs vissa).*

Bein og óbein áhrif hlýnunar hafanna og freðhvolfsbreytinga á frumframleiðni eru breytileg milli hafsvæða (*mikil vissa*). Þörungar eru fyrr á árinu í vorblóma og lengd og umfang þörungablóma hefur vaxið á seinustu áratugum *(mikil vissa).* Á Suðurskautslandinu hafa þessháttar breytingar verið raktar til hraðfara umhverfisbreytinga á tilteknum svæðum, m.a. hopunar jökla og breytinga á útbreiðslu hafíss.

Lífshættir, framleiðni og útbreiðsla sumra dýrasvifstegunda í Norður- Íshafinu hafa tekið breytingum og Suður-Íshafsljósáta hefur fært sig sunnar í Atlantshafi. Ennfremur hefur stærðarsamsetning þessara stofna breyst *(miðlungs vissa).* Áhrifa veðurfarsbreytinga á vistkerfi norðurslóða gætir í fiskafla *(mikil vissa).*

Hraði breytinga í útbreiðslu hjá plöntu og dýrahópum, frá því um 1950, er talinn vera um 52±33 km á áratug og 29±16 km á áratug fyrir lífverur í uppsjónum annars vegar og á botni hins vegar *(mjög líklegt).* Aukin útbreiðsla tegunda af völdum hlýnunar hefur breytt vistkerfum í Norður-Atlantshafi, Norðaustur-Kyrrahafi og í Norður-Íshafinu *(miðlungs vissa).*

Aukin súrnun sjávar og minnkað súrefnisinnihald hefur haft áhrif í tveimur af fjórum helstu blöndunarsvæðum við austanverð meginlönd jarðar *(mikil vissa).* Súrnun sjávar og minni súrefnisstyrkur í blöndunarsvæðinu í Kaliforníustraumnum hefur valdið breytingu á frumframleiðni og samsetningu vistkerfisins, sem síðan hefur haft áhrif á samsetningu fiskafla *(miðlungs vissa).*

Á mörgum svæðum hefur samdráttur í stofnstærð fiski- og skelfiskstofna vegna óbeinna áhrifa hnattrænnar hlýnunar þegar leitt til minni afla. Sumir stofnar hafa einnig stækkað vegna stækkunar hentugra búsvæða (*mikil vissa*). Sögulegar rannsóknir og líkangerð benda til þess að hlýnun sjávar á 20. öld hafi stuðlað að almennri minnkun á mögulegum heildarafla *(miðlungs vissa).* Samfara þessu hafa síðan 1970 orðið breytingar í tegundasamsetningu í vistkerfum víða á landgrunnssvæðum meginlanda *(miðlungs vissa)*

Vistkerfi á grunnslóð eru undir álagi vegna hlýnunar sjávar, tíðari sjávarhitabylgna, súrnunar sjávar, minnkandi súrefnisstyrks og hækkandi sjávarstöðu, sem og óhagstæðra áhrifa frá margvíslegri starfsemi mannsins á sjó og á landi (*mikil vissa*)

Hitabylgjur í sjó hafa haft neikvæð áhrif á sjávarlífverur og vistkerfið í heimshöfunum síðustu 20 ár, þar á meðal á undirstöðutegundir (*mjög mikil vissa*). Tíðni „kóralbleikingar“ vegna hlýnunar hefur aukist á stórum svæðum síðan 1977 og það hefur síðan valdið niðurbroti rifanna og þau þróast í átt til svæða þar sem þörungar ríkja *(mikil vissa).* Á sama hátt eru botnsætnar kalklífverur (t.d. hrúðurkarlar og kræklingur) í klettafjörum mjög næmar fyrir snöggum hitabreytingum og súrnun *(mikil vissa)* og minnkun í fjölbreytileika þeirra og magni hefur komið fram í vistkerfum þar sem að súrnun hefur átt sér stað við náttúrlegar aðstæður *(miðlungs vissa).*

Hækkandi sjávarstaða á strandsvæðum hefur áhrif á vistkerfi, m.a. vegna minnkunar búsvæða, fjölbreytileika og virkni, en einnig vegna tilfærslu búsvæðanna. Athafnir manna á strandsvæðum (t.d. endurheimt lands og uppfyllingar) geta magnað þessi áhrif. Manngerðar tálmanir geta hindrað setflutninga og tilfærslu flæðilanda og leiruviðarskóga inn á land *(mikil vissa).* Almennt hefur þó tilfærsla flæðilanda og leirviðarskóga haldið í við sjávarstöðuhækkun (um allt að 10 mm/ári) en ýmsir þættir, s.s. ölduálag, útslag sjávarfalla, setburður og takmörkun strandar, hafa ráðandi áhrif þar á. Við árósa skipta breytingar á vatnasvæðinu einnig máli, sérstaklega framboð á vatni og seti *(mikil vissa).*

Merkjanleg áhrif á fólk og samfélög

Breytingar á snjó og ís á norðurskautssvæðinu og á háfjallasvæðum hafa haft margvísleg áhrif á samfélög manna síðan um miðja 20. öld. Þar er einkum um að ræða afleiðingar fyrir ferskvatnsframboð, vatnsafl, innviði af ýmsum toga, samgöngur, matvælaframleiðslu, ferðamennsku og útivist og nokkra aðra þætti. Þessar afleiðingar koma fram með mismunandi hætti fyrir mismunandi samfélög og þjóðfélagshópa.

Breytingar á snjóalögum, ís á ám og vötnum og sífrera hafa haft neikvæð áhrif á matvælaöryggi, vatnsgæði og vatnsframboð víða á norðurskautssvæðinu *(mikil vissa)* og á háfjallasvæðum. Breytingarnar hafa torveldað aðgengi að veiðilendum og svæðum sem nýtt eru til beitar og til þess að afla matar *(mikil vissa).* Dregið hefur úr framleiðni í landbúnaði á sumum svæðum þar sem leysingavatn hefur minnkað, sérstaklega þar sem annað álag af völdum loftslagsbreytinga eða félagslegra þátta hefur aukist. Nefna má sem dæmi vestanverð Bandaríkin, háfjallasvæði í Asíu og svæði nærri miðbaug jarðar í Andesfjöllum *(miðlungs vissa).*

Samfélög á norðurskautssvæðinu hafa lagað ýmsa starfsemi að breyttri árstíðasveiflu og erfiðari skilyrðum á hefðbundnum ferðaleiðum *(mikil vissa).* Sveitarfélög og atvinnulíf eru að byrja að bregðast við skemmdum og bilunum á samgöngu- og samskiptabúnaði vegna þíðnandi sífrera *(miðlungs vissa).* Sum samfélög við sjávarsíðuna og samvinnuaðilar þeirra undirbúa flutning á búnaði og jafnvel hluta byggðar lengra frá ströndinni *(miðlungs vissa).*

Rekstri vatnsaflsvirkjana hefur í nokkrum tilvikum verið breytt og sumar þeirra endurbyggðar til þess að laga þær meira eða minna að rennsli jökuláa og annarra vatnsfalla, sem eiga upptök í

fjalllendi, og að breyttri árstíðasveiflu rennslisins. Slíkar breytingar hafa átt sér stað í Mið-Evrópu, á Íslandi, í vesturhluta Bandaríkjanna og Kanada og í suðurhluta Síle. *Takmarkaðar* vísbendingar eru þó fyrirliggjandi um áhrif þessarra breytinga á rekstur virkjana og raforkuframleiðslu en á Íslandi og í Noregi hefur raforkuframleiðsla aukist af þessum völdum.

Breytingar á snjó og jöklum hafa haft nokkra erfiðleika í för með sér fyrir vetrarferðamennsku, m.a. fyrir rekstur skíðasvæða, gönguferðir, fjallamennsku og ferðir á jökla *(miðlungs vissa).* Framleiðsla á snjó á skíðasvæðum hefur víða reynst skilvirk mótvægisaðgerð til þess að bregðast við hlýnandi veðurfari *(miðlungs vissa).*

Skipaferðir í Norður-Íshafinu að sumarlagi hafa aukist mjög á seinustu tveimur áratugum samfara minnkandi hafísþekju og stækkun svæða þar sem ísþekja er árstíðabundin *(mikil vissa).* Vaxandi skipaflutningar um Norður-Íshafssvæðið og ferðaþjónusta hafa afleiðingar fyrir heimsviðskipti og efnahag norðlægra þjóða sem tengjast hinum hefðbundnu skipaleiðum. Jafnframt eykst áhætta sú, sem vistkerfi sjávar og strandbyggðum er búin, af völdum skipaferðanna *(mikil vissa).*

Veðurfarstengdar breytingar í heimshöfunum hafa skaðað starfsemi vistkerfa *(mikil vissa)* og haft áhrif á fiskveiðar *(mikil vissa).* Aðrir þættir, tengdir manninum, sem orðið hafa fyrir áhrifum eru fæðuöflun *(mikil vissa)*, heilsa og vellíðan *(miðlungs vissa)*, menning frumbyggja *(miðlungs vissa),* ferðamennska *(miðlungs vissa)*, og viðskipti og flutningar *(mikil vissa).*

Breytingar á útbreiðslu og stofnstærð fiskistofna af völdum hlýnunar hafa þegar haft áhrif á veiðar úr mikilvægum stofnum og á efnahagslegan ávinning veiðanna *(mikil vissa).* Þetta hefur torveldað viðleitni haf- og fiskveiðistjórnunarstofnana til þess að tryggja gott ástand vistkerfa, mynda efnahagslegan ávinning og styrkja lífsafkomu, menningu og aðra þætti þjóðfélaganna *(mikil vissa).*

Eitraðir þörungar hafa dreifst víðar en áður og tíðni tilfella þar sem magn eitraðra þörunga er yfir hættumörkum hefur verið að aukast síðan um 1980. Aukningin er að hluta rakin til hlýnunar sjávar, súrnunar og súrefnislækkunar sem og til ofauðgunar næringarefna og til mengunar *(mikil vissa).* Eitraðir þörungar hafa neikvæð áhrif á fæðuframboð, ferðamennsku, efnahag og heilsu *(mikil vissa).* Samfélög, þar sem að vöktun er takmörkuð, eru talin hvað berskjölduðust fyrir þessari líffræðilegu hættu *(miðlungs vissa).*

Byggð og búseta á strandsvæðum stendur frammi fyrir margháttaðri loftslagstengdri áhættu sem tengist breytingum í hafi og á freðhvolfi. Meðal þessa má nefna aftakasjávarflóð, hitabylgjur í hafi, minni hafís og þiðnun sífrera *(mikil vissa).* Aftakasjávarflóð fara versnandi vegna hækkandi meðalsjávarstöðu og áhrif hækkandi sjávarborðs á sjávarfallaflóð eru merkjanleg á sumum svæðum. Gripið hefur verið til margvíslegra aðgerða vegna þessa, oftast í kjölfar aftakaflóða, en einnig hefur verið gengið út frá hækkandi sjávarstöðu þegar fram líða stundir í uppbyggingu umfangsmikilla innviða í sumum tilvikum (*mikil vissa*).

Þó gera megi ráð fyrir að hækkun sjávarborðs auki flóðahættu við strendur *(mikil vissa)* er óvíða hægt að rekja áhrif á samfélagsleg kerfi eingöngu til hækkunar sjávar *(miðlungs vissa)* því margvíslegir aðrir orsakaþættir skipta líka máli. Meðal þeirra má nefna byggðarþróun á strandsvæðum, landsig vegna athafna manna, mengun, hrörnun búsetusvæða, auk taps á staðbundinni þekkingu innfæddra, en allir þessir þættir hafa aukið áhættu vegna afleiðinga loftslagsbreytinga *(mikil vissa).*

Strandvarnir eru útbreiddar í borgum við sjóinn og á ósasvæðum og veita fyrirsjáanlega vörn *(mjög mikil vissa).* Nokkur aukning hefur verið á notkun lausna sem byggja á blöndu náttúrulegra og manngerðra þátta en lítið er vitað um kostnað við þær eða hversu haldgóðar þær eru *(mikil vissa).* Á þéttbýlum svæðum þar sem land skortir er löng hefð fyrir uppfyllingum eða öðum aðferðum til að heimta land úr sjó. Einnig eru dæmi um að hopað sé frá ströndinni, en yfirleitt er það bundið við lítil samfélög eða gert til að skapa votlendissvæði við ströndina *(mikil vissa).* Samfélagslegum úrræðum er æ meira beitt til að aðlagast sjávarstöðubreytingum, sérstaklega í þróunarlöndum, og til að aðlagast umhverfisbreytingum í hafinu á norðurskautssvæðinu *(mikil vissa).*

B.3.4 Líklegar breytingar á næstu ártugum

Líklegar breytingar á freðhvolfinu

Í skýrslunni var lagt mat á líklegar breytingar á næstu áratugum og voru notaðar reikniniðurstöður úr CMIP5 og RCP losunarsviðsmyndum. Með *mikilli vissu* má fullyrða að á komandi árum og áratugum muni jöklar hörfa víðast hvar, að snjóhula að vetri muni endast skemur og að sífreri þiðni enn frekar og hjaðni. Áhrifa þessara breytinga mun gæta í rennsli vatnsfalla. Einnig er *mikil vissa* fyrir þeim niðurstöðum líkana að rýrnun íss og snævar muni enn aukast á seinni hluta 21. aldar ef losun gróðurhúslofttegunda verður áfram veruleg. Verði stórlega dregið úr losuninni á komandi áratugum er líklegt að hægja taki á rýrnun sífrera og snjóhulu þegar fram í sækir, en hörfun margra jökla og ísbreiðanna á Grænlandi og Suðurskautslandinu mun halda áfram út öldina.

Sé gert ráð fyrir að losun verði í minna lagi á öldinni (sviðsmynd RCP2.6) er massatap jökla jarðar, að frátöldum ísbreiðum Grænlands og Suðurskautslandsins, áætlað 18±7% á tímabilinu 2015–2100, en 36±11% ef losun verður mikil (sviðsmynd RCP8.5). Tilsvarandi hækkun sjávarborðs verður 94±25 mm í fyrra tilvikinu en 200±44 mm í hinu síðara (*miðlungs vissa*). Litlir jöklar í Ölpunum, Kákasusfjöllum, í hitabeltinu, Norður-Asíu og Skandinavíu munu rýrna um meira en 80% að rúmmáli til aldarloka (*miðlungs vissa*).

Rýrnun jökla verður mest á heimskautasvæðunum, þar á meðal á jöðrum Grænlandsjökuls og Suðurskautsjökulsins, á kanadísku og rússnesku íshafseyjunum, í Alaska, á Íslandi og Svalbarða. Frá þessum síðarnefndu svæðum munu berast meira en 80% jöklaþáttar af sjávarborðshækkun til ársins 2100 (*mikil vissa*).

Snjóhula á norðurslóðum frá hausti til vors mun endast 5–10% skemur en nú á árabilinu 2031–2050. Sé miðað við sviðsmynd lítillar losunar (RCP2.6) mun snjótímabilið ekki styttast frekar eftir það, en ef losun verður mikil (sviðsmynd RCP8.5) mun hún enn styttast um 15–25%. Áætlað er að meðaldýpi snævar á láglendari svæðum fjallahéraða minnki um 10–40% á árabilinu 2031–2050, í samanburði við 1986–2005. *Mikil vissa* er um þessa niðurstöðu, óháð losunarsviðsmyndum. Á árabilinu 2081–2100 er *líklegt* að meðal-snjódýpi hafi minnkað um 50–90% (mikil losun, RCP8.5) en 10–40% ef losun verður lítil (RCP2.6).

Mikil vissa er fyrir því að sífreri muni þiðna og hjaðna mjög víða á þessari öld. Flatarmál svæða, þar sem sífreri er nærri yfirborði, mun minnka um 2–66% fram til 2100 sé miðað við losunarsviðsmynd RCP2.6 og um 30–99% fyrir sviðsmynd RCP8.5. Við þiðnunina munu tugir eða jafnvel hundruð milljarða tonna (gígatonna) kolefnis losna úr sífreranum og berast upp í andrúmsloftið sem koldíoxíð og metan. Sú viðbót mun auka hlýnunina enn frekar. Meiri lífmassi í gróðri og nýmyndun jarðvegs gæti þó unnið gegn kolefnistapinu úr sífreranum.

Á háfjallasvæðum munu fjallahlíðar verða óstöðugri vegna hörfunar jökla og þiðnunar sífrera. Einnig munu jaðarlón framan við jökla stækka og slíkum lónum mun fjölga. Búast má við að berghlaup og jökulhlaup úr slíkum lónum muni verða þar sem slíkra atburða hefur ekki áður orðið vart. Snjóflóðum mun sennilega fækka og þau munu ekki ná jafn langt frá fjallshlíð og áður, en krapaflóðum og blautum snjóflóðum mun fara fjölgandi, jafnvel að vetri til. Flóð í ám sem orsakast af asarigningu á snjó munu verða fyrr á vorin og síðar um haust en áður. Þau verða líka tíðari hærra til fjalla en fátíðari neðar í fjöllunum.

Mikil vissa er fyrir því að rúmmál og árstíðasveifla afrennslis frá vatnasviðum, þar sem framlaga snjóbráðar og jöklaleysingar gætir, muni breytast þegar snjóhula minnkar og jöklar rýrna. Vetrarrennsli mun aukast og vorleysingar verða fyrr á ferðinni. Árlegt meðalrennsli frá jöklum á flestum fjallasvæðum mun ná hámarki síðar á þessari öld og verður svo tekið að minnka á ný fyrir aldarlok.

Líklegt er að útbreiðsla hafís á norðurskautssvæðinu minnki, a.m.k. fram til miðbiks aldarinnar, en hversu mikill samdráttur íssins er á síðari hluta aldarinnar fer eftir því hversu mikið hlýnar. Nota má samband útbreiðslu hafíss að sumarlagi á norðurslóðum, hnattræns hita og uppsafnaðrar losunar CO_2 til þess að leggja mat á líkur á íslausu hafi á norðurslóðum í

september. Árlegar líkur þessa eru um 1% verði hlýnun jarðar haldið undir 1.5 °C en 10–30% verði hlýnun jarðar 2 °C (*mikil vissa*). Það er *lítil vissa* um niðurstöður framreikninga fyrir hafís umhverfis Suðurskautslandið.

Líklegar breytingar á heimshöfunum

Gera má ráð fyrir að hafið haldi áfram að hlýna á öldinni með áframhaldandi minnkun hafíss og súrefnisstyrk, aukinni súrnun, tíðari hitabylgjum í sjó og samdrætti í hringrás yfirborðs- og djúpsjávar í Atlantshafinu *(mikil vissa).* Aukin lagskipting sjávar mun breyta súefnisbúskap, framboði næringarefna og frumframleiðni. Þessar breytingar eru mun umfangsmeiri í sviðsmyndum þar sem mikið er losað af gróðurhúsalofttegundum á öldinni en í hinum þegar minna er losað.

Hlýnun hafsins mun halda áfram á öldinni *(nánast öruggt).* Í þeirri sviðsmynd sem minnst hlýnar (RCP2.6) er líklegt að við lok aldarinnar muni hafið taka upp 2–4 sinnum meiri varma en það hefur gert síðan 1970. Í hlýjustu sviðsmyndinni (RCP8.5) er munurinn 5–7 faldur *(mjög líklegt).* Í lok aldarinnar styrkist lagskipting í efstu 200 m sjávar milli 60°N og 60°S að meðaltali um 1–9% í sviðsmynd RCP2.6 og 12–30% frá því sem var á tímabilinu 1986–2005.

Á hnattræna vísu eykst tíðni hitabylgna í hafi *mjög líklega* fimmtugfalt í lok aldarinnar í sviðsmynd RCP8.5 og um tuttugufalt í sviðsmynd RCP2.6 miðað við síðari helming 19. aldar *(miðlungs vissa).* Mesta aukningin verður í hitabeltinu og í Norður-Íshafinu *(miðlungs vissa).*

Það er *nánast öruggt* að áframhaldandi upptaka sjávar á kolefni úr lofti mun sýra sjóinn enn frekar. Í sviðsmynd RCP8.5 er *nánast öruggt* að sýrustig lækki um 0.3 pH einingar fram til loka aldarinnar. Þetta mun líklega leiða til ætandi skilyrða allt árið fyrir lífverur sem mynda aragónít kalk, sérstaklega á úthafssvæðum Norður-Íshafsins, í Norður-Atlantshafi og sumum hlutum Kyrrahafsins (*mikil vissa*). Ef dregið er verulega úr losun, eins og gert er ráð fyrir í sviðsmynd RCP2.6, er *mikil vissa* fyrir því að ekki komi til þess að ætandi skilyrði skapist undir lok aldarinnar á þessum víðáttumiklu hafsvæðum en þó er hætta á þessari þróun á uppstreymissvæðum nærri austurströndum úthafanna.

Aukin lagskipting í efri lögum sjávar mun í hlýjustu sviðsmynd (RCP8.5) breyta súrefnisinnihaldi og frumframleiðni í hafi. Styrkur súrefnis í heimshöfunum dregst að meðaltali *mjög líklega* saman um 3–4% fram til síðustu áratuga aldarinnar og framboð næringarefna uppsjávar, sérstaklega í hitabeltinu, mun dragast saman um 9–14% *(miðlungs vissa).* Í þessari sviðsmynd veldur margháttað umhverfisálag því að frumframleiðni dregst saman í heimshöfunum en *lítil vissa* er um þá þróun. Í köldustu sviðsmyndinni má sjá álíka breytingar, en mun minni en í þeirri hlýjustu.

Á þessari öld munu aðstæður í heimshöfum breytast og þróast yfir í ástand ólíkt því sem ríkti fyrir daga iðnbyltingar (1850–1900). Þessar breytingar koma mishratt fram fyrir ólíka umhverfisþætti (*mikil vissa*). *Líklegt* er að súrefnistap verði merkjanlegt yfir 59–80% af yfirborði heimshafanna frá 2030–2050, og aukist í 79–91% í lok aldarinnar (2081–2100) í sviðsmynd RCP8.5. *Mjög líklegt* er að þessar breytingar verði í lok aldarinnar merkjanlegar yfir meira en 30% heimshafanna í sviðsmynd RCP2.6 og 60% í sviðsmynd RCP8.5.

Í heitustu sviðsmynd (RCP8.5) er *líklegt* er að kröftugir El Niño og La Niña atburðir verði algengari, en líkön sýna minni tíðnibreytingar í þeirri sviðsmynd sem minnst hlýnar (RCP2.6). Á þeim svæðum þar sem slíkir atburðir leiða nú þegar til óvenjumikillar úrkomu eða þurrka er *líklegt* að áhrifin versni.

Mjög líklegt er að á 21. öldinni muni draga úr styrk hringrásar yfirborðs- og djúpsjávar í Atlantshafi, þ.e. hinni svokölluðu AMOC hringrás *(mikil vissa).* Þó að mikil vissa sé um það að dragi úr hringrásinni er lítil vissa fyrir því hversu mikill samdrátturinn verður. Það er (*miðlungs vissa*) fyrir því að hún muni ekki hrynja (þ.e. dragast óafturkræft og hratt saman) fyrir aldamótin 2100. Komi til slíks hruns gæti það haft í för með sér breytingar í veðrakerfum og hringrás vatns, s.s. tilfærslu úrkomusvæða í hitabeltinu til suðurs, minni styrk monsúnkerfa í

Asíu og Afríku en öflugri monsúnkerfa á suðurhveli og aukinna þurrka í Evrópu. Nánar er fjallað um AMOC í grein 2.3.

Líklegar breytingar á sjávarstöðu

Sjávarstaða mun enn hækka *(mikil vissa)* og aftakaflóð, sem nú henda sjaldan, verða algengari um 2050 *(mikil vissa).* Komi ekki til umfangsmikillar aðlögunar umfram það sem nú er gert mun hækkun sjávar og fjölgun aftakaatburða verulega auka áhættu vegna flóða á lágsvæðum *(mikil vissa).* Reiknuð sjávarstöðuhækkun er nú meiri en IPCC mat árið 2013 (í AR5) í þeim sviðsmyndum þar sem mikið hlýnar. Ástæða þessa er sú að mat líklegrar rýrnunar íss á Suðurskautslandinu hefur hækkað *(miðlungs vissa).* Sjávarstöðubreytingar munu halda áfram á næstu öldum og gætu orðið nokkrir sentimetrar á ári og skilað margra metra hækkun sjávarstöðu til langframa *(miðlungs vissa).*

Líkleg hnattræn sjávarstöðuhækkun er 0.39 m (0.28–0.54 m) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100 í sviðsmynd RCP2.6 og 0.43 m (0.29–0.59 m) í aldarlok. Í heitustu sviðsmyndinni (RCP8.6) eru sambærilegar niðurstöður 0.71 m (0.51–0.92) fyrir tímabilið 2081–2100 og 0.84 m (0.61–1.10 m) í aldarlok. Þessar tölur eru hærri en fyrra mat IPCC (frá 2013), fyrir RCP8.5 er meðalhækkun 0.1 m hærri í lok aldarinnar, og efri mörk *líklegrar* hækkunar ná nú yfir einn metra, vegna óvissu um framlag frá Suðurskautslandinu *(miðlungs vissa)*, en óvissu í hækkun sjávarstöðu við lok 21. aldar má rekja til óvissu um bráðnun íshvelanna á Grænlandi og sérstaklega á Suðurskautslandinu.

Breytingar á sjávarstöðu munu á mörgum svæðum víkja verulega frá hnattrænni hækkun sjávarstöðu. Staðbundin ferli, óháð loftslagsbreytingum, s.s. landsig vegna náttúrulegra ferla og athafna manna geta haft áhrif á hversu mikil hækkun á hverjum stað verður *(mikil vissa).* Þó áhrif loftslagsbreytinga á sjávarstöðu aukist með tíma, þarf að taka tillit til slíkra þátta þegar lagt er mat á líklegra sjávarstöðubreytingar og viðbrögð við þeim *(mikil vissa).*

Mikil vissa er fyrir því að í sviðsmynd RCP8.5 eykst ölduhæð víða (í suðurhöfum, austanverðum hitabeltissvæðum í Kyrrahafi og Eystrasalti), en það dregur úr henni annarsstaðar (í Norður-Atlantshafi og Miðjarðarhafi). Styrkur hitabeltislægða og úrkomuákefð í þeim mun aukast á öldinni og aukningin er meiri í heitustu sviðsmynd (RCP8.5) en þeirri köldustu (RCP2.6). *Lítil vissa* er í mati á breytingum á fjölda hitabeltislægða á hnattræna vísu.

Hækkun sjávarborðs í öllum sviðmyndum þýðir að aftakaatburðir með hárri sjávarstöðu sem nú eru fágætir, s.s. sjávarflóð tengd hitabeltislægðum (t.d. hundrað ára atburðir), verða algengir árið 2100 *(mikil vissa).* Í öllum sviðsmyndum munu slíkir atburðir henda árlega árið 2050 í stórborgum á lágsvæðum og á láglendum eyjum. Komi ekki til markvissrar aðlögunar mun þetta auka tíðni alvarlegra flóða *(mikil vissa).*

Í sviðsmynd RCP8.5 er líklegt að hraði hnattrænnar sjávarstöðuhækkunar verði 15 mm á ári í lok aldarinnar og gæti farið yfir nokkra sentimetra á ári á næstu öld ef áköf losun gróðurhúsalofttegunda heldur áfram eftir næstu aldamót. Veruleg óvissa er um það hvenær íshellur umhverfis Suðurskautslandið brotna upp og hversu óstöðug jökulhvelin þar kunna að reynast. Í ljósi þessarar óvissu gæti framlag Suðurskautslandsins til sjávarstöðuhækkunar á næstu árhundruðum reynst meira en það talnabil sem talið er líklegast *(lítil vissa).* Ekki er vitað hversu mikil hlýnun má verða áður en jökulhvel verða óstöðug og hversu hratt sjávarstaða hækkar af þessum sökum.

B.3.5 Áhrif breytinga á vistkerfi

Breytingar á snjó, ís og jöklum munu hafa áhrif á vistkerfi á landi og í fersku vatni á heimskauta- og háfjallasvæðum. Búsvæði tegunda munu hnikast til norðurs og yfir á hærri svæði til fjalla, sem hefur áhrif á uppbyggingu vistkerfa og framleiðni lífríkisins. Gert er ráð fyrir að breytingarnar dragi úr líffræðilegum fjölbreytileika þegar fram í sækir og að tegundir deyi út á líffræðilega einstökum svæðum.

Á háfjallasvæðum mun áframhaldandi tilfærsla tegunda til hálendari svæða leiða til minnkandi búsvæða, aukinnar dánartíðni og fækkunar í mörgum tegundastofnum. Þetta á sérstaklega við um lífverur sem þrífast í grennd við snjó og jökla *(mikil vissa)*. Sumar tegundir munu hverfa, fyrst af ákveðnum svæðum og síðan deyja alveg út af þessum sökum *(miðlungs vissa)*. Ýmsar háfjallategundir munu aðeins lifa af ef gripið verður til viðeigandi verndunar- og mótvægisaðgerða *(mikil vissa)*.

Gera má ráð fyrir minni fjölbreytileika lífríkis á norðurskautssvæðinu vegna þess að sumar hánorrænar tegundir eiga þess ekki kost að flytja sig norðar eða hærra í landið og lúta því í lægra haldi í samkeppni við suðrænni tegundir *(miðlungs vissa)*. Talið er að kjarr og trjágróður muni breiða úr sér og þekja 24–52% túndru norðurskautssvæðisins um 2050 ef losun gróðurhúsalofttegunda verður mikil *(miðlungs vissa)*. Barrskógar munu breiða úr sér til norðurs en dragast saman á suðlægari slóðum þar sem í staðinn koma skóga- og kjarrsvæði með minni heildarlífmassa *(miðlungs vissa)*.

Þiðnun sífrera og minni vetrarsnjór munu hafa áhrif á vatnafar og skógarelda á norðurskautssvæðinu *(miðlungs vissa)*. Um 20% sífrerasvæða á norðurskautssvæðinu geta bráðnað hratt og þar orðið mikil röskun á landslagi og landsig. Gert er ráð fyrir að þessi þróun auki flatarmál lítilla stöðuvatna um meira en 50% í lok aldarinnar ef losun gróðurhúsalofttegunda verður mikil (RCP8.5) *(miðlungs vissa)*. Þrátt fyrir að hringrás vatns á heimskautasvæðinu verði öflugri, m.a. vegna aukinnar úrkomu, kann aukin uppgufun og aukið rennsli til Norðurskautshafsins að leiða til þurrari yfirborðsjarðlaga. Þetta hefur áhrif á framleiðni lífríkis og getur leitt til röskunar þess á sumum svæðum *(miðlungs vissa)*. Hætta á skógar- og gróðureldum er talin munu fara vaxandi út öldina á túndru- og barrskógasvæðum. Þróun í tíðni og umfangi gróðurelda mun ráðast af samspili breytinga í loftslagi og gróðurfari *(miðlungs vissa)*.

Ef hlýnar um 2 °C mun styrkur hitabeltislægða, hlutfall 4. og 5. stigs fellibylja og úrkomuákefð tengd hitabeltislægðum aukast merkjanlega frá hvaða tímabili sem miðað er við *(miðlungs vissa)*. Hækkandi sjávarstaða mun leiða til verri flóða samfara hitabeltislægðum *(mjög mikil vissa)*. Þetta mun einnig auka áhættu vegna strandflóða og úrhellisrigningar. Á síðari hluta aldarinnar eru þessar breytingar meiri í sviðsmynd RCP8.5 en RCP2.6 *(miðlungs vissa)*. Það er *lítil vissa* um breytingar í tíðni hitabeltislægða á hnattræna vísu.

Talið er að hraði framleiðni og lífmassi í vistkerfi sjávar muni minnka í öllum sjávarlögum, grunnum sem djúpum *(miðlungs vissa)*. Jafnframt verður tilfærsla í útbreiðslu tegunda í átt til pólsvæða sem leiða mun til breytinga á samfélagsgerð *(mjög mikil vissa):* Draga mun úr fiskafla með aukinni hlýnun hafsvæða á 21. öldinni *(miðlungs vissa)*. Þessara breytinga mun mest gæta nærri miðbaug *(mikil vissa)* en áhrifin verða margbreytilegri á pólsvæðunum. Fjölda tegunda, framleiðni og fæðutengslum innan vistkerfisins er ennfremur ógnað af súrnun *(miðlungs vissa)*, súrefnistapi *(miðlungs vissa)* og minnkun hafíss *(miðlungs vissa)*, sem síðan kunna að versna með athöfnum mannsins og svæðisbundum aðstæðum *(miðlungs vissa)*.

Hlýnun sjávar og breytingar á frumframleiðni munu líklega breyta lífmassa, framleiðni og samfélagsbyggingu vistkerfa sjávar *(mikil vissa)*, sérstaklega á svæðum nærri miðbaug *(mikil vissa)*. Heildarlífmassi spendýra og hámarksafli frá fiskveiðum er talinn minnka á bilinu 15,0±5,9% *(mjög líklegt bil)* og 16,2% til 25,5% fram til 2100 samkvæmt RCP8.5. Breytingar samkvæmt þessari sviðsmynd verða þrefalt til fjórfalt meiri en skv. köldustu sviðsmyndinni (RCP2.6).

Minnkað framboð næringarefna vegna aukinnar lagskiptingar mun um 2100 mjög líklega valda lækkun á frumframleiðni sem nemur 7-16% á svæðum við miðbaug samkvæmt RCP8.5 *(miðlungs vissa)*. Á hinn bóginn mun hlýnun, lagskipting og minnkun hafíss leiða til aukinnar frumframleiðni á heimskautasvæðum í norðri *(miðlungs vissa)* og suðri *(lítil vissa)*.

Breytingar á hripi lífræns kolefnis frá yfirborðslögum til dýpri laga sjávar munu að stórum hluta tengjast breytingum á frumframleiðni *(mikil vissa)* og þannig leiða til minni lífmassa á botni í djúpsjónum (3000-6000 m dýpi). Þessi minnkun verður meiri samkvæmt RCP8.5 heldur en við RCP4.5 og RCP2.6 *(miðlungs vissa)*.

Áætluð hlýnun, súrnun sjávar, minni útbreiðsla árstíðabundins íss og áframhaldandi minnkun

á fjölærum ís mun hafa áhrif á vistkerfi sjávar á pólsvæðum. Þar er átt við bein og óbein áhrif á búsvæði og dýrastofna *(miðlungs vissa)*. Talið er að útbreiðslusvæði vistfræðilega mikilvægra dýrategunda á norðurskautssvæðinu, eins og spendýra, fugla, og fiska, muni minnka. Jafnframt munu sumar tegundir á tempraðri svæðum færa sig norður á bóginn og þar með auka álag á hánorrænar tegundir *(miðlungs vissa)*. Áframhaldandi minnkun á fjölærum ís mun stuðla að myndun þörungablóma undir ísnum *(miðlungs vissa)* en meiri lagskipting í framtíðinni kann að draga úr blöndun næringarefna til yfirborðslaga og það getur aftur leitt til minni frumframleiðni *(miðlungs vissa)*. Þessar breytingar á frumframleiðni munu hafa áhrif allt vistkerfið í námunda við hafísinn *(miðlungs vissa)*.

Hlýnun og súrnun sjávar, lækkun súrefnisinnihalds og minnkun á flæði lífræns kolefnis frá yfirborðslögum niður í djúphafið mun draga úr kalkmyndun og auka rof og uppleysingu kaldsjávarkóralla sem styðja fjölbreytt lífríki *(miðlungs vissa)*. Kaldsjávarkórallar sem mynda búsvæði verða sérstaklega berskjaldaðir þegar hitastig og súrefnisaðstæður verða utan þolmarka einstakra tegunda *(miðlungs vissa)*. Samkvæmt RCP8.5 er ætlað að þegar kemur fram undir 2100 muni framboð fæðuagna til 95% kaldsjávarkóralla hafa minnkað miðað við það sem nú er og mun það leiða til minnkunar á lífþyngd *(miðlungs vissa)*.

Ef sviðsmyndir, þar sem mikið er losað, ganga eftir verður í aldarlok aukin hætta á verulegum áhrifum á líffræðilegan fjölbreytileika, byggingu og starfsemi strandsjávar vistkerfa. Áhrifin á vistkerfin verða tap á víðáttumiklum búsvæðum og tegundaauðgi og niðurbrot á vistfræðilegri starfsemi á þeim svæðum sem eftir standa. Þar sem vistkerfin eru viðkvæm verður áhættan mikil ef hnattræn hlýnun verður 1.5 °C umfram það sem var fyrir iðnvæðingu, ásamt með öðrum tengdum veðurfarshættum *(mikil vissa)*. Hlýsjávar kórallar eru í mikilli hættu jafnvel þó að hnattræn hlýnun verði minni en 1.5 °C *(mjög mikil vissa)*. Með því að draga úr röskun af mannavöldum er unnt að efla möguleika vistkerfa til þess að svara og aðlagast breyttum aðstæðum.

Á grundvelli áætlaðrar hækkunar sjávarborðs og eyðingar búsvæða er talið að á heimsvísu muni 20-90% af votlendissvæðum nærri ströndu hafa tapast um 2100 *(mikil vissa)*. Sum strand- og votlendissvæði eru að stækka af náttúrulegum orsökum þar sem setframburður er mikill og vistkerfið getur teygt sig í átt til lands *(miðlungs vissa)*. Í sviðsmyndum þar sem lítið er losað geta fenjaskógar, marhálmsengi og sjávarfitjar haldið í við sjávarborðshækkun út öldina, en einungis 2055 – 2070 ef losun þróast samkvæmt RCP8,*5 (miðlungs vissa*). Þróist losun í samræmi við RCP8.5 skapast mikil hætta á staðbundinni eyðingu strandgróðurs *(miðlungs vissa)*, sérstaklega þar sem tilfærsla í átt til lands er takmörkuð af manngerðum breytingum á strandlengju og þéttbýlisþróun *(mikil vissa)*.

Áætluð hlýnun, sjávarborðshækkun og breytingar á sjávarföllum á 21. öldinni munu áfram stuðla að hækkun seltu og undirmettun súrefnis í árósum *(mikil vissa)* sem aftur stofnar í hættu lífríki á botni og í vatnssúlunni (göngur, staðbundin útrýming, verri afkoma) *(miðlungs vissa)*.

Næstum öll kóralrif í hlýjum sjó munu rýrna, jafnvel þó að hnattræn hlýnun verði undir 2 °C *(mikil vissa)*. Tegundasamsetning og fjölbreytileiki á rifum sem eftir standa munu verða frábrugðin því sem nú er (mjög mikil vissa). Eyðing kóralrifa mun skerða verulega framlegð þeirra til mannlegs samfélags, svo sem fæðuframboðs *(mikil vissa),* verndunar strandsvæða *(mikil vissa)* og ferðamennsku *(miðlungs vissa)*.

B.3.6 Líklegir áhættuþættir fyrir samfélög

Breytingar sem spáð er að verði á snjó og ís munu hafa áhrif á vatnsauðlindir og hagnýtingu þeirra, m.a. á vatnsafl, áveitur í landbúnaði og vatnsgæði. Breytingarnar koma fram á heimskauta- og fjallasvæðum og neðar á vatnasviðum þar sem áhrifa snjóa og jökla til fjalla gætir *(miðlungs vissa)*. Matvælaöryggi og skilyrði til búsetu á norðurskautssvæðinu munu breytast. Breytinga er að vænta á náttúruvá, m.a. á flóðum í ám, snjóflóðum, skriðuföllum og vandamálum vegna óstöðugra jarðlaga, sem vænta má að hafi áhrif á innviði, ferðamennsku og aðstæður til útivistar *(mikil vissa)*.

Ýmsar þjóðfélagsbreytingar gera það að verkum að mörg samfélög eru berskjaldaðri fyrir náttúruvá en áður var. Rannsóknir á náttúruvá og breytingum fyrir mismunandi svæðum sýna að áhætta mun halda áfram að vaxa af þessum sökum á norðurslóðum og á háfjallasvæðum eftir því sem afleiðingar af breytingum á snjó og jöklum koma fram *(miðlungs vissa).* Rýrnun jökla dregur úr stöðugleika nærliggjandi fjallshlíða þegar aðhald jöklanna minnkar og getur leitt til skriðufalla á jöklana og í sumum tilvikum niður í jökullón. Gera má ráð fyrir að núverandi viðbúnaður og varnaraðgerðir verði víða ófullnægjandi þegar fram í sækir *(miðlungs vissa).*

Þiðnun sífrera og íss í jörðu valda landsigi og myndar keldur og ker á stórum svæðum þar sem áður var frost í jörðu *(miðlungs vissa).* Þessi þróun hefur áhrif á margs konar innviði, m.a. vegakerfi, dreifikerfi rafmagns, samskiptabúnað og hagnýtingu auðlinda á norðurskautssvæðinu og á háfjallasvæðum *(miðlungs vissa).*

Gert er ráð fyrir að minnkandi afrennsli frá snjó og jöklum dragi úr framleiðni í landbúnaði sem háður er áveitum á sumum svæðum *(miðlungs vissa).* Erfiðara aðgengi að veiði- og beitarlendum, minna fæðuframboð á sumum svæðum og nýjar tegundir sníkjudýra og sjúkdóma munu valda erfiðleikum við öflun fæðu og vatns fyrir sum samfélög á norðurskautssvæðinu *(mikil vissa).*

Rekstur vatnsaflsvirkjana mun verða fyrir vaxandi áhrifum af breytingum á heildarmagni og árstíðasveiflu afrennslis frá snjó og jöklum *(mikil vissa).* Í sumum tilvikum getur bráðnun jökla og þiðnun sífrera valdið mengun þungmálma og annarra efna frá stöðum þar sem slíkum efnum hefur verið fargað. Slík mengun getur rýrt vatnsgæði fyrir lífríki, heimilisnot og áveitur *(miðlungs vissa).*

B.3.7 Áskoranir fyrir aðlögunargetu vistkerfa og samfélaga

Breytingar í hafi og freðhvolfi af völdum loftslagsbreytinga reyna á aðlögunargetu samfélaga og vistkerfa. Sú áhætta sem fylgir breytingunum mun reyna á stjórnunarhætti á öllum stjórnsýslustigum og á alþjóðavísu *(mikil vissa).*

Áhrif loftslagsbreytinga á haf og freðhvolf og samfélagslegar afleiðingar eru víðfeðmar og ná yfir mislangan tíma, allt frá árum til alda. Þetta fellur illa að núverandi stjórnkerfum og getur hindrað rétt viðbrögð og leiðir til þess að samfélög standa frammi fyrir auknum áskorunum. Sem dæmi má nefna áhættu tengda ofanflóðum, og flóðahættu á háfjallasvæðum, stjórnun á nýtingu endurnýjanlegra auðlinda, kosti til að vernda fjölbreytileika lífs á heimskautasvæðum og ógnir sem steðja að lykilvisterfum í hafi *(miðlungs vissa).*

Núverandi stjórnkerfi eru gjarnan of dreifð um ólík stjórnsýslusvið til þess að geta á samþættan hátt tekist á við aukna áhættu og keðjuverkun áhættuþátta vegna breytinga í hafi og freðhvolfi *(mikil vissa).* Stjórnkerfiseiningar sem bera ábyrgð á málefnum haf- og heimskautasvæða hafa styrkst en eru þó hvorki nægilega viðbragðsfljót né áreiðanleg til að ráða við þá áhættu sem af þessum breytingum stafar *(mikil vissa).*

B.3.8 Kostir til að draga úr áhrifum

Ýmsir möguleikar eru tiltækir til þess að varðveita þau vistkerfi sem tengjast hafi og freðhvolfi og tryggja að virkni þeirra raskist ekki. Þar á meðal eru verndun, endurheimt, vistfræðileg stýring endurnýjanlegra náttúruauðlinda auk þess að draga úr mengun og álagi *(mikil vissa).*

Net verndarsvæða á landi og í hafi gera varið vistkerfi og tryggt þjónustu þeirra, einnig stutt við tilfærslur tegunda í átt að kaldari svæðum, í takt við þróun sem þegar er hafin vegna hlýnunar (*mikil vissa*). Ýmsir þættir tengdir landi og landnotkun á hálendissvæðum, strandsvæðum og á Norðurheimskautssvæðinu draga þó úr slíkum tilfærslumöguleikum (*mikil vissa*).

Traust fiskveiðistjórnun dregur úr neikvæðum áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg og styrkir sjálfbærni í hagkerfum sem byggja á nýtingu auðlinda hafsins (*miðlungs vissa*). Sveigjanleg stýring veiðiálags getur dregið úr áhættu fyrir fiskveiðar á heimskautasvæðum (*miðlungs vissa*) en dugir skammt til að glíma við breytingar á vistkerfum. Sjálfbær fiskveiðistjórnun getur

stuðlað að uppbyggingu ofveiddra fiskistofna, bætt stofnstærð, aflabrögð og efnahag, sérstaklega í sviðmyndum þar sem lítið er losað (*miðlungs vissa*).

Til þess að bregðast við hækkandi sjávarstöðu og aftakaflóðum af hennar völdum þurfa strandsamfélög að glíma við erfiðar en óhjákvæmilegar áskoranir. Taka þarf tillit til ólíkra þarfa, vega saman kostnað og ábata ólíkra valkosta sem hægt er að laga að breyttum aðstæðum ef þörf krefur þegar fram í sækir *(mikil vissa)*. Greining á afleiðingum ákvarðana, aðferðir til þess að draga úr hagsmunaárekstrum og gott skipulag byggðar nýtast til þess að takast á við þessar áskoranir *(mikil vissa)*.

Verði losun í samræmi við þá sviðsmynd þar sem minnst er losað (RCP2.6) er ekki líklegt að álag fari yfir tæknileg mörk eiginlegra eða hefðbundinna strandvarna, en það gæti gerst eftir 2100 fylgi losun sviðsmynd RCP8.5 *(mikil vissa)*. Ef landrými er takmarkað og verðmæti mannvirkja mikið geta hefðbundnar strandvarnir verið hagkvæmur kostur *(mikil vissa)* en fyrir yfirvöld með takmarkað fjármagn geta slíkar varnir verið óframkvæmanlegar. Þar sem landrými er nægilegt geta vistkerfislausnir dregið úr áhættu við ströndina og jafnframt skilað margskonar hliðarábata *(miðlungs vissa)*.

Bætt flóðaþol byggðar og viðvörunarkerfi er oft bæði ódýr og hagkvæm lausn, sértaklega á dreifbýlum svæðum *(mikil vissa)*. Búast má við því að slíkar lausnir nái gagnsemismörkum sínum fyrr en dæmigerðar strandvarnir. Á fámennum, strjálbýlum strandsvæðum þar sem áhætta er nú þegar mikil getur verið árangursríkt að hopa frá ströndinni, þó það sé erfitt af menningar-, félags- og stjórnmálalegum ástæðum *(mikil vissa)*. Flutningi byggðar eru ýmsar skorður settar sem ekki eru enn vel þekktar.

Viðbrögð samfélaga við hækkandi sjávarmáli er djúpstæð áskorun fyrir stjórnkerfi og samfélagið allt. Óvissa er um umfang hækkunar og mismunandi þættir rekast á., s.s. samfélagsleg markmið (t.d. öryggi, náttúruvernd og efnahagsþróun), takmarkaðir fjármunir og hagsmunaárekstrar *(mikil vissa)*. Mæta má þessum áskorunum með sveigjanlegum lausnum sem aðlaga stiga af stigi, greiningu á afleiðingum ákvarðana, skipulagi byggðar, samráði við hagsmunaaðila auk aðferða til að draga úr ágreiningi *(miðlungs vissa)*.

Þrátt fyrir verulega óvissu um hækkun sjávarborðs má nú byggja á sveigjanlegum lausnum (sem aðlaga má stig af stigi) og styðja þær með vöktunarkerfum svo hægt sé að vara við sjávarflóðum í tæka tíð. Slíkar ákvarðanir þarf að endurskoða reglulega og treysta ákvarðanatökuna með því að taka tillit til sérfræðiþekkingar, margskonar sviðsmynda og gagna (*mikil vissa*). Sé áhættuþol lítið er gagnlegt að skoða ítrustu sviðsmyndir um sjávarborðshækkun (s.s. RCP8.5 þar sem sjávarstaða rís meira en 1.1 m við aldarlok) (*mikil vissa*). Þetta þýðir m.a. að nauðsynlegt er að taka tillit til sviðsmynda þar sem mögulegar breytingar með alvarlegum afleiðingum eiga sér stað (t.d. mikil hækkun sjávar) sem erfitt er að glíma við án skilvirkrar aðlögunar.

B.3.9 Viðbrögð og stýring breytinga

Viðbrögð vegna breytinga á hafi og freðhvolfi skipta miklu. Víðtæk samvinna ólíkra aðila á mörgum sviðum og svæðum er mikilvæg til þess að hrinda í framkvæmd árangursríkum aðgerðum *(mikil vissa)*. Menntun, bættur skilningur á áhrifum manna á loftslag og áhrifum loftslags á samfélög, eftirlit, spár, fjármögnun og stuðningur stofnana eru einnig ómissandi fyrir þátttöku í aðlögun sem hentar hverju sinni, og fyrir mat á kostnaði og hliðarávinningi þess draga úr áhættu og auka áfallaþol *(mikil vissa)*.

Svæðisbundnir samstarfssamningar á norðurskautssvæðinu og á sumum hálendissvæðum og milli stjórnsýslueininga sem deila vatnasvæðum geta auðveldað aðgerðir til aðlögunar. Stefnumótun tekur þó enn takmarkað mið af afleiðingum tjóns sem kann að stafa af breytingum í hafi og freðhvolfi *(mikil vissa)*.

Víðtæk fjárfesting í menntun á ýmsum stigum auðveldar félagsnám, þ.e. að læra af og með öðrum, og uppbyggingu hæfni til þess að móta og hrinda í framkvæmd stefnu sem dregur úr áhættu og eykur áfallaþol á norðurskautssvæðinu og sumum hálendum svæðum *(miðlungs vissa)*. Eftir því sem við á getur eftirlit með og spár um breytingar á hafi og freðhvolfi stutt við aðlögun

og treyst ákvarðanatöku þar sem vega þarf saman skammtíma og langtímahagsmuni *(miðlungs vissa).*

Hingað til hefur eftirfarandi reynst vel hvað viðbrögð við sjávarstöðubreytingum varðar:

- Í fyrsta lagið að horfa til lengri tíma jafnvel þegar teknar eru ákvarðanir til skammtíma, og taka tillit til óvissu um áhættu eftir 2050 *(mikil vissa)* og byggja upp stjórnhætti sem ráða við flækjustig afleiðinga sjávarstöðubreytinga *(miðlungs vissa).*

- Í öðru lagi getur bætt samhæfing viðbragða á ólíkum stofnunum, stjórnsýslustigum og geirum auðveldað að takast á við afleiðingar og aukna áhættu vegna sjávarstöðubreytinga *(mikil vissa).*

- Í þriðja lagi skiptir máli fyrir sjálfbæra þróun, og það að byggja upp áfallaþol á sanngjarnan og réttlátan hátt, að forgangsröðun taki tillit til tjónnæmis og jafnréttis þjóðfélagshópa *(mikil vissa),* og þá getur hjálpað að tryggja öruggan farveg fyrir umræðu og lausn deilumála *(miðlungs vissa).*

- Loks má bæta almennan skilning á sjávarstöðubreytingum, áhættu og viðbrögðum með því að taka tillit til staðbundinnar þekkingar jafnt sem vísindalegrar þekkingar þegar hugað er að viðbrögðum á hverjum stað *(mikil vissa).*

Metnaðarfullar og samhæfðar aðgerðir til þess að minnka losun gróðurhúsalofttegunda, draga úr afleiðingum loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið og aðlagast mögulegum breytingum eru nauðsynlegar. Slíkar aðgerðir eru forsendasjálfbærrar þróunar sem þolir áhrif loftslagsbreytinga *(mikil vissa).*

Veruleg áskorun verður fyrir þjóðir að aðlagast þeim breytingum sem þegar eiga sér stað og líklegt er að muni verða í hafi og freðhvolfi, jafnvel með samhæfðum aðgerðum til þess að draga úr losun *(mjög mikil vissa).* Í samanburði við sviðsmyndir þar sem mikið er losað fylgir mun minni áhætta fyrir hafið og freðhvolfið sviðsmyndum þar sem lítið er losað *(mikil vissa)* og jafnframt fylgja þeim ýmsar jákvæðar hliðarverkanir. Ef losun verður mikil er útlit fyrir að samfélög sem eru háð hafsins gæðum og freðhvolfi muni ná þolmörkum aðlögunar eftir 2100. Þetta getur gerst fyrr fyrir hópa sem eru berskjaldaðir fyrir áföllum. Umfangsmiklar breytingar á efnahag og innviðum þarf til þess að koma í veg fyrir óæskilegar breytingar á hafi og freðhvolfi *(mikil vissa).*

Niðurstöður skýrslunar um áhrif loftslagsbreytingar á hafið og freðhvolfið (IPCC, 2019b) eru í samræmi við niðurstöður skýrslunnar áhrif lofslagsbreytinga á landnýtingu (IPCC, 2019a) um leiðir til að halda hlýnun innan við 1.5 °C (IPCC, 2018) og skýrslu milliríkjanefndar um líffræðilegan fjölbreytileika og vistkerfi (IPBES, 2019). Verulegur ávinningur er af einbeittum aðgerðum til þess að draga úr losun og aðlagast loftslagsbreytingum fyrir sjálfbæra þróun. Á hinn bóginn felst vaxandi kostnaður og aukin áhætta í því að fresta aðgerðum. Möguleikar til þess að grípa til aðgerða eru mismunandi fyrir ólík svæði og þjóðir. Til þess að hrinda í framkvæmd stefnu um loftslagsþolna þróun þarf að forgangsraða tímabærum, metnaðarfullum, samhæfðum og varanlegum aðgerðum til þess að draga úr áhrifum loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið.

Heimildir

IPBES (2019). „Summary for Policymakers“. Í: *IPBES Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services*. Gefið út af S. Díaz, J. Settele, E.S. Brondízio, H.T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K.A. Brauman, S.H.M. Butchart, K.M.A. Chan, L.A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S.M. Subramanian, G.F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S. Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y.J. Shin, I.J. Visseren-Hamakers, K.J. Willis og C.N. Zayas. Bonn, Germany: IPBES secretariat, bls. 56.

IPCC (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. Gefið út af V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor og T. Waterfield. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 616. URL: https://doi.org/10.1017/9781009157940.

— (2019a). *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi og J. Malley. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 896. URL: https://doi.org/10.1017/9781009157988.

— (2019b). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama og N.M. Weyer. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press, bls. 755. URL: https://doi.org/10.1017/9781009157964.

— (2019c). „Summary for Policymakers“. Í: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Gefið út af P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi og J. Malley. Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157988.00.

— (2019d). „Summary for Policymakers“. Í: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Gefið út af H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama og N.M. Weyer. Cambridge, UK og New York, NY, USA: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781009157964.001.

Stjórnarráð Íslands (2015). *Parísarsamningurinn*. URL: https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit--skyrslur-og-skrar/Par%C3%ADsarsamningurinn.pdf.

VIÐAUKI

C

VIÐAUKI: SVIÐSMYNDIR UM LOSUN, FÉLAGSLEGA OG HAGRÆNA ÞRÓUN

C Losunarsviðsmyndir

Þegar rætt er um losun gróðurhúsalofttegunda er stundum vitnað í ólíkar sviðsmyndir og loftslagsbreytingar samkvæmt þeim. Þó orðið sviðsmynd (*e. scenario*), sem kemur úr leikhúsmáli, kunni að virðast gagnsætt og auðskilið er hugtakið erfiðara viðfangs þegar það er notað um framtíðarþróun. Sviðsmynd er ekki spá heldur lýsing á hugsanlegri þróun einhverrar stærðar og þegar unnið er með sviðsmyndir eru gjarnan skoðaðir nokkrir möguleikar á þróun og þá fjallað um ólíkar sviðsmyndir. Þær geta verið flóknar eða einfaldar, auðskiljanlegar eða torskildar.

Umfjöllun í skýrslum IPCC byggir á sviðsmyndum um þróun losunar gróðurhúsalofttegunda og er leitast við að spanna allt frá minnstu til mestu mögulegrar losunar. Sviðsmyndirnar eru notaðar sem reikniforsendur í líkönum, bæði einföldum og viðameiri loftslagslíkönum eða jarðkerfislíkönum. Við gerð matsskýrslna IPCC er stuðst við niðurstöður frá CMIP reikniverkefnum[1], þar sem tugir loftslagslíkana keyra sömu þróun losunar. Skýrslur IPCC úr 5. matshring (AR5) byggja á reikniniðurstöðum frá CMIP5 verkefninu en þær nota fjórar RCP-sviðsmyndir[2] um losun gróðurhúsalofttegunda (Meinshausen o.fl., 2011). Aukning gróðurhúsalofttegunda breytir afdrifum varmageislunar í lofthjúpnum og einn mælikvarði á það hversu mikið varmageislun til yfirborðsins breytist er geislunarálag sem er mælt í W/m^2. Hver RCP sviðsmynd lýsir þróun losunar og er aukning geislunarálags við lok 21. aldar notað til aðgreiningar, t.d. RCP2.6 ef geislunarálag hefur aukist um 2,6 W/m^2 árið 2100 og RCP8.5 ef það hefur aukist um 8,5 W/m^2.

Skýrslur IPCC úr 6. matshring (AR6) nota reikniniðurstöður úr CMIP6 verkefninu (Eyring o.fl., 2016) og fimm nýjar, víðtækari SSP-sviðsmyndir[3] sem nota fleiri áhrifaþætti en bara þróun á losun gróðurhúsalofttegunda. Þær lýsa samfélagslegri og hagrænni þróun þar sem tekið er tillit til þróunar fólksfjölda, aðgengis að menntun, þéttbýlismyndunar og byggðaþróunar, hagvaxtar, aðgengis að auðlindum, þróunar tækni og eftirspurnar, auk efnahagshvata og lífshátta (Vuuren o.fl., 2011; O'Neill o.fl., 2014; Riahi o.fl., 2017). Segja má að þær séu lýsandi fyrir þjóðfélagsþróun sem hefur áhrif á það hversu auðvelt eða erfitt verður að takast á við loftslagsbreytingar og

[1] Reikniverkefnin eru kölluð *Climate Model Intercomparion Project*, sem er skammstafað CMIP.
[2] Á ensku eru þessar sviðsmyndir nefndar *Radiative Concentration Pathways*, skammstafað RCP.
[3] Á ensku eru þessar sviðsmyndir nefndar *Shared Socioeconomic Pathways*, skammstafað SSP.

afleiðingar þeirra. Að sama skapi er miserfitt að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda.

Brautirnar sjálfar eru því ekki sviðsmyndir um losun, heldur geta nokkrir möguleikar á losun fallið innan hverrar brautar. Sambandi brautanna og losunarsviðsmyndanna hefur verið lýst þannig að hver braut skapi sögusvið fyrir ólíkar losunarsviðsmyndir. Í CMIP6 verkefninu eru notaðar sviðsmyndir með sambærilega losun gróðurhúsalofttegunda og í CMIP5, t.d. lýsir SSP2-4.5 sögusviðinu SSP2 og losun með geislunarálagi 4,5 W/m^2 í lok aldarinnar. Í sérgrein C.1 er þróunarbrautunum fimm og samhengi þeirra lýst. Eins og lýst er í grein 3.1 er í þessari skýrslu notast við losunarsviðsmyndir sem eru tengdar SSP brautunum og þannig fást sviðsmyndir auðkenndar sem SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 og SSP5-8.5 (Meinshausen o.fl., 2020). Hér skiptir geislunarálagið (2.6, 4.5, 7.0 og 8.5) lykilhlutverki, en eftir því sem það er hærra eru loftslagsbreytingar og áhrif þeirra umfangsmeiri (samanber mynd A.1 og niðurstöður í köflum 1 og 3).

C.1 Fimm brautir þróunar

Hér fylgir stutt lýsing á þeim áhrifaþáttum sem leiða til hinna fimm brauta (SSP1 til SSP5), eða sögusviða, samfélags og hagrænnar þróunar: mun á menntun, alþjóðlegum viðskiptum, tækniþróun og landnýtingu, sem hafa áhrif á fólksfjölda og samvinnu þjóða. Í kjölfarið fylgir lýsing á hverju sögusviði sem ólíku þróunarbrautirnar leiða til. Nánari umfjöllun má finna í Meinshausen o.fl. (2020).

- **Menntun** leikur lykilhlutverk í þróun fólksfjölda og efnahags- og líffskilyrða. Eftir því sem menntun er meiri dregur úr fólksfjölgun og efnahagsleg þáttaka eykst. Menntun er meiri í sviðsmyndum SSP1 og SSP5 en minni í sviðsmyndum SSP3 og SSP4. Í SSP3 er menntunarstig lágt, en í SSP4 er tekjudreifing mjög ójöfn og aðgengi að menntun því misskipt.

- Umfang **alþjóðlegra viðskipta** er mælikvarði á hnattvæðingu. SSP5 er hnattvæddasta sviðsmyndin, meðan svæðisbundin togstreita í SSP3 reynist hindrun fyrir hnattvæðingu. Í öðrum sviðsmyndum fer hnattvæðing bil beggja; í SSP1 vegast á áhersla á þróun innan nærumhverfis og áhersla á alþjóðasamstarf en í SSP4 takast á alþjóðleg yfirstétt og vinnandi stétt, sem er sundruð í alþjóðlegu tilliti.

- **Tækniþróun** knýr efnahagsþróun og leikur lykilhlutverk í aðlögun og mótvægisaðgerðum. SSP5 er sú braut þar sem hagvöxtur er mestur, þar er mikil tækniþróun og bætt lífskilyrði, markaðir hnattvæddir og áhersla á framleiðslu og neyslu. Á hinn bóginn er í SSP3 togstreita milli svæða og minni samvinna sem dregur úr tækniþróun og eykur þannig áskorunina gagnvart aðlögun og mótvægisaðgerðum.

- **Breytingar á landnotkun** miða að því að varðveita land þar sem kolefnisbinding á sér stað og forðast skógareyðingu. Þróun í þágu allra og sem virðir umhverfið leiðir í SSP1 til virkrar stýringar á landnotkun, t.d. er dregið verulega úr eyðingu hitabeltisskóga. Á hinn bóginn er lítil breyting á núverandi hneigð í SSP2 og SSP5 og stýring á landnotkun ófullnægjandi. Þannig heldur t.d. eyðing regnskóga áfram álíka hratt og nú, þó dragi hægt úr henni með tíma. Í SSP4 er einungis árangursrík stýring landnotkunar meðal ríkra þjóða en í SSP3 njóta skógar hvergi mikillar verndar.

Mismunandi þróun ofangreindra þátta leiðir til fimm ólíkra sögusviða. Þó að pláss sé fyrir mismunandi sviðsmyndir um losun innan þeirra eru takmörk á því. Þannig gengur sviðsmynd ákafrar losunar ekki með SSP1 og sviðsmynd þar sem ákaft er dregið úr losun gengur ekki með SSP5. Hér fyrir neðan er hverju sögusviði gerð stutt skil með tilliti til staðsetningar þess á mynd C.1.

SSP1: Sjálfbærni (Græna leiðin)

Hnattræn samfélags- og hagræn þróun stefnir hægt en örugglega í átt að sjálfbærni, með aukinni áherslu á þróun í þágu allra sem virðir þau mörk sem talið er að umhverfið setji. Stýring hnattrænna sameigna batnar með tímanum, fjárfestingar í menntun og heilbrigði hraða umskiptum í fólksfjöldaþróun og áhersla á hagvöxt breytist yfir í víðtækari áherslu á velferð mannkyns. Skuldbindingar um að ná markmiðum um þróun verða til þess að það dregur úr ójöfnuði, bæði innan og milli landa. Neyslu er stýrt í átt að hægari vexti á efnislegum gæðum og minni notkunar hráefna og orku.

SSP2: Miðja vegu.

Hnattræn þróun fylgir braut þar sem félags-, hagræn og tækniþróun víkur lítið frá hinum sögulega ferli. Framþróun og tekjuaukningu vindur ójafnt fram, sumum löndum vegnar tiltölulega vel en öðrum síður. Alþjóða- og ríkjastofnanir vinna að þróun sjálfbærni en miðar hægt. Þrátt fyrir hnignun umhverfiskerfa eiga sér stað nokkrar endurbætur og í heildina dregur úr auðlinda- og orkunotkun. Fólksfjölgun er í meðallagi hröð og úr henni dregur á síðari hluta aldarinnar. Ójöfn tekjudreifing er þrálát eða batnar hægt og áskoranir við að draga úr tjónnæmi vegna félags- og umhverfisbreytinga eru viðvarandi.

SSP3: Togstreita milli svæða (Þvottabrettið)

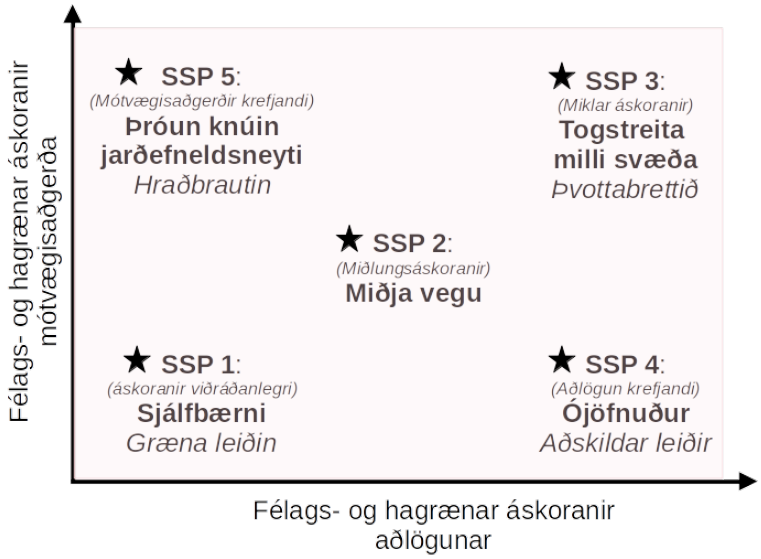
Aukin þjóðernishyggja, áhyggjur af samkeppnishæfni og þjóðaröryggi auk staðbundinna átaka valda því að þjóðfélög beina athyglinni að þróun innanlands eða meðal nágrannaþjóða frekar en alþjóðlegum málefnum. Með tíð og tíma er lögð æ meiri áhersla á öryggi þjóðarinnar og nágrannaþjóða. Lönd leggja áherslu á orku- og matvælaöryggi á eigin landsvæði eða í nágrannalöndum, en leggja ekki áherslu á alþjóðlega þróun. Það dregur úr fjárfestingu í menntun og tækni. Efnahagsþróun er hæg, neysla er hráefnafrek og ójöfnuður er viðvarandi eða eykst með tíma. Fólksfjölgun er hæg í iðnríkjum en hröð í þróunarríkjum. Umhverfismál njóta ekki forgangs á alþjóðasviðinu sem leiðir til mikillar hnignunar umhverfisins á sumum svæðum.

SSP4: Ójöfnuður (Aðskildar leiðir)

Fjárfestingum í mannauði er ákaflega ójafnt dreift sem ásamt aukinni misskiptingu í völdum og efnahagstækifærum eykur ójöfnuð og lagskiptingu bæði innan og milli landa. Með tímanum breikkar bilið á milli þjóðfélagshópa sem eru alþjóðlega vel tengdir og leggja til þekkingar- og fjármálageira heimshagkerfisins og tvístraðs samsafns lágtekjuhópa sem hafa minni menntun og starfa í vinnuaflsfrekum lágtækni störfum. Það dregur úr félagslegri samheldni og átök og ókyrrð verða síalgengari. Tækniþróun er mikil í hátæknigeirum efnahagslífsins. Fjölbreytni eykst í hnattvædda orkugeiranum með fjárfestingum bæði í kolefnisfreku eldsneyti eins og kolum og óhefðbundinni olíu (t.d. tjörusandi) en einnig í orkuuppsprettum sem lítið losa. Stefna í umhverfismálum leggur mesta áherslu á staðbundin mál á hátekju- eða meðaltekjusvæðum.

SSP5: Jarðefnaknúin þróun (Hraðbrautin)

Í þessum heimi er vaxandi trú á samkeppnismarkaði, nýsköpun og þáttökusamfélög til að hraða tækniframförum og á uppbyggingu mannauðs sem leið til sjálfbærrar þróunar. Markaðir tengjast æ betur hnattrænt. Einnig eru miklar fjárfestingar í heilsu, menntun og stofnunum til að auka mann- og félagsauð. Sókn í samfélags- og hagþróun er á sama tíma tengd nýtingu nægra jarðefnaeldsneytisbirgða, auk hnattrænnar upptöku auðlinda- og orkufrekra lífshátta. Allir þessir þættir leiða til hraðs vaxtar í heimshagkerfinu, en fólksfjöldi nær hámarki og fer svo minnkandi á 21. öldinni. Staðbundin umhverfisvandamál, s.s. loftmengun eru leyst á viðunandi hátt. Það er vaxandi trú á getu til að stýra félags og vistkerfum, með hnattverkfræði ef nauðsyn krefst.



Mynd C.1: Hinar fimm ólíku brautir hagrænnar- og samfélagsþróunar (SSPs), og staðsetning þeirra miðað við þær áskoranir sem þeim fylgja hvað varðar aðlögun að loftsagsbreytingum annarsvegar (láréttur ás) og mótvægisaðgerðum hinsvegar (lóðréttur ás). Staðsetning hvers sögusviðs ræðst af því hvernig ólíkir ráðandi þættir í þróun samfélaga valda því að miserfitt verður að bregðast við þeim áskorunum sem fylgja loftslagsbreytingum.

Heimildir

Eyring, Veronika, Sandrine Bony, Gerald A Meehl, Catherine A Senior, Bjorn Stevens, Ronald J Stouffer og Karl E Taylor (2016). „Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization“. Í: *Geoscientific Model Development* 9 (5), bls. 1937–1958.

Meinshausen, Malte, Zebedee R. J. Nicholls, Jared Lewis, Matthew J. Gidden, Elisabeth Vogel, Mandy Freund, Urs Beyerle, Claudia Gessner, Alexander Nauels, Nico Bauer, Josep G. Canadell, John S. Daniel, Andrew John, Paul B. Krummel, Gunnar Luderer, Nicolai Meinshausen, Stephen A. Montzka, Peter J. Rayner, Stefan Reimann, Steven J. Smith, Marten van den Berg, Guus J. M. Velders, Martin K. Vollmer og Ray H. J. Wang (ágú. 2020). „The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500“. Í: *Geoscientific Model Development* 13 (8), bls. 3571–3605. DOI: 10.5194/gmd-13-3571-2020.

Meinshausen, Malte, S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders og D.P. P. van Vuuren (nóv. 2011). „The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300“. Í: *Climatic Change* 109 (1-2), bls. 213–241. DOI: 10.1007/s10584-011-0156-z.

O'Neill, Brian C., Elmar Kriegler, Keywan Riahi, Kristie L. Ebi, Stephane Hallegatte, Timothy R. Carter, Ritu Mathur og Detlef P. van Vuuren (feb. 2014). „A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways“. Í: *Climatic Change* 122 (3), bls. 387–400. DOI: 10.1007/s10584-013-0905-2.

Riahi, Keywan, Detlef P. van Vuuren, Elmar Kriegler, Jae Edmonds, Brian C. O'Neill, Shinichiro Fujimori, Nico Bauer, Katherine Calvin, Rob Dellink, Oliver Fricko, Wolfgang Lutz, Alexander Popp, Jesus Crespo Cuaresma, Samir KC, Marian Leimbach, Leiwen Jiang, Tom Kram, Shilpa Rao, Johannes Emmerling, Kristie Ebi, Tomoko Hasegawa, Petr Havlik, Florian Humpenöder, Lara Aleluia Da Silva, Steve Smith, Elke Stehfest, Valentina Bosetti, Jiyong Eom, David Gernaat, Toshihiko Masui, Joeri Rogelj, Jessica Strefler, Laurent Drouet, Volker Krey, Gunnar Luderer, Mathijs Harmsen, Kiyoshi Takahashi, Lavinia Baumstark, Jonathan C. Doelman, Mikiko Kainuma, Zbigniew Klimont, Giacomo Marangoni, Hermann Lotze-Campen, Michael Obersteiner, Andrzej Tabeau og Massimo Tavoni (jan. 2017). „The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview“. Í: *Global Environmental Change* 42, bls. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.

Vuuren, D P van, J Edmonds, M Kainuma, K Riahi, A Thomson, K Hibbard, G C Hurtt, T Kram, V Krey, J F Lamarque, T Masui, M Meinshausen, N Nakicenovic, S J Smith og S K Rose (2011). „The representative concentration pathways: an overview“. Í: *Climatic Change* 109 (1-2), bls. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.

VIÐAUKI

D

VIÐAUKI: SKAMMSTAFANIR OG ORÐSKÝRINGAR

Skammstafanir tengdar Milliríkjanefnd Sþ um loftslagsbreytingar (IPCC)

AR5: *Assessment Report 5.* Skýrslur frá 5. matshring IPCC. Fyrir hvern matshring eru birtar þrjár skýrslur vinnuhópa (WG1, WG2, WG3) og samantektarskýrsla (SYR).

AR6: *Assessment Report 6.* Skýrslur frá 6. matshring IPCC. Fyrir hvern matshring eru birtar þrjár skýrslur vinnuhópa (WG1, WG2, WG3) og samantektarskýrsla (SYR).

AR6-WG1, **AR6-WG2**, **AR6-WG3**: Skýrslur einstakra vinnuhópa í 6. matshring. Sambærilegar skýrslur eru til fyrir fyrri matshringi, t.d. **AR5-WG1** o.s.frv.

AR6-SYR: *Synthesis Report 6.* Samantektarskýrsla AR6. Sambærilegar skýrslur eru til fyrir fyrri matshringi.

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change.* Milliríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar.

NDC: *Nationally Determined Contribution.* Samþykkt landsframlög. Landsframlag ákvarðar hvert framlag hvers aðildarríkis Parísarsamningsins mun verða til heildarmarkmiða samningsins. Óformlega er oft vísað til landsframlaga sem loforða um samdrátt.

RCP: *Radiative Concentration Pathway.* Sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda sem m.a. voru notaðar í AR5 og SR15, SRCCL og SROCC. Hver sviðsmynd er auðkennd með því geislunarálagi sem losun hefur valdið í lok 21. aldar. Í losunarsviðsmynd RCP8.5 hefur styrkur gróðurhúsalofttegunda þannig aukist nægilega til að geislunarálagið sé 8.5 W/m^2 í lok aldarinnar. Eftirfarandi losunarsviðsmyndir voru notaðar í AR5: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 og RCP8.5.

SR15: *Special Report on Global Warming of 1.5 °C.* Sérskýrsla IPCC frá 2018 um leiðir til að hlýnun jarðar fari ekki yfir 1.5 °C.

SRCCL: *Special Report on Climate Change and Land.* Sérskýrsla IPCC frá 2019 um landnotkun og loftslagsbreytingar af mannavöldum.

SROCC: *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.* Sérskýrsla IPCC frá 2019 um áhrif loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið.

SSP: *Shared Socioeconomic Pathway.* Fimm ólíkar brautir samfélags- og hagrænnar þróunar sem notaðar voru ásamt losunarsviðsmyndum í AR6. Þær eru tölusettar frá 1 til 5 (SSP1, SSP2, osfrv). Hver braut lýsir ákveðinni þjóðfélagsþróun sem hefur áhrif á það hversu auðvelt eða erfitt er að takast á við loftslagsbreytingar og afleiðingar þeirra. Í AR6 er losunarsviðsmynd bætt við hverja hinna fimm ólíku brauta og niðurstaðan verður sviðsmynd af þjóðfélagsþróun og losun. Til aðgreiningar er geislunarálagi í lok 21. aldar skeytt við SSP nafnið, t.d. SSP5-8.5. Þær sviðsmyndir sem mest eru notaðar í þessari skýrslu eru SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 og SSP5-8.5

WG1: Vinnuhópur 1 hjá IPCC. Þessi hópur skoðar umfang loftslagsbreytinga og áhrif þeirra á veðurlag, hafið, freðhvolfið og aðra jarðeðlisfræðilega hluta loftslagskerfisins

WG2: Vinnuhópur 2 hjá IPCC. Þessi hópur skoðar afleiðingar loftslagsbreytinga fyrir náttúru og samfélög og til hvaða úrræða megi grípa til að aðlagast breytingunum

WG3: Vinnuhópur 3 hjá IPCC. Þessi hópur skoðar efnahagsleg áhrif loftslagbreytinga og aðferðir til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda.

Skammstafanir tengdar skýrslum vísindanefndar

V2008: *Skýrslan Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi. Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar* frá 2008.

V2018: Skýrslan *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi. Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar* frá 2018.

Aðrar skammstafanir

ANPP: Ofanjarðarframleiðni eða nettó-ofanjarðarframleiðni. Árlegur ofanjarðarvöxtur gróðurs.

AMOC: *Atlantic Meridional Overturning Circulation.* Hringrás í Atlantshafi þar sem yfirborðssjór berst norður, myndar djúpsjó á norðurslóðum og streymir til suðurs sem djúpsjór.

ArcticDEM: Landhæðarlíkan af norðurhveli jarðar, norðan 60°N.

ASTER: *The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.* Mælitæki á TERRA gervitungli NASA.

b2k: Ár fyrir 2000. Tímakvarði sem m.a. er notaður í fornveðurfarsfræði. Árið 2000 er hefur b2k gildið 0, árið 1900 hefur b2k gildið 100 o.s.frv.

CARRA: *The Copernicus Arctic Regional Reanalysis.* Endurgreining í hárri upplausn sem nær yfir evrópska hluta norðurslóða og mörg jökulþakin svæði. Tilgangur endurgreininga er að búa til mynd af ástandi lofthjúpsins á hverjum tíma, byggt á fyrirliggjandi gögnum.

CMIP3, CMIP5, CMIP6: Reikniverkefni þar sem nokkrir tugir líkana frá mörgum vísindastofnunum reikna sömu losunarsviðsmyndir og reikna aðrar sambærilegar tilraunir. Niðurstöður þessara reikniverkefna eru mikið notaðar í loftslagsrannsóknum og í skýrslum um loftslagsbreytingar.

CORDEX: *Coordinate Regional Climate Downscaling Experiment.* Reikniverkefni og safn af niðurstöðum svæðisbundinna niðurkvarðana með mörgum loftslagslíkönum.

CryoSat-2: Gervitungl ESA sem sérstaklega er ætlað til að kanna freðhvolfið og breytingar á hafís og ísbreiðum.

ERA5: Endurgreining Reiknimiðstöðvar evrópskra veðurstofa. Hnattræn endurgreining á reiknineti sem hefur 30 km upplausn og nær frá 1940 til dagsins í dag. Tilgangur endurgreininga er að búa til mynd af ástandi lofthjúpsins á hverjum tíma, byggt á fyrirliggjandi gögnum.

ESA: *The European Space Agency.* Geimvísindastofnun Evrópu.

GHL: Gróðurhúsalofttegundir.

GPP: *Gross Primary Production.* Heildarframleiðni svæðis yfir eitt ár. Einnig nefnt heildarljóstillífun eða kolefnisupptaka.

GRACE: *The Gravity Recovery and Climate Experiment.* Samstarfsverkefni NASA og þýsku geimvísindamiðstöðvarinnar (DLR). Gervitunglamælingar þyngdarsviðs jarðar.

HIRHAM: Svæðisbundið loftslagslíkan sem byggir á veðurfars og loftslagslíkönum.

ICRA: Endurgreining Veðurstofu Íslands sem nær frá 1980 til 2017 með 2,5 km reikniupplausn. Tilgangur endurgreininga er að búa til mynd af ástandi lofthjúpsins á hverjum tíma, byggt á fyrirliggjandi gögnum.

NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index.* Grænkustuðull, mælikvarði á grænan lit gróðurs í gervihnattamyndum.

PISM: *Parallel Ice Sheet Model.* Ísflæðilíkan sem getur keyrt á mörgum samhliða örgjörvum.

SLE: *Sea Level Equivalent.* Mælieining fyrir sjávarstöðubreytingar, t.d. ísbráðnunar dreift á heimshöfin með núverandi flatarmáli.

WHO: *World Health Organization.* Alþjóðaheilbrigðisstofnunin.

Orðskýringar

Aðlögunaðgerðir: Loftslagsaðgerðir sem auka viðnámsþrótt og aðlögunargetu samfélaga, kerfa og náttúru gagnvart loftslagsbreytingum, öðru nafni loftslagsþol samfélaga.

Blágrænar ofanvatnslausnir: Með blágrænum ofanvatnslausnum er ofanvatni í þéttbýli veitt á náttúrulegan hátt niður í jarðveginn í stað þess að veita því í hefðbundin fráveitukerfi. Þannig er líkt eftir náttúrulegri hringrás vatn.

Deilistofnar: Stofnar sem hafa útbreiðslu sem nær yfir fleiri en eina efnahagslögsögu og veiðirétti er því deilt á milli þjóða.

Farglétting vegna rýrnunar jökla: Þegar jöklar rýrna hverfur sá þungi af jörðinni sem var þegar þeir voru stærri, því lyftist jarðskorpan upp sem viðbragð við léttingu þungans.

Freðhvolf: Sá hluti andrúmslofts og yfirborðs jarðar sem er frosið vatn, svo sem jöklar, snjór, hafís, sífreri.

Fyrsta stigs heilbrigðisþjónusta: Heilsugæsla, heilsuvernd og forvarnir, bráða- og slysamóttaka og önnur heilbrigðisþjónusta á vegum heilsugæslustöðva. Þjónusta og hjúkrun á hjúkrunarheimilum, í hjúkrunar- og dvalarrýmum stofnana og í dagdvöl.

Geislunarálag: Mælikvarði á breytingar í styrk gróðurhúsaáhrifa. Yfirleitt mældur í W/m^2.

Loftslagsáhætta: Áhætta vegna neikvæðra áhrifa loftslagsbreytinga og tilheyrandi tap og tjón. Loftslagsáhætta mun í auknum mæli samtvinnast annars konar áhættu.

Loftslagsvæn uppbygging: Uppbygging sem dregur úr losun gróðurhúsalofttegunda.

Loftslagsþolin þróun: Samsafnaður viðnámsþróttur samfélags, eða hluta þess, gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga.

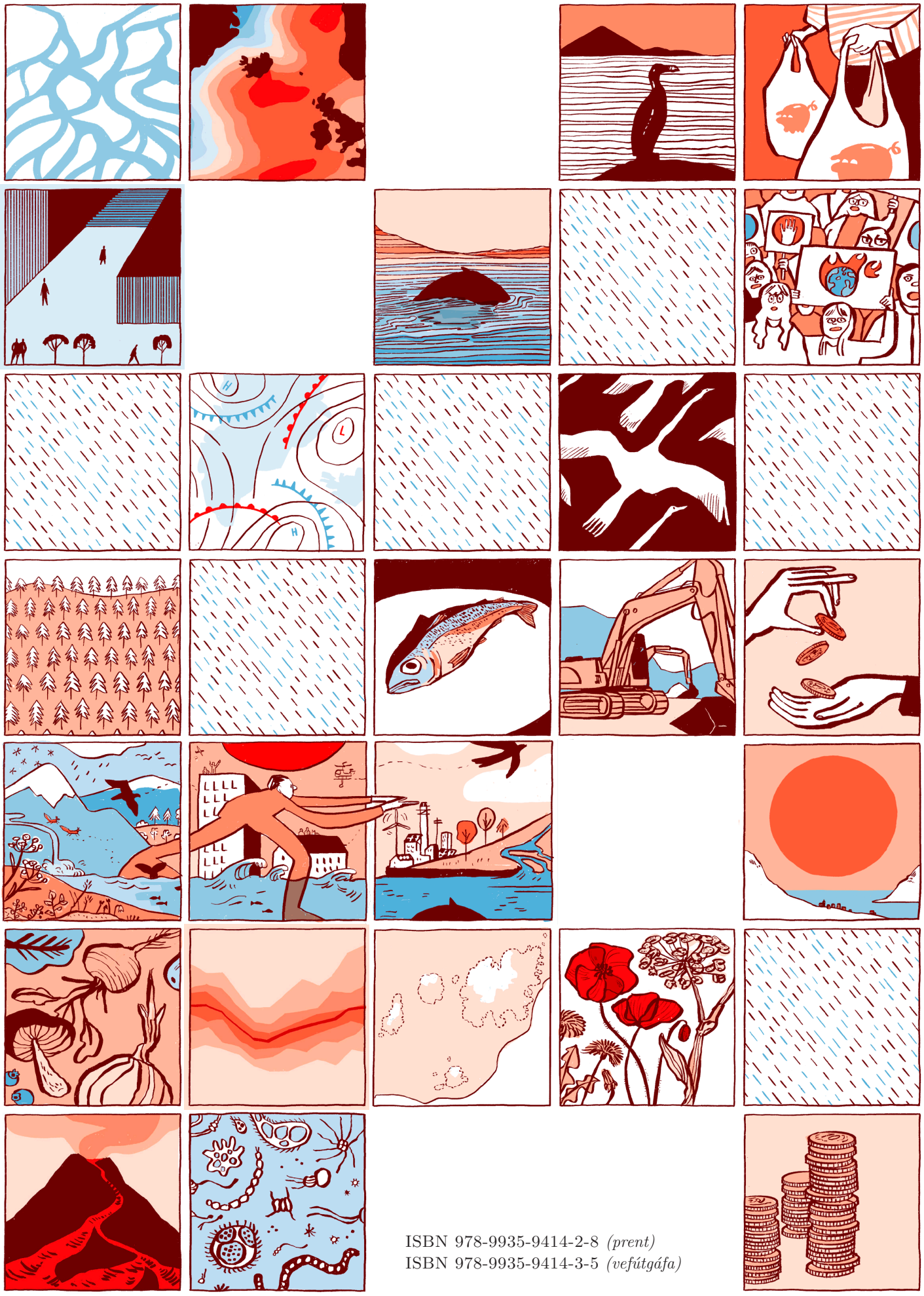
Mótvægisaðgerðir: Loftslagsaðgerðir sem hafa það að markmiði að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda út í andrúmsloftið eða fjarlægja þær úr andrúmsloftinu.

Nettólosun: Losun gróðurhúsalofttegunda að frádreginni bindingu kolefnis úr andrúmslofti.

Orkuplöntur: Plöntutegundir sem henta til framleiðslu lífolíu eða annarrar líforku. Dæmi um orkuplöntur sem í dag eru notaðar til lífolíuframleiðslu á Íslandi eru repja og nepja.

Samþykkt landsframlög: Landsframlag ákvarðar hvert framlag hvers aðildarríkis Parísarsamningsins mun verða til heildarmarkmiða samningsins.

Loftslagsráð hefur gefið út ýmsar orðskýringar sem tengjast loftslagsmálum og þær er hægt að nálgast á heimasíðu ráðsins, www.loftslagsrad.is. Einnig er bent á að í umræðuplaggi Loftslagsráðs, *Að búa sig undir breyttan heim*, er að finna orðskýringar sem tengjast loftslagsbreytingum, mótvægisaðgerðum og aðlögun.



ISBN 978-9935-9414-2-8 *(prent)*
ISBN 978-9935-9414-3-5 *(vefútgáfa)*