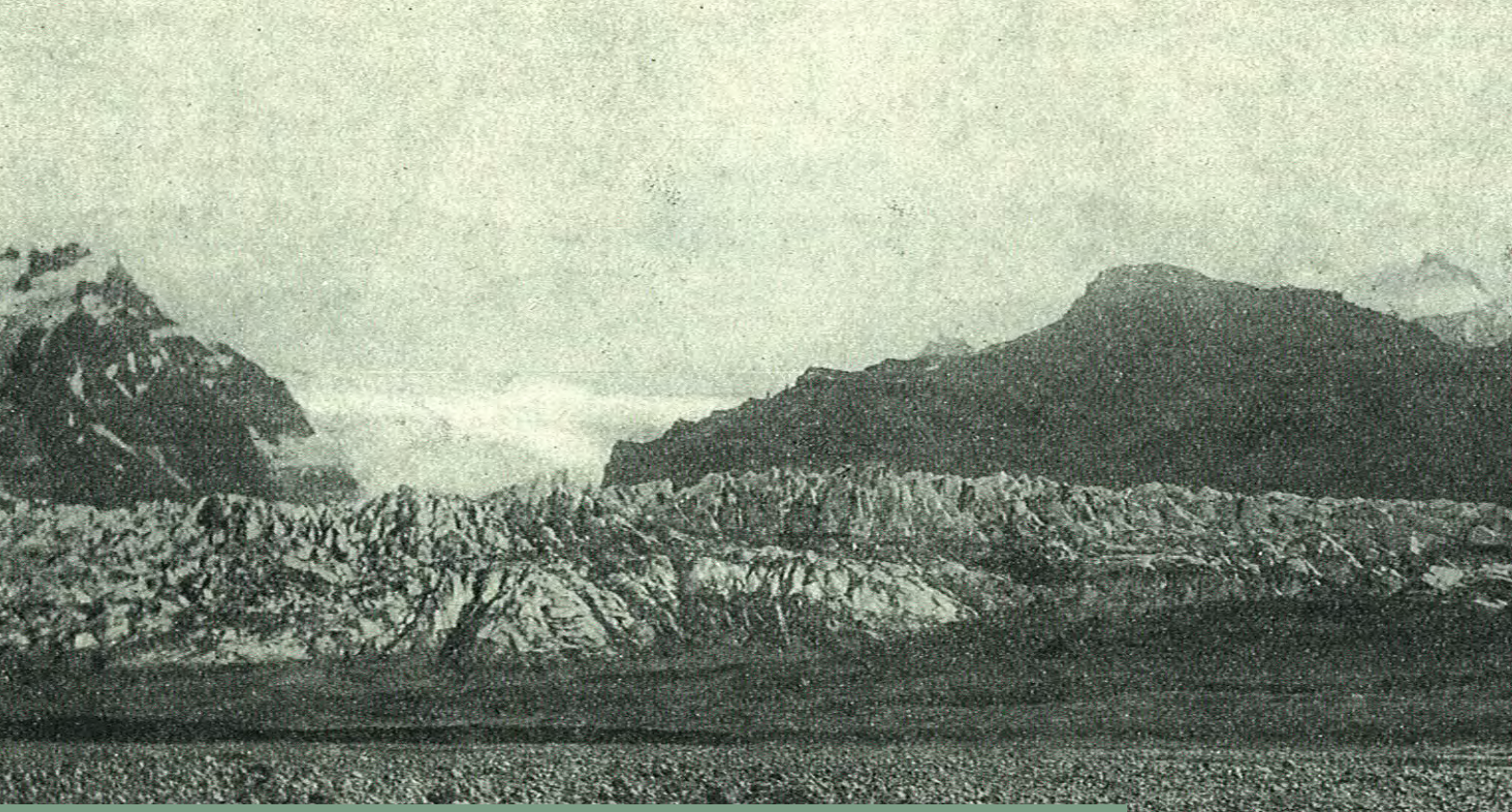


LOFTSLAGSBREYTINGAR OG ÁHRIF ÞEIRRA Á ÍSLANDI

Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar

2018

Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi

Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar

2018

Veðurstofa Íslands

Myndir á forsíðu:
Svínafellsjökull. Efri myndina tók Tretow-Loof einhvern tíma á árunum 1902–1904.
Neðri myndina tók Hrafnhildur Ævarsdóttir í október 2016.
Sjá nánar umfjöllun í kafla 5.

Mynd Tretow-Loof er m.a. birt í Bruun, D., 1928. Fortidsminder og Nutidshjem paa Island. Gyldendal, Kaupmannahöfn. Sjá einnig doktorsritgerð Hrafnhildar Hannesdóttur, 2014, Variations of southeast Vatnajökull past, present and future. Háskóli Íslands.

Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi
Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018

Veðurstofa Íslands 2018

Hönnun og umbrot: Margrét E. Laxness
Prentun: Svansprent
ISSN 978-9935-9414-0-4

Hvernig vitna á í skýrsluna:
Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórssson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson, Trausti Jónsson. 2018. Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018. Veðurstofa Íslands.

Ávarp umhverfisráðherra

Áhrif loftslagsbreytinga á umhverfi okkar verða sífellt greinilegri. Í fyrstu skýrslu Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC) sem gefin var út árið 1990 var einungis fjallað um *mögulegar* afleiðingar loftslagsbreytinga í framtíðinni, en 23 árum seinna voru afleiðingar orðnar augljósar. Í skýrslu nefndarinnar frá 2013 sagði að hlýnun jarðar væri óumdeilanleg og merkja mætti fordæmalausar breytingar á ýmsum náttúrufarsþáttum.

Á Íslandi hefur hlýnað verulega á síðustu áratugum og eru ýmsar breytingar af þeim sökum vel merkjanlegar í íslenskri náttúru. Jöklar hopa og þynnast, jökulár breyta um farveg og suðausturströnd landsins rís hratt. Merkjanleg aukning hefur orðið á útbreiðslu gróðurs, sérstaklega trjágróðurs. Útbreiðsla, komu- og varptími ýmissa fuglategunda á Íslandi hefur breyst. Nýjar tegundir nema land, en aðrar eiga undir högg að sækja eða hafa jafnvel horfið úr íslenskri náttúru. Þannig hefur haftyrðill hætt að verpa hér á landi, og umhverfisbreytingar komið hart niður á mörgum sjófuglategundum. Lífríki sjávar hefur einnig tekið breytingum, með nýjum tegundum í hafinu umhverfis landið á meðan aðrar hörfa. Súrnun sjávar er hraðari á okkar hafsvæði en víðast annarsstaðar í heimshöfunum, sem er mikið áhyggjuefni. Líklegt er að neikvæð áhrif hennar á vistkerfi komi fyrr fram á íslenskum hafsvæðum en að jafnaði í heimshöfunum.

Ofangreindar afleiðingar hlýnunar eru meðal þess sem fjallað er um í þessari þriðju skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar á Íslandi. Skýrslan bætir umtalsverðu við þær upplýsingar sem fram komu í fyrri skýrslum, enda hafa vísindarannsóknir á síðustu árum aukið miklu við þekkingu á afleiðingum loftslagsbreytinga hér á landi.

Samfélagsleg áhrif loftslagsbreytinga fá nú meiri umfjöllun en í fyrri skýrslum, 2000 og 2008.

Aðlögun samfélagsins að áhrifum loftslagsbreytinga er verkefni sem verður æ brýnna eftir því sem áhrifin magnast. Í skýrslunni er fjallað um áhrif á innviði samfélagsins, orku- og veitustofnanir og helstu atvinnuvegi. Aðlögun snertir marga aðra þætti þjóðlífsins, s.s. skipulagsmál, samgöngur, auðlindir og búskaparhætti. Að auki þarf að bregðast við aukinni náttúruvá sem getur fylgt loftslagsbreytingum, m.a. breytingum á flóðum í ám og aukinni sjávarflóðahættu á sumum svæðum, aukinni skriðuhættu – sérstaklega vegna bráðnunar sífrera í fjalllendi – eldgosum og gróðureldum. Verulegar líkur eru á langtímahækkun sjávarborðs víðast hvar við ströndina á næstu áratugum og öldum og þarf að huga að því við skipulag byggðar á strandsvæðum.

Í skýrslunni er lögð áhersla á að aðlögun þurfi að vera vel ígrunduð og byggjast á traustum rannsóknum og þekkingu. Leitast þarf við að stýra aukinni áhættu vegna náttúruvár, en reynslan sýnir að með skipulegri áhættustjórnun er hægt er að ná miklum árangri við að draga úr hættu.

Með þessari viðamiklu skýrslu er vísindaleg þekking á loftslagsbreytingum hérlendis enn styrkt. Mikilvægt er að nýta þá þekkingu til góðra verka í þágu umhverfisverndar og efnahagslegrar hagsældar fyrir komandi kynslóðir.

Vitund og áhugi Íslendinga á loftslagsmálum hefur vaxið hratt á undanförnum árum. Herða þarf aðgerðir sem draga úr losun og auka kolefnisbindingu, svo skaðinn verði sem minnstur. Ljóst er þó að miklar breytingar verða á náttúrufari og samfélagi á Íslandi vegna hlýnunar. Þessi skýrsla upplýsir um þær breyingar og veitir okkur leiðsögn um aðlögun. Höfundar hennar eiga góðar þakkir skildar og stjórnvöld munu nýta niðurstöður hennar í starfinu framundan.

Guðmundur Ingi Guðbrandsson, umhverfisráðherra

Efnisyfirlit

1 Ágrip 7
Hnattrænar breytingar 7
Veðurfarsbreytingar á Íslandi 9
Jöklar, vatnafar og sjávarstaða 9
Súrnun sjávar 11
Breytingar á lífríki og ástandi sjávar 11
Breytingar á lífríki á landi 12
Áhrif á ræktarland og landbúnað 13
Aðlögun að áhrifum loftslagsbreytinga 14
Samfélagslegir innviðir og atvinnuvegir 15
Náttúruvá, áhættustýring og heilsumál 16
Ábendingar um aðgerðir og skort á þekkingu 17
2 Inngangur 19
3 Hnattrænar loftslagsbreytingar 23
3A Kvarðað orðalag 23
3.1 Lofthjúpurinn 24
3.2 Hafið 26
3.3 Freðhvolfið 26
3.4 Sjávarstaða 27
3.5 Kolefni og önnur lífræn jarðefni 28
3.6 Áhrif á lífkerfi og samfélög 28
3.7 Aðlögun og umhverfi ákvarðanatöku 29
3.8 Líklegar breytingar á nýhafinni öld 30
3.9 Lykiláhættuþættir, áhyggjuefni og aðlögunargeta 32
3.10 Þróun losunar gróðurhúsalofttegunda og Parísarsamkomulagið 34
3B Kolefnisjöfnuður Íslands 36
3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5 38
3D Rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna 39
Tilvísanir 41
4 Veðurfarsbreytingar á Íslandi 45
Samantekt 45
4.1 Veðurfar á Íslandi 46
4.2 Breytingar á veðurfari á Íslandi frá öndverðu 50
4.2.1 Nútími – Loftslagsbreytingar á Íslandi/Norður-Atlantshafi 51
4.3 Veðurfar á Íslandi á tíma samfelldra mælinga 54
4.4 Sviðsmyndir og CMIP5 líkön 58
4.41 Úrvinnsla fyrir Ísland og nærliggjandi hafsvæði 58
4A Endurgreiningar 59
4.4.2 Loftslagslíkön og hitabreytingar í Íslandsreitnum síðustu 140 árin 60
4.4.3 Hita- og úrkomubreytingar í framtíðarsviðsmyndum 62
4.4.4 Töflur sem sýna samanburð sviðsmynda 62
4.4.5 Samantekt á breytingum ársmeðaltala hita og úrkomu 63
4.4.6 Breytingar á árstíðasveiflu 64
4B Hafís á norðurslóðum 68
4.5 Niðurstöður loftslagslíkana með hærri upplausn 70
4.5.1 Niðurkvörðun á CORDEX líkönum 70
4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar 76
Lóðrétta hringrásin (AMOC) 76
Áratugabreytileiki í lofti og hafi (AMV) 76
Langtímahneigð og síðustu ár 79
Umræða 80
Viðauki: Töflur með hita- og úrkomubreytingum 81
Tilvísanir 83
5 Breytingar á jöklum, vatnafari og sjávarstöðu 87
Samantekt 87
5.1 Jöklar 88
5.1.1 Ástand og breytingar frá lokum litlu ísaldar *88*
5.1.2 Breytingar á afrennsli frá jöklum og á jökullónum *90*
5.1.3 Líklegar breytingar jökla á komandi öld *92*
5.1.4 Afleiðingar fyrir afrennsli frá jöklum og á jökullón 95
5.2 Vatnafar 95
5.2.1 Langtímabreytingar í vatnafari 95
5.2.2 Áhrif loftslagsbreytinga 98
5.2.3 Samantekt 98
5.3 Sjávarstöðubreytingar 98
5.3.1 Sjávarstöðubreytingar við Ísland 100
5.3.2 Landhæðarbreytingar við Ísland 103
5.3.3 Spár um hnattræna hækkun sjávarborðs 103
5.3.4 Svæðisbundnar breytingar á sjávarstöðu í spám IPCC 104
5.3.5 Samantekt á líklegum sjávarstöðubreytingum við Ísland á 21. öldinni 109
5.3.6 Horfur eftir 2100 109
5.3.7 Meðhöndlun óvissu 111
5.3.8 Aðferðir 111

5A Fingrafar jöklabráðnunar og aðlögun að flotjafnvægi 113
Fingrafarið 113
Aðlögun að flotjafnvægi 113
Tilvísanir 115
6 Súrnun sjávar 119
Samantekt 119
6.1 Inngangur 119
6.2 Efnafræðihlið súrnunar sjávar 120
6.3 Áhrif súrnunar á kalkmyndum í lífríki hafsins 121
6.4 Mat á breytingum við vaxandi styrk CO_2 lofti 122
6.5 Svæðatengdur breytileiki á súrnun hafsins 123
6.6 Rannsóknir á áhrifum súrnunar sjávar á lífríki 123
6.7 Afleiðingar súrnunar, tvær sviðmyndir 124
6.8 Hafið við Ísland 125
6.8.1 Árstíðasveiflur – langtímabreytingar 126
6.9 Áhrif á lífríki við Ísland 127
Tilvísanir 129
7 Breytingar á ástandi sjávar og áhrif á lífríki í sjó 131
Samantekt 131
7.1 Langtímabreytingar á ástandi sjávar 132
7.2 Lífríki í sjó 134
7.2.1 Uppsjávarfiskar 135
Loðna 135
Makríll 136
7.2.2 Botnfiskar 137
Þorskur 137
Ýsa 137
Skötuselur 137
Minni stofnar og flækingar 137
7.3.4 Áður óþekktar fisktegundir innan íslenskrar lögsögu 138
7.3 Sjávarspendýr 140
7.4 Sjófuglar 141
7.5 Að lokum 142
Tilvísanir 143
8 Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki Íslands 145
Samantekt 145
8.1 Inngangur 146
8.2 Stýrðar rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á vistkerfi Íslands 147
8.3 Áhrif loftslagsbreytinga á gróðurfar og dýralíf 149
8.3.1 Gróðurfar 149
8.3.1.1 Breytingar á gróðurfari 151
8.3.1.2 Hagaverkefnið 152
8.3.2 Dýralíf 153
8.3.2.1 Fuglar 153
8.3.2.2 Spendýr 155
8.3.2.3 Smádýr 156
8.3.3 Vatnalíf 158
8.3.4 Loftslagsbreytingar og framandi ágengar tegundir 162
Tilvísanir 165
9 Ræktað land 169
Samantekt 169
9.1 Inngangur 169
9.2 Landbúnaður 170
9.2.1 Garðyrkja 173
9.3 Skógrækt og skóglendi 175
9.4 Landgræðsla 177
Tilvísanir 178
10 Aðlögun í alþjóðlegu samhengi og framkvæmd 181
Samantekt 181
10.1 Alþjóðlegt samhengi aðlögunar 181
10.2 Stefnumótun og framkvæmd aðlögunar í nágrannalöndum 183
10.2.1 Evrópusambandið 183
10.2.2 Norðurlönd 184
Noregur 184
Finnland 185
Kaupmannahöfn 185
Björgvin 186
10.3 Staða aðlögunar á Íslandi 187
10.4 Aðlögun og önnur stefnumörkun 188
10.4.1 Samspil aðlögunar og mótvægisaðgerða til að draga úr nettólosun 188
10.4.2 Samspil aðlögunar og Heimsmarkmiða um sjálfbæra þróun 189
10.5 Samantekt 191
Tilvísanir 192
11 Áhrif loftslagsbreytinga á innviði, atvinnuvegi og samfélag 195
Samantekt 195
11.1 Vatn og veitur 196
11.2 Fráveita og ofanvatnskerfi 196
11.1.2 Aðlögun – aðgerðir 197
11.2 Orka 198
11.2.1 Framleiðsla 198
11.2.2 Flutningsnet raforku 200
11.2.3 Eftirspurn 201

11.3 Samgöngur 202
11.3.1 Vegasamgöngur 202
11.3.1.1 Aðlögun í vegasamgöngum 204
11.3.2 Siglingar 205
11.4 Frumatvinnuvegir 206
11.4.1 Landbúnaður og skógrækt 206
11.4.2 Fiskveiðar og fiskeldi 207
11.5 Aðrir atvinnuvegir 209
11.5.1 Ferðaþjónusta 209
11.5.2 Trygginga- og fjármálastarfsemi 210
11.5.2.1 Viðlagatrygging Íslands, opinberir sjóðir og loftslagsmál 212
11.5.2.2 Einkarekin vátryggingafélög og loftslagsmál 213
11.5.2.3 Vátryggingafélög og aðlögun að loftslagsbreytingum 213
11.5.2.4 Viðlagatrygging Íslands, opinberir sjóðir og aðlögun 213
11.5.2.5 Einkarekin vátryggingafélög og aðlögun 214
11.5.2.6 Samantekt um tryggingastarfsemi og aðlögun 214
11.6 Önnur samfélagstengd mál 215
Tilvísanir 216
12 Náttúruvá og heilbrigðismál 221
Samantekt 221
12.1 Náttúruvá 222
12.1.1 Náttúruvá tengd aftakaveðri 222
12.1.2 Flóð í ám 225
12.1.3 Sjávarflóð 226
12.1.3.1 Endurkomutími flóða í Reykjavík 226
12.1.3.2. Helstu flóð á suðvesturhluta landsins 226
12.1.3.3 Hækkun sjávarborðs og skipulag strandsvæða 227
12.1.3.4 Áhrif stórflóðs á höfuðborgarsvæðinu 227
12.1.3.5 Sjávarflóð og skipulag á höfuðborgarsvæðinu 228
12.1.3.6 Áhættustýring vegna sjávarflóða 228
12.1.4 Ofanflóð 229
12.1.5 Gróðureldar 230
12.1.6 Eldgos 230
12.1.7 Áhættustýring og náttúruvá 231
12A Um endurkomutíma náttúrhamfara 231
12.2 Heilbrigðismál 232
Tilvísanir 234

1 Ágrip

Umfjöllun um hnattrænar loftslagsbreytingar í þessari skýrslu byggist að mestu á nýjustu samantektum *Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar* (IPCC) sem gefnar voru út 2013 og 2014. Þær hafa verið uppfærðar þar sem þörf var á (sjá nánar kafla 3). Í skýrslunni er einnig leitast við að taka saman og gefa yfirlit um þær loftslagstengdu breytingar sem orðið hafa á náttúrufari, lífríki og samfélagi landsins frá útkomu síðustu skýrslu nefndarinnar árið 2008. Slíkt yfirlit byggist á rannsóknum fjölmargra aðila eins og lýst er í hverjum kafla (4–12). Hver þeirra byrjar á stuttri samantekt aðalatriða kaflans, en hér að neðan er ágrip af niðurstöðum þeirra allra. Einnig eru í lok þessa kafla ábendingar nefndarinnar um verkefni sem takast þarf á við, auk samantektar um á hvaða sviðum þarf helst að bæta þekkingu.

Hnattrænar breytingar

Hlýnun jarðar er óumdeilanleg og benda margar athuganir til breytinga frá því um miðbik síðustu aldar sem eru fordæmalausar hvort sem litið er til áratuga eða árþúsunda. Lofthjúpurinn og heimshöfin hafa hlýnað, dregið hefur úr magni og útbreiðslu snævar og íss, auk þess sem sjávarborð hefur hækkað og styrkur gróðurhúsalofttegunda aukist. Ennfremur hefur sýrustig sjávar lækkað um 0.1 pH stig frá iðnbyltingu og ummerki þess á lífríki eru þegar merkjanleg.

Athafnir manna, sérstaklega bruni jarðefnaeldsneytis, hafa aukið styrk gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpnum og er hann nú mun meiri en vitað er að hann hafi verið a.m.k. síðustu 800 þúsund ár. Styrkur CO_2 í lofthjúpnum hefur aukist um 40% frá því fyrir iðnbyltingu. Heimshöfin hafa tekið við um 30% af koldíoxíðslosuninni og veldur það súrnun þeirra. Nýlegar rannsóknir benda til þess að frá miðbiki 8. áratugs síðustu aldar hafi hlýnun numið um 0.17–0.19°C á áratug og sveiflur yfir styttri tímabil víki ekki marktækt frá því. Hlýnun síðustu áratuga er tölfræðilega marktæk.

Loftslagsbreytingar hafa á liðnum áratugum haft áhrif á náttúru og samfélög á öllum meginlöndum og um öll heimsins höf. Áhrif loftslagsbreytinga koma greinilegast fram og eru víðtækust í náttúrufari. Sumar samfélagsbreytingar má þó einnig rekja til loftslagsbreytinga að meira eða minna leyti.

Vegna loftslagsbreytinga hefur útbreiðsla ýmissa dýrategunda breyst, bæði á landi og í sjó, auk þess sem árstíðabundin hegðan hefur raskast, með áhrifum á stofnstærð og víxlverkun við aðrar tegundir. Fjöldi

Mynd 1.1 Fellibylurinn Irma olli gríðarlegu tjóni á eyjum í Karabíska hafinu. Myndin sýnir fellibylinn um það leyti sem hann náði hámarki þ. 6. september 2017. Loftslagsbreytingar auka tíðni ýmissa veðuröfga og m.a. geta fellibyljir orðið öflugri. (MODIS mynd frá Aqua-gervihnetti NASA.)

rannsókna, frá ólíkum svæðum og á mörgum nytjategundum, sýnir að loftslagsbreytingar hafa oftar neikvæð áhrif á jarðrækt en jákvæð.

Áhrif öfga í veðurfari á umliðnum árum, svo sem hitabylgna, þurrka, flóða, fellibylja og gróðurelda, benda til þess að sum vistkerfi og mörg félagsleg kerfi séu berskjölduð og viðkvæm gagnvart núverandi breytileika í veðurfari. Loftslagstengd náttúruvá eykur annað álag og hefur oft neikvæð áhrif á lífsbjörg, sérstaklega fyrir fátækari samfélagshópa. Sagan sýnir að samfélög og hópar hafa, með misgóðum árangri þó, aðlagast breytingum í veðurfari og aftakaveðrum.

Þegar reynt er að draga úr áhættu sem loftslagsbreytingar hafa í för með sér verður að taka tillit til þess að umhverfið mun halda áfram að breytast. Ákvarðanir um aðlögun og aðrar aðgerðir í loftslagsmálum í nálægri framtíð munu hafa áhrif á þróun áhættu af völdum loftslagsbreytinga á öldinni.

Hnattræn hlýnun við lok aldarinnar verður líklega á bilinu 0.3 til 4.8°C og fer mjög eftir því hversu mikið verður losað af gróðurhúsalofttegundum. Meginlönd munu hins vegar hlýna meira en úthöfin og hlýnunin verður áköfust á heimskautasvæðum norðursins. Nánast öruggt er að á flestum svæðum mun heitum dögum fjölga og köldum dögum fækka að sama skapi. Líklegt er að hitabylgjur verði lengri og tíðari, en eftir sem áður má stöku sinnum búast við köldum vetrum á hærri breiddargráðum. Draga mun úr úrkomu á þurrum svæðum á sama tíma og hún eykst á svæðum sem þegar eru úrkomusöm.

Verði ekki dregið verulega úr losun gróðurhúsalofttegunda mun súrnun sjávar halda áfram.

Hafís á norðurhveli mun halda áfram að dragast saman og ísinn þynnast og sífreri mun minnka. Jöklar munu tapa massa sem leiðir til sjávarstöðubreytinga. Milliríkjanefndin taldi að meðalsjávarborð á árunum 2081–2100 yrði á bilinu 0.26 til 0.82 m hærra en að meðaltali 1986–2005.

Síðan skýrsla IPCC kom út hafa rannsóknir sýnt að óafturkræft hrun jökla við Amundsenflóa á vestanverðu Suðurskautslandinu sé líklega hafið. Hætta er á að þetta leiði til hruns á stórum hluta vestanverðs Suðurskautslandsins sem myndi að lokum hækka sjávarstöðu um meira en 3 metra. Slík atburðarrás tekur að öllum líkindum mörg hundruð ár og leiðir til langtímahækkunar á sjávarstöðu við Ísland.

Samkvæmt *Parísarsamkomulaginu* frá 2015 hyggjast aðildarþjóðir Sameinuðu þjóðanna (Sþ) draga úr losun gróðurhúsalofttegunda svo að hnattræn hlýnun frá iðnbyltingu verði vel undir 2°C, en jafnframt leitast við að takmarka hlýnunina við 1.5°C. Í aðdraganda Parísarsamkomulagsins sendu aðildarþjóðir Sþ frá sér yfirlýsingar um hversu mikið þær hygðust draga úr losun á næstu áratugum. Ljóst er að heildaráhrif þessara loforða munu ekki ná að uppfylla markmið samkomulagsins og því þurfa aðildarþjóðirnar að taka á sig frekari skuldbindingar. Samband hlýnunar og heildarlosunar gróðurhúsalofttegunda setur því skorður hversu mikið má losa ef hlýnun á ekki að fara yfir 2°C. Ljóst er að einungis örfáir áratugir eru til stefnu ef uppfylla á Parísarmarkmiðin.

Veðurfarsbreytingar á Íslandi

Rannsóknir sýna að frá lokum síðasta jökulskeiðs, eða í rúm 10 þúsund ár, hafa langtímahitafarsbreytingar (meðalhitinn ef litið er til áratuga eða alda) á Íslandi verið um 4°C sem er mun meira en hnattrænar breytingar á sama tíma. Ísland liggur á mörkum kaldtempraðs- og heimskautaloftslags og rekja má ummerki veðurfarsbreytinga á náttúru landsins gegnum tíðina. Síðustu þúsundir ára kólnaði á landinu en þó skiptust á hlýrri og kaldari tímabil. Á 11. og 12. öld var hlýtt á landinu og nærliggjandi hafsvæðunum en kaldasta tímabil frá ísaldarlokum virðist hafa verið á svonefndri *litlu-ísöld* sem hófst á 15. öld og lauk fyrir um 100 árum.

Frá því að samfelldar mælingar hófust fyrir miðbik 19. aldar hefur hlýnað verulega á landinu. Hlýnunin nemur um 0.8°C á öld sem er sambærilegt við hnattræna hlýnun á sama tíma. Ákafast hlýnaði fyrir miðbik síðustu aldar og svo aftur í lok hennar. Á tímabilinu 1980–2015 hlýnaði um 0.5°C á áratug, mest vestan- og norðvestantil á landinu, og á sama tíma jókst ársúrkoma frá um 1500 mm í 1600–1700 mm.

Fram að miðbiki aldarinnar er líklegt að hlýni á landinu og hafsvæðinu umhverfis það og að árin 2046–2055 verði að meðaltali á bilinu 1.3–2.3°C hlýrri en árin 1986–2005. Umfang hlýnunar ræðst aðallega af losun gróðurhúsalofttegunda. Ef losun verður mikil gæti hlýnun til loka aldarinnar (meðaltal áranna 2091–2100) numið meira en 4°C, með ríflegum óvissumörkum þó. Í sviðsmyndum þar sem minna er losað er hlýnunin til loka aldarinnar á bilinu 1.5–2.4°C og eiga lægri mörkin við ef Parísarsamkomulagið gengur eftir.

Líklegt er að hlýnunin verði meiri að vetri til en að sumri og nemur munurinn u.þ.b. helmingi af hlýnun á ársgrundvelli. Vísbendingar eru um að hlýnunin verði meiri norðanlands en sunnan og víða um landið verði meira en helmingur sumardaga við lok aldarinnar hlýrri en 15°C.

Meiri óvissa er um úrkomubreytingar en breytingar á hita en gera má ráð fyrir að úrkoma aukist um a.m.k. 1.5% fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Í sumum reiknilíkönum er aukningin allt að 4.5% fyrir hverja gráðu. Vísbendingar eru um að úrkomuákefð geti einnig aukist og að þrátt fyrir aukna heildarúrkomu geti þurrkadögum einnig fjölgað.

Jöklar, vatnafar og sjávarstaða

Íslenskir jöklar náðu flestir mestu útbreiðslu á nútíma í lok 19. aldar. Síðan hafa þeir hopað mikið og flatarmál þeirra dregist saman um nálægt 2000 km^2. Á þessari öld nemur samdrátturinn rúmlega 500 km^2 eða um 0.35% á ári. Miklar breytingar hafa orðið á afrennslisleiðum frá jöklum. Sem dæmi má nefna að nú rennur allt vatn sem kemur undan Skeiðarárjökli í Gígjukvísl. Breytingar hafa víða orðið á jaðarlónum við jökla, ný lón hafa myndast, sum eldri lón hafa stækkað og önnur horfið.

Gangi sviðsmyndir um loftslagsbreytingar eftir munu íslenskir jöklar halda áfram að minnka. Við lok aldarinnar gæti Langjökull, hafa tapað 85% af rúmmáli sínu en Hofsjökull og syðri hluti Vatnajökuls um 60%. Verði hlýnun í samræmi við þær sviðsmyndir þar sem mest er losað af gróðurhúsalofttegundum hverfa jöklar á Íslandi á næstu öldum. Vatnajökull mun lifa lengst, a.m.k. á hæstu fjallatindum.

Afrennsli frá jöklum mun aukast og ná hámarki upp úr miðri öldinni en byrja að dragast saman á síðustu áratugum aldarinnar. Þessar breytingar hafa áhrif á hönnunar- og rekstrarforsendur virkjana og ýmissa annarra mannvirkja.

Mælingar sýna bæði skammtíma- og langtímabreytingar í vatnafari. Á hlýindaskeiði eftir aldamót breyttist árstíðasveifla afrennslis þannig að afrennsli að vetri jókst en að sama skapi dró úr vorflóðum. Líkanreikningar benda til þess að þessi breyting árstíðasveiflu haldi áfram ef hlýnar frekar. Gera má ráð

Mynd 1.2 Miklar skemmdir urðu á vegum í vatnsveðri sem gekk yfir Suðaustur- og Austurland síðustu dagana í september 2017. Flóð ollu vandræðum, m.a. í Suðursveit, Álftafirði, Hamarsfirði, Berufirði og í Fljótsdal. Brúin yfir Steinavötn skemmdist og vatn náði upp að gólfi brúarinnar yfir Hamarsá. Myndin, sem tekin er 27. september 2017, sýnir flóðið í Hamarsá í Hamarsdal. Ef úrkomuákefð eykst geta atburðir sem þessir orðið algengari. (Ljósmynd: Ragnar Eiðsson.)

Mynd 1.3 Okjökull var um 15 ferkílómetrar um aldamótin 1900 en hafði rýrnað í um 4 ferkílómetra einni öld síðar. Myndin er tekin 2003 og var þá ákomusvæði jökulsins horfið. Árið 2012 var hann kominn niður í 0.7 ferkílómetra og árið 2014 var hann afskráður sem jökull þar eð aðeins voru eftir þunnir, sundurlausir ísflákar þar sem jökull stóð forðum. Á síðustu árum hafa margir íslenskir smájöklar látið á sjá, eða jafnvel horfið. (Ljósmynd: Oddur Sigurðsson.)

fyrir að afrennsli aukist í takt við aukna úrkomu og bráðnun jökla a.m.k. fram yfir miðja öldina en fyrst um sinn er líklegt að breyting árstíðasveiflu verði víða greinilegri en aukning afrennslis.

Rannsóknir á sjávarstöðubreytingum við Ísland benda til þess að sjávarstaða hafi hækkað meira á síðustu 500 árum en á 1500 árum þar á undan. Landris og landsig útskýra að nokkru þær sjávarstöðubreytingar sem nú verður vart við ströndina en langtímamælingum á sjávarstöðu hér á landi er mjög ábótavant. Mælingar sýna að landsig er víða við ströndina vestanlands og fyrir miðju Norðurlandi en inn til landsins er landris. Frá Austurlandi og vestur eftir suðurströndinni er landris, ákafast suðaustanlands. Þar sem land rís hraðast mun afstætt sjávarmál falla á öldinni.

Betri þekking er nú á svæðisbundnum breytingum á sjávarstöðu en þegar síðasta skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar var rituð. Bráðnun jökla hefur í för með sér breytingu á þyngdarsviði næst jöklunum sem dregur úr hækkun sjávar þar. Hækkun sjávarstöðu fjær íshvelinu verður því meiri. Bráðnun Grænlandsjökuls dregur úr hækkun sjávar hér við land, bráðnun á Suðurskautslandinu hækkar sjávarstöðu við landið.

Líklegt er að hækkun sjávarstöðu hér við land verði á bilinu 30–40% af hnattrænni meðalhækkun. Óvissumörk eru rífleg og hefur bráðnun íss á Grænlandi og Suðurskautslandi ráðandi áhrif á þetta hlutfall, aukið massatap á Suðurskautslandinu gæti bætt tugum sentímetra við hækkun hér við land á öldinni.

Óafturkræft hrun á jöklum á Suðurskautslandinu kann að vera hafið. Það getur á nokkrum öldum valdið margra metra hækkun á sjávarborði heimshafanna. Langtímahækkun sjávarstöðu virðist því óumflýjanleg víðast hvar við ströndina nema á Suðausturlandi.

Súrnun sjávar

Súrnun hafsins er staðreynd, staðfest með beinum mælingum. Tenging súrnunar sjávar við losun gróðurhúsalofttegunda er byggð á traustum fræðilegum grunni. Súrnun sjávar hefur nú þegar haft neikvæð áhrif á lífríki hafsins og skelfiskrækt. Til þess að komast hjá stórfelldum breytingum á lífríki og vistkerfum í höfunum þarf að minnka losun koltvíoxíðs stórlega. Framtíð hafsins ræðst af því hvernig losun manna á koltvíoxíði verður háttað og til hvaða aðgerða verður gripið fyrr en síðar.

Vegna aðstæðna í hafinu er súrnun sjávar miklu örari hér nyrst í Atlantshafi en að jafnaði í heimshöfunum. Því er líklegt að sjórinn hér við land hafi súrnað meira eftir iðnvæðingu heldur en heimshöfin að jafnaði. Örastar breytingar eru í yfirborði sjávar og líklegt er að náttúruleg árstíðasveifla á sýrustigi í yfirborði sjávar sé komin út fyrir það svið sem lífríkið hafði aðlagast fyrir iðnvæðingu. Súrnunin er hægari í dýpri sjávarlögum en nær til botns á 1800 m dýpi þar sem súrnun er vöktuð í Íslandshafi.

Kalkmyndandi lífríki er talið einkar viðkvæmt fyrir áhrifum súrnunar. Vegna eiginleika sjávar og lágs sjávarhita er kalkmettunarstig í hafinu við Ísland og í Norðurhöfum almennt náttúrulega lágt. Við þessar aðstæður leiðir súrnun fyrr til undirmettunar kalks heldur en að jafnaði í heimshöfunum.

Líklegt er því að neikvæð áhrif súrnunar á lífríki og vistkerfi sjávar komi fyrr fram á íslenskum hafsvæðum en að jafnaði í heimshöfunum. Áhrif á efnahagslega mikilvægar tegundir geta birst óvænt eins og gerðist í ostrurækt við Kyrrahafsstrendur N-Ameríku. Áhrifin geta komið fram, án þess að eftir því sé tekið, hjá tegundum í lífríkinu sem eru ekki nýttar.

Breytingar á lífríki og ástandi sjávar

Breytileiki í hafi umhverfis Ísland, bæði milli ára og áratuga, tengist víðáttumiklum veðurfarssveiflum á Norður-Atlantshafi. Síðustu tvo áratugi hafa hiti og selta sjávar umhverfis Ísland oftast verið um og yfir meðaltali.

Breytingar á ástandi sjávar hafa á undanförnum áratugum haft veruleg áhrif á vistkerfi sjávar. Líklegt er að breyttar umhverfisaðstæður skýri að hluta breytingar í stofnstærð og útbreiðslu sumra uppsjávarfiska, sérstaklega loðnu, makríls og sandsílis. Loðnan hefur hopað og haldið sig lengra norður í höfum og vestar yfir landgrunni Austur-Grænlands. Jafnframt hefur dregið úr nýliðun og stofninn minnkað. Á árunum 2010–2016 hafa um 1–3 milljónir tonna af makríl verið mæld innan íslenskrar lögsögu ár hvert og afli aukist úr um 40 þús. tonnum í um 150 þús. tonn. Stofnar suðlægari þorskfiskategunda (t.d. ýsu, spærlings og lýsu) hafa stækkað og útbreiðslusvæði þeirra hliðrast til norðurs. Margir minni stofnar og flækingar af suðrænum uppruna, sem áður fundust helst undan suðurströndinni, hafa á undanförnum árum einnig veiðst í auknum mæli

Mynd 1.4 Á liðnum árum hefur útbreiðsla loðnu breyst og hún haldið sig lengra norður í höfum og vestar yfir landgrunni Austur-Grænlands en fyrr. Breytingar í stofnstærð og útbreiðslu sumra uppsjávarfiska, sérstaklega loðnu, makríls og sandsílis, má líklega að hluta rekja til breytinga á umhverfisaðstæðum. (Ljósmynd, Svanhildur Egilsdóttir.)

á landgrunninu fyrir norðan land. Samfara hlýindum síðustu tveggja áratuga hafa 34 áður óþekktar fisktegundir veiðst innan 200 mílna lögsögunnar, þar af 8 frá útkomu síðustu skýrslu vísindanefndar (2008).

Á hlýindatímabilinu sem hófst rétt fyrir aldamót hefur hrygningarstofn þorsks stækkað stöðugt og hefur hann ekki verið stærri í um 40 ár. Samanburður á stofnvísitölum fyrir árin 1985–1996 (kalt tímabil) annars vegar og 2002–2015 (hlýtt tímabil) sýnir hins vegar að miðja útbreiðslu hefur aðeins í litum mæli hliðrast inn á kaldari svæði. Litlar breytingar í útbreiðslu og nýliðun styðja þá kenningu að við Ísland sé þorskurinn á kjörsvæði sínu og því vel aðlagaður til að takast á við umhverfisbreytingar sem átt hafa sér stað.

Breytingar sem hafa orðið á útbreiðslu og fjölda nokkurra hvalategunda í hafinu kringum Ísland á liðnum árum eru taldar tengjast breyttum fæðuskilyrðum á landgrunninu við Ísland. Bæði landsel og útsel hefur fækkað við Ísland á undanförnum árum og kann það einnig að tengjast breyttum fæðuskilyrðum. Fækkun hefur orðið í flestum sjófuglastofnum og líklega stafar hún af breyttum skilyrðum, þ.e. breytingum í stofnum uppsjávarfiska (loðnu, sandsíli) og dýrasvifs.

Breytingar sem á undanförnum árum hafa átt sér stað í vistkerfi sjávar má að verulegu leyti rekja til hlýinda síðustu áratuga. Enn sem komið er er mjög erfitt að aðgreina náttúrulegan breytileika frá áhrifum hnattrænnar hlýnunar í hafinu umhverfis Ísland. Vistkerfi sjávar bregst við hlýnun óháð orsökum.

Breytingar á lífríki á landi

Loftslagsbreytingar, hlýnun og aukinn styrkur CO_2 í andrúmsloftinu hafa mikil áhrif á lífsskilyrði plantna og dýra á landi. Aukinn styrkur CO_2 hefur áhrif á framleiðni plantna sem lýsir sér m.a. í meiri vexti þeirra. Loftslagsbreytingar hafa áhrif á ýmsa aðra umhverfisþætti sem hafa síðan áhrif á vistkerfi, valda breytingum á búsvæðum plantna, dýra og fjölbreytni.

Tilraunir hafa sýnt að viðbrögð gróðurlenda við hlýnun eru misjöfn. Í fjalldrapamóum leiðir hlýnun til aukins vaxtar viðarkenndra tegunda á kostnað mosa. Tilraunir í misheitum lækjum sýna að með hlýnun jókst magn þörunga og blágrænna baktería á botni, innflæði næringarefna jókst og breytingar urðu í fæðuvef og vistkerfi lækjanna. Heildarframframleiðni, þekja og lífmassi vatnaplantna og blágrænna baktería jókst með hlýnun en fjölbreytni þörunga minnkaði. Þéttleiki vatnadýra í flestum fæðuþrepum varð meiri við hlýnun en það dró úr fjölbreytileika samfélaga þeirra. Í samanburði við kaldari læki voru því tegundirnar færri þótt framleiðnin væri meiri. Þetta veldur áhyggjum um áhrif loftslagsbreytinga á lífríki ferskvatns á Íslandi.

Tilraunir sem nýta jarðvegshlýnun frá heitum berggrunni til að rannsaka áhrif hlýnunar á þurrlendisvistkerfi sýna að vistkerfin hafa umtalsvert þol gagnvart hlýnun, um rúmlega 5°C, en þegar hlýnunin fer upp fyrir þau mörk þá „hrynja“ þau hins vegar.

Rannsóknir á gróðurfarsbreytingum á Íslandi síðustu

Mynd 1.5 Breytingar á umhverfisþáttum, þá sérstaklega fæðuskortur vegna hruns sandsílastofnsins, hafa komið hart niður á mörgum sjófuglategundum. Krían hefur af þeim sökum átt undir högg að sækja hér landi mörg undanfarin ár. (Ljósmynd: Trausti Baldursson.)

áratugi hafa leitt í ljós töluvert mikla aukningu gróðurs á landsvísu frá því um og fyrir 1990. Helstu ástæður þessarar aukningar eru taldir nokkrir samverkandi þættir, s.s. minni sauðfjárbeit á afréttum og láglendi og hlýnun sem eykur vöxt gróðurs en leiðir einnig til hops jökla og þ.a.l. landnáms gróðurs á nýjum svæðum.

Merkja má áhrif hlýnunar á margar fuglategundir á Íslandi, útbreiðslumörk breytast og breytingar verða á búsvæðum. Tíðni landnáms nýrra fuglategunda hér á landi jókst þegar leið á 20. öldina, en haftyrðill, sem er hánorræn tegund, hætti að verpa á landinu. Komu- og varptími sumra farfugla breyttist í takt við hlýnun, en breyttur varptími getur haft áhrif á afkomu margra fuglategunda. Varpfuglum í sjófuglabyggðum við norðanvert Atlantshaf hefur fækkað verulega frá síðustu aldamótum og flestir sjófuglastofnar virðast fara minnkandi, en hérlendis hafa slíkar breytingar verið sérstaklega áberandi síðustu 10–15 árin.

Áhrif loftslagsbreytinga á íslensk spendýr eru í flestum tilvikum óbein og tengjast fyrst og fremst breytingum á fæðuframboði. Umhverfisbreytingar hafa áhrif á sjávarlífverur sem geta skilað sér í breytingum á fæðuvali spendýra. Gera má ráð fyrir að fækkun í sjófuglastofnum hafi áhrif á afkomu refa, sérstaklega á þeim svæðum þar sem sjófuglar eru stór hluti fæðunnar.

Aukið og breytt gróðurfar samhliða hlýnun og skógrækt hefur leitt til breytinga á útbreiðslu smádýra (skordýra og annarra hryggleysingja) og víða sjást merki um landnám nýrra tegunda.

Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki í ferskvatni eru flókin og mismunandi eftir gerð straum- og stöðuvatna og aðstæðum á hverjum stað. Snjóbráðnun hefur kælingaráhrif á ár og læki en með hlýnun styttist sá tími sem ís hylur vötn. Hlýnun vatns í lækjum og ám mun í heildina leiða til aukinnar frumframleiðni, aukins vaxtarhraða en minni fjölbreytileika lífvera. Búast má við að kulvísum tegundum fjölgi en kulsæknar tegundir lífvera láti undan síga og útbreiðsla þeirra dragist saman. Rekja má mikinn samdrátt í íslenska bleikjustofninum til hlýnunar.

Hlýnandi loftslag mun auðvelda ýmsum tegundum dýra og plantna, þ.m.t. lífverum sem valda sjúkdómum, s.s. sníkjudýrum og örverum, að nema hér land og einnig hafa áhrif á útbreiðslu framandi ágengra tegunda sem fyrir eru í landinu, sem eykur skaðsemi þeirra. Mikilvægt er að fyllstu varúðar sé gætt við innflutning, notkun og dreifingu á framandi lífverum. Mótvægisaðgerðir vegna loftslagsbreytinga verða að taka tillit til verndunar líffræðilegrar fjölbreytni.

Áhrif á ræktarland og landbúnað

Innlendar rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á bæði ræktuð og náttúruleg landvistkerfi hafa verið mjög brotakenndar hingað til og því eru enn stór göt í vísindalegri þekkingu sem hamla getu til að gera traustar spár um áhrif í framtíðinni.

Nýlegar rannsóknir sýna þó að vaxtartími úthaga færist fram um 16 daga fyrir hverja 1°C hækkun í meðaljarðvegs- og lofthita vormánaða. Þá hækkaði meðalgrænkustuðull (e. NDVI) Íslands um 80% milli 1982 og 2010 og aukin gróska í úthaga hefur væntanlega

Mynd 1.6 Birkiskógar og kjarr hafa aukið útbreiðslu sína um 9% frá því um 1990. (Ljósmynd: Bjarni Diðrik Sigurðsson.)

aukið beitarþol landsins á mörgum svæðum á síðustu áratugum. Tilraunir frá 1987 til 2014 sýna að kornuppskera var 134% meiri á hvern hektara í hlýjustu árunum miðað við þau köldustu.

Margar nýjar rannsóknir sýna að bæði ræktaðir og náttúrulegir skógar vaxa nú umtalsvert betur en fyrir 1990. Flatarmál birkiskóga og birkikjarrs jókst um 9% á landsvísu með sjálfsáningu frá 1989, en slík aukning í skógarþekju á sér stað víða á Norðurheimskautssvæðinu. Í hlýindum síðustu áratuga jókst tíðni landnáms nýrra meindýra sem eru skaðleg fyrir trjárækt en skemmdirnar eru enn litlar á landsvísu miðað við vaxtaraukningu skóga á sama tíma.

Hlýrri sumur og lengri vaxtartími þýða að uppskera af hverri einingu ræktarlands mun væntanlega aukast í hefðbundnum landbúnaði, garðyrkju og skógrækt, en vetrarhlýindi og vorhret munu áfram takmarka ræktun fjölærra eða vetrareinærra fóðurjurta og skógartrjáa sem koma úr landrænna loftslagi nágrannalandanna. Þó að uppgræðslustarf verði almennt auðveldara í hlýnandi veðurfari þá þarf umtalsverð inngrip og/eða langan tíma til að endurheimta hnignuð vistkerfi landsins.

Sumareinærar tegundir, svo sem bygg, hafrar og einær nepja, einær repja og sumarhveiti, geta haslað sér völl hér á næstu áratugum. Innri breytileiki veðurfars þýðir að kalár og búsifjar í jarðrækt, skógrækt og garðyrkju munu áfram eiga sér stað á næstu áratugum. Auknir þurrkar yfir vaxtartímann vegna meiri breytileika í úrkomu verða hugsanlega meira vandamál í ræktun hér en verið hefur á síðustu áratugum.

Þó að hlýnun hér á norðurslóðum fylgi almennt aukin gróska þá eru einnig í náttúrunni ýmis ferli sem hlýnun og/eða gróðurbreytingar geta magnað og haft mikil og óvænt áhrif á bæði ræktarland og útjörð. Dæmi sem eru þegar farin að koma í ljós hérlendis eru aukin tíðni skordýraplága, breytingar á fartíma og beitarhegðun gæsa og álfta, og óvenju-stórir gróðureldar.

Brýnt er að auka rannsóknir á samspili loftslags og landnýtingar, þannig að traustari grunnur fáist til að laga sjálfbæra nýtingu að breyttum aðstæðum.

Aðlögun að áhrifum loftslagsbreytinga

Aðlögun að afleiðingum loftslagsbreytinga verður ekki umflúin. Innan alþjóðasamfélagsins er mikið fjallað um aðlögun og gerð er krafa um að aðilar að Parísar-samkomulaginu geri áætlanir um hvernig bregðast eigi við afleiðingum loftslagsbreytinga og standi skil á áætlunum.

Í nágrannalöndunum hefur verið lögð áhersla á að aðlögun skuli byggð á haldbærum rannsóknum og þekkingaröflun. Þar hafa áhrif á ólíka geira samfélagsins verið skoðuð og reynt að meta hversu viðkvæmir þeir séu gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga. Meðal annars hefur tjónnæmi tengt vatni, orku, sjávarauðlindum, landbúnaði og samgöngum verið kannað. Sem dæmi

Mynd 1.7 Greining á gervihnattamyndum sýnir að meðalgrænkustuðull hækkaði verulega milli 1982 og 2010. (Ljósmynd: Bjarni Diðrik Sigurðsson.)

um ógnir sem fjallað hefur verið um má nefna aukna úrkomuákefð og vaxandi illviðratíðni, hækkun sjávarborðs, hlýnun, áhrif á grunnvatn og óbein áhrif loftslagsbreytinga á loftmengun og líffræðilega fjölbreytni.

Erlendis er algengt að áhættustýringu sé beitt við stefnumótun og framkvæmd aðlögunar, sérstaklega hvað varðar ýmsa náttúruvá sem loftslagsbreytingar kunna að hafa áhrif á. Einnig er algengt að lögð sé áhersla á vistvænar lausnir við aðlögun, sérstaklega í tengslum við skipulagsmál.

Þar til nýlega var yfirleitt fjallað um aðlögun og mótvægisaðgerðir til þess að draga úr losun gróðurhúsaloftegunda sem aðskilin viðbrögð, en á síðustu árum hefur það breyst því oft eru veruleg samlegðaráhrif milli aðlögunar annars vegar og mótvægisaðgerða hins vegar. Sem dæmi má nefna að *grænar lausnir* við flóðavarnir geta stuðlað að kolefnisbindingu. Þá er mikilvægt að tryggt sé að ekki sé ráðist í mótvægisaðgerðir sem dragi úr aðlögunarhæfni þjóðfélaga og öfugt.

Á Íslandi hefur formleg stefnumótun um aðlögun að loftslagsbreytingum á vegum stjórnvalda verið takmörkuð, en einstaka fyrirtæki og stofnanir hafa þó mótað sér stefnu. Sem dæmi má nefna Landsvirkjun og Vegagerðina. Þá hafa sveitarfélög, svo sem Reykjavíkurborg, mótað sér loftslagsstefnu þar sem meðal annars er fjallað um aðlögun að loftslagsbreytingum.

Samfélagslegir innviðir og atvinnuvegir

Þær takmörkuðu rannsóknir sem farið hafa fram á áhrifum loftslagsbreytinga á fráveitur og ofanvatnskerfi sýna þörf á umtalsverðri aðlögun. Loftslagsbreytingar kunna að hafa áhrif á eftirspurn, framboð og gæði vatns, en gera þarf umfangsmeiri rannsóknir og tryggja bætt eftirlit á þessu sviði.

Hækkuð sjávarstaða og aukin ákefð úrkomu gætu valdið meira álagi á fráveitukerfi. Í nágrannalöndum hafa viðmiðunarreglur fyrir hönnun fráveitukerfa verið endurskoðaðar vegna þessa. Hér á landi vantar gögn fyrir endurskoðun reglna og mælanet úrkomu í þéttbýli er ófullnægjandi.

Rannsóknir benda til þess að hlýnun geti minnkað eftirspurn eftir heitu vatni, e.t.v. um u.þ.b. 5% fyrir hverja gráðu. Eftirspurn eftir raforku mun aukast, m.a. vegna rafmagnsvæðingar samgangna en bæta þarf dreifinet og álagsstýra með verðlagningu.

Í orkugeiranum er veruleg aðlögunarþörf til að mæta aukningu í nýtanlegu vatnsafli. Rannsóknir benda til að á tímabilinu 2010–2050 muni nýtanlegt vatnsafl aukast um 27–84% í einstaka virkjuðum jökulám. Í heildina, fyrir núverandi orkukerfi, er aukningin um 20%, en án endurhönnunar mun kerfið einungis geta nýtt 38% af aukningunni.

Líklegt er að loftslagsbreytingar hafi áhrif á uppbyggingu og viðhald vegakerfisins sem og þjónustuþörf,

t.d. minni þörf á snjómokstri en aukinni þörf á hálkuvörnum. Verði veður rysjóttara þurfa vegir að standast slíkt álag.

Siglingar á norðurslóðum eru líklegar til að aukast en óvissa er um áhættu sem og ávinning þeirra fyrir Ísland.

Hlýnun síðustu áratuga hefur haft umtalsverð áhrif á ræktun jarðargróða á Íslandi. Að stórum hluta eru þetta jákvæð áhrif, en þó hafa einnig nokkur neikvæð áhrif komið í ljós, eins og áður hefur verið minnst á. Þannig hefur álag af sníkjudýrum á gróður aukist og einnig urðu þurrkavandamál í kornrækt á sendnum jarðvegi á ákveðnum stöðum hérlendis á síðasta áratug. Aukinni framleiðni úthaga og þurrkum gæti svo fylgt aukin hætta á gróðureldum. Einnig er líklegt er að framleiðsla ýmissa fóður- og fæðuplantna aukist með hlýnandi loftslagi.

Íslenskur sjávarútvegur hefur áður brugðist skjótt við breytingum í umhverfisaðstæðum og ætti því að ráða við hægfara breytingar lífríkis samfara loftslagsbreytingum. Áhrif súrnunar sjávar á lífríki hafsins kunna að koma fyrr fram á íslensku hafsvæði en annars staðar. Líklegt er að nýtanlegar auðlindir sjávar muni betur standa af sér áhrif loftslagsbreytinga ef álagsþáttum tengdum fiskveiðum, raski á búsvæðum og mengun verður haldið í lágmarki.

Fiskeldi er vaxandi atvinnugrein, en bæði súrnun og hlýnun geta haft áhrif á framleiðslu greinarinnar. Einnig eru óbein markaðstengd áhrif loftslagsbreytinga hugsanleg, bæði á fóður- og afurðaverð.

Í heildina benda rannsóknir á efnahagslegum og samfélagslegum áhrifum loftslagsbreytinga á ferðamennsku til jákvæðra efnahagslegra áhrifa í kaldari löndum, a.m.k. til skamms tíma, en fáar slíkar rannsóknir er að finna sérstaklega fyrir Ísland.

Á alþjóðavísu hefur verið nokkuð fjallað um tryggingar sem leið til að stýra áhættu vegna loftslagsbreytinga. Viðlagatrygging Íslands veitir vátryggingavernd gegn náttúruhamförum, m.a. áhættuþáttum sem loftslagsbreytingar geta haft áhrif á, svo sem ofanflóð og vatnsflóð. Almenn vátryggingarfélög bjóða tryggingar gegn foktjóni og geta veitt viðskiptavinum mikilvæga ráðgjöf um mögulega áhættu á eignatjóni vegna storma og úrkomu. Lagaumhverfi og regluverk skýrir ekki nægilega vel ábyrgð ólíkra aðila sem skapar hættu á að almannafé sé notað til að greiða fyrir áhættu vegna vanhannaðra eða illa staðsettra mannvirkja.

Líklegt er að loftslagsbreytingar hafi ýmsan kostnað í för með sér fyrir íslenskt þjóðfélag, bæði vegna mótvægisaðgerða og til að standa straum af aðlögun. Þá getur komið til þess að kaupa þurfi losunarheimildir náist ekki markmið um samdrátt í losun. Alþjóðasamfélagið gerir orðið kröfur til iðnríkja um fjármögnun aðgerða til þess að stemma stigu við loftslagsbreytingum eða aðlagast þeim, m.a. með framlögum í *Græna loftslagssjóðinn*. Talið er að um 26 milljónir manna þurfi árlega að flytja vegna umhverfisbreytinga, s.s. flóða, þurrka og annarra náttúruhamfara. Loftslagsbreytingar geta því leitt til búferlaflutninga frá þeim svæðum verst verða úti, til svæða sem standa betur.

Heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna um sjálfbæra þróun tengjast loftslagsbreytingum beint og óbeint, en álag vegna loftslagsbreytinga gerir þjóðum erfiðara fyrir að ná þessum markmiðum. Stefnumótun í þessum málaflokki þarf því að taka tillit til áhrifa loftslagsbreytinga.

Náttúruvá, áhættustýring og heilsa

Nokkur reynsla og þekking er hér á landi í áhættumati og viðbrögðum við náttúruvá. Loftslagsbreytingar geta aukið áhættu fyrir sumar tegundir náttúruvár. Eðlilegast er að viðbrögð við aukinni áhættu verði skipulögð í tengslum við áhættustýringu á núverandi vá og aðgerðir til að mæta henni efldar. Meðal áhættuþátta sem huga þarf að eru tíðni og umfang jökulhlaupa og flóða frá jaðarlónum, ofanflóð – sérstaklega vegna bráðnunar sífrera í fjallendi – eldgosahætta vegna aukinnar kvikuframleiðslu undir landinu, gróðureldar og sjávarflóð. Reynslan sýnir að hægt er að ná miklum árangri við að draga úr áhættu. Skipuleg áhættustýring, með formlegu áhættumati, viðbragðsáætlunum og aðgerðum til þess að draga úr tjóni, er vænlegasta leiðin til þess að mæta breytingum á áhættu.

Mikilvægt er að farið sé með gát þegar byggð er skipulögð á lágsvæðum og tekið sé tillit til aukinnar flóðahættu. Á áhættusvæðum ætti að forðast að setja í kjallara spennistöðvar, viðkvæm kerfi eða geymslur sem tryggja eiga örugga varðveislu verðmæta.

Loftslagsbreytingar munu hafa í för með sér

Mynd 1.8 Í september 2012 féll skriða úr 750 m hæð í Móafellshyrnu í Fljótum. Myndin sýnir klump af freraurð samlímda með ís sem kom niður með skriðunni. Með bráðnun sífrera í fjallendi eykst hætta á skriðuföllum. (Ljósmynd: Jón K. Helgason.)

breytingar á aftakaveðrum. Líklegt er að úrkomuákefð aukist á öldinni og því munu rigninga- og leysingaflóð taka breytingum. Erfitt er að segja fyrir um hvernig tíðni hvassviðra á Íslandi muni breytast á öldinni, en árlegur fjöldi hvassviðrisdaga á landinu sýnir verulegar sveiflur milli áratuga.

Hækkandi sjávarborð eykur óhjákvæmilega hættuna á sjávarflóðum. Langtímamælingum á sjávarstöðu við Ísland er ábótavant.

Búast má við að smitleiðir breytist, m.a. vegna breytinga á tegundasamsetningu skordýra, og líklegt er að aukið magn frjókorna og myglugróa geti haft neikvæð áhrif á heilsufar.

Miðað við núverandi styrk heilbrigðiskerfisins bendir ekkert til annars en að það myndi ráða við álag vegna loftlagsbreytinga. Viðbrögð við heilsufarsáhrifum loftlagsbreytinga kunna að fela í sér tækifæri í bættri lýðheilsu til framtíðar.

Ábendingar um aðgerðir og skort á þekkingu

Í síðustu skýrslu Vísindanefndar árið 2008 var bent á að umtalsverðar afleiðingar loftslagsbreytinga á Íslandi verði ekki umflúnar. Þetta yki þörf á vöktun og rannsóknum á ýmsum þáttum náttúrufars. Ljúka þyrfti öflun grunnupplýsinga um náttúrufar landsins og efla langtímavöktun á umhverfisþáttum og lífríki hafs og lands. Þá var bent á að vöktun er langtímaverkefni sem krefst stöðugra fjárveitinga og hentar ekki til fjármögnunar úr samkeppnissjóðum.

Síðan skýrslan kom út hefur dregið úr almennri vöktun á náttúrufari landsins, og gildir það jafnt um veðurathuganir sem og vöktun á lífríki lands og sjávar. Vísindanefnd telur mikilvægt benda á að skipuleg viðbrögð við loftslagsbreytingum þarf að byggja á haldbærum rannsóknum og þekkingaröflun.

Margvíslegar rannsóknir hafa þegar verið gerðar sem gefa vísbendingar um áhrif loftslagsbreytinga á ýmsa náttúruþætti. Engin áætlun er þó til um vöktun á lykilþáttum íslenskrar náttúru. Sérstaklega vantar rannsóknir þar sem tengsl við loftslagsbreytingar eru viðfangsefni, en ekki er reynt að skýra út orsakasamhengi breytinga á umhverfisþáttum og náttúrufari eftir á. Bæta þarf vöktun sérstaklega á þeim þáttum sem líklegastir eru taldir til að breytast.

Þó að áhrif hlýnunar á jarðargróða séu veruleg hafa áhrif hlýnunar á búsmala og á jarðrækt lítið verið rannsökuð. Sárlega vantar rannsóknir á áhættuþáttum breyttra búhátta, svo sem aukinnar korn- og skógræktar.

Skýringar á orsakarsamhengi umhverfisþátta og breytinga í vistkerfi sjávar kalla á mun ítarlegri rannsóknir en til þessa. Mikilvægt er á næstu árum og áratugum að vakta og skrá hvernig vistkerfi Íslandsmiða bregst við umhverfisbreytingum, bæði súrnun sem og sveiflum í hita. Grunnþekking á súrnun úthafsins við

Ísland er nokkuð góð. En aðstæður á landgrunni og strandsvæðum eru fjölbreytilegar. Til að verjast efnahagslega hastarlegum áhrifum súrnunar sjávar er ráðlegt að efla strax rannsóknir með það að markmiði að bera kennsl á hafsvæði, vistkerfi og tegundir í lífríkinu þar sem líklegt er að áhrif hennar komi fram.

Bráðnun jökla mun hafa áhrif á landris og sjávarstöðu. Mikilvægt er að massatap íslenskra jökla verði endurmetið og áhrif þess á þyngdarsviðið reiknað í sjávarstöðulíkani. Leggja þarf mat á líklegar breytingar á sjávarflóðahættu.

Efnahagsleg og samfélagsleg áhrif loftslagsbreytinga á hina ýmsu geira íslensks samfélags hafa lítt verið rannsökuð, svo sem möguleg áhrif á sjávarútveg, landbúnað og aðra landnýtingu, ferðaþjónustu og tryggingargeirann. Mikilvægt er að auka rannsóknir á þessum þáttum. Sérstaklega er mikilvægt að leggja áherslu á þverfaglegar rannsóknir á þessu sviði hérlendis, þar sem samspil mismunandi þátta er oftar en ekki mikilvægara en hin beinu áhrif loftslagsbreytinga á hvern þátt ein og sér.

Auk þess að bæta rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga er óhjákvæmilegt að lögð verði meiri áhersla á aðlögun að loftslagsbreytingum.

Bæta þarf mat á líklegum áhrifum, þörf á aðlögun og einnig meta hvaða aðgerðir séu líklegastar til að skila árangri.

Vinna þarf formlega aðlögunaráætlun fyrir Ísland eins og gert hefur verið í nágrannalöndum og beita þarf áhættustýringu, áhættumati, viðbragðsáætlunum og aðgerðum þar sem það á við.

Að auki þarf að ráðast í heildstæða stefnumótun í aðlögun að loftslagsbreytingum þar sem horft er á aðlögun í samhengi við mótvægisaðgerðir til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda.

Aðgreina þarf innri- og ytri breytiþætti, annars vegar þær breytingar sem verða á íslenskri náttúru og afleiðingar þeirra en hins vegar þær breytingar sem leggjast munu af þunga á þjóðfélagið utanfrá vegna loftslagsbreytinga annars staðar. Sömuleiðis er mikilvægt að tekið sé tillit til breytinga á þjóðfélagi og atvinnuvegum í áhættumati.

Meta þarf áhrif loftslagsbreytinga á ólíka flokka náttúruvár, s.s. ofanflóða gróðurelda, flóð vegna aftakaúrkomu og hækkandi sjávarstöðu. Mikilvægt er að bæta mælanet úrkomu í þéttbýli og endurskoða viðmiðunarreglur fyrir hönnun fráveitukerfa.

Breyta þarf fyrirkomulagi mælinga á sjávarstöðubreytingum og tryggja að mæliraðir séu nýtilegar til þess að fylgjast með langtímabreytingum. Æskilegast er að langtímamælingar á sjávarstöðu væru gerðar á nokkrum stöðum á landinu og samfelldar landhæðarbreytingar mældar á sama stað með GPS.

Mikilvægt er að við skipulag á lágsvæðum sé tekið tillit til líklegrar hækkunar sjávarborðs og tryggja þarf eftirfylgni með reglum og að ábyrgð ólíkra aðila sé vel skilgreind.

Ráðast þarf í heildstæða greiningu á sambandi mögulegra mótvægisaðgerða og aðlögunar á Íslandi, m.a. með tilliti til bindingarmöguleika með endurheimt gróðurþekju og votlendis.

2 Inngangur

Um þessar mundir eru um tvær aldir síðan vísindalegur skilningur á áhrifum lofthjúpsins á hitafar við yfirborð jarðar tók að mótast. Upp úr miðbiki 19. aldar varð ljóst að vissar lofttegundir raska varmageislun frá jörðinni þannig að neðri hluti lofthjúpsins og yfirborð jarðar eru hlýrri en ella væri. Þessi áhrif eru kölluð *gróðurhúsaáhrif* og lofttegundirnar *gróðurhúsalofttegundir*. Án þeirra væri meðalhiti jarðar undir frostmarki og hún vart lífvænleg. Í lok 19. aldar komu fram fyrstu hugmyndir um að bruni jarðefnaeldsneytis (kol, olía og jarðgas) myndi losa nægilegt magn koldíoxíðs (CO_2) til lofthjúpsins til þess að það hefði áhrif á loftslag jarðar. Það var ekki fyrr en á síðari hluta 20. aldar sem vísindasamfélagið áttaði sig á því að óheft losun gróðurhúsalofttegunda gæti valdið verulegum breytingum á loftslagi.

Samfelldar mælingar á styrk CO_2 í lofthjúpnum hafa staðið síðan 1957. Á þeim tíma hefur styrkur CO_2 aukist úr 315 ppm í rúmlega 400 ppm og eykst um rúmlega 2 ppm á ári. Á sama tíma er hlýnun jarðar veruleg og síðustu áratugi hefur hlýnunin að jafnaði numið u.þ.b. 0.18°C á áratug, þó að sveiflur séu milli ára og áratuga. Af tíu hlýjustu árum síðan samfelldar mælingar hófust eru öll á nýhafinni öld nema eitt, sem var við lok 20. aldar. Önnur afleiðing aukningar CO_2 í lofti er aukin upptaka þess í hafi sem veldur súrnun sjávar.

Hlýnun jarðar hefur þegar haft merkjanleg áhrif víða um heim og ljóst er að frekari áhrif loftslagsbreytinga á öldinni kunna að verða veruleg. Til að bregðast við þessu hafa verið gerðir alþjóðlegir samningar um takmarkanir á losun gróðurhúsaloftegunda. Þó að þeir muni draga úr áhrifum loftslagsbreytinga þurfa samfélög að aðlagast þeim áhrifum loftslagsbreytinga sem kunna að verða.

Ísland fer ekki varhluta af þeim hnattrænu loftslagsbreytingum sem nú eru að verða og um nokkra hríð hefur verið ljóst að fylgjast þarf með umfangi og afleiðingum loftslagsbreytinga hér á landi. Vegna þessa hefur Umhverfisráðuneytið í tvígang látið vinna skýrslur um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi. Þær voru unnar af *Vísindanefnd um loftslagsbreytingar* og kom sú fyrsta út árið 2000 og sú næsta árið 2008.

Árið 2014 var farið að huga að ritun næstu skýrslu og var Vísindanefnd um loftslagsbreytingar skipuð haustið 2015 aðilum frá Veðurstofu Íslands, Háskóla Íslands, Landbúnaðarháskóla Íslands, Hafrannsóknastofnun og Náttúrufræðistofnun Íslands. Nefndina skipuðu:

Halldór Björnsson, Veðurstofu Íslands, formaður.
Bjarni Diðrik Sigurðsson, Landbúnaðarháskóla Íslands.
Brynhildur Davíðsdóttir, Háskóla Íslands.
Jón Ólafsson, Háskóla Íslands.
Ólafur S. Ástþórsson, Hafrannsóknastofnun.
Trausti Baldursson, Náttúrufræðistofnun Íslands.
Trausti Jónsson, Veðurstofu Íslands.

Ritari nefndarinnar var Snjólaug Ólafsdóttir, umhverfisverkfræðingur hjá Andrými ráðgjöf.

Umhverfisráðuneytið fól nefndinni að taka saman rannsóknir um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi, um súrnun sjávar og einnig um stöðu og þörf á aðlögun að loftslagsbreytingum.

Árið 2016 stóð nefndin fyrir átta málstofum um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra. Til þeirra var boðið þeim vísindamönnum sem hér á landi hafa fengist við rannsóknir sem tengjast loftslagsmálum, sem og fulltrúum helstu stofnana og fyrirtækja sem efninu tengjast. Eftirfarandi aðilar fluttu erindi á þessum málstofum eða lögðu nefndinni til efni á annan hátt: Aðalsteinn Sigurgeirsson, Árni Einarsson, Ásdís Hlökk Theodórsdóttir, Áslaug Geirsdóttir, Áslaug Helgadóttir, Benedikt G. Ófeigsson, Björn Erlingsson, Björn Traustason, Borgþór Magnússon, Daði Már Kristófersson, Davíð Egilson, Edda Sif Aradóttir, Edward Huijbens, Emma Eyþórsdóttir, Erling Ólafsson, Erpur Snær Hansen, Ester Rut Unnsteinsdóttir, Finnur Ingimarsson, Finnur Pálsson, Fjalarr Gíslason, Fjóla Jóhannesdóttir, Guðmundur Halldórsson, Guðni Guðbergsson, Guðni Þorvaldsson, Guðríður Helgadóttir, Gunnar Ólafur Haraldsson, Gunnar Þór Jóhannesson, Gunnar Sigurðsson, Haraldur Rafn Ingvarsson, Haraldur Sigurðsson, Hálfdán Ágústsson, Helgi Björnsson, Héðinn Valdimarsson, Hilmar Malmquist, Hlynur Óskarsson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Hrafnhildur Ævarsdóttir, Hrannar Smári Hilmarsson, Hrönn Egilsdóttir, Hrönn Hrafnsdóttir, Ingibjörg Jónsdóttir, Íris Þórarinsdóttir, Joan Nymand Larsen, Johannes T. Welling, Jónatan Hermannsson, Jóhann Þórsson, Jón Eiríksson, Jón Guðmundsson, Jón K. Helgason, Jón S. Ólafsson, Jón Örvar Bjarnason, Lára Jóhannesdóttir, Margrét Cela, Matthías S. Alfreðsson, Nikolai Nawri, Oddur Sigurðsson, Óðinn Þórarinsson, Óli Grétar Blöndal Sveinsson, Ragnar H. Þrastarson, Reynir Sævarsson, Sigrún Sigurgeirsdóttir, Sigurður Guðjónsson, Sigurður R. Gíslason, Sigurður Pétursson, Sigurður Sigurðarson, Skúli Þórðarson, Snorri Zóphóníasson, Sólveig Rósa Ólafsdóttir, Tinna Þórarinsdóttir, Tómas Grétar Gunnarsson, Tómas Jóhannesson, Úlfar Linnet, Vanda Úlfrún Liv Hellsing, Þorsteinn Sæmundsson, Þorsteinn Þorsteinsson, Þóra Árnadóttir, Þóra Katrín Hrafnsdóttir og Þórir Guðmundsson.

Drög að skýrslunni voru tilbúin sumarið 2017 og um haustið voru þau send út til ritrýni til þeirra sem áttu efni í skýrslunni eða höfðu sérþekkingu á efnisatriðum. Eftirfarandi tóku þátt í ritrýni skýrslunnar: Aðalsteinn Sigurgeirsson, Árni Jón Elíasson, Ásdís Hlökk Theódórsdóttir, Áslaug Geirsdóttur, Benedikt G. Ófeigsson, Björn Traustason, Edda Sif Aradóttir, Edward Huijbens, Einar Sveinbjörnsson, Emma Eyþórsdóttir, Erpur Snær Hansen, Finnur Pálsson, Gísli Víkingsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Guðmundur Halldórsson, Guðrún Nína Petersen, Guðríður Helgadóttir, Gunnar Þór Jóhannesson, Hálfdán Ágústsson, Héðinn Valdimarsson, Hilmar Malmquist, Hlynur Óskarsson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Hrund Ólöf Andradóttir, Hrönn Egilsdóttir, Hrönn Hrafnsdóttir, Hugi Ólafsson, Hulda Ragnheiður Árnadóttir, Ingibjörg Jónsdóttir, Ingibjörg Svala Jónsdóttir, Joan Nymand Larsen, Jóhann Þórsson, Jón Einar Jónsson, Jón S. Ólafsson, Jón Örvar Bjarnason, Kristín B. Ólafsdóttir, Lára Jóhannsdóttir, Oddur Sigurðsson, Reynir Sævarsson, Sigurður Sigurðarson, Skúli Þórðarson, Snorri Zóphóníasson, Sólveig Rósa Ólafsdóttir, Tinna Þórarinsdóttir, Tómas Jóhannesson, Úlfar Linnet, Vanda Úlfrún Liv Hellsing, Þorsteinn Sæmundsson, Þorsteinn Þorsteinsson, Þóra Árnadóttir, Þóra Ellen Þórhallsdóttir, Þórir Guðmundsson og Þórólfur Guðnason.

Guðrún Pálsdóttir las próförk og samræmdi málfar og Sigurlaug Gunnlaugsdóttir lagfærði ýmis atriði í próförk.

Vísindanefnd þakkar öllum þessum aðilum fyrir óeigingjarnt starf, án vinnu þeirra hefði ekki verið hægt að gera þessa skýrslu. Einnig þakkar nefndin Jórunni Harðardóttur framkvæmdastjóra og Árna Snorrasyni, forstjóra Veðurstofu Íslands, fyrir stuðning við verkefnið.

Efnistök nú eru að nokkru frábrugðin fyrri skýrslum. Sérstaklega er fjallað um súrnun sjávar og að auki er fjallað meira um áhrif loftslagsbreytinga á samfélagið,

innviði þess og atvinnuvegi en í fyrri skýrslum. Þá er sérstakur kafli um aðlögun að loftslagsbreytingum og að auki er kafli um náttúruvá og áhættustýringu. Þessi munur á efnistökum ræðst að nokkru af beiðni ráðuneytis, en ekki síður af því að þekkingu á þessum þáttum hefur fleygt fram frá útkomu síðustu skýrslu. Þrátt fyrir aukna þekkingu á undanförnum árum skortir samt tilfinnanlega rannsóknir á flestum þáttum sem snúa að áhrifum loftslagsbreytinga á Íslandi.

Skipulag skýrslunnar er sem hér segir: Í 1. kafla er ágrip af efni skýrslunnar. Í 3. kafla er fjallað um hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra og byggist sú umfjöllun að mestu á nýjustu skýrslum Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar. Í 4. kafla er fjallað um veðurfar á Íslandi og líklegar breytingar á þessari öld. Í 5. kafla er fjallað um áhrif hlýnunar á jökla, vatnafar og sjávarstöðu. Í 6. kafla er fjallað um súrnun sjávar, í 7. kafla um ástand sjávar og lífríki umhverfis landið. Fjallað er um lífríki á landi og ræktað land í 8. og 9. kafla. 10. kafli er um aðlögun að áhrifum loftslagsbreytinga. Þar er farið yfir skipulag aðlögunar og aðgerðir í nágrannalöndum, auk umfjöllunar um stöðu aðlögunar á Íslandi. Í 11. kafla er rætt er um áhrif loftslagsbreytinga á samfélagslega innviði og atvinnuvegi, sem og aðlögunarþörf þar sem við á. Skýrslunni lýkur á kafla um loftslagsbreytingar, náttúruvá og heilsufar.

3 Hnattrænar loftslagsbreytingar

Hlýnun jarðar er óumdeilanleg og benda margar athuganir til breytinga frá því um miðbik síðustu aldar sem eru fordæmalausar hvort sem litið er til síðustu áratuga eða árþúsunda. Lofthjúpurinn og heimshöfin hafa hlýnað, dregið hefur úr magni og útbreiðslu snævar og íss auk þess sem sjávarborð hefur hækkað og styrkur gróðurhúsalofttegunda aukist.

Þessa staðhæfingu má finna í upphafi fimmtu úttektarskýrslu *Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar* (IPCC[1]), frá árinu 2013[2]. IPCC gefur á nokkurra ára fresti út úttektarskýrslur þar sem vísindaleg þekking á loftslagsbreytingum er dregin saman.

Verkinu er skipt niður á þrjá vinnuhópa og skoðar sá fyrsti orsakir og umfang loftslagsbreytinga. Annar hópurinn skoðar afleiðingar þeirra fyrir náttúru og samfélög og til hvaða úrræða megi grípa til þess að aðlagast breytingunum. Þriðji hópurinn skoðar síðan hvernig hægt sé að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda.

Ítarlega var fjallað um niðurstöður fjórðu úttektarskýrslu IPCC frá árinu 2007 í fyrsta kafla skýrslu Vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá árinu 2008[3] (í þeim köflum sem hér fylgja er er oft vitnað til fyrri skýrslu sem V2008). Hér verður stuttlega fjallað um fimmtu matsskýrsluna, niðurstöður vinnuhópa 1 og 2 og þar sem ástæða þykir til eru upplýsingar skýrslu IPCC uppfærðar með nýrri gögnum.

3A Kvarðað orðalag

Í úttektarskýrslum IPCC 2013 er notað visst kvarðað orðalag til þess að tilgreina líkur á tiltekinni atburðarás eða niðurstöðu. Slík orð eru skáletruð í textanum. Orðin eru alþekkt en nákvæmlega hefur verið skilgreint við hvað er átt, og er sá lykill gefinn hér. Þessi skilgreining gefur lesmáli frá IPCC ákveðnari merkingu en ella.

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%

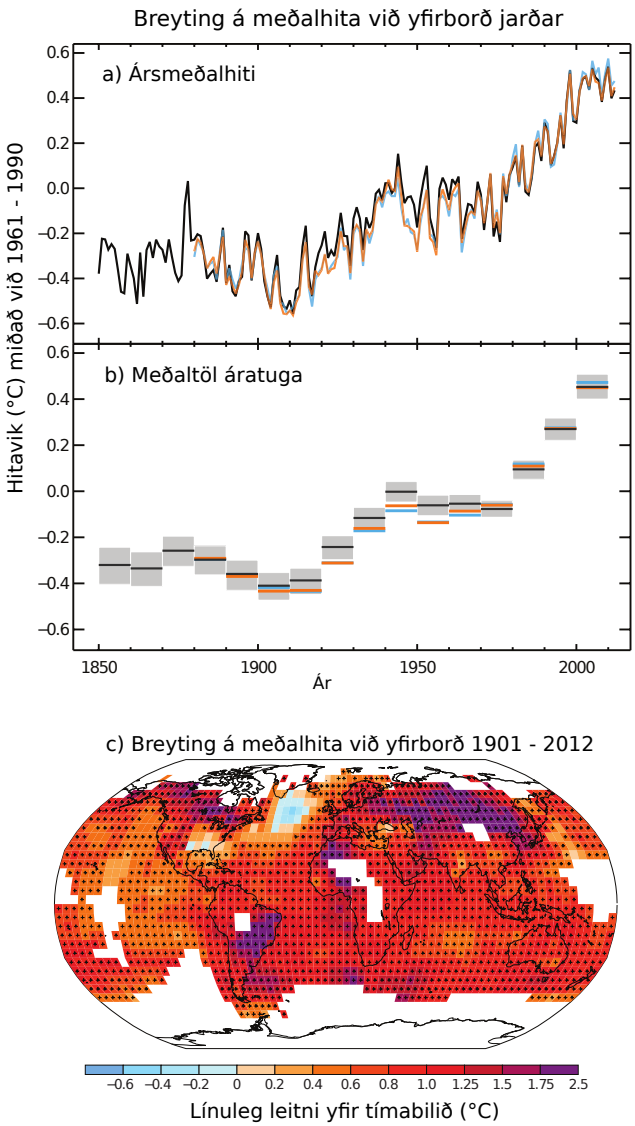
Hvað vísbendingar (evidence) varðar er notað orðalagið: *Takmarkaðar*, *miðlungs* eða *traustar* (limited, medium & robust) eftir því hversu eindregnar þær eru.

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.

Tafla 3.1 Kvarðað orðalag sem notað er í skýrslum Milliríkjanefndar.



Mynd 3.1 Samantekt á hitamælingum. a) Tímaraðir sem sýna breytingar í hnattrænu ársmeðaltali. Sýnd er samantekt frá þremur stofnunum. b) Áratugameðaltöl gagnanna í a). c) Kort af hitabreytingum í MLOST gagnasafninu fyrir tímabilið 1901 til 2012. Hitabreytingin er reiknuð út frá hallatölu bestu línu gegnum gagnasafnið í hverjum reit. Gerð er krafa um að gögn séu til staðar fyrir a.m.k. 70% tímabilsins, og a.m.k. 20% tímans fyrstu og síðustu 11 árin (IPCC, 2013 mynd SPM-1).

3.1 Lofthjúpurinn

Sérhver síðustu þriggja áratuga er hlýrri en allir fyrri áratugir síðan samfelldar mælingar hófust upp úr 1850, og er fyrsti áratugur 21. aldar sá hlýjasti þeirra. Gögn um fornveðurfar benda til þess að á norðurhveli sé tímabilið 1983–2012 *mjög líklega*[4] hlýjasta 30 ára tímabil síðustu 800 ára *(mikil vissa)* og *líklega* hlýjasta 30 ára tímabil síðustu 1400 ára *(miðlungs vissa)*.

Samanteknar hitamælingar á landi og á hafsvæðum sýna að frá 1880 til 2012 hlýnaði um 0.85 [0.65–1.06]°C við yfirborð jarðar. Á því tímabili, sem fyrirliggjandi gögn eru heillegust (1901–2012), hlýnaði víðast hvar á jörðinni (mynd 3.1).

Mikil vissa er fyrir því að á síðmiðöldum var um nokkurra áratuga skeið álíka hlýtt á sumum svæðum og á síðari hluta 20. aldar. Þessi hlýnun varð þó ekki jafnviðtæk og hlýnunin á 20. öldinni.

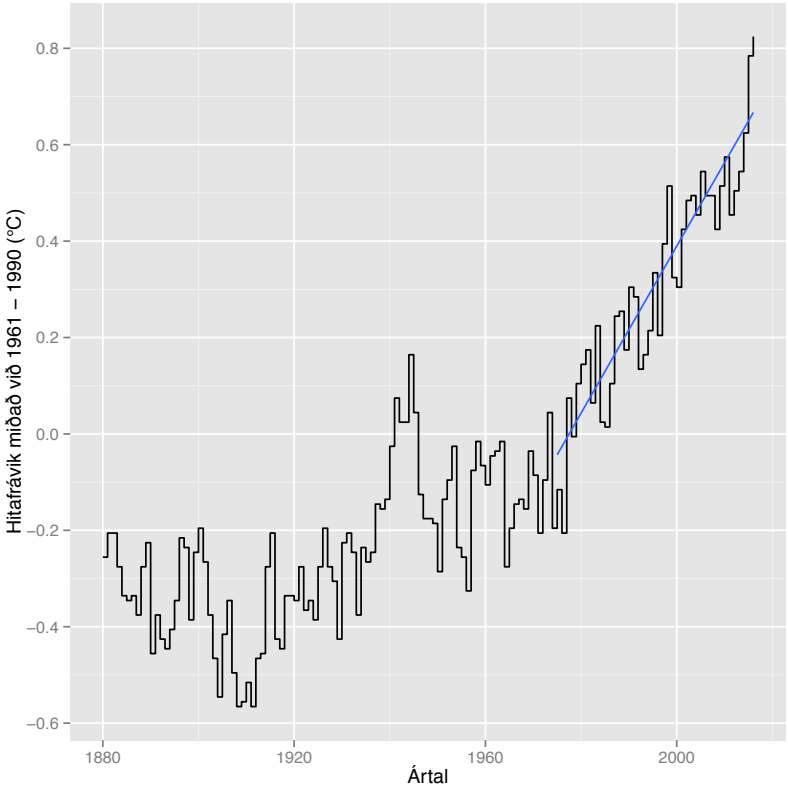
Það er *nánast öruggt* að veðrahvolfið hefur hlýnað síðan um miðbik 20. aldar og samfara því kólnaði í heiðhvolfinu. Á norðurhveli er, utan hitabeltissvæða, *miðlungsvissa* fyrir þessum hitabreytingum með hæð og einnig því hversu hratt hlýnaði en *lítil vissa* annars staðar.

Þrátt fyrir augljósa langtímahlýnun getur meðalhitinn sveiflast verulega milli áratuga. Fyrir stutt tímabil eru hitabreytingar sveiflukenndar og endurspegla ekki langtímabreytingar. Sem dæmi má nefna að á 15 ára tímabili 1998–2012, sem hófst á sterkum El Nino atburði nam hlýnunin 0.05 [-0.05–0.15]°C á áratug, sem er minna en að meðaltali á tímabilinu 1951–2012 en þá var hneigðin 0.12 [0.08–0.14]°C á áratug.

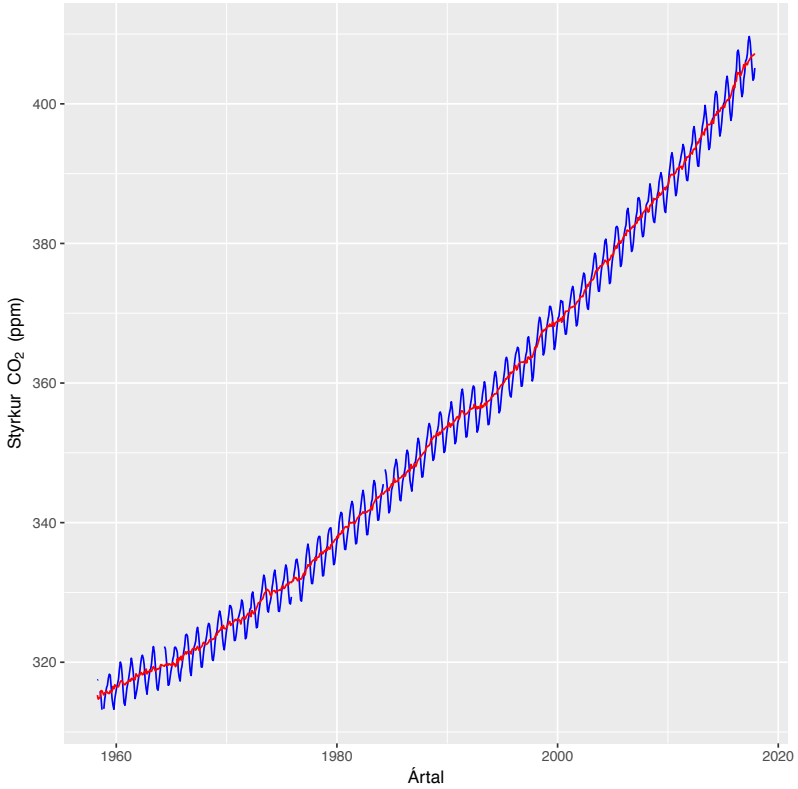
Til og með 2016 voru 9 af 10 hlýjustu árum frá upphafi samfelldra mælinga á 21. öld, eina árið frá 20. öldinni var El Niño árið 1998 í 8. sæti. Áhrifa El Nino gætti einnig árin 2015 og 2016. Þau ár voru mun hlýrri en áður voru dæmi um (mynd 3.2)[5].

Nýlegar rannsóknir benda til þess að frá miðbiki 8. áratugs síðustu aldar hafi tölfræðilega marktæk hlýnun numið um 0.17–0.19°C á áratug og sveiflur yfir styttri tímabil víki ekki marktækt frá því[6]. Komi ekki til verulega breytinga á losun gróðurhúsalofttegunda er líklegast að hlýnun jarðar haldi áfram með svipuðum hraða en að skammtímasveiflur ýmist dragi úr eða auki við hlýnunina.

Það er *mjög líklegt* að síðan 1950 hafi hnattrænt dregið úr fjölda kaldra daga og nátta en hlýjum dögum og



Mynd 3.2 Þróun hnattræns meðalhita frá 1880 til 2016. Árshitavik eru miðuð við tímabilið 1961–1990. Bláa línan nær frá 1975 og er langtímaleitnin 0.17 [0.15–0.20]°C á áratug. (Gögn frá bandarísku haf- og veðurfræðistofnuninni NOAA.)



Mynd 3.3 Styrkur CO_2 í lofthjúpnum mældur á Mauna Loa á Hawaii. Bláa línan sýnir mánaðargildi, rauða línan sýnir reiknaðan ársferil. Mælingar ná frá marsmánuði 1958 til loka árs 2017. Mælirröðin frá Mauna Loa er lengsta samfellda röðin, en samhljóða niðurstöður hafa fengist víðs vegar um heim. (Gögn frá bandarísku haf- og veðurfræðistofnuninni NOAA.)

nóttum hafi fjölgað. *Líklegt* er að hitabylgjum hafi fjölgað í stórum hluta Evrópu, Asíu og Ástralíu. Landsvæði þar sem aftakaúrkoma er nú tíðari eru *líklega fleiri* en svæði þar sem aftakaúrkoma er nú fátíðari. Breytingar eru ekki þær sömu allstaðar en mest vissa er um breytingar í Norður-Ameríku þar sem *líklegt* er að aftakaúrhelli hafi orðið tíðari.

Vegna skorts á gögnum um úrkomu er *lítil vissa* um hnattrænar úrkomubreytingar yfir landi frá 1901 til 1950 en *miðlungsvissa* eftir það. Á miðlægum

breiddargráðum (þ.e. utan heimskauta- og hitabeltissvæða) á norðurhveli hefur úrkoma aukist síðan 1901 (*miðlungsvissa* fyrir 1950 og *mikil vissa* eftir það). Fyrir önnur svæði er lítil vissa um langtímabreytingar.

Styrkur koldíoxíðs í lofthjúpnum eykst um rúmlega 2 ppm á ári[7] og útslag árstíðasveiflu er rúmlega 6 ppm. Þegar skýrsla Milliríkjanefndar kom út árið 2013 var styrkur CO_2 í lofti á mælistöðinni á Mauna Loa tæplega 400 ppm en hann var um 315 ppm þegar mælingar hófust árið 1958. Á þeim árum sem liðin eru síðan skýrslan kom út hefur styrkurinn aukist og frá árinu 2015 hefur styrkurinn aldrei farið undir 400 ppm (mynd 3.3)[8].

3.2 Hafið

Hafið tekur við langmestu af þeirri varmaorku sem bætist við vegna hnattrænnar hlýnunar og *mikil vissa* er um að það tók við meira en 90% af viðbættri varmaorku á árabilinu 1971–2010. Það er *nánast öruggt* að efstu lög hafsins (0–700 m) hlýnuðu frá 1971 til 2000 og *líklegt* að það hafi þau einnig gert frá 1870 til 1971.

Hnattræn hlýnun hafsins er mest nærri yfirborði, en efstu 75 dýptarmetrarnir hlýnuðu um 0.11 [0.09–0.13]°C á áratug frá 1971–2010. Frá yfirborði hlýnaði niður á 2000 m dýpi þótt það drægi úr umfangi hlýnunar eftir því sem neðar dró. Frá 1992 til 2005 mældist engin hlýnun á 2000 m til 3000 m dýpi, en hlýnun neðan við 3000 m er mest nærri myndunarsvæðum djúpsjávar í Norður-Atlantshafi og í suðurhöfum.

Af viðbættri varmaorku er meira en 60% geymd í efri lögum sjávar (0–700 m) en um 30% í neðri lögum. Það er *líklegt* að varmainnihald í efstu lögum sjávar hafi aukist um 17 [15–19] x 10^{22} J á tímabilinu 1971–2010.

Svæðisbundnar breytingar í seltu sjávar sýna á óbeinan hátt samspil úrkomu og uppgufunar. *Miðlungs vissa* er um að þetta samspil valdi því að selta hefur aukist á svæðum þar sem uppgufun er mikil og sjór er selturíkur fyrir en minnkað á svæðum þar sem úrkoma er meiri og selta sjávar er að jafnaði lægri.

Fyrirliggjandi gögn benda ekki til þess að marktækar breytingar hafi orðið á lóðréttri hringrás Atlantshafsins. Eftir að skýrsla IPCC kom út árið 2013 hafa breytingar í lóðréttu hringrásinni verið rannsakaðar frekar og nánar er fjallað um þær niðurstöður í hliðargrein (sjá 4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar).

3.3 Freðhvolfið

Mikil vissa er um að á síðustu tveimur áratugum hafi Grænlandsjökull og Suðurskautsjökullinn minnkað. Nær allir aðrir jöklar hafa haldið áfram að hörfa, auk þess sem snjóhula að vori og hafís á norðurhveli dregst áfram saman (mynd 3.4).

Ef jöklar við jaðar hinna stóru íshvela heimskautanna eru undanskildir er massatapið á tímabilinu 1971–2009 *mjög líklega* 226 [91–361] Gt/ári og 275 [140–410] Gt/ári frá 1993–2009. Til samanburðar má nefna að 100 Gt nægja til að hækka yfirborð heimshafanna um 0.28 mm.

Hvað stóru ísbreiðurnar á Grænlandi og Suðurskautslandinu varðar er *mjög mikil vissa* um að Grænlandsjökull hafi tapað massa á síðustu tveimur áratugum. Massatapið jókst *mjög líklega* úr 34 [-6–74] Gt/ári að meðaltali frá 1992–2001 í 215 [157–274] Gt/ári frá 2002–2011.

Einnig er *mikil vissa* fyrir því að ísbreiðan á Suðurskautslandinu hafi tapað massa á síðustu tveimur áratugum. Þar jókst massatapið *líklega* frá 30 [-37–97] Gt/ári frá 1992–2001 í 147 [72–221] Gt/ári frá 2002–2011.

Síðustu ár, frá því að 5. matsskýrsla IPCC kom út, hefur bráðnun ísbreiðanna aukist og meiri alvara færst í vangaveltur um hvort massatap á Suðurskautslandinu verði óstöðvandi næstu aldir. Nánar er rætt um þessar breytingar og sjávarstöðuhækkun í hliðargrein (sjá 3D Rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna).

Samdráttur meðalhafísútbreiðslu í Norður-Íshafi var *mjög líklega* á bilinu 3.5–4.1% á áratug frá 1979–2012 og á sama tíma er *mjög líklegt* að árleg lágmarksútbreiðsla hafi minnkað um 9.4–13.6% á áratug. *Mikil vissa* er fyrir því að útbreiðslan hafi að jafnaði minnkað mest á sumrin og haustin, þó að samdráttar verði vart á öllum árstíðum og að jafnaði fyrir alla áratugi frá 1979. Það er *miðlungsvissa* fyrir því að samdráttur íssins að sumarlagi á síðustu þremur áratugum sé óvenjulegur sé litið til a.m.k. síðustu 1450 ára og sama gildir um hlýnun yfirborðssjávar á heimskautasvæðunum. Nánar er fjallað um hafís á hafsvæðinu umhverfis Ísland í hliðargrein í kafla 4 (sjá 4B Hafís á norðurslóðum).

Mælingar á þykkt hafísþekjunnar eru rýrari að umfangi en athuganir á útbreiðslu. Nýleg greining bendir þó til þess að á tímabilinu 1979 til 2016 hafi heildarrúmmál hafíss á norðurslóðum að jafnaði verið

um 28 þúsund km³ þegar mest er í apríl en 11.5 þúsund km³ þegar minnst er í september. Samdráttur í rúmmáli er á þessu tímabili um 3100 ± 1000 km³ á áratug[9].

Það er *mjög líklegt* að hafísútbreiðsla umhverfis Suðurskautslandið hafi aukist um 1.2–1.8% á áratug frá 1979 til 2012. Það er *mikil vissa* fyrir því að breytingar eru mismunandi milli svæða umhverfis Suðurskautslandið, sums staðar hefur útbreiðslan aukist, annars staðar hefur hafísþekjan dregist saman. Næstu þrjú ár eftir að skýrsla IPCC kom út dróst hafísútbreiðslan saman, m.a. vegna óvenjulegra illviðra í suðurhöfum[10].

Það er *mikil vissa* fyrir því að snjóhula á norðurhveli hafi minnkað síðan um miðja 20. öldina, sérstaklega að vori til. Í mars og apríl nemur samdráttur í meðalútbreiðslu snævar 1.6 [0.8–2.4]% á áratug yfir tímabilið frá 1967 til 2012. Á sama tímabili minnkaði snjóhula í júní um 11.7 [8.8–14.6]%. Ekki varð vart við marktæka aukningu snjóhulu í neinum mánuði.

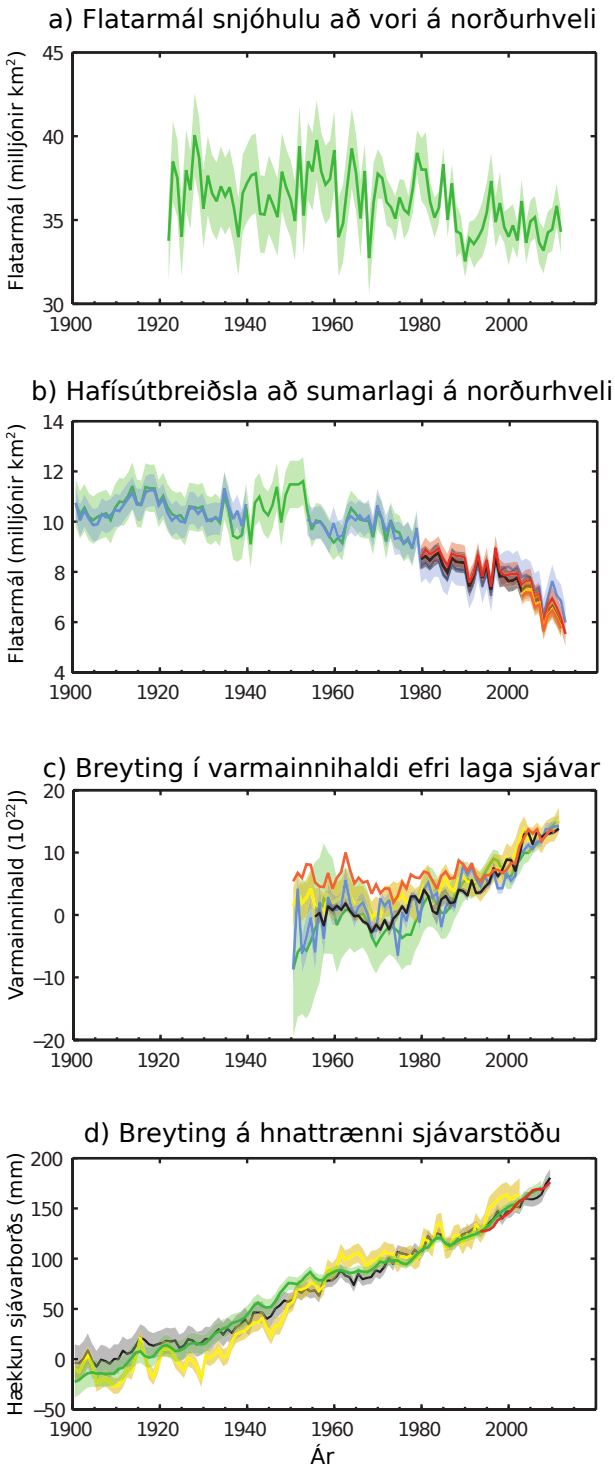
Það er *mikil vissa* fyrir því að hiti í sífrera hafi hækkað frá því upp úr 1980 þó að hækkunin sé mismunandi eftir svæðum. Í Rússlandi hefur útbreiðsla sífrera marktækt minnkað og hann þynnst frá 1975 til 2005 *(miðlungsvissa)*.

3.4 Sjávarstaða

Hnattræn hækkun sjávarborðs var 0.19 [0.17–0.21] m á tímabilinu 1901 til 2010 (mynd 3.4). Á þessu tímabili er *mjög líklegt* að hnattræn sjávarstaða hafi að jafnaði hækkað um 1.7 [1.5–1.9] mm á ári, og fyrir tímabilið 1993 til 2010 um 3.2 [2.8–3.6] mm á ári. Bæði sjávarfalla- og gervihnattamælingar sýna aukinn hraða á síðara tímabilinu og það er *líklegt* að hækkunin hafi verið álíka hröð 1920 til 1950. Hraði sjávarborðshækkunar hefur aukist frá því um miðbik 19. aldar en *mikil vissa* er fyrir því að síðan þá sé hraðinn meiri en hann var að jafnaði í a.m.k. 2000 ár þar á undan.

Á síðustu árum, frá því að skýrslan kom út, hefur hraði sjávaryfirborðshækkunar aukist og hefur sú aukning haldist í hendur við aukna bráðnun hinna stóru íshvela heimskautanna. Nánar er fjallað um þessa aukningu í hliðargrein (sjá 3D Rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna).

Mjög mikil vissa er fyrir því að á síðasta hlýskeiði ísaldar (fyrir 129–116 þúsund árum) hafi sjávarstaða verið a.m.k. 5 m hærri en hún er nú, en þá var um tveimur gráðum hlýrra en var fyrir iðnbyltingu



Mynd 3.4 Margvísleg gögn um áhrif loftslagsbreytinga. a) Snjóhula á norðurhveli jarðar að vori til. b) Útbreiðsla hafíss á norðurheimskautssvæðinu að sumarlagi. c) Breytingar á varmainnihaldi yfirborðslaga hafsins. d) Breytingar á hnattrænni sjávarstöðu. Gráskyggða svæðið sýnir óvissumörk, mislitir ferlar sýna niðurstöður ólíkra gagnaraða. (Heimild IPCC, 2013 mynd SPM.3.)

(*miðlungsvissa*). *Mikil vissa* er fyrir því að á síðasta hlýskeiði hafi sjávarstaðan ekki verið yfir 10 m hærri en hún er nú.

Mjög líklegt er að á síðasta hlýskeiði hafi Grænlandsjökull verið minni en hann er nú, samsvarandi 1.4 til 4.3 m hnattrænni sjávarborðshækkun. Með *miðlungsvissu* má því gera ráð fyrir að íshvelin á Suðurskautslandinu hafi einnig verið minni og lagt sitt af mörkum til hærri sjávarstöðu.

3.5 Kolefni og önnur lífræn jarðefni

Styrkur gróðurhúsalofttegundanna koldíoxíðs (CO_2), metans (CH_4) og köfnunarefnisoxíðs (N_2O) í lofthjúpnum er nú mun hærri en vitað er að hann hafi verið a.m.k. síðustu 800 þúsund ár. Styrkur CO_2 í lofthjúpnum hefur aukist um 40% frá því fyrir iðnbyltingu (þ.e. 1750). Þessi aukning stafar af athöfnum manna, nánast að öllu leyti vegna bruna jarðefnaeldsneytis og breytinga á landnotkun. Heimshöfin hafa tekið við um 30% af koldíoxíðslosuninni, sem veldur súrnun þeirra.

Mjög mikil vissa er fyrir því að aukning koldíoxíðs í lofthjúpnum hafi verið hraðari en vitað er til í a.m.k. 22 þúsund ár. Styrkur CH_4 og N_2O hefur einnig aukist frá iðnbyltingu, um 150% fyrir CH_4 og 20% fyrir N_2O.

Á tímabilinu 1750 til 2011 var heildarlosun af mannavöldum 454 [460–630] PgC en uppsöfnun í lofhjúpnum nemur 240 [230–250] PgC. Við þetta jókst styrkur CO_2 í lofthjúpnum frá 278 [273–283] ppm árið 1750 í 390.5 ppm árið 2011. Frá þeim tíma hefur styrkur CO_2 í lofthjúpnum að jafnaði aukist um rúmlega 2.5 ppm á ári og var um 407 ppm í lok ársins 2017[11].

Heildarlosuninni má skipta niður í 365 [335–395] PgC vegna bruna jarðefnaeldsneytis og sementsframleiðslu og 180 [100–260] PgC vegna skógareyðingar og annarra breytinga á landnotkun[12].

Talið er að heimshöfin hafi gleypt 155 [125–185] PgC af því kolefni sem athafnir manna hafa losað upp í lofthjúpinn á ofangreindu tímabili. Á sama tíma nam upptaka vistkerfa á landi um 150 [60–240] PgC.

Nýleg samantekt á losun kolefnis af mannavöldum og upptöku í náttúrunni leiddi í ljós að á tímabilinu 2006–2015 var losun vegna bruna jarðefnaeldneytis um 9.3 ± 0.5 PgC á ári, en losun vegna landnotkunar var 1.0 ± 0.5 PgC á ári. Á sama tíma söfnuðust 4.5 ± 0.1 PgC á ári fyrir í lofthjúpnum (sem jók styrk CO_2), vistkerfi á landi tóku upp 3.1 ± 0.9 PgC á ári og hafið gleypti 2.6 ± 0.5 PgC á ári13. Á þessum áratug var hafið því að gleypa um 25% af losun CO_2, sem aftur hefur leitt til aukningar á sýrustigi hafsins.

Mikil vissa er um að sýrustig sjávar hafi lækkað um 0.1 pH stig síðan um iðnbyltingu sem samsvarar 26% aukningu á vetnisjónum í hafinu. Nánar er fjallað um súrnun sjávar í kafla 6.

Nánar er fjallað um kolefnishringrásina og losun af mannavöldum, bæði á hnattræna vísu og sérstaklega fyrir Ísland, í hliðargrein (sjá 3B Kolefnisjöfnuður Íslands).

3.6 Áhrif á lífkerfi og samfélög

Loftslagsbreytingar hafa á liðnum áratugum haft áhrif á náttúru og samfélög á öllum meginlöndum og um öll heimsins höf. Áhrif loftslagsbreytinga koma greinilegast fram og eru víðtækust í náttúrufari. Sumar samfélagsbreytingar má rekja til loftslagsbreytinga að meira eða minna leyti[14].

Breytingar á úrkomu eða bráðnun snævar og íss hafa víða haft áhrif á vatnsauðlindir, bæði hvað varðar magn og vatnsgæði *(miðlungsvissa)*. Loftslagsbreytingar hafa valdið því að nánast allir jöklar á jörðinni hopa, sem hefur áhrif á afrennsli og vatnsforða á vatnasviði þeirra *(miðlungsvissa)*. Á heimskautasvæðum og í fjalllendi valda loftslagsbreytingar því að sífreri í jörðu þiðnar *(mikil vissa)*.

Vegna loftslagsbreytinga hefur útbreiðsla ýmissa dýrategunda breyst, bæði á landi og í sjó, auk þess sem árstíðabundin hegðun (svo sem komur farfugla, göngur fiskistofna o.s.frv.) hefur breyst, með áhrifum á stofnstærð og víxlverkun við aðrar tegundir *(mikil vissa)*. Enn sem komið er eru fá tilvik þar sem rekja má útdauða tegunda til loftslagsbreytinga *(mikil vissa)* en saga lífs á jörðinni síðustu ármilljónir geymir dæmi um miklar breytingar á búsvæðum og fjölda tegunda sem dóu út af völdum loftslagsbreytinga sem voru mun hægari en þær sem nú ganga yfir *(mikil vissa)*.

Fjöldi rannsókna, frá ólíkum svæðum og á mörgum nytjategundum, sýnir að loftslagsbreytingar hafa oftar neikvæð áhrif á jarðrækt en jákvæð *(mikil vissa)*.

Þær fáu rannsóknir þar sem einhver jákvæð áhrif finnast eru frá köldum svæðum og þar er enn ekki ljóst hvort heildaráhrifin eru jákvæð eða neikvæð *(mikil vissa)*.

Loftslagsbreytingar hafa haft neikvæð áhrif á maís- og hveitirækt á mörgum svæðum og í heildina þegar litið er til jarðarinnar allrar *(miðlungsvissa)*. Á hinn bóginn eru áhrif á sojabauna- og hrísgrjónarækt víðast hvar lítil eða ekki merkjanleg. Áhrifin eru einkum á framleiðslu matvara en síður á dreifingu, aðgengi eða aðra þætti sem lúta að fæðuöryggi.

Frá því að skýrsla IPCC kom út árið 2007 hafa skyndilegar en tímabundnar verðhækkanir á kornvöru og matvælum fylgt í kjölfar óvenjulegs veðurfars á mikilvægum framleiðslusvæðum. Sýnir það að þessir markaðir eru m.a. viðkvæmir fyrir óvenjulegu veðurlagi *(miðlungs vissa)*.

Til þessa hafa loftslagsbreytingar ekki haft mikil áhrif á heilsufar mannkyns miðað við aðra mælanlega álagsþætti en áhrifin eru þó ekki vel þekkt. Fleiri deyja af völdum hitabylgna en færri úr kulda *(miðlungsvissa)*. Þá hafa staðbundnar breytingar á hita og úrkomu áhrif á útbreiðslu meinsemda sem berast í vatni, sem og á lífverur sem bera þær *(miðlungsvissa)*.

Mismunandi er hversu berskjölduð samfélög eru fyrir áhrifum loftslagsbreytinga og ræðst það af þáttum sem ekki eru eru beintengdir loftslagi *(mjög mikil vissa)*. Almennt gildir að hópar sem eru illa settir félagslega eða efnahagslega, eða búa við ótryggt stjórnarfar og slaka innviði, eru sérstaklega viðkvæmir fyrir afleiðingum loftslagsbreytinga *(miðlungsvísbendingar, mjög sammála)*. Yfirleitt er flóknu samspili ólíkra þátta um að kenna.

Áhrif öfga í veðurfari á umliðnum árum, svo sem hitabylgna, þurrka, flóða, fellibylja og gróðurelda, benda til þess að sum vistkerfi og mörg félagsleg kerfi séu berskjölduð og viðkvæm gagnvart núverandi breytileika í veðurfari *(mikil vissa)*. Dæmi um slík áhrif eru tjón á vistkerfum, truflanir á matvælaframleiðslu og dreifingu vatns, tjón á innviðum og byggðum svæðum, heilsutjón og neikvæðar afleiðingar á geðheilsu og líðan manna. Reynslan sýnir að, óháð efnahagsþróun samfélaga, ráða sumir efnahagsgeirar illa við ríkjandi tíðni veðuröfga.

Loftslagstengd náttúruvá eykur annað álag og hefur oft neikvæð áhrif á lífsbjargir, sérstaklega fyrir fátækari hópa *(mikil vissa)*. Meðal beinna áhrifa má nefna minni afrakstur ræktarlands og eyðileggingu heimila. Óbein áhrif eru t.d. hærra matvælaverð og minna matvælaöryggi. Meðal jákvæðra áhrifa fyrir þessa hópa, sem eru þó yfirleitt takmörkuð og oftast óbein, má nefna breytta högun landbúnaðar og bætt tengslanet.

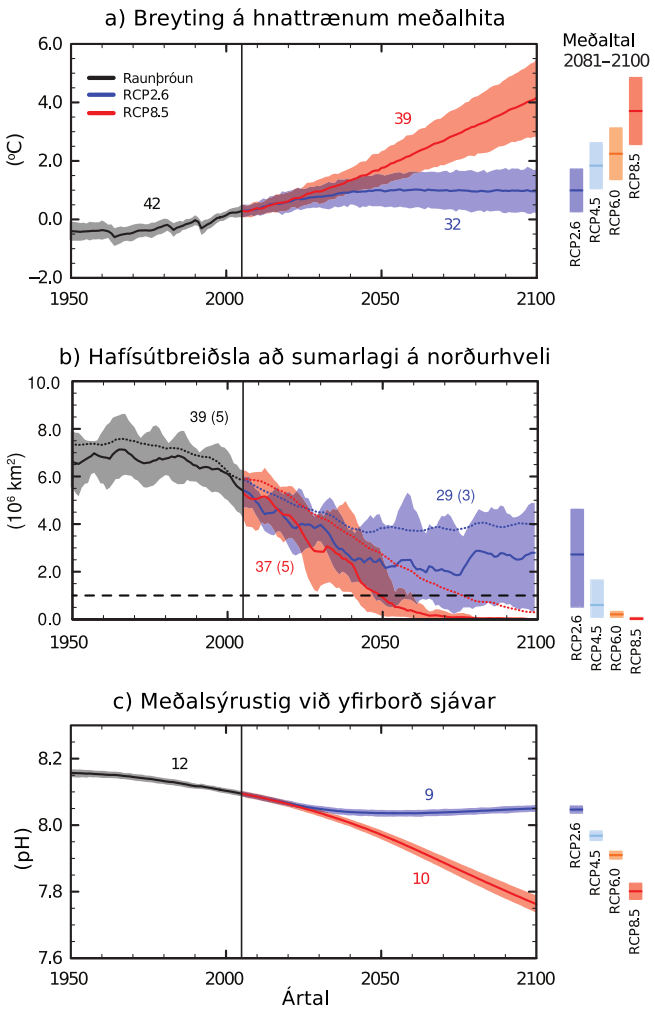
Vopnuð átök gera samfélög berskjaldaðri gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga *(miðlungs-vísbendingar, mjög sammála)* og draga úr getu til aðlögunar með því að valda tjóni á innviðum, náttúru- og félagsauði og draga úr tækifærum til þess að nýta lífsbjargir.

3.7 Aðlögun og umhverfi ákvarðanatöku

Sagan sýnir að samfélög og hópar hafa, með mismunandi góðum árangri, aðlagast breytingum í veðurfari og aftakaveðri.

Það færist í aukana að tekið sé tillit til loftslagsbreytinga í áætlunum, þótt enn séu ekki mörg dæmi um að aðgerðum sem fela í sér aðlögun sé hrint í framkvæmd *(mikil vissa)*. Hvað varðar tækni- og verkfræðilausnir eru dæmi um að aðlögun sé tvinnuð saman við fyrirliggjandi verkferla og aðferðir, t.d. við stýringu á vatnsauðlindum og áhættustýringu náttúruvár. Aukinn skilningur er á mikilvægi aðgerða sem byggjast á vistrænum, félags- og stofnanalegum viðbrögðum. Einnig er bættur skilningur á þeim þáttum sem takmarka getu til aðlögunar. Þær aðgerðir sem komist hafa á framkvæmdastig einkennast hingað til af smáum skrefum með áherslu á samhliða viðbótarávinning, auk áherslu á lærdóm og sveigjanleika *(miðlungsvísbendingar, í meðallagi sammála)*.

Fyrirliggjandi úttektir á aðlögun hafa flestar takmarkast við afleiðingar loftslagsbreytinga, tjónnæmi og skipulagningu aðlögunar, en fáar skoðað aðlögun í framkvæmd eða afleiðingar aðgerða *(miðlungsvísbendingar, mjög sammála)*. Vaxandi reynsla er af aðlögun að loftslagsbreytingum innan einka- og almannageirans og hjá mismunandi samfélagshópum *(mikil vissa)*. Unnið er að áætlunum og stefnumótun tengdri aðlögun á mörgum



Mynd 3.5 Mögulegar breytingar til loka þessarar aldar: a) Hnattræn hlýnun fyrir mismunandi sviðsmyndir. Sýnd eru vik frá meðalhita áranna 1986–2005. b) Hafísútbreiðsla á norðurhveli að hausti (5 ára hlaupandi meðaltal). c) Hnattrænt meðaltal sýrustigs sjávar. Ferillinn (og gráa umslagið) sem sýnd eru fyrir 2005 er reiknaður með þekktum mæliröðum af styrk gróðurhúsalofttegunda, ryks og annarra þátta sem hafa áhrif á geislunarjafnvægi. Bláu og rauðu ferlarnir eftir 2005 sýna útreikninga fyrir tvær mismunandi sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda en súlurnar lengst til hægri sýna meðaltal fleiri sviðsmynda, fyrir árin 2081–2100. Rauða og bláa umslagið sýna dreifingu líkanreikninga. Fjöldi líkana sem notaður var í hverju tilviki er sýndur á myndunum en á mynd b) er einnig sýndur innan sviga fjöldi líkana sem náðu vel að herma eftir meðalhafísþekju 1979–2012 (Heimild IPCC, 2013 mynd SPM, sjá nánar tilvísun 2).

stjórnsýslustigum og tekið tillit til loftslagsbreytinga í víðu samhengi.

Við ákvarðanatöku til að stýra þeirri áhættu sem loftslagsbreytingar hafa í för með sér verður að taka tillit til þess að umhverfið mun halda áfram að breytast. Umfang breytinganna og hvenær þær koma fram er hins vegar óvissu undirorpið. Þessi óvissa getur dregið úr árangri aðgerða til aðlögunar *(mikil vissa)*. Áhættustýring sem byggist á sífelldri endurskoðun hefur reynst heppileg fyrir ákvarðanatöku í flóknum aðstæðum þar sem framtíðarþróun álagsþátta er breytileg, langtímaóvissa mikil, hugsanlegar afleiðingar mjög alvarlegar en mögulegt að aðlaga aðgerðir í takt við aukna þekkingu. Til þess að greina hvaða aðgerðir séu bestar fyrir áhættustýringu er mjög mikilvægt að skoða afleiðingar í sem víðustu samhengi, og einnig skoða afdrifaríka áhættuþætti sem þó teljast ólíklegir.

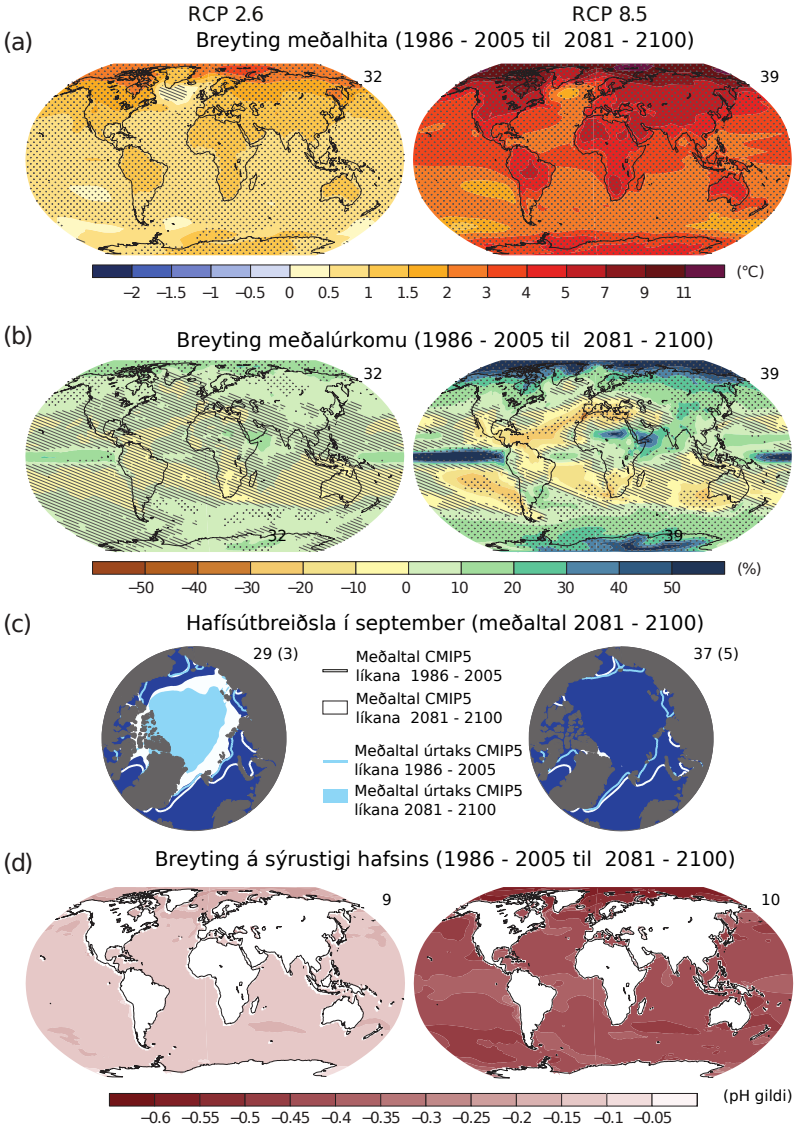
Ákvarðanir um aðlögun og aðrar aðgerðir í loftslagsmálum sem teknar verða í nálægri framtíð munu hafa áhrif á það hvernig áhætta tengd loftslagsbreytingum mun þróast á öldinni *(mikil vissa)*.

Óvissa um framtíðarþróun tjónnæmis, áraunar[15] **og það hvernig samtengd félags- og náttúruleg kerfi svara álagi er veruleg** *(mikil vissa)*. Þetta kallar á víðfeðma skoðun á menningartengdum og félagshagfræðilegum þáttum við mat á framtíðarþróun áhættu. Dæmi um slíka þætti eru verðmætadreifing innan samfélaga, aðgengi að þekkingu, atvinnumöguleikar, fólksflutningar og aðrir lýðfræðilegir þættir, einnig félagsleg gildi, stjórnarfar og stofnanarammi til að leysa úr ágreiningsmálum. Á alþjóðavísu hafa viðskipti og samstarf ríkja einnig áhrif á svæðisbundna áhættu vegna loftslagsbreytinga.

3.8 Líklegar breytingar á nýhafinni öld

Miðlungsvissa er um að á fyrsta þriðjungi þessarar aldar verði hlýnun við yfirborð jarðar *líklega* á bilinu 0.3 til 0.7°C miðað við meðaltal áranna 1986–2005. Mat á hlýnun til aldarloka er á bilinu 0.3 til 4.8°C og fer mjög eftir því hvaða sviðsmynd[16] um losun á þessari öld er notuð (mynd 3.5). Til loka aldarinnar munu meginlönd hlýna meira en úthöfin, og hlýnunin verður ákafast á heimskautasvæðum norðursins (mynd 3.6a).

Það er *nánast öruggt* að á flestum svæðum mun heitum dögum fjölga og köldum dögum fækka að sama



Mynd 3.6 Kort af niðurstöðum CMIP5 líkana fyrir tvær sviðsmyndir (sjá mynd 3.5). Kortin sýna: a) hlýnun við yfirborð frá meðaltali áranna 1986–2005 til 2081–2100, b) úrkomubreytingu á sama tíma og d) súrnun sjávar á sama tíma, en c) breytingu á útbreiðslu hafíss á norðurhveli í september, bæði fyrir öll CMIP5 líkön hvorrar sviðsmyndar og einnig þau líkön sem best náðu að herma eftir meðalútbreiðslu áranna 1979–2012. Tölur við hvert kort sýna fjölda líkana sem niðurstaðan byggist á. Á kortum a) og b) sýna punktar þau svæði þar sem 90% líkana bar saman um formerki breytingarinnar, og þar sem meðalbreytingin var meiri en tvö staðalfrávik af innri breytileika líkana, en skástrik sýna þau svæði þar sem meðalbreyting er minni en staðalfrávik innri breytileika. (Heimild IPCC, 2013 mynd SPM.8. Sjá nánar tilvísun 2.)

skapi. *Líklegt* er að hitabylgjur verði lengri og tíðari en eftir sem áður má stöku sinnum búast við köldum vetrum.

Það er *mikil vissa* fyrir því að þegar líður á öldina muni úrkoma á þurrum svæðum minnka á sama tíma og hún eykst á svæðum þar sem þegar er úrkomusamt. Eins aukist úrkomumunur innan ársins þ.e. á milli þurrustu og úrkomusömustu mánaða.

Mynd 3.6b sýnir líklega landfræðilega dreifingu úrkomubreytinga til loka aldarinnar. Líklegt er að sama landfræðilega dreifing verði á úrkomubreytingum næstu áratuga, þó að umfangið verði minna. Náttúrulegur breytileiki úrkomu verður þó áfram verulegur[17]. *Líklegt* er að samfara hnattrænni hlýnun verði aftakaúrkoma mjög víða ákafari og tíðari.

Mjög líklegt er að ENSO (El Nino/La Nina-sveiflan) verði áfram ríkjandi sveifla í veðurfari. Vegna breytinga á loftraka er líklegt að úrkomubreytingar tengdar ENSO muni aukast.

Öllum sviðsmyndum ber saman um að hafið muni hlýna. Varmi mun berast niður í hafdjúpin og hafa áhrif á djúphringrás sjávar.

Hlýnun sjávar verður mest í hitabeltinu og á nærliggjandi svæðum. *Mjög líklegt er* að draga muni úr lóðréttri hringrás Atlantshafsins (AMOC), um 11 [1–24]% í þeirri sviðsmynd[16] þar sem minnst hlýnar (RCP2.6), en 34 [12–54]% í sviðsmyndinni þar sem mest hlýnar (RCP8.5). *Líklegt* er að sveiflur í styrk AMOC verði umtalsverðar, en það er *mjög ólíklegt* að þessi hringrás breytist snögglega og varanlega. Ekki er hægt að útiloka hraðar breytingar eftir 2100. Nánar er fjallað um lóðrétta hringrás hafsins í hliðargrein í kafla 4 (sjá 4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar).

Mjög líklegt er að á 21. öld muni hafís á norðurhveli

halda áfram að minnka (mynd 36) og sömuleiðis snjóhula að vori. Einnig mun rúmmál jökla minnka.

Mjög líklegt er að hafísútbreiðsla á norðurhveli muni halda áfram að dragast saman og ísinn þynnast og það er *nánast öruggt* að útbreiðsla sífrera muni minnka. Byggt á þeim líkönum sem best ná að herma eftir meðalútbreiðslu hafíss 1979 til 2012 er *líklegt* að Norðurheimskautssvæðið verði nánast íslaust í lok sumars um miðja öldina ef losun verður í samræmi við sviðsmynd RCP8.5 (mynd 36c)[18].

Sjávarstaða mun hækka á 21. öld og *mjög líklegt* er að á 21. öldinni muni sjávarborð hækka hraðar en á tímabilinu 1971 til 2010.

Byggt á losunarsviðsmyndum er *líklegt* að meðalsjávarborð á árunum 2081–2100 muni verða 0.26 til 0.82 m hærra en að meðaltali 1986–2005. Hversu mikið hækkar fer eftir sviðsmyndum, *miðlungsvissa* er um að lítil losun muni valda hækkun á bilinu 0.26 til 0.55 m en mikil losun hækkun á bilinu 0.45 til 0.82 m (mynd 3.7).

Við framreikninga á líklegri sjávarstöðuhækkun byggði IPCC á gögnum frá CMIP5 líkönunum, jöklalíkönum, auk tölfræðilegrar úrvinnslu á þeim. Á þeim tíma sem skýrslan kom út var talið ólíklegt að sjávarborðshækkun yrði meiri en greint er frá hér að ofan, nema til kæmi ákaft massatap frá ísbreiðunni á Suðurskautslandinu þar sem hún kelfir í sjó fram. Nánar er fjallað um þróun síðustu ára í hliðargrein um rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna (sjá hliðargrein 3D Rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna).

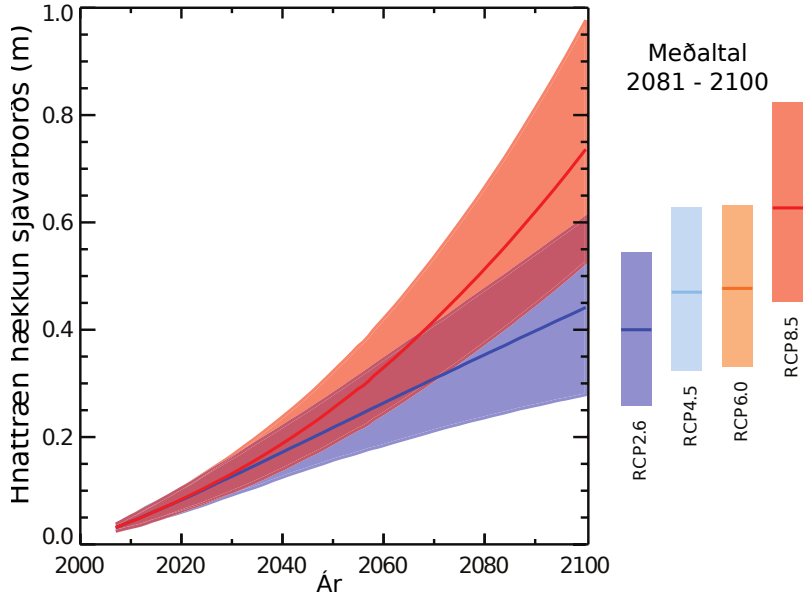
Sjávarstöðubreytingar verða ekki einsleitar. Við lok 21. aldar er *mjög líklegt* að sjávarborðshækkun nái til meira en 95% flatarmáls heimshafanna. Víðast hvar verður breytingin nærri því sem gerist hnattrænt. Talið er að á um 70% af strandsvæðum heimsins víki staðbundin breyting ekki meira en 20% frá þeirri hnattrænu. Utan þessara svæða munu staðbundin áhrif ráða meiru og ítarlegar er fjallað um slík áhrif við Íslandsstrendur og á nærliggjandi hafsvæði grein 5.3.

3.9 Lykiláhættuþættir, áhyggjuefni og aðlögunargeta

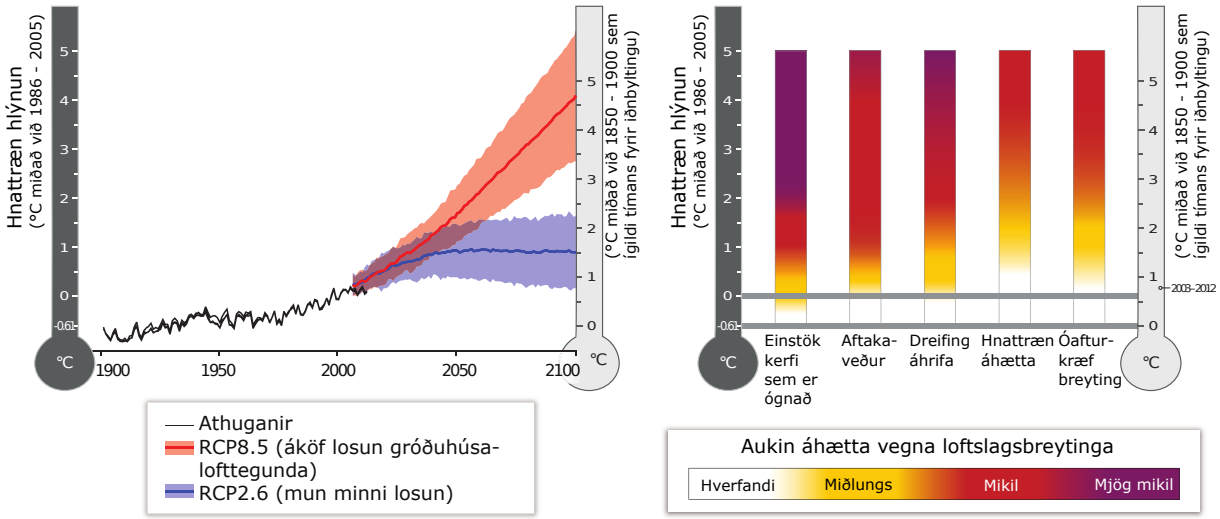
Árið 1992 samþykktu aðildarþjóðir Sameinuðu þjóðanna (Sþ) Rammasamning um loftslagsbreytingar[19]. Þar skuldbundu aðildarþjóðir sig til að halda styrk gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpnum innan þeirra marka að

1 Einstökum kerfum er ógnað	Dæmi eru um bæði vistkerfi og menningarsamfélög sem er þegar ógnað af völdum loftslagsbreytinga (***mikil vissa***). Slíkum kerfum fjölgar við 1°C hlýnun. Tegundir og kerfi með takmarkaða aðlögunargetu eru í verulegri hættu við 2°C hlýnun. Sem dæmi má nefna kóralrif og hafís á norðurslóðum.
2 Aftakaveður	Áhætta vegna aftakaatburða, s.s. aftakaúrkomu, hitabylgna og strandflóða, er þegar nokkur vegna loftslagsbreytinga (***mikil vissa***) og verður mikil við 1°C hlýnun (***miðlungsvissa***). Sumar tegundir aftakaatburða hafa í för með sér enn meiri áhættu (t.d. hitabylgjur) við frekari hlýnun.
3 Dreifing áhrifa	Dreifing áhættu er mjög mismunandi fyrir ólíka hópa. Óháð þróunarstigi samfélaga er hún almennt mest fyrir hópa sem standa höllum fæti. Svæðisbundin áhrif loftslagsbreytinga á akuryrkju valda þegar nokkurri áhættu (***miðlungs- til mikil vissa***), og miðað við líklegan samdrátt í afrakstri akuryrkju og vatnsforða er líklegt að landfræðileg dreifing áhrifa loftslagsbreytinga um jörðina verði mjög ójöfn ef hlýnar meira en 2°C.
4 Hnattræn áhætta	Fyrir hlýnun á bilinu 1–2°C má gera ráð fyrir hnattrænum breytingum fyrir afmörkuð kerfi eða heildir. Dæmi eru áhrif á lífríkið og tegundafjölda og áhrif á heimsmarkaðshagkerfið (***miðlungsvissa***). Veruleg hætta er á mikilli tegundafækkun og samhliða því á samdrætti á framleiðslu og þjónustu vistkerfa ef hlýnun nálgast 3°C (***mikil vissa***). Í heildina eykst efnahagstjón með hlýnun (***takmarkaðar vísbendingar, mjög sammála***) en lítið er um rannsóknir sem gera kleift að leggja tölulegt mat á tjón vegna hlýnunar sem nemur 3°C eða meira.
5 Óafturkræfar breytingar	Með aukinni hlýnun aukast líkur á að sum kerfi breytist skyndilega og óafturkræft. Hætta á slíkri umturnun er nokkur fyrir hlýnun að 1°C, en þegar eru merki um að óafturkræfar breytingar séu að verða á hlýsjávarkóröllum og á ástandi vistkerfa á norðurheimskautssvæðinu (***miðlungsvissa***). Þessi áhætta eykst mikið ef hlýnun verður á bilinu 1–2°C og verður mjög mikil ef hlýnun fer yfir 3°C, vegna hættu á mikilli og óafturkræfri hækkun sjávarstöðu vegna bráðnunar heimskautajöklanna. Verði langtímahlýnun nægileg er líklegt að Grænlandsjökull hverfi að mestu á um 1000 árum, sem myndi hækka hnattræna sjávarstöðu um 7 m. Hversu mikla hlýnun þarf er óvíst, en mörkin gætu legið á bilinu 1–3°C og eru hærri tölur líklegri.

Tafla 3.2 Fimm flokkar áhyggjuefna samkvæmt skýrslu Milliríkjanefndar frá 2001. Lykiláhættuþættir tengjast einum eða fleiri flokkum.



Mynd 3.7 Sviðsmyndir um sjávarstöðubreytingar til aldamóta. Línurnar sýna meðaltal líkana fyrir sviðsmyndirnar og umslagið öryggisbil sjávarborðshækkunar hverrar sviðsmyndar. Til hægri sést líkleg meðalhækkun á tímabilinu 2081–2100 fyrir nokkrar ólíkar sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Myndin endurspeglar stöðu mála og þekkingu eins og hún var 2013, en síðan þá hefur átt sér stað hröð bráðnun íshvela, einkum þeirra sem kelfa í sjó fram, sem gæti valdið mun meiri hækkun en myndin sýnir. (Heimild IPCC, 2013 mynd SPM.9. Sjá nánar tilvísun 2.)



Mynd 3.8 Hnattræn sýn á áhættu sem tengist loftslagsbreytingum. Myndin til hægri sýnir samband hlýnunar og fimm atriða sem ástæða er til að hafa áhyggjur af (tafla 3.2). Litakvarðinn sýnir áhættu. Hvítur litur þýðir að áhrif loftslagsbreytinga eru ekki merkjanleg, gulur litur þýðir að áhrif loftslagsbreytinga eru merkjanleg (miðlungsvissa), rauður litur þýðir mikil og víðfeðm áhrif loftslagsbreytinga og fjólublár þýðir mjög mikla áhættu tengda mörgum þáttum. Myndin til vinstri sýnir þróun hitafars á síðustu öld og líklega þróun samkvæmt tveimur sviðsmyndum um losun gróðurhúsalofttegunda á þessari öld. Hitakvarðarnir tveir sýna hlýnun miðað við meðaltal 1986–2005 annars vegar og meðaltal 1850–1900 hins vegar. Síðara tímabilið er notað sem ígildi tímans fyrir daga iðnbyltingar. (Heimild IPCC, 2014, mynd SPM Box 1. Sjá nánar tilvísun 2.)

hættuleg röskun á loftslagi myndi ekki eiga sér stað. Tekið hefur verið saman yfirlit um lykiláhættuþætti, sem líta má á sem alvarlegustu afleiðingar. Matið er byggt á því hversu líklegir áhættuþættirnir eru, umfangi þeirra, því tjóni sem þeir geta valdið, hvort afleiðingar séu afturkræfar, hvort um langtímahættu sé að ræða, hvort tjónnæmi og áraun sé varanleg og hvort takmarkaðir möguleikar séu á að aðlagast afleiðingum. Lykiláhættuþættir tengjast fimm flokkum áhyggjuefna[20], sem upphaflega voru settir fram í þriðju úttekt Milliríkjanefndar árið 2001, og marka afleiðingar og tjón fyrir vistkerfi, þjóðfélög, efnahagsgeira og svæði[21]. Flokkarnir eru sýndir í töflu 3.2 og mynd 3.8 sýnir samband hlýnunar[22] og áhættu þeim tengda.

Lykiláhættuþættir spanna bæði efnahagsgeira og svæði og *mikil vissa* er fyrir því að afleiðingar þeirra séu verulegar. Sérhver áhættuþáttur tengist einum eða fleiri flokkum áhyggjuefna (ÁE).

1. Hætta á slysum, manntjóni, heilsufarsvanda eða skerðingu lífsbjarga á lágsvæðum nærri ströndu, á smáeyjum og á láglendum eyjum í þróunarríkjum, vegna strandflóða og sjávarborðshækkunar (ÁE 1–5).
2. Skertar lífsbjargir og hætta á alvarlegum heilsufarsvanda í stórum borgarsamfélögum vegna flóðahættu á sumum svæðum (ÁE 2 og 3).
3. Kerfislæg áhætta vegna aftakaveðra sem geta valdið tjóni á veigamiklum innviðum, s.s. rafkerfum, vatnsveitum, heilsugæslu og öryggisþjónustu (ÁE 2–4).
4. Hætta á aukinni sjúkdóma- og dánartíðni þegar hitabylgjur ganga yfir, sérstaklega meðal þeirra sem vinna utandyra og meðal viðkvæmari hópa í þéttbýli (ÁE 2 og 3).
5. Ógn við matvælaöryggi og röskun á matvælaframleiðslu og dreifingu matvæla, vegna hlýnunar, þurrka, úrkomubreytinga og aftakaveðurs, sérstaklega gagnvart fátækari hópum bæði í þéttbýli og dreifbýli (ÁE 2–3).
6. Hætta á tekjusamdrætti hjá bændum og hirðingjaþjóðfélögum á þurrum svæðum og að þeim verði allar bjargir bannaðar vegna ónógs aðgengis að vatni til neyslu og áveitu.
7. Hætta á verulegu tjóni á vistkerfum í hafi og á strandsvæðum. Skertar lífsbjargir vegna taps á náttúrugæðum, þ.e. virkni, afurðum og þjónustu vistkerfa, sérstaklega í strandveiðisamfélögum í hitabeltinu og á norðurheimskautssvæðinu (ÁE 1, 2 og 4).
8. Hætta á verulegu tjóni á ferskvatnsvistkerfum og öðrum vistkerfum á landi og jafnframt á tegundafækkun og minni náttúrugæðum (ÁE 1, 3 og 4).

Margir lykiláhættuþættir eru sérstaklega vandasamir í þeim löndum sem eru skemmst á veg komin í þróun, þar sem aðlögunargeta er takmörkuð.

Með aukinni hlýnun aukast líkur á alvarlegum, víðtækum og óafturkræfum áhrifum. Sumir áhættuþátta eru verulegir við 1–2°C hlýnun frá því fyrir iðnbyltingu en í öllum áhyggjuflokkunum verður áhætta mjög mikil ef hlýnun fer yfir 4°C (mynd 3.8). Meðal afleiðinga má þá nefna verulegan tegundadauða, verulega áhættu fyrir matvælaöryggi á svæðisbundna sem hnattræna vísu og að álag vegna hita og raka torveldi athafnir utandyra svo sem landbúnaðarstörf og aðra útivinnu, a.m.k. hluta ársins *(mikil vissa)*. Ekki er vitað nákvæmlega hversu mikla hlýnun þarf svo ýmis kerfi umturnist og skyndilegar óafturkræfar breytingar eigi sér stað, en hættan á því að farið sé yfir slíka þröskulda, í náttúrunni eða tengdum félagskerfum eykst með hlýnun *(miðlungsvissa)*.

Draga má úr áhættu með því að takmarka umfang og hraða loftslagsbreytinga. Áhættan er mun minni ef losun fylgir sviðsmyndum þar sem verulega er dregið úr losun (RCP2.6) miðað við þær sviðsmyndir þar sem mest er losað (RCP8.5), sérstaklega á síðari hluta 21. aldar *(mjög mikil vissa)*. Einnig dregur verulega úr aðlögunarþörf ef fylgt er sviðsmynd þar sem dregið er úr losun, en í öllum sviðsmyndum sem skoðaðar hafa verið er nokkur hætta á skaðlegum afleiðingum *(mjög mikil vissa)*.

3.10 Þróun losunar gróðurhúsalofttegunda og Parísarsamkomulagið

Á fundi í París í desember 2015 náðu aðildarþjóðir Sþ samkomulagi[23] um að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda svo hlýnun frá iðnbyltingu yrði vel undir 2°C, en jafnframt skyldi leitast við að takmarka hlýnunina við 1.5°C. Þetta samkomulag er kallað Parísarsamkomulagið.

Í skýrslu IPCC frá 2013 var lagt mat á það hversu líklegt væri að hlýnun innan hverrar sviðsmyndar færi yfir sett mörk[24] sem valin voru 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 og

4.0°C frá því fyrir iðnbyltingu. Tafla 3.3 sýnir hlutfallslegan fjöldi líkana sem fara yfir þessi mörk innan hverrar sviðsmyndar. Hlutfallstölurnar sýna ekki formleg líkindi, en gefa þó til kynna þá óvissu sem ríkir um framtíðarhlýnun a.m.k. fyrir CMIP5 líkönin. Tafla 33 sýnir að í sviðsmynd RCP2.6 hlýnar um meira en 1.5°C í um helmingi líkana en rétt ríflega fimmtungur þeirra nær 2.0°C hlýnun. Í sviðsmynd RCP4.5 hlýnar meira en 1.5°C í öllum líkönum og meira en 2.0°C í langflestum.

Í öðrum dálki töflu 3.3 er einnig sýnd líkleg hlýnun frá iðnbyltingu, staðalfrávik og óvissumörk[25], fyrir hverja sviðsmynd. *Líklegt* er talið að hlýnunin liggi innan 5–95% markanna fyrir hverja sviðsmynd. Samkvæmt töflunni er *líklegt* að það hlýni meira en 1.5°C fyrir allar sviðsmyndir nema RCP2.6, og *líklegt* að hlýnunin verði meiri en 2°C í sviðsmyndum RCP6.0 og RCP8.5. Í sviðsmynd RCP4.5 er líklegra en ekki að það hlýni meira en 2°C. Hvað Parísarsamninginn varðar er því ljóst að einungis losun í samræmi við sviðsmynd RCP2.6 á góða möguleika á að uppfylla markmið samningsins við að halda hlýnun jarðar innan við 2°C en ef leitast á við að takmarka hlýnunina við 1.5°C þarf að draga meira úr losun.

Þessar niðurstöður fara nokkuð eftir jafnvægissvörun líkana, þ.e. hversu mikið hlýnar ef styrkur CO_2 í lofthjúpnum tvöfaldast. Í CMIP5 líkönum er þessi svörun á bilinu 2.0–4.5°C en sé byggt á rannsóknum á fornveðurfari, áhrifum stórgosa og hlýnun síðustu aldar telur IPCC að jafnvægissvörunin sé *líklega* á bilinu 1.5–4.5°C[26]. Sé raunverulegt gildi lægra en niðurstöður CMIP5 líkananna gefa til kynna þá er einnig mögulegt að RCP4.5 nái að uppfylla a.m.k. 2°C takmarkið[27]. Í þessu samhengi er þó mikilvægt að hafa í huga að súrnun sjávar mun halda áfram ef losun er í samræmi við sviðsmyndir RCP4.5–RCP8.5, sjá nánar umfjöllun í kafla 6.

Í aðdraganda Parísarsamkomulagsins sendu aðildarþjóðir Sþ inn yfirlýsingar um það hversu mikið þær hygðust draga úr losun á næstu áratugum. Ljóst er að heildarárhif þessara loforða munu ekki ná að uppfylla markmið samkomulagsins[28]. Yfirlýsingarnar ná flestar einungis til 2030 en ef gert er ráð fyrir álíka metnaði aðildarþjóða næstu áratugi eftir þá verður hlýnunin á bilinu 2.6–3.2°C. Í þessu tilviki færi losun þá nærri því sem lýst er í sviðsmynd RCP4.5.

Önnur leið til að skoða hversu mikið þarf að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda er að miða við heildarlosun vegna bruna jarðefnaeldsneytis frá upphafi iðnbyltingar[29]. Frá 1870 til 2016 var heildarlosun CO_2 vegna bruna jarðefnaeldsneytis og breytinga á landnotkun um 2100 $GtCO_2$. Ef miðað er við 66% líkur á að halda hnattrænni hlýnun innan 2°C má ekki brenna meira en 2900 $GtCO_2$ sem þýðir að bruni jarðefnaeldsneytis má ekki fara yfir 800 $GtCO_2$ á næstu áratugum[30]. Á tímabilinu 2006–2015 var heildarlosun CO_2 vegna bruna jarðefnaeldsneytis og breytinga á landnotkun um 37.6 $GtCO_2$ á ári sem þýðir að ef ekki verður dregið úr losun gróðurhúsalofttegunda mun kolefniskvótinn klárast á rúmum tveimur áratugum. Þó að veruleg óvissa sé í ofangreindum tölum[31], sem og á jafnvægissvörun, er ljóst að ef uppfylla á Parísarmarkmiðin eru ekki margir áratugir til stefnu.

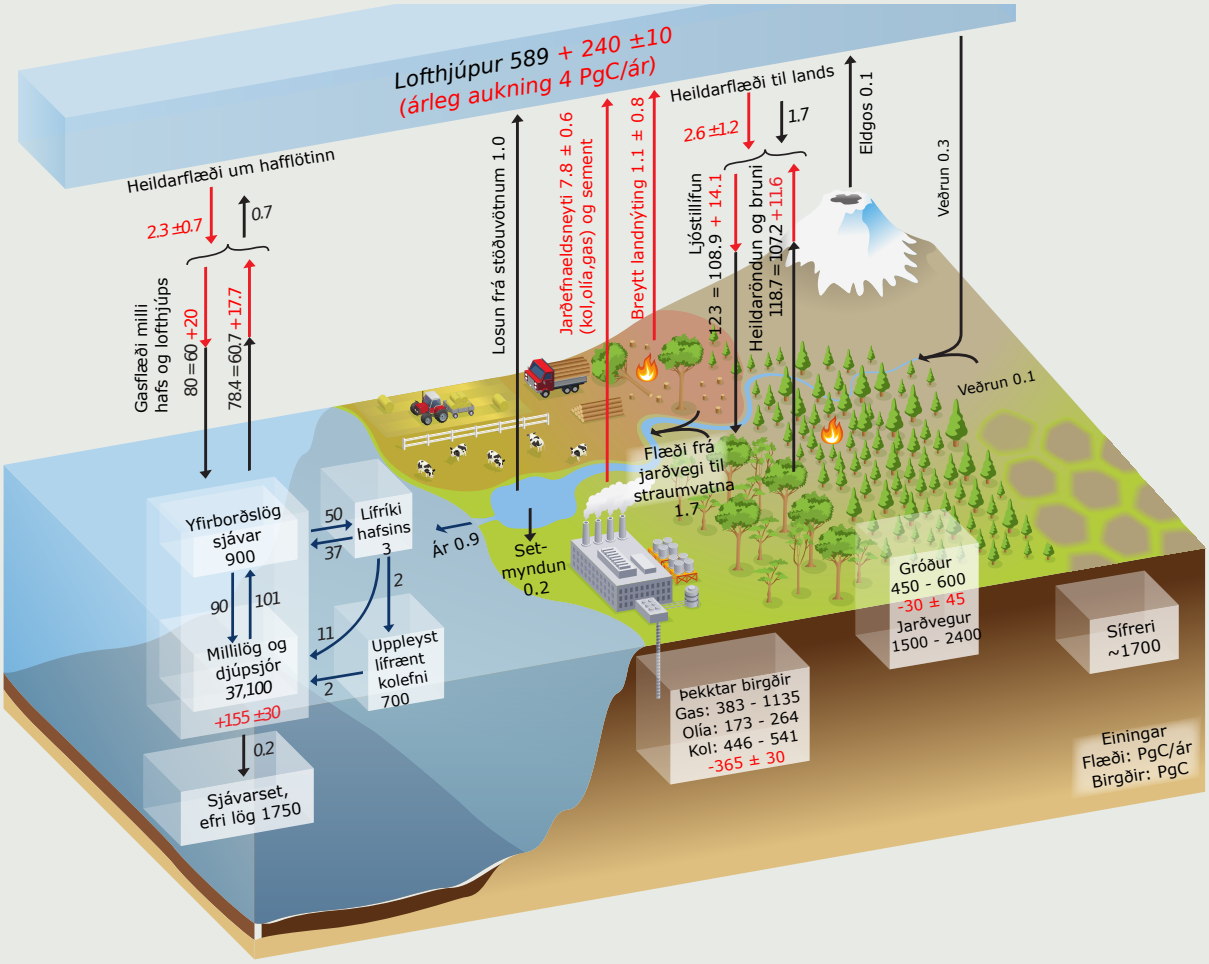
Sviðsmynd	ΔT (°C) 2081–2100	ΔT > +1.0°C	ΔT > +1.5°C	ΔT > +2.0°C	ΔT > +3.0°C	ΔT > +4.0°C
RCP2.6	1.6 ± 0.4 (0.9, 2.3)	94%	56%	22%	0%	0%
RCP4.5	2.4 ± 0.5 (1.7, 3.2)	100%	100%	79%	12%	0%
RCP6.0	2.8 ± 0.5 (2.0, 3.7)	100%	100%	100%	36%	0%
RCP8.5	4.3 ± 0.7 (3.2, 5.4)	100%	100%	100%	100%	100%

Tafla 3.3 Hlýnun frá iðnbyltingu fyrir tímabilið 2081–2100 í CMIP5 líkönum. Fyrir hverja sviðsmynd eru sýnd meðaltöl líkananna ± staðalfrávik, auk 5% og 95% vikmarka innan sviga. Einnig er sýndur hlutfallslegur fjöldi CMIP5 líkana sem sýna meiri hlýnun en 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 og 4.0°C (byggt á töflu 12.3 í heimild 24).

3B Kolefnisjöfnuður Íslands

Stærsti þátturinn í kolefnisjöfnuði hvers lands er yfirleitt hin náttúrulega hringrás CO_2 milli andrúmslofts, gróðurs og jarðvegs. Á heimsvísu er áætlað að landmassi jarðar hafi árlega tekið upp 123 PgC á ári með ljóstillífun gróðurs og losað á móti um 118.7 PgC með öndun á tímabilinu 2000–2009. Það jafngildir árlegri nettóuppsöfnun um 2.6 PgC í gróðri og jarðvegi annars staðar en þar sem virk jarðvegs- og skógareyðing á sér stað og að 1.7 PgC hafi borist til sjávar með árvatni (mynd 3.9). Til samanburðar var árleg losun manna á sama tímabili með bruna jarðefnaeldsneytis 7.8 PgC og 1.1 PgC með skógar- og jarðvegseyðingu, sem var 6.6% og 0.9% af því CO_2 sem losnaði með öndun frá plöntum og jarðvegi árlega. Þrátt fyrir að þessar árlegu hlutfallsstærðir í auknu flæði CO_2, með bruna jarðefnaeldsneytis og breytingu á landnýtingu, virðist ekki mjög stórar við fyrstu sýn, þá hafa þær stöðugt aukið það magn CO_2 sem er í hringrás og þar með valdið síhækkandi styrk CO_2 í andrúmslofti, en hann hefur hækkað úr 278 ppm CO_2 um 1750 upp í um 407 ppm árið 2017 (sjá grein 3.5).

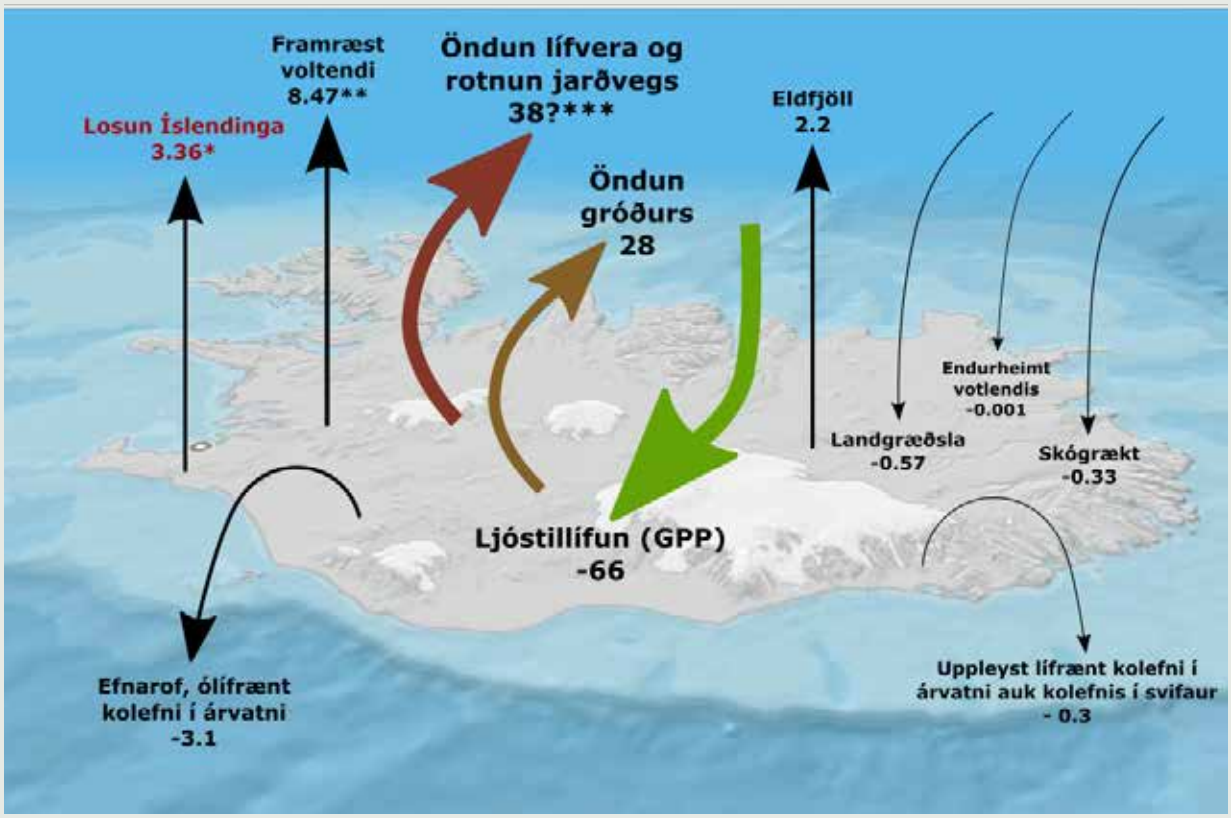
Árið 2012 kom út bók um kolefnishringrás Íslands[33], en í henni var í fyrsta sinn reynt að gefa yfirlit um bæði lífræn og ólífræn ferli sem tengjast kolefnishringrás landsins, líkt og gert var fyrir alla jörðina á mynd 3.9. Með leyfi höfundar er hér endurgerð lykilmynd úr bókinni sem tekur saman öll þessi ferli og bætt við ýmsum nýjum upplýsingum sem komið hafa fram eftir að bókin kom út 2012. Fyrir kolefnisbúskap Íslands er heppileg eining milljón tonn CO_2 en 1 PgC samsvarar 3664 milljón tonnum CO_2.



Mynd 3.9 Einfölduð mynd af kolefnishringrás jarðar 2000–2009. Tölur standa fyrir magn kolefnis (kolefnisforða) í PgC (1 PgC = 10^{15} g C) og flæði kolefnis í PgC á ári. Svartar tölur og örvar tákna ástandið fyrir iðnbyltingu, en rauðar tölur og örvar tákna flæði C á árunum 2000–2009; þ.e. breytingu vegna áhrifa mannsins eftir 1750. (Heimild: IPPC (2013), sjá tilvísun 32 mynd 6.1.)

Kolefnishringrás Íslands (mynd 3.10) lítur um margt líkt út og fyrir jörðina alla. Þar er stærsti liðurinn öndun frá plöntum, dýrum (örverum) og jarðvegi, eða 66 milljónir tonna. Til viðbótar er áætluð árleg CO_2 losun alls framræsts votlendis um 8.5 milljónir tonna, en hún er áætluð út frá kortlögðu flatarmáli alls framræsts lands og alþjóðlegum losunarstuðlum fyrir N-Evrópu[34]. Eldvirkni losar að jafnaði um 2,2 milljónir tonna CO_2 á hverju ári og losun manna frá iðnaði, orkuvinnslu, landbúnaði, úrgangi og efnanotkun í byggingum, samgöngum o.fl. nam alls um 3.4 milljónum tonna. Alls er því áætlað að um 80 milljónir tonna af CO_2 losni að jafnaði frá Íslandi á hverju ári, og um 18% þeirrar losunar stafi af beinni eða óbeinni (vegna landnýtingar) losun manna.

Mynd 3.10 sýnir að árleg upptaka gróins lands með ljóstillífun er um 66 milljónir tonna hérlendis. Við þá tölu bætist svo árleg binding með skógrækt, landgræðslu og endurheimt votlendis, sem nam um 0,9 af milljónum tonna CO_2 árið 2015, og efnaveðrun (efnarof) ólífræns CO_2 og flutningur lífræns C með árvatni til sjávar, sem nam samtals um 3.4 milljónum tonna árið 2006. Árleg upptaka nemur alls um 70.3 milljónum tonna af CO_2, en um 1.3% hennar er með



Mynd 3.10 Einfölduð mynd af kolefnishringrás Íslands á síðasta áratug. Tölur standa fyrir flæði kolefnis í milljónum tonna CO_2 á ári. Jákvæðar tölur sýna losun frá landi til andrúmslofts en neikvæðar sýna upptöku CO_2 úr andrúmslofti og umbreytingu þess í ýmis önnur efnasambönd. Tölur um losun Íslendinga, losun frá framræstu votlendi og upptöku með skógrækt, landgræðslu og endurheimt votlendis eru fyrir árið 2015 (sjá heimild 34), en aðrar tölur eru áætlaðar fyrir árið 2006 og voru fengnar frá heimild 33.

** Losun CO_2 af mannavöldum frá Íslandi var 3.36 milljón tonn CO_2 árið 2015[34], en alls var heildarlosun af mannavöldum 4.54 milljóna tonn CO_2-ígilda, þegar öðrum gróðurhúsalofttegundum hafði verið bætt við. Þessar tölur taka ekki til losunar vegna breytinga á landnýtingu (framræslu votlendis o.fl.). Að auki eru alþjóðaflug og siglingar ekki taldar með.*

*** Losun CO_2 frá framræstu votlendi, sem annaðhvort hefur verið breytt í ræktað land eða er flokkað sem almennt graslendi, var áætluð vera 8.47 milljón tonn CO2 árið 2015. Þetta er langstærsti þátturinn í losun gróðurhúsalofttegunda sem tengist landnýtingu, en alls losnuðu 10.27 milljónir tonn CO_2-ígilda frá Íslandi árið 2015 vegna landnýtingar.*

**** Hvað kolefnisjöfnuð Íslands varðar er mest óvissa á þessum þætti. Að hluta skarast hann einnig við það magn CO_2 sem áætlað er að losni árlega frá framræstu votlendi.*

stýrðum aðgerðum mannsins (skógrækt, landgræðsla og endurheimt votlendis). Þess ber að geta að flest þau ferli sem sýnd eru á mynd 3-10 eru hitastigsháð[35, 36], og því má búast við breytingum á þeim í framtíðinni með hlýnandi veðurfari.

Munurinn á þessum tveimur stóru tölum í flæði CO_2 um yfirborð landsins (útflæði 80 milljónir tonna og innflæði 70.3 milljónir tonna) er áætlaður kolefnisjöfnuður Íslands á síðasta áratug. Sú tala nemur um +9.7 milljónum tonna CO_2 sem er árleg nettó losun landsins og það magn sem berst frá Íslandi og stuðlar að hækkandi styrk CO_2 í andrúmslofti (mynd 3.3) og súrnun hafsins (sjá kafla 6). Þetta er heldur lægri tala en sem talin er fram til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna, en þar var hún áætluð um +14.8 milljón tonn CO_2-jafngilda árið 2015[34]. Ástæðan er annars vegar að á mynd 3.10 er einungis tekið tillit til upptöku og losunar CO_2, en ekki annarra gróðurhúsalofttegunda, og hins vegar tekur kolefnisbókhald Íslands til Loftslagssamningsins ekki tillit til losunar frá eldfjöllum eða upptöku CO_2 vegna efnaveðrunar landsins.

Þó að metan (CH_4) sé vissulega kolefnissamband, þá er flæði þess til og frá Íslandi sleppt á mynd 3.10. Losun metans til andrúmslofts verður einkum frá óröskuðu mýrlendi og frá jórturdýrum. Nýjar rannsóknir á íslenskum graslendum og skógum sýna hins vegar að metan er bundið úr andrúmslofti í þurrlendisjarðvegi hérlendis[37]. Þrátt fyrir að hraði bindingarinnar sé ekki hár, þá má ætla að hann verði á stórum hlutum gróins þurrlendis hérlendis og því nokkuð óvíst hvernig jöfnuður metans er í raun.

Áhugavert er að bera kolefnisbúskap hér á landi saman við upptöku sjávar á hafsvæðum nærri landinu. Eins og kemur fram í kafla 6 veldur þessi upptaka súrnun hafsins, en í kaflanum kemur einnig fram að Norður-Atlantshaf er afar mikilvægt í þessu sambandi, því á hverju ári tekur það til sín miklu meira CO_2 en það lætur frá sér. Íslandshaf, norður af landinu, er um 406 þúsund ferkílómetrar og mikið er til af gögnum úr rannsóknum Hafrannsóknastofnunar á koldíoxíði í Íslandshafi. Sé heildar-kolefnisjöfnuður landsins, +9.7 milljónir tonna af CO_2 á ári, borinn saman við nettó upptöku yfirborðssjávar í Íslandshafi, fæst að kolefnisjöfnuðurinn jafngildir CO_2 upptöku á 49 þúsund km^2 hafsvæði í Íslandshafi. Til samanburðar má hafa í huga að flatarmál Íslands er tvöfalt stærra, eða um 103 þúsund km^2. Þess ber að gæta að kolefnisjöfnuður landsins er að mestu vegna athafna manna á landinu en upptaka hafsins tengist ástandi lofthjúps jarðar.

Þegar kemur að því að reyna að draga úr hækkandi styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu til að sporna við loftslagsbreytingum og súrnun hafsins þá eru það aðeins fáeinir þættir á mynd 3.10 sem stjórnvöld, fyrirtæki og almenningur geta haft áhrif á.

3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5

Í 5. matskýrslu IPCC (2013) eru loftslagslíkön úr CMIP5 verkefninu notuð til þess að leggja mat á hlýnun jarðar að gefnum fjórum sviðsmyndum um losun gróðurhúsalofttegunda[38]. Aukning gróðurhúsalofttegunda breytir afdrifum varmageislunar í lofthjúpnum. Mælikvarði á þetta er geislunarálag sem er aukning varmageislunar í átt að yfirborði jarðar mælt í W/m^2. Geislunarálag eykst mismikið í þessum fjórum sviðsmyndum og draga þær nafn sitt af álaginu í lok 21. aldar. Þannig eykst geislunarálag frá iðnbyltingu um 8.5 W/m^2 í sviðsmynd RCP8.5 en um 2.6 W/m^2 í sviðsmynd RCP2.6. Einnig var til samanburðar reiknuð „söguleg“ sviðsmynd þar sem þróun geislunarálags var í samræmi við ætlaða þróun frá iðnbyltingu til okkar daga. Í CMIP5 verkefninu voru mörg loftslagslíkön notuð til að reikna þróun loftslags við hverja sviðsmynd[39] og er fjöldi þeirra sýndur í töflu 3.4.

Sviðsmynd	Geislunarálag W/m2	Fjöldi
Söguleg	Raunþróun	42
RCP2.6	2.6	32
RCP4.5	4.5	42
RCP6.0	6.0	25
RCP8.5	8.5	39

Tafla 3.4 Sviðsmyndir notaðar í CMIP5 verkefninu og fjöldi líkana í hverri.

Sviðsmyndirnar eru ekki spá um losun, en þess er vænst að þær nái að spanna heildarlosun gróðurhúsalofttegunda á 21. öldinni. Til að kanna áhrif þess að draga úr losun eftir 2100 voru sviðsmyndirnar einnig framlengdar til ársins 2500, en ekki er fjallað um þær niðurstöður í þessum kafla[40]. Í greinum 3.10, 4.4 og 6.7 eru sviðsmyndirnar ræddar með hliðsjón af niðurstöðum Parísarsamkomulagsins.

3D Rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna

Um síðustu aldamót var almennt gert ráð fyrir að umtalsverðar breytingar á hinum risastóru ísbreiðum tækju langan tíma og að minni jöklar utan heimskautasvæðanna, t.d. á Íslandi, Svalbarða, í Alaska á strandsvæðum Grænlands og víðar legðu til meginhluta framlags jökla til hækkunar heimshafanna á næstu áratugum. Erfitt var þó að leggja mat á afkomu ísbreiðanna með hefðbundnum afkomumælingum. Um síðustu aldamót var ekki unnt að leggja mat á hvort þessi risastóru svæði væru að bæta við sig eða tapa ís. Því voru ísbreiður heimskautasvæðanna, á Suðurskautslandinu og Grænlandi, í aðalatriðum taldar nærri jafnvægi og fáir gerðu þá ráð fyrir að á þessu yrði grundvallarbreyting í nánustu framtíð.

Þó hafði verið ljóst frá því um 1980 að ísbreiða vesturhluta Suðurskautslandsins liggur að miklu leyti á undirlagi sem er undir sjávarmáli og jöklar þar tóku líklega miklum breytingum milli jökulskeiða og hlýskeiða ísaldar. Hlýnun af mannavöldum kynni að hafa í för með sér miklar breytingar á jöklum á þessu svæði ef marka mætti vísbendingar úr jarðsögunni og ákveðnar jöklafræðilegar röksemdir hnigu í sömu átt[41]. Vestanvert Suðurskautslandið ber ís sem samsvarar um 8 m hækkun á sjávarborði heimshafanna.

Bylting hefur orðið á mælingum á afkomu jökla á síðustu einum til tveimur áratugum. Nú gera gervihnattamælingar, einkum þyngdarmælingar GRACE gervihnatta NASA og þýsku geimferðastofnunarinnar DLR, kleift að leggja allnákvæmt mat á breytingar á heildarmassa íss á heimskautasvæðum og reyndar á ýmsum minni svæðum jarðar þar sem jökla er að finna[42]. Mynd 3.11 sýnir massatap ísbreiða Suðurskautslandsins og Grænlands síðan 2002[43]. Einnig eru á sömu mynd sýndar breytingar á meðalsjávarborði heimshafanna. Sjá má að rýrnun heimskautajöklanna hefur vaxið hröðum skrefum síðan báðir jöklarnir voru nærri jafnvægi í upphafi aldarinnar. Meðalrýrnun Grænlandsjökuls á tímabilinu 2002–2016 mælist 281 Gt/ár en Suðurskautsjökulsins 122 Gt/ár, samtals 403 Gt/ár, sem samsvarar rúmlega 1 mm hækkun á meðalsjávarborði heimshafanna á ári, sem er talsvert meira en samanlagt framlag jökla utan heimskautasvæða til hækkunar sjávarborðs á svipuðu tímabili (0,65 mm/ár fyrir tímabilið 2002–2014)[44]. Massabreytingin í upphafi tímabilsins árið 2002 var um 195 Gt/ár fyrir Grænland og einungis um 25 Gt/ár fyrir Suðurskautslandið, samtals 220 Gt/ár, en árið 2016 hafði rýrnunin hert á sér í 367 Gt/ár fyrir Grænland og 220 Gt/ár fyrir Suðurskautslandið, samtals 587 Gt/ár. Það samsvarar tæplega 2 mm hækkun sjávarborðs á ári (óvissa í þessum tölum flestum er á bilinu 10–20%). Hraði rýrnunarinnar hefur þannig tvöfaldast fyrir Grænland og áttfaldast fyrir Suðurskautslandið á tímabilinu 2002–2016.

Mælingar á hraða ísskriðs og lækkun á yfirborði jöklanna sýna að mestu breytingarnar eiga sér stað á nokkrum afmörkuðum svæðum nærri ströndinni þar sem skriðjöklar kelfa í sjó fram. Á Grænlandi er einkum um að ræða Ilulissatjökul á vesturströndinni og nokkra aðra jökla, en á Suðurskautslandinu eru breytingarnar hraðastar á skriðjöklum við Amundsenflóa á vesturströndinni[43,45]. Mælingar sýna hraða hörfun jökulsporða á þessum slóðum, sem nemur tugum km á nokkrum stöðum það sem af er þessari öld, og hafdýpið þar sem jöklarnir kelfa í sjó fram vex víða eftir því sem þeir hörfa, sérstaklega við fyrrnefndan Amundsenflóa. Fyrirliggjandi gögn benda til þess að hraðfara og óafturkræf hörfun og þynning hluta vestanverðs Suðurskautsjökulsins kunni að vera hafin[46] og muni ekki stöðvast eða ganga til baka þótt andrúmsloftið hætti að hlýna. Ekki er unnt að segja til um það með jöklafræðilegum líkanreikningum hversu hröð þessi þróun verður á næstu áratugum vegna óvissu um eðli kelfingar, ísskriðs og fleiri jökla- og haffræðilegra þátta.

Mynd 3.11 sýnir einnig að hækkun á sjávarborði heimshafanna hefur hert verulega á sér á síðustu árum. Meðaltalshækkunin var 3.4±0,4 mm/ár á tímabilinu 1993–2016 sem gervihnattamælingar spanna[47] en hækkaði í 5–6 mm/ár á árunum 2016 og 2017 ef litið er til tölfræðilegrar aðfellu sem jafnar út breytingar milli ára (sjá rauða ferilinn á myndinni). Mun meiri óvissa er um hraða hækkunarinnar yfir fárra ára tímabil en tímabil sem spanna nokkra áratugi. Ljóst er að hækkun sjávarborðsins það sem af er þessari öld hefur hert mikið á sér frá meðaltali 20. aldar sem var um 1.8 mm/ár. Nýlega voru nákvæmar mælingar á breytingum í þyngdarsviði jarðar greindar. Sýna þær að grunnvatn hefur safnast verulega upp á nokkrum svæðum jarðar. Á síðari árum hefur það vegið á móti vaxandi massatapi

Mynd 3.11 Breytingar á massa ísbreiða Suðurskautslandsins og Grænlands á tímabilinu 2002–2016 skv. mælingum GRACE gervihnatta og hækkun á meðalsjávarborði heimshafanna síðan árið 2002[43]. Sjávarborðsferillinn hefur verið leiðréttur fyrir lóðréttum jarðskorpuhreyfingum (GIA) og áhrif árstíðasveiflu verið numin burt. Rauðar bogadregnar línur sýna fleygboga sem felldir hafa verið að mælingunum með aðferð minnstu kvaðrata. Fleygbogana má nota til þess að meta hraða rýrnunar ísbreiðanna í Gt/ári og hraða sjávarborðshækkunarinnar í mm/ár á mismunandi tímum.

heimskautajöklanna[48]. Dragi úr uppsöfnun vatns á landi mun massatap jöklanna koma að fullu fram og sjávarborðshækkunin herða enn meira á sér. Eins og með massatap jöklanna er erfitt að meta með líkanreikningum hvernig sjávarborðið kann að þróast á næstu áratugum vegna óvissu um framlag jöklanna. Ýmsar þjóðir hafa af þessum sökum lagt fram spár um hækkun sjávarborðs með breiðu óvissubili til þess að endurspegla þessa stöðu og hafa m.a. Hollendingar lagt fram þá spá að sjávarborð í Norðursjó kunni að hækka um 0.65–1.3 m á yfirstandandi öld[43,49]. Hér á landi eru aðstæður aðrar eins og nánar er rætt í grein 5.3 og líklegt að sjávarborð hér við land hækki minna en að meðaltali yfir heimshöfin vegna breytinga á þyngdarsviði sem að hlýst af nálægð við Grænland.

Tilvísanir

1 Milliríkjanefndin er betur þekkt af enskri skammstöfun heitis hennar, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, og er sú skammstöfun notuð í þessari skýrslu.

2 Greinar 3.1 –3.5 og 3.8 byggjast á IPCC 2013. Summary for Policymakers í skýrslunni Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, SK. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (ritstj.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA.

3 Halldór Björnsson, Árný E. Sveinbjörnsdóttir, Anna K. Daníelsdóttir, Árni Snorrason, Bjarni D. Sigurðsson, Einar Sveinbjörnsson, Gísli Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Snorri Baldursson, Sólveig Þorvaldsdóttir og Trausti Jónsson 2008. Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar. Umhverfisráðuneytið. Í þeim köflum sem hér fylgja er er oft vitnað til fyrri skýrslu sem V2008.

4 Í úttektarskýrslum Milliríkjanefndar er notað visst kvarðað orðalag til þess að tilgreina líkur á tiltekinni atburðarás eða niðurstöðu. Slík orð eru skáletruð í textanum. Sjá nánar hliðargrein 3A Kvarðað orðalag.

5 Myndin byggist á gögnum frá bandarísku haf- og veðurfræðistofnuninni, NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for June 2017 (from www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201706). Greiningarnar byggjast á aðferðum sem lýst er í Peterson, T.C. & R.S. Vose 1997. An Overview of the Global Historical Climatology Network Database. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 78, 2837-2849 og Huang, B., V.F. Banzon, E. Freeman, J. Lawrimore, W. Liu, T.C. Peterson, T.M. Smith, P.W. Thorne, S.D. Woodruff & H-M. Zhang. 2016. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and Intercomparisons. J. Climate, 28, 911–930. dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00006.1

6 Sjá Rahmstorf S, Foster G. og Cahill, N. 2017. Global temperature evolution: recent trends and some pitfalls. Environmental Research Letters, 12:5. Nokkrar gagnaraðir hnattrænna hitavika eru til (Mynd 3.1) og síðustu áratugi hefur hlýnunin í þeim numið 0.17–0.19°C á áratug. Dæmigerð spönn 90% óvissubils á þessum leitnitölum er 0.05°C, t.d. 0.17 [0.15, 0.20]°C á áratug.

7 Skammstöfunin ppm stendur fyrir parts per million, þ.e. milljónasti hluti.

8 Myndin er byggð á gögnum frá Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/) og Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu/).

9 Þessar tölur eru byggðar á svokallaðri PIOMAS-endurgreiningu, en vegna þess hversu lítið er um þykktarmælingar kunna niðurstöður að vera háðar líkani. Tölur um samdrátt eru uppfærðar úr grein Schweiger, A., R. Lindsay, J. Zhang, M. Steele, H. Stern & R. Kwok 2011. Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume, J. Geophys. Res., 116, C00D06, doi:10.1029/2011JC007084.

10 Turner, J., T. Phillips, G. J. Marshall, J. S. Hosking, J. O. Pope, T. J. Bracegirdle & P. Deb. 2017. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016, Geophys. Res. Lett., 44, doi:10.1002/2017GL073656.

11 Hvað síðustu ár varðar er miðað við styrk CO_2 á Mauna Loa, tölur eru frá bandarísku veðurstofunni NOAA, sjá heimild í tilvitnun 8.

12 Einingin PgC táknar petagrömm af kolefni. Þetta er sama magn og gígatonn kolefnis, GtC. Skyld eining er gígatonn af CO2 eða GtCO2, en þegar fjallað er um losun CO^2 nota sumar heimildir GtC en aðrar GtCO2. Auðvelt er að skipta á milli þessara eininga með því að nota sér að í 3.664 kg af CO^2 er 1 kg af kolefni.

13 Corinne Le Quéré ofl., Global Carbon Budget 2016. Earth Syst. Sci. Data, 8, 605-649, 2016 doi.org/10.5194/essd-8-605-2016

14 Greinar 3.6, 3.7 og 3.9 eru útdráttur greina A1, A2 og B1 í IPCC 2014. Summary for policymakers. Í: Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., 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, and L.L.White (ritstj.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA, bls. 1–32. Í samræmi við frumtexta er *kvarðað orðalag* oftast innan sviga í þessum hluta textans.

15 Hér er enska orðið *vulnerability* þýtt sem tjónnæmi, en orðið *exposure* þýtt sem áraun. Síðara orðið hefur einnig verið þýtt sem viðvera (í umfjöllun um áættustýringu vegna ofanflóða) og einnig sem berstaða.

16 Nánar er fjallað um sviðsmyndir í hliðargrein 3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5.

17 Með náttúrulegum breytileika er hér átt við breytileika í veðurfari sem ekki er hægt að rekja til athafna mannkyns.

18 Mynd 3.6c sýnir að mjög fá hafíslíkön ná vel að herma eftir hafísútbreiðslu áranna 1979 – 2012. Hafa ber þetta í huga við mat á áreiðanleika framreikninga á hafísþekju.

19 Rammasamningur Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar heitir á ensku United Nations Framework Covention on Climate Change og er skammstafaður UNFCCC.

20 Hér er *reasons for concern* þýtt sem áhyggjuefni.

21 Sjá Smith, J.B. ofl. 2001. Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken & K.S. White, ritstjóri. Cambridge University Press, Cambridge, 913–967.

22 Í töflunni er miðað við hlýnun frá meðaltali áranna 1986 – 2005, þ.e. frá lokum 20. aldar.

23 Þetta samkomulag er nefnt eftir borginni þar sem það náðist og kallað *Parísarsamkomulagið*. Sjá nánar unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php

24 Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver & M. Wehner. 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. Í skýrslu IPCC 2013; sjá tilvitnun 2.
25 Í töflunni er breyting meðalhita frá 1850 – 1900 til 1985 – 2005, sem er 0.61°C í HadCRUT4 gögnunum, notuð sem ígildi hlýnunar frá því fyrir iðnbyltingu. 5% – 95% óvissumörk miðast við staðaldreifingu byggða á meðaltali og staðalfráviki CMIP5 líkana.
26 Sjá t.d. grein TFE.6 í Stocker, T.F., ofl. 2013. Technical Summary. Í skýrslu IPCC 2013; sjá tilvitnun 2.
27 Sjá t.d. umfjöllun í Ross J. Salawitch, Canty , T.P., Hope A.P., Tribett, W.R. og Bennett B.F. 2017. Paris as a beacon of Hope. Springer 10.1007/978-3-319-46939-3, 180 bls.
28 Rogeli, J., den Elzen M., Höhne N., Fransen T., Fekete H., Winkler H., Schaeffer R., Sha F., Riahi K., Meinshausen M. 2016. Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. Nature 534(7609):631–9. doi: 10.1038/nature18307.
29 Tölur um losun í þessari málsgrein byggjast á heimild 13 en til að gæta samræmis við heimild 30 hafa tölur verið umreiknaðar í GtCO2 í stað PgC með því að margfalda með 3.664. Sjá einnig umfjöllun í Jackson, R.B., Friedlingstein, P., Canadell, J.G., & Andrew, R.M. 2015. Two or Three Degrees: CO2 Emissions and Global Temperature Impacts. The Bridge 45, 16-21.
30 Sjá töflu 2.2 í IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R.K. Pachauri & L.A. Meyer (ritstj.)]. IPCC, Genf, Sviss, 151 bls.
31 Rogeli, J, ofl. 2016. Differences between carbon budget estimates unraveled. Nature Climate Change Nature Climate Change 6, 245–252 2016 doi:10.1038/nclimate2868
32 Ciais, P., C. Sabine, G. Bala, L. Bopp, V. Brovkin, J. Canadell, A. Chhabra, R. DeFries, J. Galloway, M. Heimann, C. Jones, C. Le Quéré, R.B. Myneni, S. Piao & P. Thornton, 2013. Carbon and Other biogeochemical Cycles. Í skýrslu IPCC 2013; sjá tilvitnun 2.
33 Sigurður Reynir Gíslason 2012. Kolefnishringrásin: Hið íslenska bókmenntafélag.
33 Sigurður Reynir Gíslason 2012. Kolefnishringrásin: Hið íslenska bókmenntafélag.
34 Hellsing, V. Ú. L., Ragnarsdóttir, A. S., Jónsson, K., Keller, N., Jóhannsson, Þ., Guðmundsson, J., o.fl. 2017. National Inventory Report. Iceland 2017. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2015. Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Reykjavík, Iceland: Environment Agency of Iceland.
35 Weslien, J., Finér, L., Jón Ágúst Jónsson, Koivusalo, H., Laurén, A., Ranius, T. & Bjarni D. Sigurdsson. 2009. Effects of increased forest productivity and warmer climates on carbon sequestration, run-off water quality and accumulation of dead wood in a boreal landscape: A modelling study. Scandinavian Journal of Forest Research 24. 333-347.
36 Sigurður R. Gislason & Oelkers, E.H. 2003. Mechanism, rates, and consequences of basaltic glass dissolution: II. An experimental study of the dissolution rates of basaltic glass as a function of pH and temperature. Geochimica et Cosmochimica Acta 67 (20). 3817-3832.
37 Maljanen, M., Yli-Moijala, H., Biasi, C., Leblans, N.I.W., De Boeck, H.J., Brynhildur Bjarnadóttir & Bjarni D. Sigurdsson 2017. The emissions of nitrous oxide and methane from natural soil temperature gradients in a volcanic area in southwest Iceland. Soil Biology and Biochemistry 109, 70-80.
38 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. Sjá Taylor, K. E., R. J. Stouffer & G. A. Meehl, 2012: A summary of the CMIP5 experiment design. Bull. Am. Meteorol. Soc., 93, 485–498. Sjá nánari lýsingu á sviðsmyndum í boxi SPM1.1 og kafla 12.3 í skýrslu IPCC 2013; sjá tilvitnun 2.
39 Sjá nánar um í IPCC, 2013. Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections (van Oldenborgh, G.J. ofl. (ritstjh.)). Í skýrslu IPCC 2013; sjá tilvitnun 2.
40 Sjá umfjöllun í Box 1.1 í Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald & J.-G. Winther 2013. Introduction. Í skýrslu IPCC 2013; sjá tilvitnun 2.
41 Mercer, J. H. 1978. West Antarctic ice sheet and CO_2 greenhouse effect – A threat of disaster. Nature, 271(5643), 321–325.
42 Shepherd, A., E. R. Ivins, A. Geruo, V. R. Barletta, M. J. Bentley, S. Bettadpur, o.fl. 2012. A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. Science, 338(6111), 1183–1189. Velicogna, I., T. C. Sutterley og M. R. van den Broeke 2014. Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data, J. Geophys. Res. Space Physics, 41, 8130–8137. doi: 10.1002/2014GL061052.
43 Myndin byggist á gögnum sem aðgengileg eru vefsvæðinu „climate.nasa.gov/vital-signs/“ og eru notuð gögn sem uppfærð eru til 2016. Heimildir gagnaraðanna eru:
Watkins, M. M., D. N. Wiese, D.-N. Yuan, C. Boening og F. W. Landerer 2015. Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons. J. Geophys. Res. Solid Earth, 120, 2648–2671. doi: 10.1002/2014JB011547, Beckley, B. D. , N. P. Zelensky, S. A. Holmes, F. G. Lemoine, R. D. Ray, G. T. Mitchum, S. D. Desai og S. T. Brown 2010. Assessment of the Jason-2 Extension to the TOPEX/Poseidon, Jason-1 Sea-Surface Height Time Series for Global Mean Sea Level Monitoring. Marine Geodesy, 33, Suppl. 1. doi:10.1080/01490419.2010.491029 auk GSFC. 2015. Global Mean Sea Level Trend from Integrated Multi-Mission Ocean Altimeters TOPEX/Poseidon Jason-1 and OSTM/Jason-2 Version 3. Ver. 3. PO.DAAC, CA, USA. dx.doi.org/10.5067/GMSLM-TJ123.
44 Gardner, A.S., G. Moholdt, J. G. Cogley, B. Wouters, A.A. Arendt, J. Wahr o.fl. 2013. A Reconciled Estimate of Glacier Contributions to Sea Level Rise: 2003 to 2009. Science, 340(6134), 852–857. doi: 686 DOI 10.1126/science.1234532.
45 Mouginot, J., E. Rignot og B. Scheuchl 2014, Sustained increase in ice discharge from the Amund¬sen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013. Geophys. Res. Lett., 41, 1576–1584. doi: 10.1002/2013GL059069.
Rignot, E., J. Mouginot, M. Morlighem, H. Seroussi og B. Scheuchl 2014. Widespread, rapid ground¬ing line retreat of Pine Island,

Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. Geophys. Res. Lett., 41(10), 3502–3509.
Sutterley, T. C., I. Velicogna, E. Rignot, J. Mouginot, T. Flament, M. R. van den Broeke, J. M. van Wess¬em og C. H. Reijmer 2014, Mass loss of the Amundsen Sea Embayment of West Ant¬arctica from four independent techniques. Geophys. Res. Lett., 41, 8421–8428. doi: 10.1002/2014GL061940.

46 Joughin, I., og R. B Alley 2011. Stability of the West Antarctic ice sheet in a warming world. Nat. Geosci., 4(8), 506–513.
Joughin, I., B.E. Smith og B. Medley 2014. Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. Science, 344(6185), 735–738.

47 Nerem, R. S., D. Chambers, C. Choe og G. T. Mitchum 2010. Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions. Marine Geodesy, 33(1), Suppl. 1, 435. Uppfært til 2016 með upplýsingum á vefsíðunni sealevel.colorado.edu.

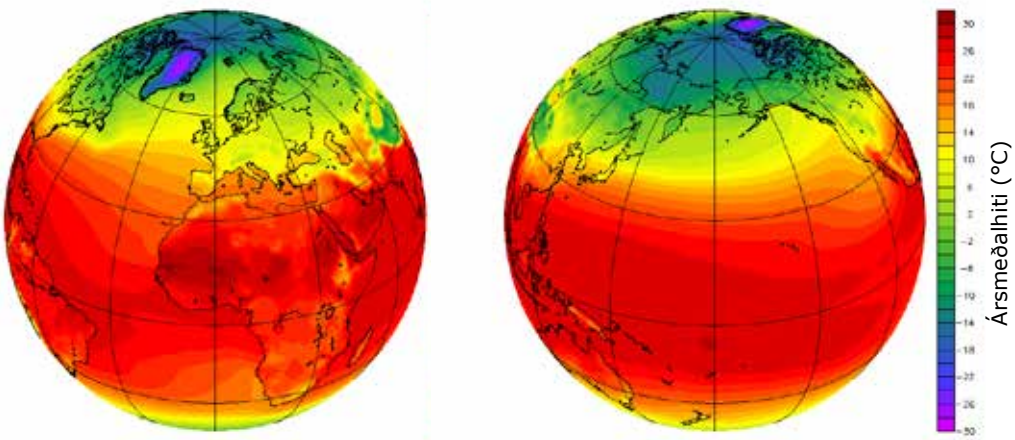
48 Reager, J. T., A. S. Gardner, J. S. Famiglietti, D. N. Wiese, A. Eicker og M.-H. Lo. 2016. A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology. Science, 351(6274, 699–703. doi: 10.1126/science.aad8386.

49 The Delta Committee (Deltacommissie). 2008. Working together with water. A living land builds for its future. Findings of the Deltacommissie. 2008. The Hague, Secretariat Delta Committee.

4 Veðurfarsbreytingar á Íslandi

Samantekt

1. Ísland liggur á mörkum kaldtempraðs- og heimskautaloftslags. Í samanburði við staði á sömu breiddargráðu er hér hlýrra, árstíðasveifla minni en úrkoma meiri.
2. Rannsóknir sýna að á nútíma (frá síðasta jökulskeiði) hefur spönn langtímabreytinga á Íslandi verið um 4°C sem eru mun meiri hitabreytingar en á jörðinni á sama tíma.
3. Síðustu þúsundir ára kólnaði á landinu, en þó skiptust á hlýrri og kaldari tímabil. Kaldasta tímabil nútíma virðist hafa verið á litlu-ísöld sem lauk í upphafi 20. aldar.
4. Frá því að samfelldar mælingar hófust fyrir miðbik 19. aldar hefur hlýnað verulega á landinu og nemur hlýnunin um 0.8°C á öld.
5. Þessi hlýnun var áköfust fyrir miðbik síðustu aldar og svo aftur í lok hennar.
6. Síðustu áratugi hefur hlýnun verið mjög áköf og frá 1980–2015 nam hún 0.47°C á áratug, mest vestan- og norðvestantil á landinu.
7. Úrkoma á landinu hefur aukist frá því að vera um 1500 mm/ár í 1600–1700 mm/ár síðustu ár.
8. Á ársgrundvelli er úrkomuaukning síðustu áratuga nokkuð jafndreifð yfir landið en aukning sumarúrkomu er mest á vesturhluta landsins.
9. Fram að miðbiki aldarinnar er líklegt að hlýnunin verði á bilinu 1.3–2.3°C [-0.9–3.9]°C. Í þeim sviðsmyndum þar sem losun er nærri því sem Parísarsamkomulagið gerir ráð fyrir er hlýnunin hóflegri, eða á bilinu 1.3 til 1.6°C.
10. Til loka aldarinnar dregur verulega sundur með ólíkum sviðsmyndum og er hlýnunin 4.1°C [1.9 6.5]°C í þeirri sviðsmynd þar sem mest er losað af gróðurhúsalofttegundum, en 1.5 til 2.4°C í þeim sviðsmyndum þar sem dregið er úr losun.
11. Gera má ráð fyrir að hlýnunin verði meiri að vetri til en að sumri og nemur munurinn u.þ.b. helmingi af hlýnun á ársgrundvelli.
12. Niðurstöður úr niðurkvörðunum líkana með þéttu reiknineti benda til þess að hlýnunin verði meiri norðanlands en sunnan.
13. Víða um landið verður meira en helmingur sumardaga við lok aldarinnar hlýrri en 15°C.
14. Úrkomubreytingar í sviðsmyndum eru ekki mjög eindregnar en þó má gera ráð fyrir að úrkoma aukist um a.m.k. 1.5% fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Í sumum líkönum er aukningin mun meiri og í niðurkvörðunarlíkönum með hárri upplausn er hún um 4.5% fyrir hverja gráðu sem hlýnar.
15. Þó að líkönum beri ekki vel saman um umfang (og/eða formerki) úrkomubreytinga benda niðurstöður til þess að hún aukist mest síðsumars og á haustin.
16. Niðurstöður úr niðurkvörðunum líkana með þéttu reiknineti eru misvísandi en vísbendingar eru um að úrkomuákefð geti aukist, en jafnframt geti þurrkadögum einnig fjölgað.
17. Sömu líkön benda til þess að það dragi úr vindi en víða í byggð kunna breytingar á gróðurfari einnig að draga úr vindi.



Mynd 4.1 Meðalhiti (°C) á norðurhveli á tímabilinu 1981–2010. Sýnd eru tvö hnattkort, annað með miðpunkt yfir 30°N og hádegisbaug (Greenwich) en hitt kortið er með miðpunkt yfir 30°N og 180°V. Myndin byggist á gögnum úr ERA Interim endurgreiningunni (sjá nánar hliðargrein 4A Endurgreiningar).

4.1 Veðurfar á Íslandi

„Á Íslandi er úthafsveður og eyjaloft miklu mildara og hlýrra en við mætti búast eftir legu landsins á hnettinum.“ Þannig eru upphafsorð loftslagskaflans í *Lýsingu Íslands* eftir Þorvald Thoroddsen[1]. Þorvaldur ræðir síðan að jafnhitalínur á hnettinum liggi almennt ekki samsíða breiddargráðum og segir að lega landa og hafsvæða hafi áhrif á vinda og hafstrauma „sem aftur hafa ýmisleg áhrif á veðurlag hinna einstöku landa“. Mynd 4.1 sýnir ársmeðalhita á norðurhveli jarðar[2] á tímabilinu 1981–2010 og á henni sést að nærri Íslandi er árshiti á bilinu 3–6°C, norðvestan við landið er mun kaldara en hlýrra suðaustan við það.

Nákvæmari mynd af árshita á Íslandi má gera úr gögnum frá íslensku endurgreiningunni[2] og sjá má meðalhita ársins á Íslandi fyrir tímabilið 1981–2010 á mynd 4.2. Myndin sýnir að á láglendi er meðalhitinn 6°C við suðurströndina en um 3°C við norðurströndina. Á hálendinu er svo mun kaldara og á sumum hálendum svæðum er meðalhiti ársins undir frostmarki.

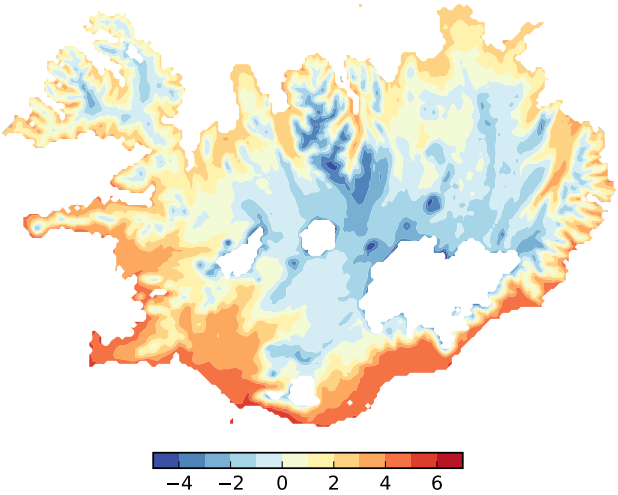
Mynd 4.1 sýnir, rétt eins og Þorvaldur bendir á, að mun hlýrra er á hafsvæðinu umhverfis Ísland en almennt á breiddarstigi landsins. Þessi vik eru mun meiri á Norður-Atlantshafi en á Norður-Kyrrahafi þar sem jafnhitalínurnar liggja frekar samsíða breiddargráðum. Mynd 4.3 sýnir hvernig hitinn á hverjum stað víkur frá meðalhita breiddargráðunnar. Myndin sýnir greinilega að á stóru svæði í norðanverðu Norður-Atlantshafi er mun hlýrra en annars staðar á sömu breiddargráðu. Mestu hitavikin sem sjást á kortunum eru á svæðinu umhverfis Ísland og í átt til Noregs og Svalbarða, og algjöru hámarki er náð út af strönd Norður-Noregs.

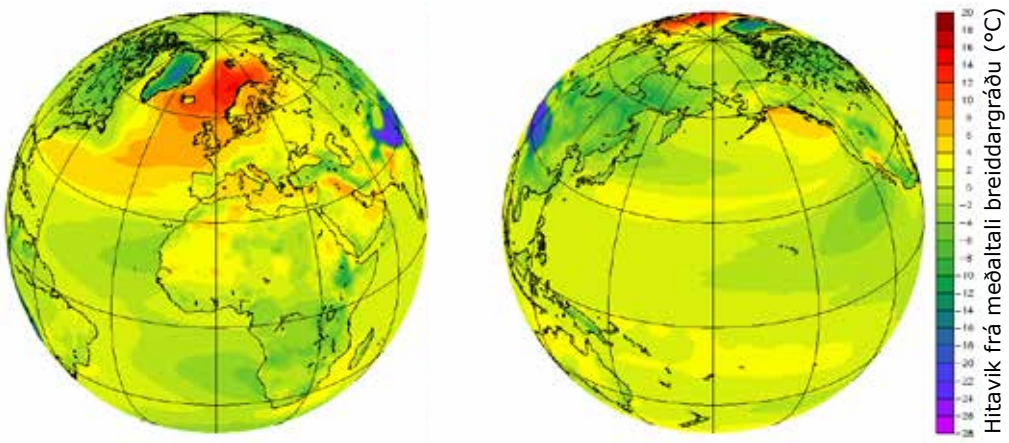
Eitt einkenni þess *úthafsloftslags* sem Þorvaldur kallar *úthafsveður* er að árstíðasveifla lofthita er minni en yfir meginlöndum. Þetta má sjá á mynd 4.4 sem sýnir kort af útslagi árstíðasveiflunnar á norðurhveli. Greinilegt er að útslagið er mjög lítið í hitabeltinu og mun minna yfir hafsvæðum en á meginlöndum. Eina hafsvæðið þar sem útslag árstíðasveiflu er verulegt er yfir Norður-Íshafi en þar hefur hafísinn afgerandi áhrif á árstíðasveifluna.

Mynd 4.4 sýnir að árstíðasveiflan á Íslandi er lítil í samanburði við það sem gerist á meginlöndunum og á norðurheimsskautssvæðinu. Mynd 4.5 sýnir þetta nánar fyrir 15 veðurstöðvar á Íslandi. Myndin sýnir meðalárstíðasveiflu hita[3] fyrir tímabilið 1981–2010 og er veðurstöðvunum raðað réttsælis um landið. Útslag árstíðasveiflunnar er minnst tæplega 9°C (á Dalatanga) en mest um 13°C á Akureyri. Myndin sýnir einnig nokkurn mun á hitafari á stöðvunum. Að vetri til er hlýjast nærri ströndinni sunnanlands (kaldasti vetrarmánuðurinn er 0.7°C á Fagurhólsmýri og 1.6°C á Stórhöfða) en áberandi kaldast á hálendinu norðanlands (á Grímsstöðum á Fjöllum er kaldasti mánuðurinn -4.7°C). Að sumri til fer hlýjasti mánuður víða yfir 10°C, hlýjast er í Reykjavík og á Akureyri (11.2°C), en á hálendinu og á annesjum norðantil er kaldara.

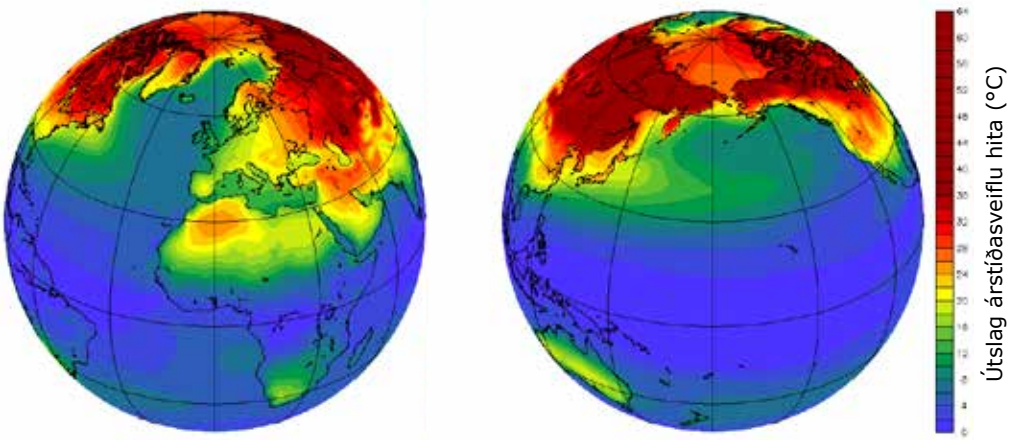
Hversu hlýtt er að sumri til skiptir máli fyrir gróðurfar og það í hvaða loftslagsflokk svæði falla. Til eru nokkur

Mynd 4.2 Ársmeðalhiti (°C) áranna 1981–2010 á Íslandi. Myndin byggist á gögnum frá íslensku endurgreiningunni (sjá nánar hliðargrein 4A Endurgreiningar).

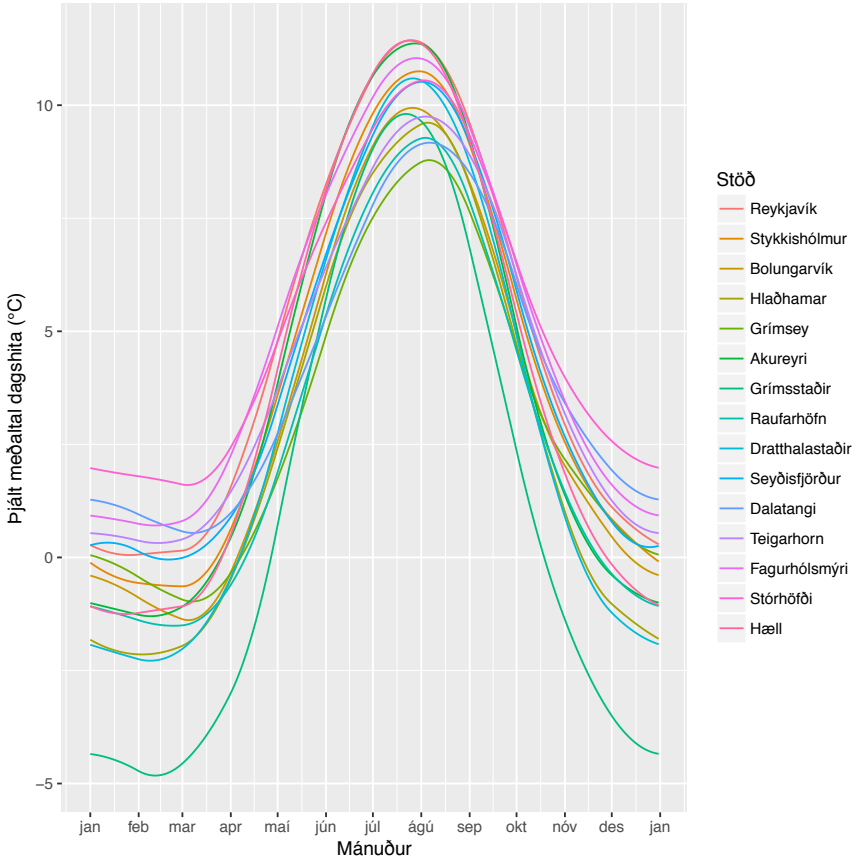




Mynd 4.3 Vik lofthita (°C) frá meðaltali hitans á breiddargráðunni. Sýnd eru tvö hnattkort, annað með miðpunkt yfir 30°N og hádegisbaug (Greenwich) en hitt kortið er með miðpunkt yfir 30°N og 180°V. Myndin byggist á gögnum úr ERA Interim endurgreiningunni (sjá nánar hliðargrein 4A Endurgreiningar).



Mynd 4.4 Útslag árstíðasveiflu lofthitans (°C) á tímabilinu 1981–2010. Útslag árstíðasveiflu er hér skilgreint sem mismunur hæsta og lægsta mánaðarmeðaltals ársins, óháð tíma ársins. Sýnd eru tvö hnattkort, annað með miðpunkt yfir 30°N og hádegisbaug (Greenwich) en hitt kortið er með miðpunkt yfir 30°N og 180°V. Myndin byggist á gögnum úr ERA Interim endurgreiningunni (sjá nánar hliðargrein 4A Endurgreiningar).



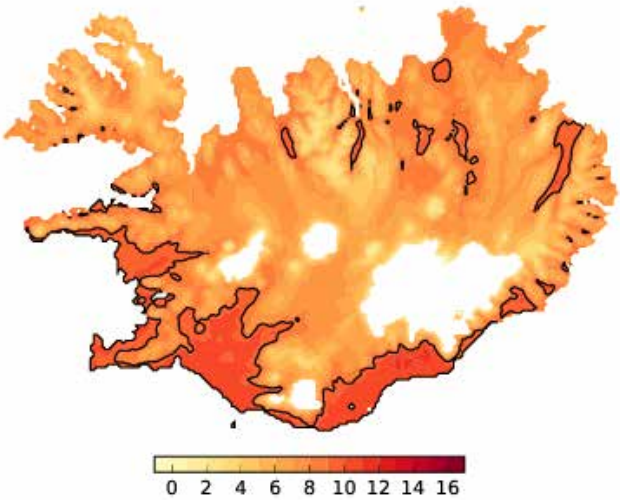
Mynd 4.5 Árstíðasveifla hita (°C) á nokkrum veðurstöðvum frá 1981–2010. Gögn frá Veðurstofu Íslands.

mismunandi kerfi við að flokka veðurfar ólíkra svæða á jörðinni en í því kerfi sem fellur best saman við gróðurbelti jarðar (sk. Köppenflokkun) skilur 10°C meðalhiti hlýjasta mánaðar milli kaldtempraðs- og heimskautaloftslags. Mynd 4.6 sýnir niðurstöður endurgreiningar fyrir sumarhita (júní til ágúst) á Íslandi á tímabilinu 1981–2010. Myndin sýnir einnig 10°C jafnhitalínu fyrir júlímánuð, þ.e. mörkin milli Köppenflokka.

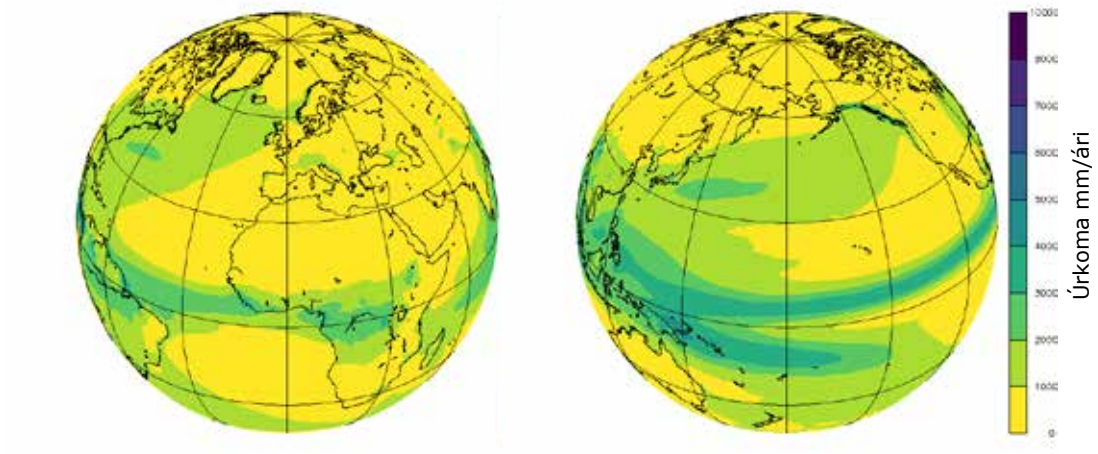
Myndin sýnir greinilega að á láglendi sunnanlands og í sumum dölum norðanlands er hlýrra en 10°C í júlí, en á hálendinu og annesjum norðanlands nær hitinn ekki 10°C. Ísland liggur því á mörkum kald-temprað og heimskautaloftslags. Í bók Markúsar Einarssonar, Veðurfar á Íslandi, er þessi skipting skoðuð fyrir tímabilið 1931 til 1960 og eru niðurstöðurnar á mynd 4.6 í meginatriðum sambærilegar við niðurstöður hans[4]. Eins ber niðurstöðum á mynd 4.5 og mynd 4.6 nokkuð vel saman við útreikninga á hitafari á Íslandi fyrir tímabilið 1961 til 1990[5].

Annað einkenni úthafsloftslags er að þar er úrkoma meiri en yfir meginlöndum. Almennt er úrkoman mest í hitabeltinu en utan þess eru víðfeðm úrkomusvæði yfir úthöfunum og teygja þau sig m.a. norður til Íslands, en þar er úrkoman á bilinu 500–1500 mm á ári (mynd 4.7).

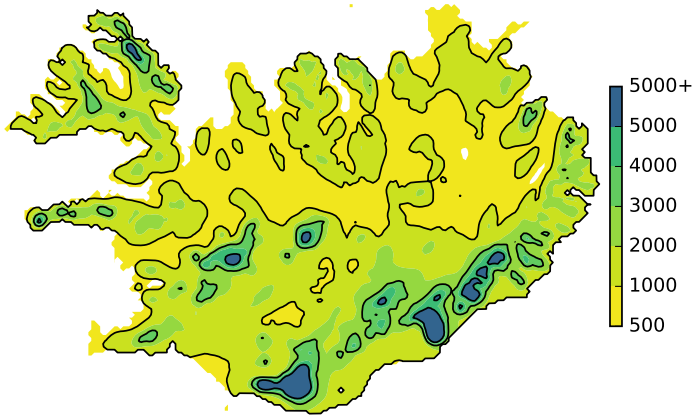
Í upphafsgrein loftslagskaflans í Lýsingu Íslands notar Þorvaldur Thoroddsen orðið *eyjaloft* til að lýsa veðurlagi á Íslandi. Eitt einkenni loftslags á eyjum er að þar rignir gjarnan meira en á hafsvæðinu umhverfis þær. Þegar rakt sjávarloftið fer yfir fjöll kólnar það, rakinn þéttist og getur fallið sem rigning, sérstaklega áveðurs á fjallgörðum. Þessi áhrif landslags á dreifingu úrkomu á Íslandi má sjá á mynd 4.8 sem byggist á íslensku endurgreiningunni. Úrkoma er mun meiri á fjöllum en á láglendi, og mest á hálendinu sunnan- og suðaustanlands. Þessi svæði eru áveðurs í suðlægum áttum og sú mikla úrkoma sem þarna fellur viðheldur íslensku jöklunum. Á norðanverðu landinu er úrkoman mest nyrst á Vestfjörðum og viðheldur þar Drangajökli. Á hálendinu norðan jöklanna er lítil úrkoma og er oft talað um úrkomuskugga á því svæði, en kortið sýnir einnig að lítil úrkoma er á svæði sem teygir sig niður á láglendi víða um norðanvert landið. Eldri greining á



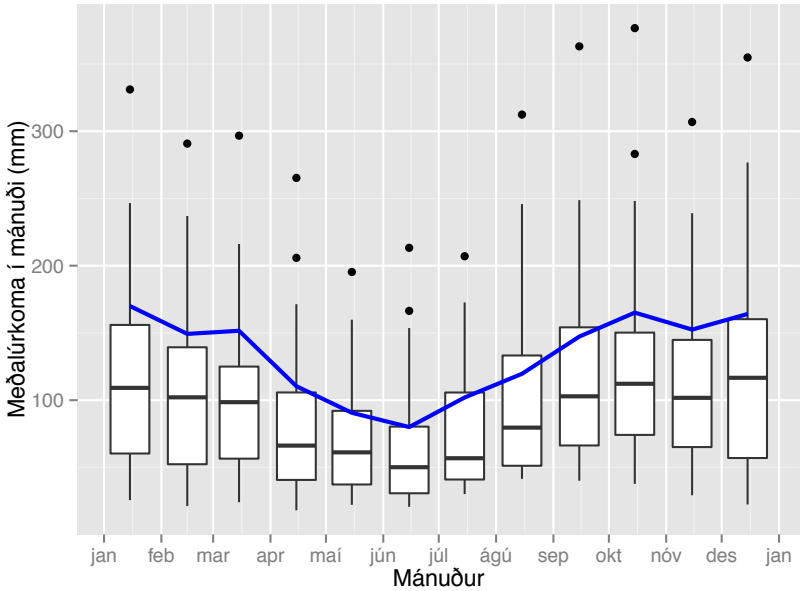
Mynd 4.6 Sumarhiti (°C júní til ágúst) áranna 1981–2010. Svarta línan afmarkar 10°C meðalhita í júlímánuði. Myndin byggist á gögnum frá íslensku endurgreiningunni (sjá nánar hliðargrein 4A Endurgreiningar).



Mynd 4.7 Dreifing ársúrkomu (mm/ári) á norðurhveli fyrir árin 1981–2010. Eins og á mynd 4.1 er byggt á niðurstöðum ERA Interim greiningarinnar og sjónarhorn á hnöttinn er það sama (sjá nánar hliðargrein 4.A Endurgreiningar).



Mynd 4.8 Dreifing ársúrkomu (mm/ári) á Íslandi árin 1981–2010. Heildregnu línurnar marka 1000, 3000 og 5000 mm á ári. Myndin er byggð á gögnum frá íslensku endurgreiningunni (sjá nánar hliðargrein 4.A Endurgreiningar).



Mynd 4.9 Árstíðasveifla úrkomu (mm) frá 1981–2010. Kassaritin eru byggð á tölum frá 32 láglendisstöðvum og meðaltal endurgreiningarinnar er sýnd sem þykk blá lína (byggt á gögnum frá íslensku endurgreiningunni og veðurstöðvum Veðurstofu Íslands).

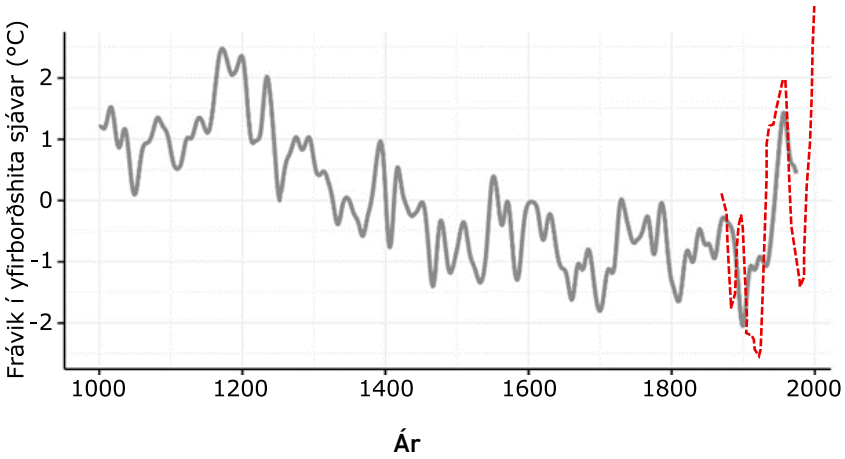
úrkomu fyrir árin 1971–2000 sýnir sambærilega dreifingu[6].

Úrkoma á Íslandi er meiri að vetri til en að sumri og er munurinn milli mestu og minnstu mánaðarúrkomu allt að tvöfaldur. Mynd 4.9 sýnir kassarit[7] af árstíðasveiflu úrkomu á 32 veðurstöðvum á láglendi og í endurgreiningu Veðurstofu Íslands (heildregin lína). Bæði stöðvagögn og endurgreining sýna að úrkoma er mest á haustin og fram eftir vetri, en í lok vetrar og fram á vor dregur úr úrkomu og er lágmarki náð í júnímánuði. Meðaltal endurgreiningarinnar nær bæði yfir hálendi og láglendi sem skilar sér í hærri tölum fyrir mánaðarúrkomu, yfirleitt er mánaðarmeðaltal endurgreiningar nærri 75% hlutfallsmarki dreifingar úrkomu á veðurstöðvum. Árstíðasveifla úrkomu í gögnum frá endurgreiningunni er þó í meginatriðum sú sama og á veðurstöðvum.

4.2 Breytingar á veðurfari á Íslandi frá öndverðu

Náttúrulegar sveiflur einkenna veðurfarssögu jarðar. Loftslag bregst við margs konar breytingum á ytri áhrifaþáttum, s.s. eldgosum, inngeislun sólar, reglubundnum breytingum í afstöðu jarðar og sólar (Milankovitchsveiflur), legu meginlanda, auk breytinga á efnasamsetningu andrúmsloftsins. Þessar breytingar gerast mishratt og taka allt frá örfáum árum upp í margar milljónir ára. Heimildir um náttúrulegar veðurfarssveiflur jarðsögunnar má finna í fornloftslagsgögnum svo sem í set- og ískjörnum. Óbeinar mælingar á svokölluðum veðurvísum í setkjörnum (t.d. plöntuleifum, þykkt setlaga, efnafræðilegum mælingum) eru notaðar til að meta hita, sjávarseltu, gróðurfar og aðrar umhverfisbreytur á þeim tíma sem setlagið myndaðist. Sambærilegar rannsóknir má gera á ískjörnum og trjáhringjum. Með víðtækum samanburði ólíkra tegunda veðurvísa og keyrslum loftslagslíkana næst fram betri skilningur á þeim ferlum sem hafa valdið breytingum á veðurfari gegnum jarðsöguna. Nauðsynlegt er að þekkja vel þessa sögu til að hægt sé að meta hversu nærmt loftslagskerfið er fyrir breytingum á ytri þáttum, hversu mikið af núverandi breytingum eigi sér náttúrulegar skýringar og ekki síst til þess að bregða ljósi sögunnar á núverandi breytingar.

Í þessari grein er farið yfir veðurfarssögu Íslands og nágrennis. Hafið ræður miklu um loftslag á Íslandi og er veðurfar landsins og nærsvæða mjög nærmt á breytingar á sjávarstraumum og legu hafíss. Þar sem landið liggur á mörkum hlýrra og kaldra haf- og loftstrauma þykir það áhugavert til loftslagsrannsókna og því hefur verið safnað viðamiklum gögnum tengdum veðurfarssögu bæði frá landi og úr sjó. Í kafla 2.1 í síðustu skýrslu vísindanefndar (V2008[8]) var greint frá



Mynd 4.10 Breytingar á yfirborðshita sjávar (°C) á Norður-Atlantshafi að sumarlagi árin 1000–1974 , byggt á sjávarsetkjörnum frá landgrunni Íslands, Noregs og Skotlands. Ferillinn sýnir miðaldahlýindin kringum 1200 AD. Frá því um 1250 AD fór hægt kólnandi þar til snemma á 20. öldinni. Þá tók að hlýna og sjávarhiti síðustu áratuga ferilsins er sambærilegur og var á miðöldum. Rauð strikalína sýnir þróun sumarhita yfirborðs sjávar, byggða á sjávarhitamælingum (Heimild: Sjá tilvísun 26).

náttúrulegum veðurfarsbreytingum á Íslandi á jarðsögulegum tíma. Hér verður lögð áhersla á að greina frá nýjum rannsóknum og greinum sem hafa komið út síðastliðin ár og upplýsingar síðustu skýrslu þannig uppfærðar.

Mestur hluti þeirra gagna sem bæst hefur við á síðustu árum eru gögn úr stöðuvatna- og sjávarsetkjörnum sem ná yfir síðustu 10 þúsund árin og því er aðaláherslan á það tímabil í þessum kafla. Þetta jarðsögulega tímabil, eftir að síðasta jökulskeiði lauk, er kallað *nútími* en það hófst fyrir tæplega 12 þúsund árum. Gott yfirlit um veðurfarsbreytingar við Ísland lengra aftur í tímann má finna í skýrslunni frá 2008.

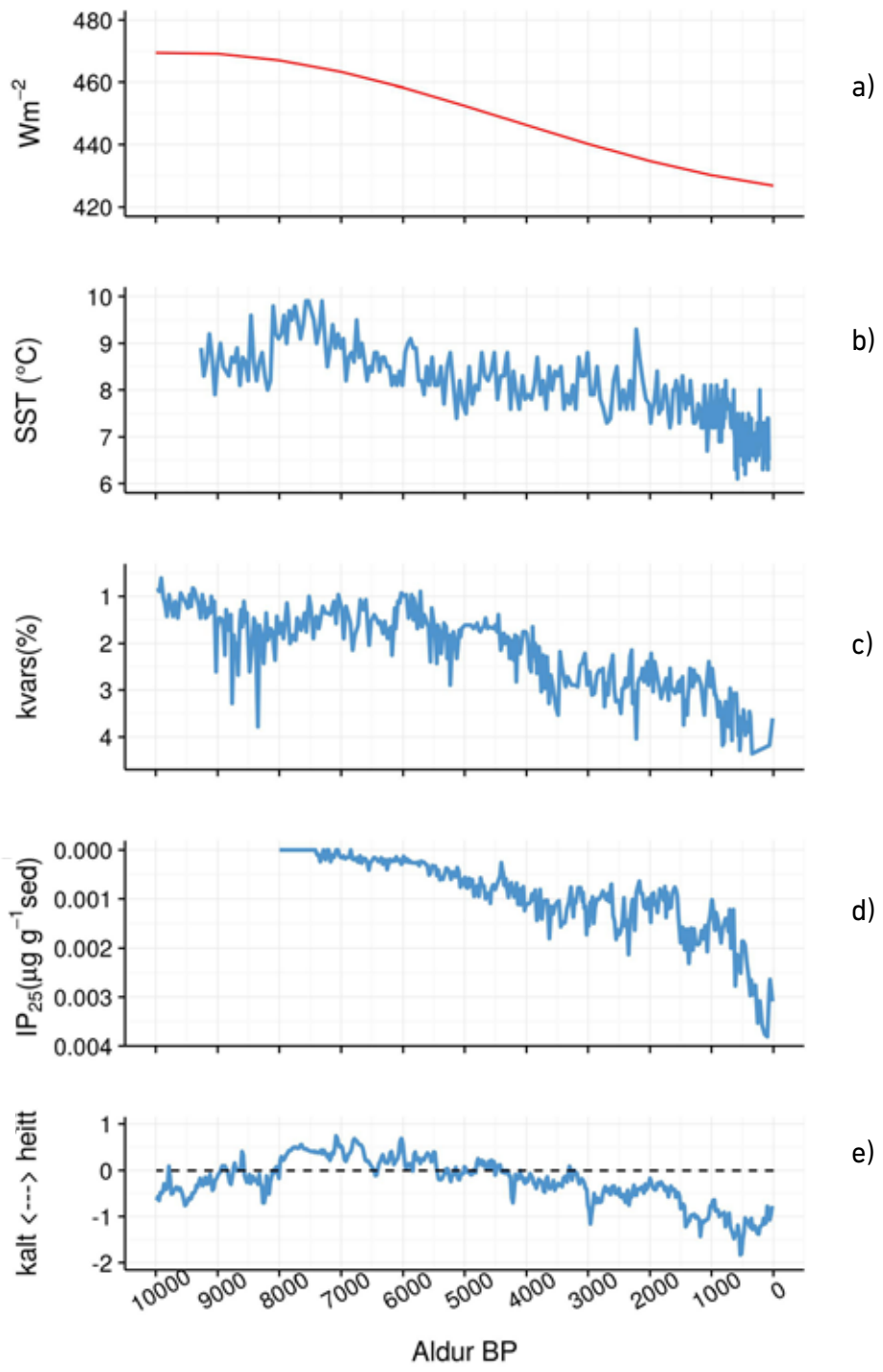
4.2.1 Nútími – Loftslagsbreytingar á Íslandi/Norður-Atlantshafi

Setkjarnar hafa verið teknir úr fjölda stöðuvatna víðs vegar um landið[t.d. 9,10,11,12,13] og sjávarsetskjarnar af landgrunni Íslands[t.d.14,15,16,17,18]. Því er komin ágæt mynd af loftslagssögu Íslands á *nútíma*. Almennt hafa íslensku gögnin mjög góða upplausn en setmyndunarhraði hér er tiltölulega mikill, auk þess sem fjöldi gjóskulaga í setinu auðveldar aldursgreiningar.

Þótt megindrættir loftslagssögu Íslands og nágrennis á *nútíma* séu óbreyttir frá síðustu skýrslu gefa nýjar rannsóknir nákvæmari mynd af umfangi náttúrulegra sveiflna, stærð atburða og tímasetningu þeirra, auk þess sem bæst hefur við í þekkingu á undirliggjandi ferlum og áhrifaþáttum. Undanfarið hefur verið unnið að því að þétta mælingar og fá nákvæmari aldursgreiningar, sérstaklega fyrir síðustu þrjú þúsund árin.

Í setlögum frá Hvítárvatni má til að mynda finna hvarflög sem eru samsett af þykku, grófu sumarlagi og þunnu, fínu vetrarlagi sem saman mynda eitt ár. Búið er að telja hvarflög í setkjörnum Hvítárvatns fyrir síðustu þrjú þúsund árin og því er til nákvæmt tímatal fyrir umhverfisbreytingar sem sjást í vatninu á þessu tímabili. Mælingar á þykkt hvarflaganna eru notaðar til að meta rofstyrk Langjökuls sem kelfir út í vatnið, auk breytinga á öðrum umhverfisþáttum[11,19]. Þá hafa íslenskar kúfskeljar og árlegir vaxtarhringir þeirra verið notaðar til að afla samfelldra háupplausnargagna um loftslagsbreytingar við Ísland. Skeljarnar geyma upplýsingar um ástand sjávar og sjávarhita og með því að aldursgreina þær má fá fram breytingar á sjávarhita ár frá ári [20,21,22,23]. Unnið hefur verið að því að bæta upplausn gagna úr sjávarsetskjörnunum norður af Íslandi og nýlegar rannsóknir hafa bætt þekkingu á breytileika hita og/eða ástandi sjávar við landið síðustu þúsund árin[16,24,25].

Mynd 4.10 sýnir samsettan feril breytinga á yfirborðshita sjávar á Norður-Atlantshafi síðustu þúsund árin. Á myndinni hefur tíu sjávarhitaferlum frá landgrunni Noregs, Íslands og Skotlands verið splæst



Mynd 4.11 a) Inngeislun sólar í júlímánuði við 65°N (sjá tilvísun 33). b) Yfirborðshiti sjávar (SST) að sumarlagi metinn út frá kísilþörungum úr sjávarsetskjarna MD99-2275, sem tekinn var af norðanverðu landgrunni Íslands (sjá tilvísun 18). c). Magn ísrekins efnis í kjarna MD99-2269, sem tekinn var við Húnaflóa, gefur vísbendingar um hafísútbreiðslu (sjá tilvísun 40). Athugið að lóðrétti ásinn er öfugur, en hærra gildi þýðir meiri hafís. d) Hafísferill metinn með greiningu lífmassa, IP25, sem finna má í sjávarsetskjarnanum MD99-2269 sem tekinn var við Húnaflóa (sjá tilvísun 30). Lóðrétti ásinn er öfugur en hærri IP25 gildi gefa vísbendingar um meiri hafís. e) Samsettur stöðuvatnaferill sem sýnir breytingar á sumarhita/loftslagi. Ferillinn er byggður á nokkrum veðurvísum úr stöðuvatnaseti frá Haukadalsvatni og Hvítárvatni (sjá tilvísun 9). Langtímabreytingar í gögnunum fylgja breytingum á inngeislun sólar að sumarlagi á norðurhveli. Myndin sýnir gott samræmi á milli stöðuvatnaferilsins, sjávarhita og hafísgagna. Hlýjasti tími nútíma kemur fram fyrir um 6-8 þúsund árum. Hægfara kólnun kemur fram í gögnunum frá því fyrir um 5500 árum síðan og merki um hafís koma fram á þeim tíma. Litla ísöld ~1300–1900 AD markar kaldasta tíma nútíma. Tímakvarði myndarinnar er í árum BP sem sýnir ár fyrir 1950.

saman til þess að draga fram breytingar á stærra hafsvæði en fást með einstökum kjörnum, sem sýna einnig staðbundnari þætti. Til samanburðar hefur verið bætt á myndina sumarhitaferli sem byggður er á sjávarhitamælingum fram til aldamóta[26].

Fornsegulmælingar hafa verið notaðar til að tengja saman sjávar- og stöðuvatnasetkjarna frá Íslandi til að auðvelda samanburð milli lands og sjávar og gera hann nákvæmari[27]. Með hjálp þessara mælinga hefur verið settur saman 10 þúsund ára ferill sem byggður er á nokkrum veðurvísum úr stöðuvatnaseti frá bæði Haukadalsvatni og Hvítárvatni[9]. Ferillinn er notaður til að lýsa þróun á sumarhita og loftslagi á vatnasviðum þessara tveggja vatna (mynd 4.11e). Góð fylgni er á milli breytinga stöðuvatnaferilsins og sjávarsetskjarna við Ísland sem gefur til kynna að fornloftslagsgögn þessara vatna fylgi að miklu leyti breytingum á sjávarstraumum og hafísútbreiðslu við Ísland[9].

Undanfarin ár hafa nokkrar vísindagreinar fjallað um hafís og tengsl hans við veðurfar. Talið er að hafísútbreiðsla hafi átt stóran þátt í að viðhalda köldum sumrum á *litlu*-ísöld[28] með meira endurkasti sólargeisla á tímum mikillar hafísútbreiðslu. Á þeim tímabilum þegar hafísútbreiðsla var minni dró úr endurkastinu og og sólin hitaði dökkan sjóinn enn frekar. Hafís hefur áhrif á vistkerfi og má nota veðurvísa til að rekja þau áhrif í setkjörnum. Dæmi um þetta er veðurvísirinn IP25 sem er talinn geta endurspeglað hafísútbreiðslu, sérstaklega að vorlagi[29]. Nýlega var 8 þúsund ára langur IP25 hafísferill unninn úr sjávarsetskjarna sem var tekinn við Húnaflóa[30] (mynd 4.11d). Áður hafði styttri IP25 hafísferill verið birtur frá norðurströnd Íslands[31] sem sýnir góða fylgni við söguleg hafísgögn frá Íslandi[32].

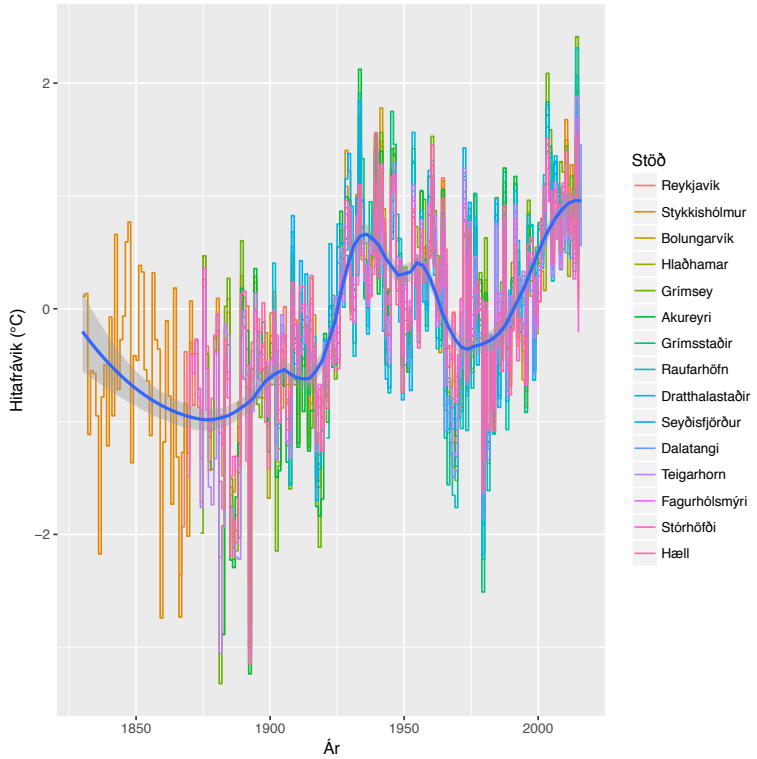
Á *nútíma* fylgdi langtímabreytileiki í veðurfari á norðurslóðum breytingum á inngeislun sólar að sumarlagi á norðurhveli. Þessi inngeislun ræðst af afstöðu jarðar á braut sinni um sólina og náði hámarki fyrir um 9–11 þúsund árum en minnkaði svo hægt eftir það[33,34,35]. Þetta endurspeglast í flestum fornveðurfarsgögnum við Ísland sem fylgja í stórum dráttum þessari langtímasveiflu (mynd 4.11).

Hlýjasti tími *nútíma* á Íslandi (bæði á landi og sjó) kemur þó fram seinna eða fyrir um 6–8 þúsund árum[9,13,14,17,18]. Talið er að þessi seinkun hafi stafað af streymi bræðsluvatns frá ísbreiðum meginlandanna sem hafði áhrif á hafstrauma, dró úr innflæði á hlýjum söltum sjó sem leiddi til kaldara og óstöðugra veðurfars[36,37]. Á hlýjasta skeiði *nútíma* er talið sennilegt að Langjökull hafi ekki verið til staðar[19,38] og að hiti hafi verið um 3°C hærri en á viðmiðunartímabilinu 1961–1990[19]. Með breytingum í tegundaflóru götunga og kísilþörunga í sjávarsetskjörnum má sjá að áhrif Irmingerstraumsins, sem ber hlýjan og saltan sjó að ströndum Íslands, hafi verið í hámarki á þessum tíma[14,15,17].

Eftir að hámarkshlýnun var náð tók við hægfara kólnun í takt við minnkandi inngeislun sólar að sumarlagi. Þó að um langtímakólnun væri að ræða skiptust þó einnig á hlý og köld tímabil sem stöfuðu af öðrum áhrifaþáttum, svo sem tíðni stórra eldgosa, mismunandi virkni sólar, breytingum á hafstraumum o.fl.[39]. Í flestum íslenskum gögnum kemur fram skýr vendipunktur fyrir um fimm þúsund og fimm hundruð árum þegar kólnun hefst[9,13,14,18]. Þetta er á svipuðum tíma og kólnun hefst annars staðar á norðurhveli jarðar og talað er um að *ný-jöklunarskeið* hafi gengið í garð. Veðurvísar stöðuvatnanna sýna kólnun sem á sér stað í þrepum[9,13,19] og jöklar fara að vaxa[12,19,37]. Breytingar koma fram í sjávarsetskjörnum sem sýna aukin áhrif Austur-Grænlandsstraumsins, sem kemur með kaldan og tiltölulega ferskan sjó að norðan meðan það dregur úr áhrifum Irmingerstraumsins[14,17]. Á þessum tíma fara vísbendingar um hafís að koma fram í gögnum[30,40].

Kólnunin er svo mest á *litlu-ísöld* (~1300–1900 AD) sem markar kaldasta skeið *nútíma*. Aukning götunga og þörunga sem þrífast í köldu og tiltölulega fersku vatni kemur fram í sjávarsetskjörnum[24,25,41,42], sjávarhiti lækkar snögglega[16,18,25] og mikil aukning verður á hafís[30,31]. Veðurvísar stöðuvatnanna sýna einnig kólnun[9] og jöklar ná sinni mestu stærð á *nútíma*[19,37]. Samkvæmt líkanreikningum þarf hiti að lækka um 1°C (frá meðalhita áranna 1961–1990) til þess að Langjökull nái þeirri stærð sem hann var í á hámarki *litlu-ísaldar*[38]. Rannsóknir á mýi í stöðuvatnaseti frá norðvesturlandi gefa einnig til kynna um 1–2°C kólnun á kaldasta hluta *litlu-ísaldar*[10].

Á undan *litlu-ísöld* var tiltölulega hlýtt skeið (~900–1300 AD), sem gjarnan er kennt við *miðaldahlýnun*, en þá var veðurfar hagstæðara en síðar varð[9,11,16,24,25,31,41]. Breytingin á milli þessara skeiða er talin hafa verið snögg og hafa gerst á árabilinu 1250 til 1300 AD. Nýlegar rannsóknir benda til þess að upphaf *litlu-ísaldar* hafi átt sér stað í kjölfar runu stórra eldgosa á stuttum tíma. Talið er að kólnun sem af þessu stafaði



Mynd 4.12 Þróun hitafars (°C) á Íslandi síðustu 170 árin. Gögn til ársins 2015 eru sýnd sem vik frá meðaltali 20. aldar. Útjafnaður þjáll ferill ásamt óvissumati er einnig sýndur. Gögn frá Veðurstofu Íslands.

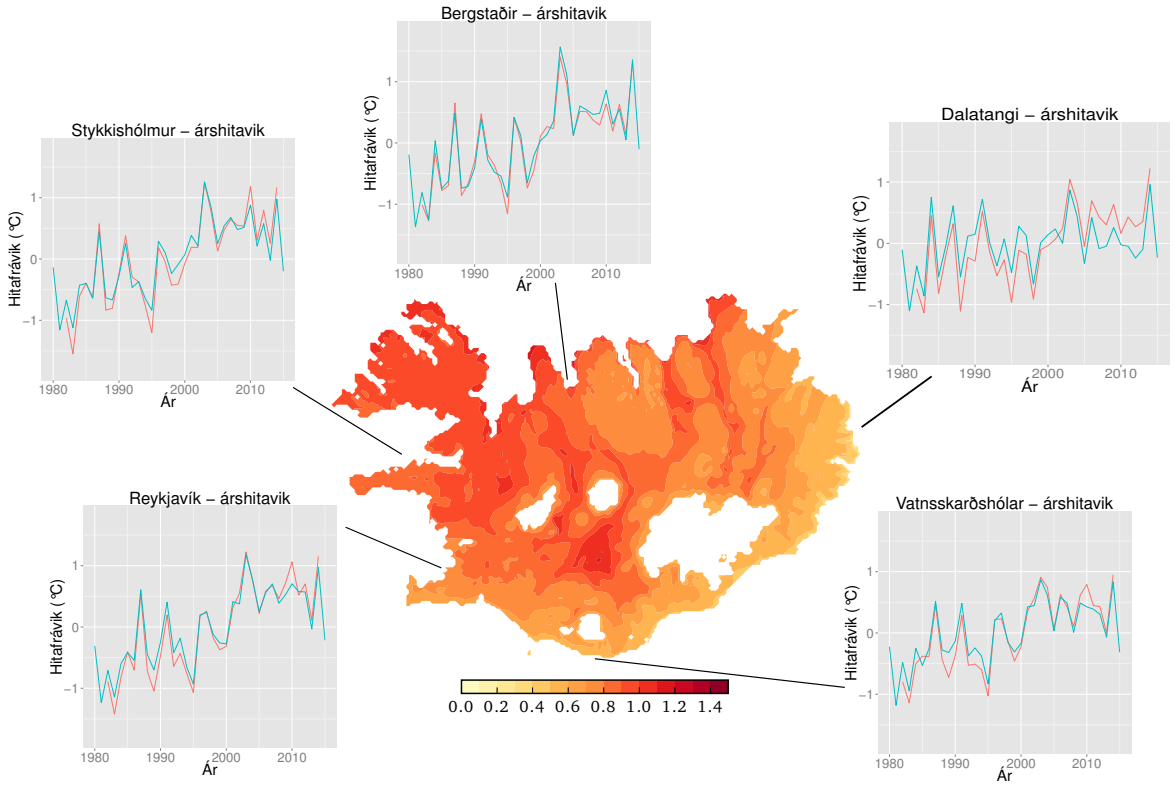
hafi verið viðhaldið með aukinni hafísmyndun[28]. Auk þess má túlka skeljagögn sem svo að styrkur hita-seltu hringrásarinnar (AMOC) hafi minnkað við upphaf *litlu-ísaldar*[21]. *Litla-ísöldin* einkenndist af óstöðugleika í veðurfari, ekki var um samfellda kuldatíð að ræða, heldur skiptust á nokkur köld tímabil með mildari tímabilum inn á milli[11,17,25,41]. Þennan mikla breytileika má útskýra með flökti á staðsetningu meginskila í sjónum norðvestur af landinu. Þar skilur á milli heitra og kaldra hafstrauma og breytingar á staðsetningu þeirra (nær og fjær landinu) olli óstöðugu veðurfari. Staðsetning skilanna tengist einnig útbreiðslu hafíss við Íslandsstrendur sem hafði mikil áhrif á veðurfar á Íslandi á *litlu-ísöld* og má finna góða tengingu á milli hafísgagna og landrænna gagna[11,30]. Minnstan breytileika er þó að finna í gögnum frá Suðurlandi[13], þar sem hafís hefur líklega ekki haft eins mikil áhrif enda hafís sjaldan úti fyrir ströndum suðvestan- og vestanlands og jafnvel ekki á *litlu-ísöldinni*[30,43,44].

Vel er þekkt að veðurfarsbreytingar á norðurslóðum á *nútíma* eru mun umfangsmeiri en hnattrænar breytingar. Þessi mögnun er einkum tengd flökti á hafísþekju og skyldum ferlum[36]. Samkvæmt líkanreikningum var á hlýjasta skeiði *nútíma* á Íslandi um 3°C hlýrra en á árabilinu 1961–1990 en um 1°C kaldara á kaldasta skeiði *litlu ísaldar*[38]. Þetta mat gefur því 4.0°C útslag hitabreytinga á *nútíma*[38]. Í samanburði er mat Marcott o.fl.[35] á meðalhitabreytingum á jörðinni á *nútíma* um 0.7°C og eru breytingarnar því töluvert meiri á Íslandi.

4.3 Veðurfar á Íslandi á tíma samfelldra mælinga

Í skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá árinu 2008 var fjallað sérstaklega um veðurfar á Íslandi frá því að mælingar hófust. Áreiðanlegar mæliraðir eru til frá því um 1830 og teygja má hitaraðir á stöku stað að aldamótunum 1800 með því að nota mælingar á nærliggjandi stöðum, en veruleg fylgni er milli hita í hinum ýmsu landshlutum.

Mynd 4.12 sýnir þróun meðalhita á Íslandi fyrir 14 veðurstöðvar. Myndin sýnir vik frá meðalhita 20. aldarinnar og er stöðvunum raðað réttsælis um landið. Á myndina er bætt útjöfnuðum ferli sem dregur fram langtímabreytingar í þróun meðalhita. Yfir allt tímabilið (1830–2015) er veruleg hlýnun í röðinni og nemur hún um 0.77°C á öld, sem er sambærilegt við hnattræna hlýnun á sama tímabili. Síðustu áratugi hefur hlýnunin verið mjög áköf og frá 1980 til 2015 hlýnaði að jafnaði um 0.47°C á áratug. Á síðasta áratug hefur dregið úr hlýnuninni, en árið 2014 er þó það hlýjasta á fimm



Mynd 4.13 Hlýnun á Íslandi á síðustu áratugum. Mismunur meðaltala tímabilanna 2000–2014 og 1985–1999 (kort). Myndirnar sýna samanburð á mælingum á veðurstöðvum (rauðar línur) og útreiknuðum hita samkvæmt endurgreiningunni (bláar línur).

stöðvanna, og fyrir allar stöðvarnar er það hlýjast að meðaltali. Árið 2016 var hlýjasta árið í Stykkishólmi, í lengstu mælirröðinni.

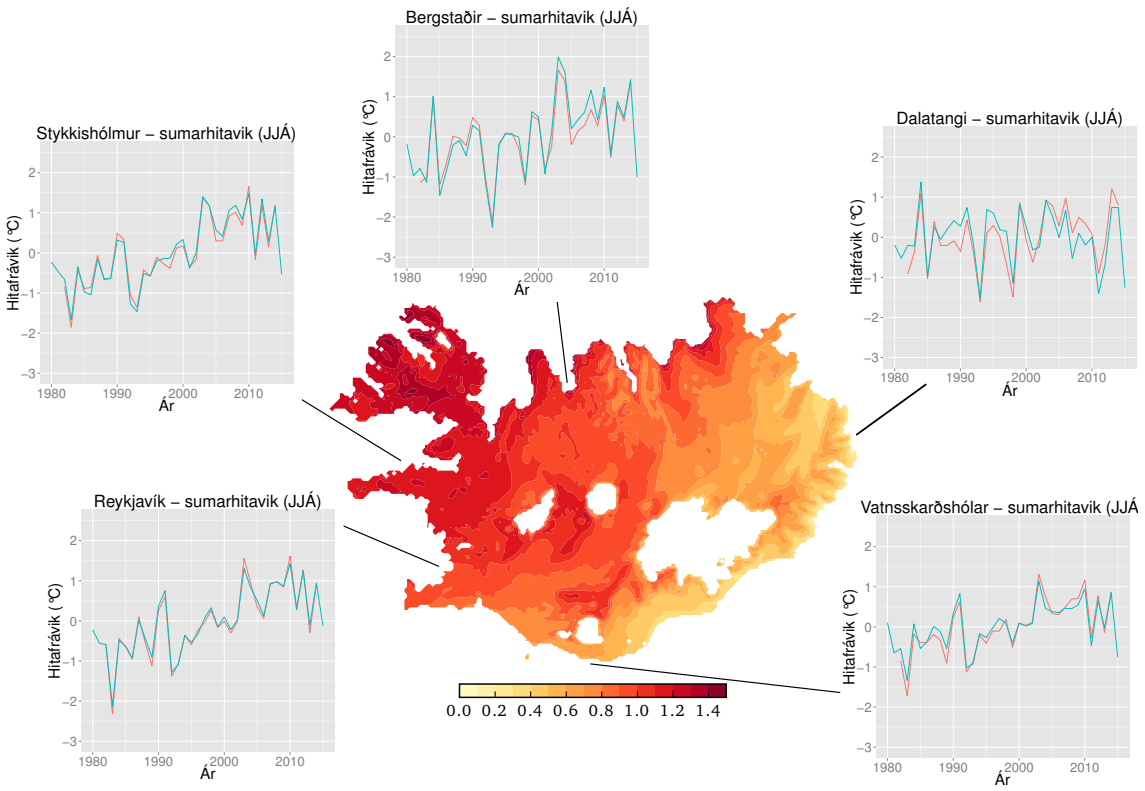
Með því að nota gögn úr íslensku endurgreiningunni má kortleggja hvernig þessi hlýnun var ólík milli landshluta. Mynd 4.13 sýnir mismun meðalhita tveggja 15 ára langra tímabila sitt hvorum megin við aldamótin. Einnig sýnir myndin samanburð á þróun hitavika á nokkrum veðurstöðvum og niðurstöðum endurgreiningarinnar. Þessi samanburður staðfestir að endurgreiningin er nægilega áreiðanleg til þess að treysta megi kortinu.

Kortið sýnir að hlýnunin er meiri vestan- og norðvestantil á landinu, en minnst á landinu austanverðu. Línuritin frá stöðvunum sýna einnig að hlýnunin var einna áköfust um aldamótin.

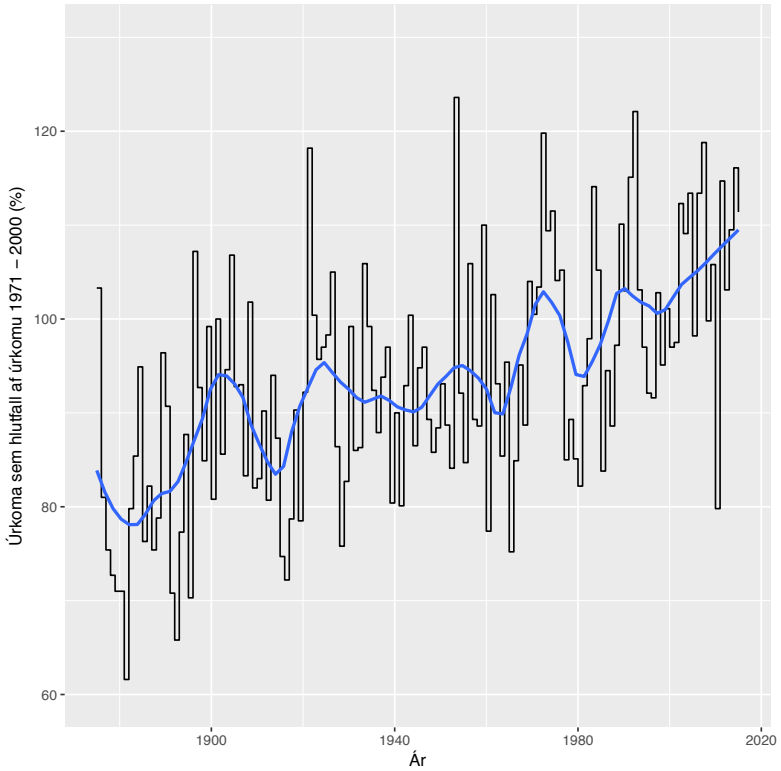
Þróun sumarhita má sjá á mynd 4.14 sem sýnir sambærilega útreikninga og á mynd 4.13, en fyrir sumarmánuðina. Hlýnunin að sumri til er skarpari og aukin hlýnun vestan- og norðvestantil á landinu sést enn greinilegar. Á landinu austanverðu er hlýnunin mun minni. Áhugavert er að línuritin frá stöðvunum sýna ekki að hlýnun að sumarlagi hafi verið ákafari um aldamótin.

Sú niðurstaða að meira hlýnaði vestan- og norðvestantil á landinu á þessu árabili bendir til þess að orsaka hlýnunarinnar sé að hluta til að leita í því að aðstæður í hafi breyttust nokkuð skömmu fyrir aldamót. Mynd 7.2 sýnir dæmi um þá hlýnun sem varð í hafinu vestur af landinu á þeim tíma. Einnig má benda á að síðari hluti kuldaskeiðsins á 7. og 8. áratug var kaldari á vesturhluta landsins en á austurhluta þess.

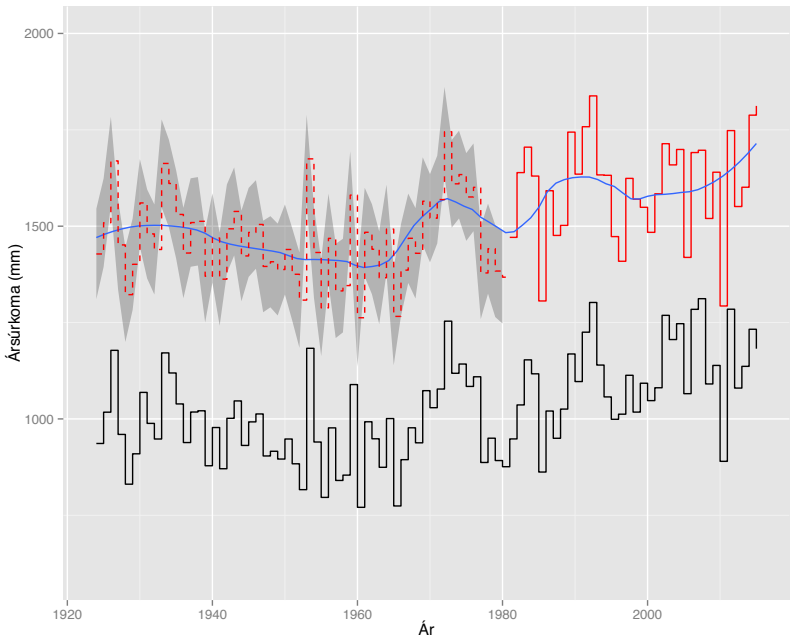
Samfelldar úrkomumælingar á Íslandi eru til frá því á miðri 19. öld. Þó að net mælistöðva hafi framan af verið gisið má nota þær til þess að leggja mat á úrkomuþróun á síðustu 160 árum. Mynd 4.15 sýnir hlutfallsbreytingar í úrkomu frá 1857. Hlutfallsleg úrkoma hvers mánaðar, miðað við tímabilið 1971–2000, var reiknuð fyrir hverja veðurstöð og þreparitið sýnir ársmeðaltal hlutfallsgildanna. Blá línan sýnir útjafnað meðaltal sem fylgir áratugasveiflum. Nokkrar breytingar verða á stöðvanetinu og athugunarháttum á því tímabili sem myndin nær yfir en hún ætti þó að



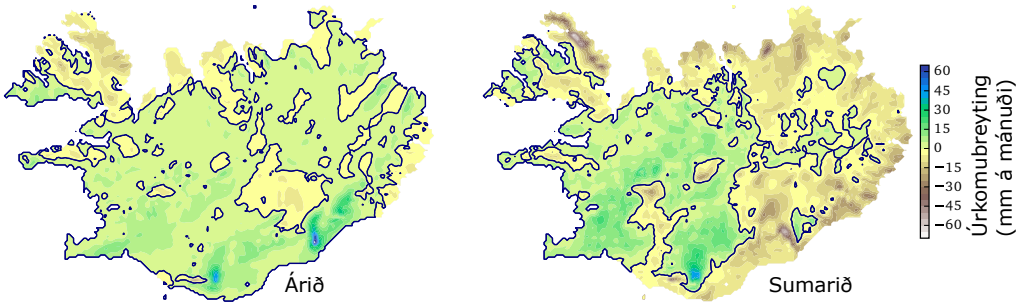
Mynd 4.14 Hlýnun að sumarlagi á Íslandi síðustu áratugi. Sambærilegt við mynd 4.13 nema hér eru einungis notuð gögn fyrir sumarmánuðina (júní til ágúst).



Mynd 4.15 Hlutfallslegar breytingar í úrkomu (%) frá 1875 til 2015. Þreparitið sýnir breytingar í úrkomu sem hlutfall af úrkomu tímabilsins 1971–2000. Hlutfallið er reiknað fyrir hverja stöð og hvern mánuð áður en meðaltalið er tekið. Bláa línan sýnir útjafnað meðaltal sem fylgir áratugasveiflum.



Mynd 4.16. Þróun ársúrkomu (mm) á láglendisstöðvum frá 3. áratug síðustu aldar fram til 2015 (svart þreparit). Einnig er sýnd ársúrkoma fyrir allt landið samkvæmt íslensku endurgreiningunni (rautt þreparit, heildregnar línur). Mat á ársúrkomu byggt á sambandi láglendisstöðvanna og endurgreiningarinnar er sýnt sem brotnar línur og skyggða svæðið sýnir 90% óvissumörk matsins. Bláa línan sýnir áratugasveiflur.

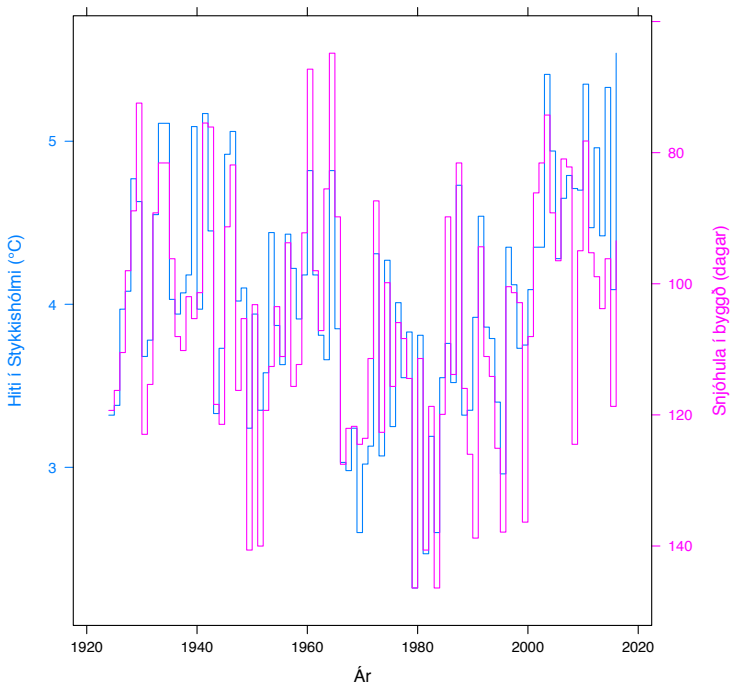


Mynd 4.17 Breytingar á úrkomu (mm/mánuði) milli tímabilsins 1985–1999 og tímabilsins 2000–2014. Byggt á íslensku endurgreiningunni. Kortið vinstra megin sýnir niðurstöður fyrir árið í heild sinni en hægra megin eru niðurstöður fyrir sumarmánuðina (júní til ágúst).

sýna megindrætti úrkomubreytinga. Í heildina jókst úrkoma á tímabilinu en áratugasveiflur eru verulegar.

Samband langtímasveiflna hita (mynd 4.12) og úrkomu er ekki einfalt. Raðirnar tvær hafa marktæka fylgni (R=0.34), sem dugir þó einungis til að útskýra 11% breytileikans. Ítarlegur samanburður á röðunum tveimur sýnir tilhneigingu til þess að úrkoma sé lítil á svalari skeiðum, en úrkomuaukning á hlýindaskeiðum er ekki jafngreinileg, sérstaklega ekki um miðbik 20. aldar. Í fyrri skýrslu (V2008) var skoðað samband úrkomubreytinga í Stykkishólmi og á Teigarhorni við þróun hita í Stykkishólmi og þar sást greinilega úrkomuaukning á hlýindaskeiðinu um miðbik síðustu aldar.

Eftir 1925 er net veðurstöðva á láglendi þar sem úrkoma er mæld nægjanlega þétt til þess að leggja megi mat á ársúrkomu á láglendi. Mynd 4.16 sýnir niðurstöðu slíkra reikninga, og sýnir að á láglendisstöðvum var úrkoma tæplega 1000 mm á ári framan af tímabilinu, en jókst á síðasta fjórðungi 20. aldar og hefur verið á bilinu 1100–1200 mm á 21. öldinni. Myndin sýnir einnig ársúrkomu reiknaða með íslensku endurgreiningunni (rauð lína). Samband endurgreiningar og meðaltals veðurstöðvanna er nægilega gott til þess að meta má heildarúrkomu á landinu fyrir 1980, og er það sýnt sem brotalínur og skyggða svæðið sýnir óvissumörk þessa mats. Í heildina sést að úrkoma á landinu hefur



Mynd 4.18 Fjöldi snjóhuludaga í byggð (rauð lína) og hiti í Stykkishólmi (°C, blá lína) frá 1924 til 2016. Takið eftir að lóðrétti ásinn hægra megin er viðsnúinn.

aukist frá því að vera um 1500 mm á ári á fyrri hluta 20. aldar í 1600–1700 mm á ári síðustu árin.

Mynd 4.17 sýnir breytingar á úrkomu á sömu 15 ára tímabilum og notuð voru á myndum mynd 4.13 og mynd 4.14, bæði fyrir árið í heild sinni og sumarið. Þegar litið er á árið í heild sinni jókst úrkoma víðast á landinu, mest þó á fjöllum og jöklum sunnan- og suðaustanlands. Á norðanverðum Vestfjörðum og á annesjum norðanlands dró úr úrkomu. Að sumarlagi var úrkomuaukningin bundin við vesturhluta landsins, en það dró úr úrkomu á svæði sem teygir sig frá norðanverðum Vestfjörðum austur með Norðurlandi og yfir megnið af austanverðu landinu.

Í skýrslu vísindanefndar frá 2008 var einnig fjallað um nokkra aðra veðurþætti, m.a. snjóhulu, en samkvæmt á gögnum frá 1924 til 2016 má segja að sá tími sem land er snævi hulið styttist um rúmar þrjár vikur fyrir hverja gráðu sem hlýnar, ef miðað er við snjóhulu í byggð, en tæpar þrjár vikur ef miðað er við snjóhulu á fjöllum. Mynd 4.18 sýnir samband snjóhulu í byggð[45] og vetrarhita í Stykkishólmi fyrir tímabilið 1924–2016.

4.4 Sviðsmyndir og CMIP5 líkön

Í 5. matskýrslu IPCC (2013) eru loftslagslíkön úr CMIP5[49] verkefninu notuð til þess að leggja mat á hlýnun jarðar að gefnum fjórum sviðsmyndum. Nánar er fjallað um þessar sviðsmyndir í hliðargrein[50] í kafla 3 en þær draga nafn sitt af geislunarálagi vegna losunar gróðurhúsalofttegunda. Almennt eykst hlýnun með geislunarálagi, svo minnst hlýnar í sviðsmynd RCP2.6 en mest í sviðsmynd RCP8.5. Mikilvægt er að hafa í huga að þessum sviðsmyndum er ætlað að spanna róf mögulegrar losunar gróðurhúsalofttegunda – en þær eru ekki spá um losun. Einnig var reiknuð „söguleg“ sviðsmynd þar sem þróun geislunarálags var í samræmi við þróunina frá iðnbyltingu til okkar daga. Til að Parísarsamkomulagið gangi eftir þarf losun að fylgja þeirri sviðsmynd þar sem minnst er losað, verði losun mikið meiri er ólíklegt að hnattræn hlýnun haldist innan 2°C frá iðnbyltingu (sjá nánar í grein 3.10).

4.41 Úrvinnsla fyrir Ísland og nærliggjandi hafsvæði

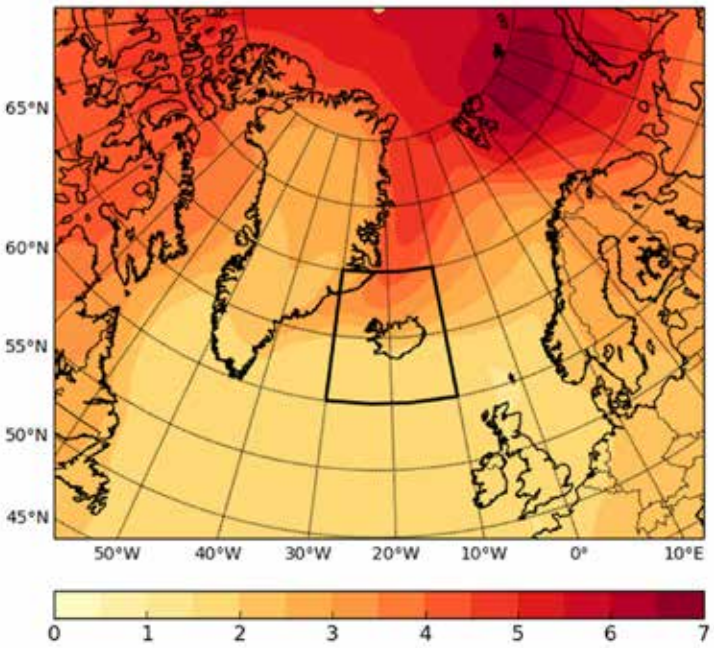
Eins og í fyrri skýrslu vísindanefndar voru skoðaðar breytingar í reit sem þekur Ísland og nærliggjandi svæði og reiturinn sem afmarkast af 60°–70°N og 10°–30°V skoðaður sérstaklega (mynd 4.19). Til þægindi verður þessi reitur hér að neðan kallaður Íslandsreiturinn. Í næstu greinum verða raktar niðurstöður

4A Endurgreiningar

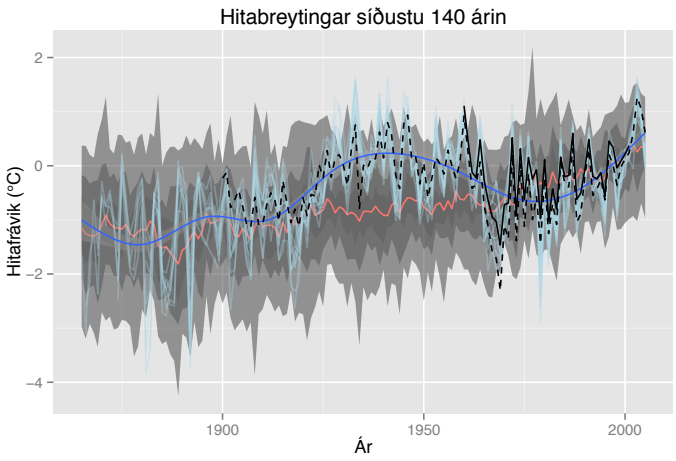
Í þessum kafla eru kort sem byggjast á endurgreiningum, annars vegar frá Reiknimiðstöð evrópskra veðurstofa (ECMWF) og hins vegar frá Veðurstofu Íslands[46]. Tilgangur endurgreininga er að búa til mynd af ástandi lofthjúpsins á hverjum tíma og byggja á fyrirliggjandi gögnum. Fyrirliggjandi gögn geta verið mælingar á hita, þrýstingi, vindi, útgeislun jarðar, snjóhulu o.s.frv. Í stað þess að brúa hverja gagnategund fyrir sig er notað veðurlíkan sem nýtir öll gögnin og finnur það ástand lofthjúpsins sem fellur best að þeim. Greiningar voru upphaflega þróaðar til þess að finna upphafsskilyrði fyrir veðurspálíkön og aðferðafræðin hefur verið í þróun áratugum saman[47]. Greiningar fyrir veðurspálíkön eru gerðar nokkrum sinnum á dag til þess að hægt sé að reikna veðurspár, og í áranna rás breytast aðferðir, líkön og þau gögn sem notuð eru. Endurgreiningar eru á hinn bóginn afmörkuð verkefni þar sem notast er við sama veðurlíkan og reynt að tryggja að gagnasafnið taki ekki stórum breytingum á því tímabili sem endurgreiningin nær yfir.

Sú endurgreining ECMWF sem er mest notuð hér er sk. ERA Interim greining, en hún nær frá 1979 en þá urðu gervihnattagögn nægilega góð til að hægt væri að nota þau í greiningum. ERA Interim er hnattræn greining og hentar vel til að skoða þróun lofthjúpsins á stórum kvarða. Möskvastærð reiknínets er hins vegar um 75 km sem þýðir að áhrif landslags og ýmis staðbundin áhrif koma ekki fram og því þarf að nota aðrar endurgreiningar fyrir fínni kvarða. Á Veðurstofu Íslands hefur spálíkanið HARMONIE-AROME verið notað til þess að reikna endurgreiningu fyrir sama tímabil og ERA Interim nær yfir. Þessi endurgreining byrjar með upplýsingar frá ERA Interim og notar svo upplýsingar frá fleiri veðurstöðvum á Íslandi til þess að reikna skammtímaveðurspá á reiknineti með 2.5 km möskvastærð. Þessi upplausn er nægilega góð til þess að helstu áhrif landslags á veður komi fram. Hér er þessi greining kölluð íslenska endurgreiningin og leysir hún af hólmi fyrri endurgreiningar fyrir Ísland[48].

Á mynd 4.20 og mynd 4.23 eru einnig notaðar niðurstöður frá tveimur öðrum greiningum frá ECMWF, ERA40, sem nær yfir tímabilið 1957 til 2002, og ERA20C sem nær frá 1900 til 2010. Þessar tvær greiningar eru á grófara reiknineti en ERA Interim og nýta ekki jafnmikið af gögnum til aðlögunar. Eftir sem áður geta þær gefið ágæta mynd af langtímaþróun veðurfars á stórum kvarða og svæðum eins og Íslandsreitnum.



Mynd 4.19 Hlýnun (°C) á Norður–Atlantshafi milli tímabilanna 1986–2005 og 2081–2100 í sviðsmynd RCP4.5. Myndin sýnir einnig staðsetningu Íslandsreitsins.



Mynd 4.20 Hitabreytingar (°C) í Íslandsreitnum frá 1865–2005. Skyggðir borðar sýna niðurstöður loftslagslíkana og afmarkar ljósgrár litur 5–95% dreifingarinnar, grár litur 20–80% og dökkgrár 35–60%. Meðaltal líkana er sýnt sem rauð lína. Heildregin svört lína sýnir niðurstöður ERA40 greiningarinnar fyrir Íslandsreitinn, en brotalínan sýnir niðurstöður ERA20C greiningarinnar. Ljósbláar línur sýna mælingar á veðurstöðvum (sömu stöðvar og á mynd 4.12) og blá lína sýnir útjafnaðan feril sem fylgir áratugasveiflum.

ofangreindra sviðsmynda fyrir þennan reit og byrjað á því að skoða sögulegu keyrslurnar.

4.4.2 Loftslagslíkön og hitabreytingar í Íslandsreitnum síðustu 140 árin

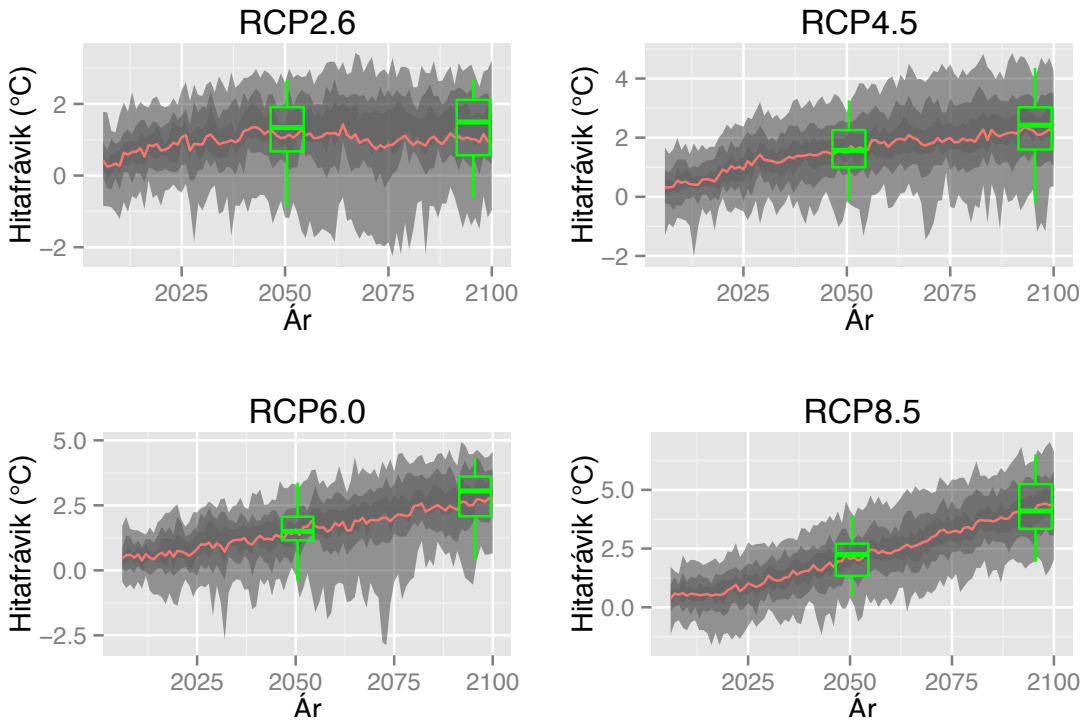
Loftslagslíkön eins og þau sem notuð eru í CMIP5 verkefninu reikna loftslag að gefnum forsendum um geislunarálag. Ef upphafsskilyrði líkansins eru frátalin er geislunarálagið í sögulegu sviðsmyndinni einu upplýsingarnar sem líkanið fær um raunverulega þróun á 19. og 20. öld. Líkanið fær engar upplýsingar um þróun loftslagsins á þessu tímabili, heldur verður það að reikna loftslagið út. Þetta er gert með því að reikna hvernig veður í líkaninu breytist með tíma. Ólíkt hefðbundinni veðurspá er það veður sem reiknað er í loftslagslíkönum ekki spá fyrir neinn tiltekinn dag, heldur eining í safn sem gefur mynd af loftslagi í líkaninu. Ef notuð eru ólík upphafsskilyrði (t.d. ólíkir upphafsdagar til að byrja keyrslu líkans) mun reiknniðurstöðum ekki bera að fullu saman, og eins skila ólík líkön ekki nákvæmlega sömu þróun loftslags.

Þegar reiknniðurstöður fyrir síðustu 140 ár eru skoðaðar fyrir Íslandsreitinn ber því að hafa í huga að það er engin sérstök ástæða til að ætla að loftslagslíkön nái að herma í smáatriðum eftir þróun loftslags á svæðinu. Atburðir, svo sem frostaveturinn mikli 1918 eða hafísárin 1965 til 1970, stafa ekki af breytingum í geislunarálagi, heldur eru dæmi um innri breytileika í náttúrunni og það er undir hælinn lagt hvort loftslagslíkön ná að herma slíkan breytileika. Loftslagslíkön eiga hins vegar að geta hermt eftir breytingum sem rekja má til geislunarálags, s.s. kuldakasta í kjölfar stórra eldgosa og hlýnunar vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa.

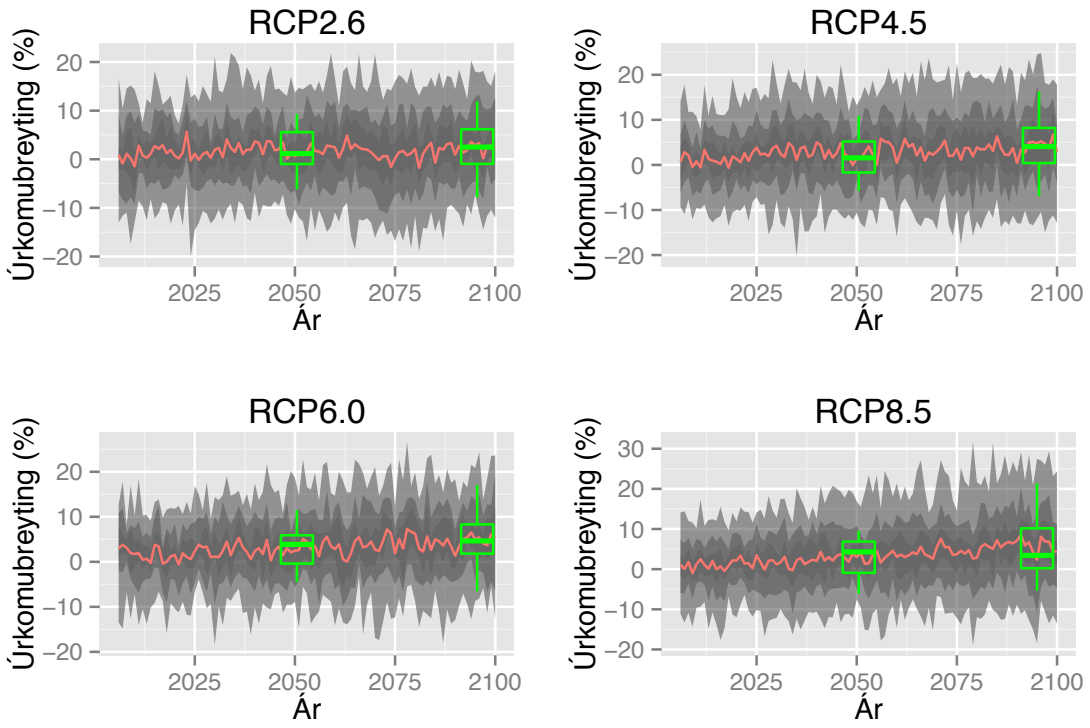
Þó ekki sé eðlilegt að gera þá kröfu til loftslagslíkana að þau endurspegli þróun loftslags í Íslandsreitnum í smáatriðum má gera þá kröfu að það loftslag sem líkanið reiknar sé ekki afbrigðilegt, það sé í takt við það hvernig raunverulegt loftslag gæti þróast. Ef skoðaðar eru niðurstöður margra loftslagslíkana og þær bornar saman við raunverulega þróun loftslags er krafan því að dreifingin á niðurstöðum loftslagslíkana nái að spanna náttúrulegan breytileika.

Mynd 4.20 sýnir niðurstöður 42 loftslagslíkana fyrir hitafarsbreytingar í Íslandsreitnum síðustu 140 árin. Í samræmi við 5. matsskýrslu IPCC eru öll frávik miðuð við tímabilið 1986–2005. Meðaltal líkananna er sýnt sem rauð lína, en dreifing niðurstaðna umhverfis meðaltalið er sýnd með borðum sem afmarka 5–95% af spönn dreifingarinnar (ljósgrár), 20–80% (grár) og 35–65% (dökkgrár). Til að bera þessar niðurstöður saman við raunverulega þróun hitafars í Íslandsreitnum eru sýndar niðurstöður úr ERA40 og ERA20C endurgreiningum evrópsku reiknimiðstöðvarinnar (sjá nánar grein 4A Endurgreiningar). Eins og kemur fram hér að framan er ekki við því að búast að meðaltal loftslagslíkana fylgi náttúrulegum innri sveiflum eins og þeim sem endurgreiningarnar sýna, en máli skiptir að náttúrulegu sveiflurnar fari ekki langt út fyrir það gráskyggða svæði sem niðurstöður loftslagslíkananna afmarka.

Loks sýna ljósbláar línur á myndinni þróun hita á nokkrum íslenskum veðurstöðvum (sömu og á mynd 4.12). Þar sem þetta eru einstakar veðurstöðvar má gera ráð fyrir að breytileiki á þeim geti verið meiri en gerist



Mynd 4.21 Hitabreytingar (°C) í sviðsmyndum RCP2.6–RCP8.5. Skyggðir borðar sýna niðurstöður loftslagslíkana og afmarkar ljósgrár litur 5–95% dreifingarinnar, grár litur 20–80% og dökkgrár 35–60%. Meðaltal líkana er sýnt sem heildregin lína. Kassarit (græn) sýna sömu gögn og í töflum 4.1 og 4.2.



Mynd 4.22 Úrkomubreytingar í sviðsmyndum RCP2.6–RCP8.5. Skyggðir borðar sýna niðurstöður loftslagslíkana og afmarkar ljósgrár litur 5–95% dreifingarinnar, grár litur 20–80% og dökkgrár 35–60%. Meðaltal líkana er sýnt sem heildregin lína. Kassarit (græn) sýna sömu gögn og í töflum 4.3 og 4.4.

að meðaltali í Íslandsreitnum og því er til samanburðar dreginn útjafnaður ferill sem sýnir langtímaþróun hitafars á veðurstöðvunum.

Um miðbik 20. aldar var mjög hlýtt á Íslandi og þó að álíka hlýtt sé í sumum loftslagslíkönum ná þau að meðaltali ekki að herma þessi hlýindi. Ástæða þessa er líklegast sú að þetta hlýindaskeið er dæmi um innri (náttúrulegan) breytileika loftslags, en orsakanna er ekki að leita í breytingum á geislunarálagi. Á síðasta hluta 20. aldar var aukning geislunarálags vegna losunar gróðurhúsalofttegunda farin að valda hlýnun og á þessu tímabili fylgir meðaltal líkananna raunverulegri hitaþróun betur. Meðaltal líkana nær þó aldrei að endurspegla þær sveiflur sem eru í hitaþróun á veðurstöðvum og í endurgreiningu. Áberandi er að hlýnun um síðustu aldamót er mun ákafari en meðaltalshlýnun loftslagslíkana, og líklegt að hún sé að hluta náttúruleg sveifla sem leggst við hlýnun vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa, samanber umræðu um myndir 4.12 og 4.13.

Niðurstöðurnar á mynd 4.20 sýna að loftslagslíkönin fara nærri því að spanna náttúrulegan breytileika hitafars í Íslandsreitnum, en herma þó að meðaltali ekki eftir raunverulegri hitaþróun, nema á síðasta fjórðungi 20. aldarinnar þegar hlýnunar vegna aukins geislunarálags (aukinna gróðurhúsaáhrifa af mannavöldum) fer að gæta.

4.4.3 Hita- og úrkomubreytingar í framtíðarsviðsmyndum

Hita- og úrkomubreytingar í Íslandsreitnum voru reiknaðar sem vik frá meðaltali áranna 1986 til 2005, fyrir úrkomu var hlutfallslegt frávik reiknað. Myndir 4.21 og 4.22 sýna niðurstöðu þessara útreikninga. Eins og fyrr afmarka borðarnir 5–95% af spönn dreifingarinnar (ljósgrár), 20–80% (grár) og 35–65% (dökk grár). Einnig er meðaltalið sýnt sem rauð lína. Áratugameðaltöl hvers líkans voru reiknuð fyrir tímabilin 2046 til 2055 og 2091 til 2100 og eru kassarit fyrir þessi meðaltöl einnig sýnd á myndunum (grænt).

4.4.4 Töflur sem sýna samanburð sviðsmynda

Upplýsingarnar sem fram koma í kassaritunum eru dregnar saman í töflunum hér á eftir. Hver tafla sýnir hlutfallsmörk (5%, 25%, 50%, 75% og 95%) hita- eða úrkomubreytinga við miðbik aldarinnar eða aldarlok. Til útskýringar sýna dálkarnir þau mörk þar sem tiltekin hlutföll líkana eru „jafnköld eða kaldari“ (töflur 4.1 og 4.2) eða „jafnþurr eða þurrari“ (töflur 4.3 og 4.4). Þannig er hlýnun í helmingi líkana minni eða jöfn þeim gildum sem sýnd eru í 50% dálkinum í töflum 4.1 og 4.2 og úrkomuaukningin í helmingi líkana er minni eða jöfn þeim gildum sem sýnd eru í 50% dálkum í töflum 4.3 og 4.4.

Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
RCP2.6	-0.86	0.67	1.34	1.91	2.69
RCP4.5	-0.13	1.00	1.57	2.25	3.25
RCP6.0	-0.43	1.16	1.50	2.06	3.37
RCP8.5	0.51	1.34	2.25	2.71	3.91

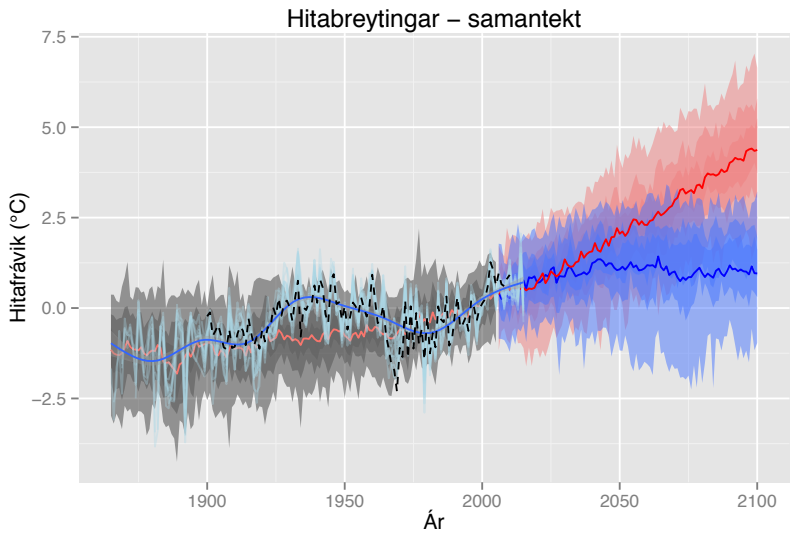
Tafla 4.1 Hitafarsbreytingar (°C) í Íslandsreitnum frá meðaltali áranna 1986–2005 til 2046–2055.

Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
RCP2.6	-0.63	0.57	1.50	2.11	2.69
RCP4.5	-0.22	1.60	2.42	3.03	4.36
RCP6.0	0.39	2.08	3.05	3.61	4.33
RCP8.5	1.93	3.34	4.10	5.24	6.52

Tafla 4.2 Hitafarsbreytingar (°C) í Íslandsreitnum frá meðaltali áranna 1986–2005 til 2091–2100.

Sambærilegar töflur má finna í þriðja kafla V2008. Þar er þó notast við útreikninga frá CMIP3 verkefninu sem byggjast á eldri sviðsmyndum um aukingu geislunarálags[51] og öðrum loftslagslíkönum[52]. Samanburður[53] á þeim sviðsmyndum þar sem þróun geislunarálags er hvað líkust[54] sýnir að framreiknuð hlýnun í CMIP5 líkönum er aðeins meiri en í V2008, og óvissubilið stærra[55].

Það er þekkt niðurstaða að hnattræn hlýnun í CMIP5 líkönunum fyrir RCP sviðsmyndirnar er aðeins meiri en í CMIP3 og eldri sviðsmyndum[56]. Þetta gildir líka fyrir svæðið nærri Íslandi, en niðurstaðan hér sýnir að óvissubilið breikkar einnig. Stærra óvissubil kann að stafa af því að á norðurslóðum hlýnar meira í sumum CMIP5 líkönum en gerði í CMIP3, en í nokkrum CMIP5 líkönum kólnar á norðurslóðum tímabundið í kjölfar breytinga á hafstraumum[57] (sjá t.d. RCP6.0 um



Mynd 4.23 Samantekt á hitabreytingum (°C) frá miðri 19. öld og sviðsmyndareikningum til 2100 fyrir RCP2.6 (blátt) og RCP8.5 (rautt). Eins og á mynd 4.20 sýna gráskyggðir borðar niðurstöður loftslagslíkana fyrir sögulegu keyrslurnar, brotalínan sýnir niðurstöður ERA20C greiningarinnar og ljósbláar línur sýna veðurstöðvar. Í öllum sviðsmyndum afmarkar dekksti liturinn 35–65% dreifingarinnar, sá næst dekksti 20–80% og sá ljósasti 5–95%.

árið 2070 á mynd 4.21). Slíkt eykur óvissuna í mati á hlýnun.

Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
RCP2.6	-6.17	-0.96	1.17	5.58	9.32
RCP4.5	-5.77	-1.68	1.57	5.20	10.91
RCP6.0	-4.50	-0.39	3.87	5.90	11.47
RCP8.5	-6.10	-0.90	4.30	6.87	9.58

Tafla 4.3 Hlutfallslegar úrkomubreytingar (%) í Íslandsreitnum frá meðaltali áranna 1986–2005 til 2046–2055.

Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
RCP2.6	-7.83	-0.94	2.51	6.18	11.91
RCP4.5	-6.96	0.42	4.08	8.22	16.28
RCP6.0	-6.53	1.81	4.65	8.32	17.05
RCP8.5	-5.67	0.03	3.13	10.23	21.40

Tafla 4.4 Hlutfallslegar úrkomubreytingar (%) í Íslandsreitnum frá meðaltali áranna 1986–2005 til 2091–2100.

Töflur 4.3 og 4.4 sýna breytingar á úrkomu í Íslandsreitnum fyrir CMIP5 líkönin. Álíka samanburð má gera á framreiknuðum úrkomubreytingum og gert var fyrir hlýnun. Sá samanburður sýnir að úrkoma eykst minna í CMIP5 en í niðurstöðum CMIP3 sem fjallað var um í fyrri skýrslu[58]. Hins vegar eru óvissumörk rífleg og erfitt að draga ályktanir hvað úrkomubreytingar varðar um mun á eldri niðurstöðum og þeim sem kynnt eru hér.

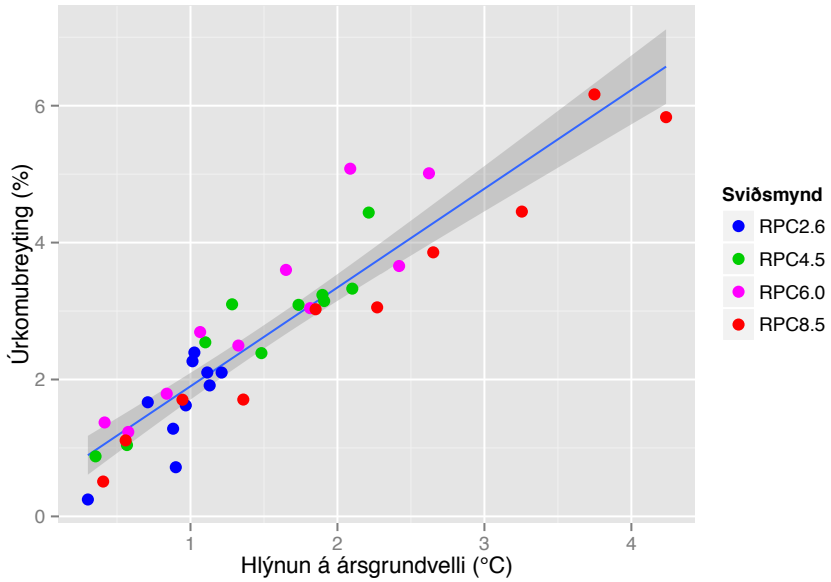
4.4.5 Samantekt á breytingum ársmeðaltala hita og úrkomu.

Eins og fram kom í grein 4.3 sýnir hitafar á Íslandi ótvíræð merki langtímabreytileika, sem er sambland af langtímahneigð og sveiflum sem taka nokkra áratugi. Mynd 4.20 sýndi samanburð á niðurstöðum reiknilíkana, endurgreininga og veðurstöðva fyrir síðustu 140 ár og þar sást að loftslagslíkönin náðu að mestu að spanna náttúrulegan breytileika hitaþróunar á þessum tíma.

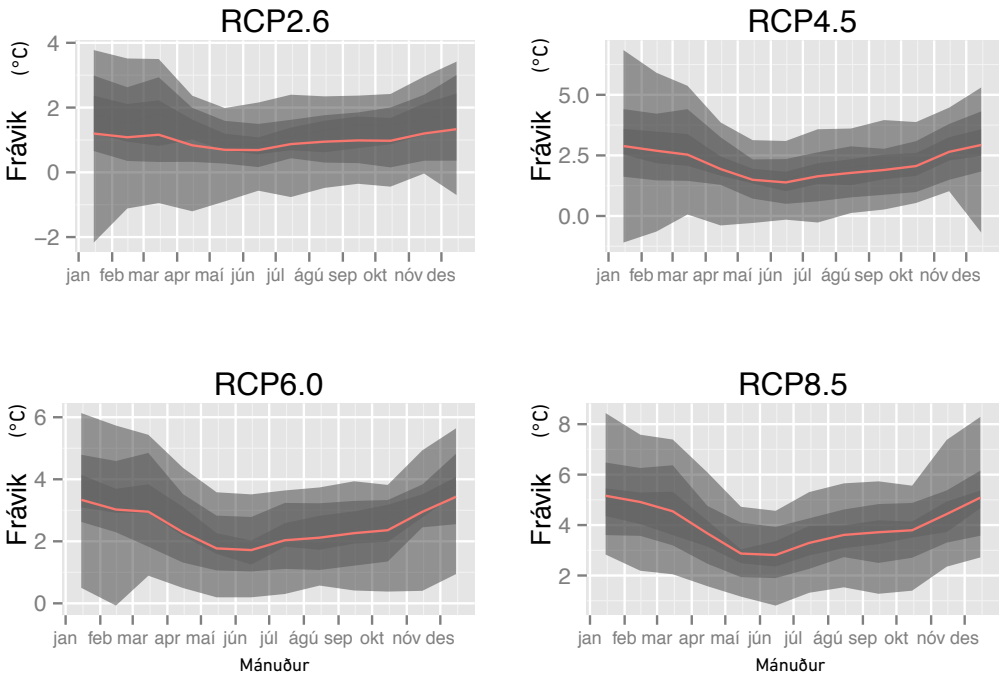
Mynd 4.23 sýnir álíka samantekt, en að auki eru sýndar niðurstöður sviðsmynda RCP8.5 (rauðskyggt) og RCP2.6 (bláskyggt). Sem fyrr eru niðurstöður ERA20C endurgreiningarinnar teiknaðar inn og veðurstöðvarnar sýndar sem ljósbláar línur.

Verði losun gróðurhúsalofttegunda í samræmi við sviðsmynd RCP8.5 verður hlýnunin langt umfram það sem teljast má eðlilegt veðurfar á Íslandi, en ef losunin fylgir RCP2.6 verður hlýnunin vægari og ekki jafn frábrugðin veðurfari í upphafi 21. aldar. Líkönin herma ekki eftir þeim náttúrulegum sveiflum sem verða á hitafari og því má búast við því að hin raunverulega hitaþróun verði skrykkjóttari en bláu og rauðu meðaltalsferlarnir sýna.

Þótt úrkomubreytingar séu ekki jafn eindregnar og hitabreytingar er eftir sem áður samband á milli þess



Mynd 4.24 Samband úrkomu (%) og hitabreytinga (°C). Punktarnir sýna 10 ára meðaltöl. Einnig er sýnd besta lína og óvissumat hennar er skyggt.

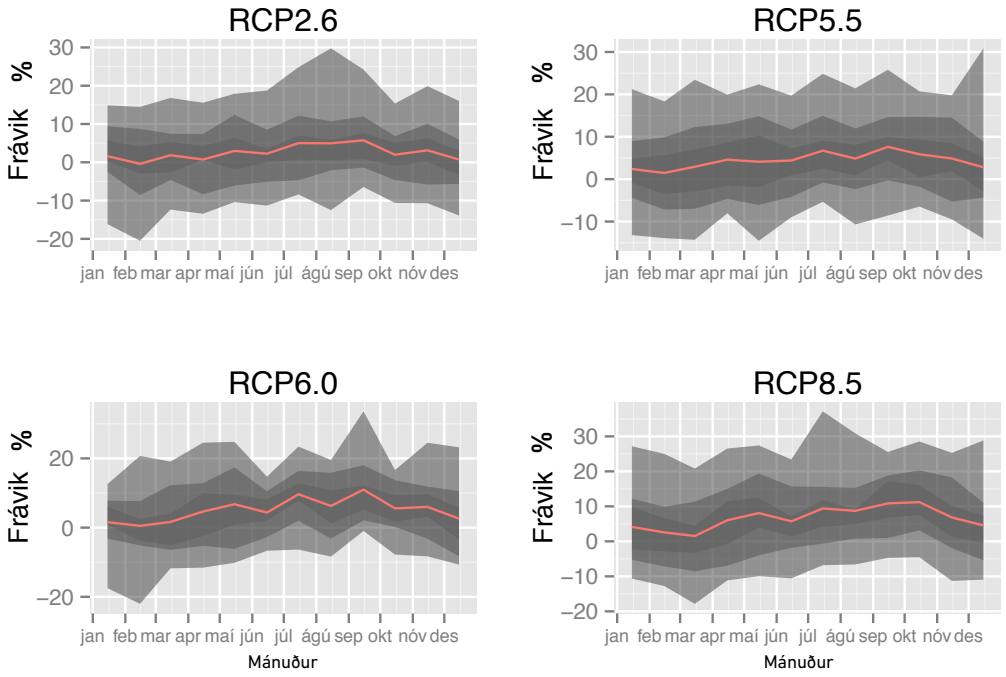


Mynd 4.25 Breytingar á árstíðasveiflu hita (°C) í sviðsmyndum RCP2.6–RCP8.5. Sýndar eru breytingar frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

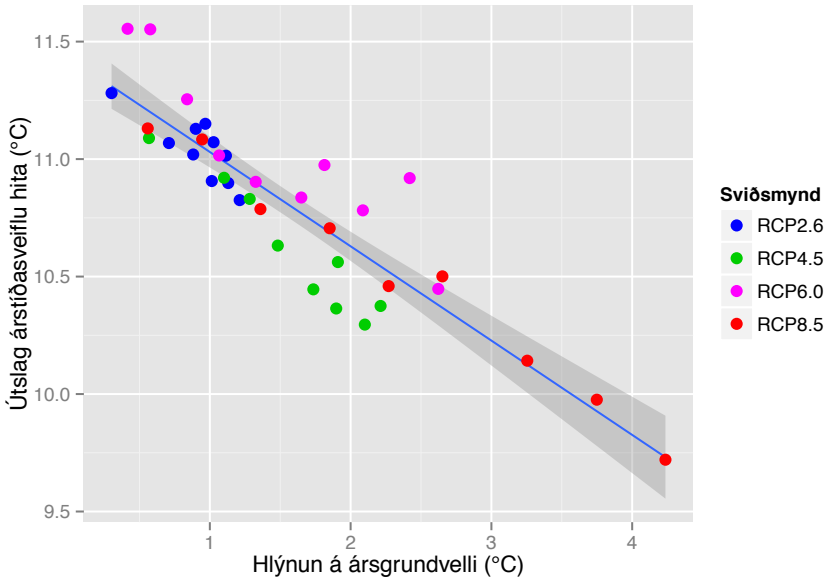
hversu mikið hlýnar og hversu mikið úrkoma eykst að meðaltali. Mynd 4.24 sýnir samantekt á þessu, en hún sýnir meðaltöl hlýnunar og úrkomubreytinga fyrir öll líkön og hvern áratug 21. aldar (2001–2010, 2011–2020 o.s.frv.). Þessar niðurstöður eru mjög sambærilegar við niðurstöður V2008, en þar kom fram að fyrir hverja gráðu sem hlýnaði jókst úrkoma um 2–3%. Eins og áður hefur komið fram er úrkomuaukningin aðeins minni í CMIP5 líkönunum, svo hér er hlutfallið því lægra eða um 1.5%. Eins og áður kom fram eru úrkomubreytingar mun sveiflukenndari en breytingar í hitafari og því meiri óvissa um þessa niðurstöðu.

4.4.6 Breytingar á árstíðasveiflu

Hér að framan var árstíðasveiflu hita og úrkomu á Íslandi lýst. Vitað er að árstíðasveiflan kann að breytast í takt við hnattrænar loftslagsbreytingar. Myndir 4.25 og 4.26 sýna hvernig árstíðasveifla hita og úrkomu breytist milli tveggja 20 ára tímabila, þ.e. 1986–2005



Mynd 4.26 Breytingar á árstíðasveiflu úrkomu (%) í sviðsmyndum RCP2.6–RCP8.5. Sýndar eru breytingar frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.



Mynd 4.27 Samantekt á breytingu árstíðasveiflu hita og hlýnunar á ársgrundvelli (°C). Punktarnir sýna 10 ára meðaltöl. Einnig er sýnd besta lína og óvissumat hennar er skyggt.

og 2081–2100. Þær tölulegu upplýsingar sem myndir 4.25 og 4.26 eru byggðar á má sjá í töflum í viðauka.

Í öllum sviðsmyndum er meiri hlýnun að vetri til en að sumri. Þetta þýðir að draga mun úr árstíðasveiflu hita. Mynd 4.27 sýnir samband þessa samdráttar og hlýnunar á ársgrundvelli. Ef hlýnar um 4°C þá minnkar árstíðasveiflan frá um 11.5°C í 9.5°C, eða um 2°C. Þessar niðurstöður eru sambærilegar við V2008, en þar kom fram að hlýnun að vetrarlagi yrði meiri en að sumarlagi, og næmi munurinn um helmingi af hlýnun á ársgrundvelli.

Eins og fram hefur komið er úrkoma á Íslandi að jafnaði meiri að vetri en að sumri. Ekki eru jafn augljósar breytingar á árstíðasveiflu úrkomu, en í öllum sviðsmyndum er þó tilhneiging til þess að úrkoman aukist meira síðsumars og á haustin en minnst, ef þá nokkuð, snemma árs.

4B Hafís á norðurslóðum

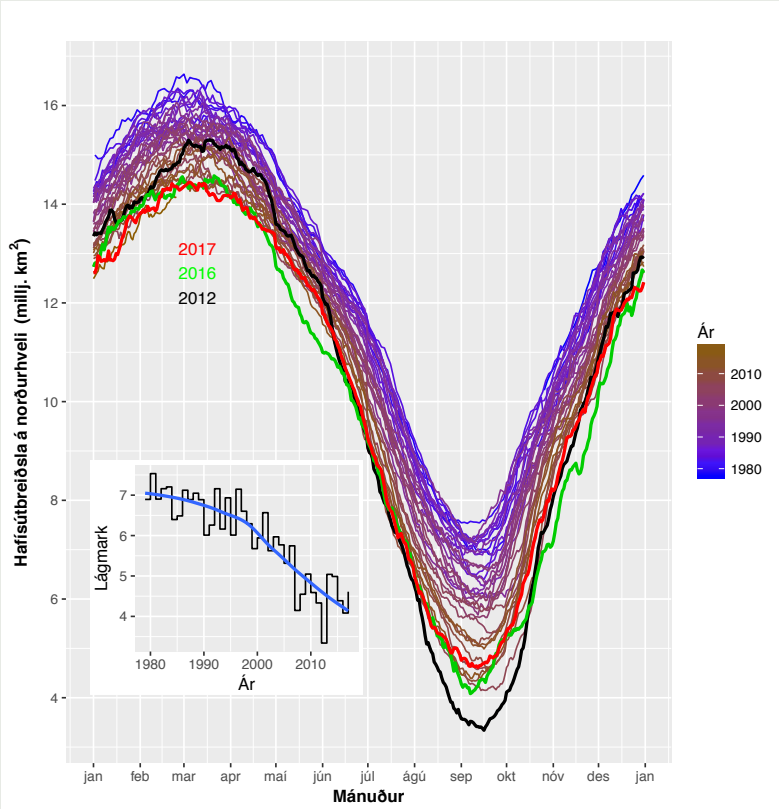
Fjallað var um líklegar breytingar á útbreiðslu hafíss á hafsvæðinu norðan við Ísland í kafla 4.1 í V2008. Sú umfjöllun byggist á skýrslu IPCC frá 2007 og reikniniðurstöðum frá CMIP3 líkönum. Bent var á að líkönin ofmætu útbreiðslu hafíss við núverandi aðstæður, sem drægi úr trausti á niðurstöður þeirra um þróun á öldinni. Líkönum bar þó saman um að á síðari hluta aldarinnar myndi hafís nánast hverfa síðsumars af Norður-Grænlandshafi en minnkun vetraríssins yrði ekki jafn áberandi, en þó merkjanleg.

Í skýrslu IPCC frá 2013 er fjallað um hafísútbreiðslu eins og rakið er í kafla 3. Síðan skýrslan kom út hefur hafísútbreiðsla á norðurhveli haldið áfram að dragast saman. Mynd 4.28 sýnir mælingar á stærð hafísbreiðunnar frá upphafi gervihnattaaldar[59] og eru allar tölur í milljónum ferkílómetra. Myndin sýnir árstíðasveiflu útbreiðslunnar og er hámarki yfirleitt náð í mars, en lágmarki í september. Á myndinni sýna bláar línur mælingar í upphafi tímabilsins en brúnar línur mælingar á síðustu árum. Upp úr 1980 var árshámark útbreiðslu um 16.5 milljón km^2 og árslágmarkið rúmlega 7 milljón km^2. Síðustu ár hefur hámarkið fallið í um 14.5 milljón km2 en lágmarkið hefur fallið enn meira. Minnst útbreiðsla varð haustið 2012, 3.4 milljón km^2, en árin 2007 og 2016 var árslágmarkið um 4.1 km^2. Árin 2012, 2016 og 2017 eru merkt sérstaklega inn á myndina. Innskotsmynd sýnir hvernig árslágmarkið hefur fallið frá upphafi mælinga og útjafnaður ferill sýnir að samdrátturinn varð ákafari í lok síðustu aldar.

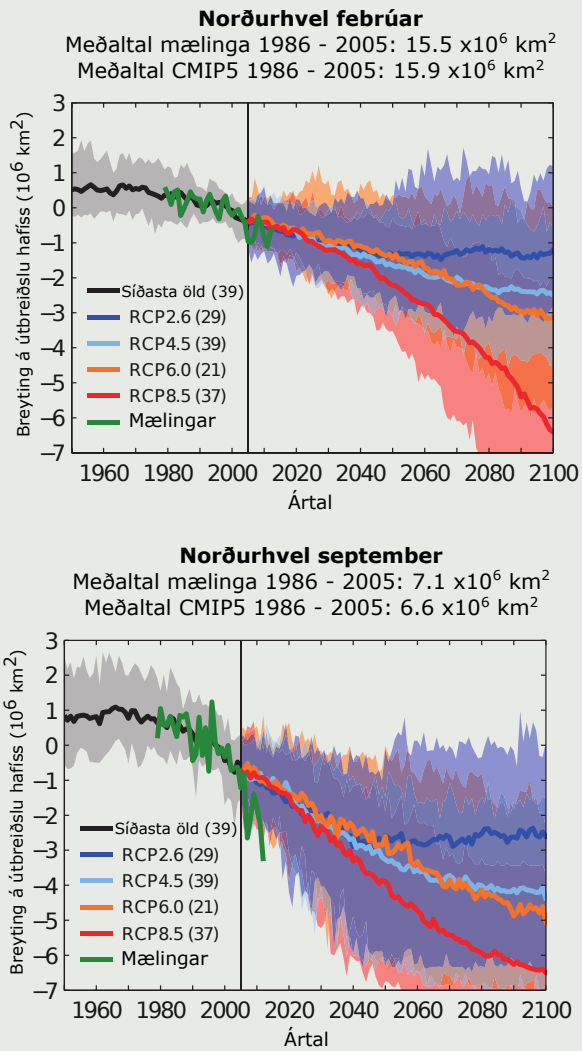
Mynd 4.29 sýnir reikniniðurstöður CMIP5 líkana auk mælinga. Myndin til vinstri sýnir febrúarmánuð þegar útbreiðslan er sem mest en tími lágmarksútbreiðslu í september er sýndur á myndinni til hægri. Á tímabilinu fyrir 2005 ná líkönin sæmilega að herma útbreiðslu íssins, en verr eftir það. Sérstaklega er ljóst að líkönin ná ekki að herma ákafan samdrátt í lágmarksútbreiðslu á síðustu árum.

Myndin sýnir líka þróun hafísþekju í CMIP5 líkönum við sviðsmyndir RCP2.6–RCP8.5. Allar sviðsmyndir sýna verulegan samdrátt, en þó meiri í september en í febrúar. Athygli vekur að líkönum ber ekki vel saman, sérstaklega er áberandi að í öllum sviðsmyndum sýna sum líkön ákafan samdrátt hafísþekju í september, um nærri 6 milljón ferkílómetra fyrir 2040. Þá yrði útbreiðsla sumaríssins um 1 milljón ferkílómetra, en oft er miðað við þá tölu þegar rætt er um að íshafið verði að mestu íslaust.

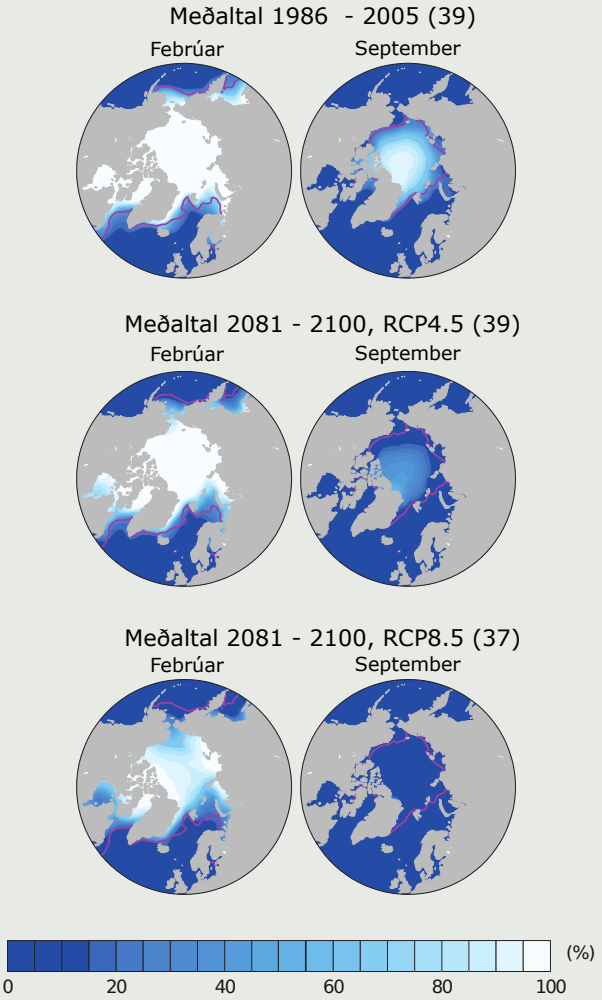
Mynd 4.30 sýnir kort af meðalútbreiðslu hafíss í CMIP5 líkönum fyrir tímabilið 1986–2005 og síðan



Mynd 4.28 Útbreiðsla hafíss (millj. km^2) frá 1979 til 2017. Árstíðasveiflan fyrstu árin er sýnd með blálituðum línum en síðustu árin eru brúnlituð. Árin 2012, 2016 og 2017 eru merkt sérstaklega. Litla myndin sýnir þróun árslágmarksins og bláa línan sýnir útjafnaðan feril.



Mynd 4.29 Breytingar á útbreiðslu hafíss ($10^6 km^2$) á síðari hluta 20. aldar og á 21. öld samkvæmt sviðsmyndum RCP2.6 – RCP8.5. Sýndar eru reiknniðurstöður CMIP5 líkana og einnig eru mælingar á gervihnattaöld sýndar sem græn lína. Lóðrétta línan árið 2005 sýnir hvar skipt var frá sviðsmynd sem notaði söguleg gögn yfir í RCP sviðsmyndirnar. Heildregnu línurnar sýna meðaltal líkana og stærð skyggða svæðisins afmarkar 5 – 95% hlutfallsmörk dreifingar niðurstaðna. Hafísútbreiðslan miðast við að þéttleiki hafíss sé 15% eða meira (byggt á mynd 12.28 í IPCC, 2013).



Mynd 4.30 Meðalþéttleiki hafíss í reiknniðurstöðum CMIP5 líkana fyrir tímabilin 1986–2005 og 2081–2100 fyrir sviðsmyndir RCP4.5 og RCP8.5. Tölur innan sviga sýna fjölda líkana fyrir hverja sviðsmynd. Reiknniðurstöður voru brúaðar á 1° x 1° net og meðaltal reiknað og niðurstöður teiknaðar fyrir 15% þéttleika eða meira. Fíndregin ljósrauð lína sýnir hvar 15% mörkin lágu samkvæmt mælingum fyrir tímabilið 1986–2005 (byggt á mynd 12.28 í IPCC, 2013).

2081–2100 fyrir sviðsmyndir RCP4.5 og RCP8.5. Rauða línan sýnir raunverulega útbreiðslu á tímabilinu 1986–2005. Hvað hafsvæðið norðan við Ísland varðar er ljóst að líkönin ofmátu hafísmagn að vetri til fyrir 1986–2005. Þrátt fyrir að framfarir hafi orðið í hafíslíkönum frá 2007 eru enn verulegar skekkjur í niðurstöðum þeirra, a.m.k. fyrir Norður Grænlandshaf að vetri. Sem fyrr ber líkönum þó saman um að á síðari hluta aldarinnar muni hafís nánast hverfa síðsumars úr Norður-Grænlandshafi en minnkun vetraríssins verði ekki jafn áberandi, en þó merkjanleg.

4.5 Niðurstöður loftslagslíkana með hærri upplausn

Hnattræn reiknilíkön, eins og þau sem eru í CMIP5 safninu, hafa ekki nægilega upplausn til þess að gefa góða mynd af svæðisbundnum breytileika en nota má líkön með hærri upplausn til að niðurkvarða hnattræn líkön. Niðurstöður hnattræna líkansins eru þá notaðar sem innlagsgögn fyrir háupplausnarlíkan sem þekur afmarkað svæði. Á þann hátt er hægt að skoða hvaða áhrif þéttara reikninet, nákvæmara landslag og bætt yfirborð líkansins hefur á niðurstöður. Í sumum tilfellum breytir hærri upplausn niðurstöðum verulega, t.d. magnast úrkomubreytingar í fjalllendi með þéttara reiknineti og eins getur munað nokkru í því hvernig árstíðasveifla hita, úrkomu og vindhraða breytist. Í 3. kafla V2008 er stuttlega fjallað um slíkar niðurkvarðanir og tekið dæmi þar sem niðurkvörðun benti til þess að úrkoma ykist mest á haustin, en ekki á sumrin eins og í niðurstöðum hnattrænna loftslagslíkana.

Á síðustu árum hafa tvö stór alþjóðleg rannsóknarverkefni, ENSEMBLES[60] og CORDEX[61], beitt niðurkvörðun til þess að reikna svæðisbundnar loftslagsbreytingar. Í báðum verkefnum voru nokkur háupplausnarlíkön notuð og hvert þeirra látið niðurkvarða nokkur hnattræn líkön og þannig gerð tafla af reiknniðurstöðum sem leyfði að kanna skipulega kerfisbundnar skekkjur hvers líkans og áhrif ólíkra samsetninga líkana á niðurstöður. Reiknisvæði ENSEMBLES verkefnisins var þó óheppilegt fyrir Ísland, því jaðar þess lá þvert yfir landið, eða skammt vestan við það. Þetta þýddi að niðurstöður voru mjög háðar því hnattræna líkani sem háupplausnarlíkanið niðurkvarðaði[62].

Fyrsta rannsóknin sem bar saman niðurstöður ólíkra háupplausnarlíkana fyrir Ísland notaði þrjú líkön, þar af tvö líkön frá ENSEMBLES verkefninu, þar sem jaðarinn lá vestan við landið[62]. Niðurstöður þessara líkana voru bornar saman innbyrðis og einnig við niðurstöður hnattrænna líkana. Úrkoma og hitafar reyndist trúverðugra í háupplausnarlíkönunum og því meir sem upplausn líkansins var fínni. Hlýnun í þessum líkönum var um 0.2–0.4°C á áratug fram að miðbiki aldarinnar en hlýnun á hafsvæðum umhverfis landið var minni, eða 0.15–0.3°C á áratug. Á sama tímabili jókst úrkoma um u.þ.b. 1% á áratug, en úrkomuaukning í háupplausnarlíkönunum var í heildina sambærileg við niðurstöður hnattrænu líkananna. Niðurstöður bentu þó til þess að aukningin yrði meiri yfir landi en hafi.

Úrkomuákefð var ekki skoðuð sérstaklega í þessari rannsókn, en frekari greining á niðurstöðum benti þó heldur til þess að hún ykist þegar liði á öldina. Á vegum verkefnisins *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á orkukerfi og samgöngur* (LOKS) voru áhrif háupplausnar á niðurkvörðun skoðuð enn frekar[63], og staðfest að rúmfræðileg dreifing hita og úrkomu var trúverðugri með hærri upplausn. Einnig kom fram að hærri upplausn gat hliðrað þeim svæðum þar sem úrkomubreytingar voru mestar.

Ensembles verkefnið notaði einungis eitt reiknisvæði sem þakti meginland Evrópu en náði skammt út fyrir það. Í CORDEX verkefninu voru notuð nokkur reiknisvæði og tvö þeirra, Evrópa og Norður-heimskautssvæðið, þekja Ísland. Á báðum þessum svæðum voru nokkur hnattræn líkön kvörðuð niður með líkönum sem höfðu 50 km upplausn reikninets, en á Evrópusvæðinu voru einnig notuð háupplausnarlíkön með 12.5 km upplausn.

4.5.1 Niðurkvörðun á CORDEX líkönum

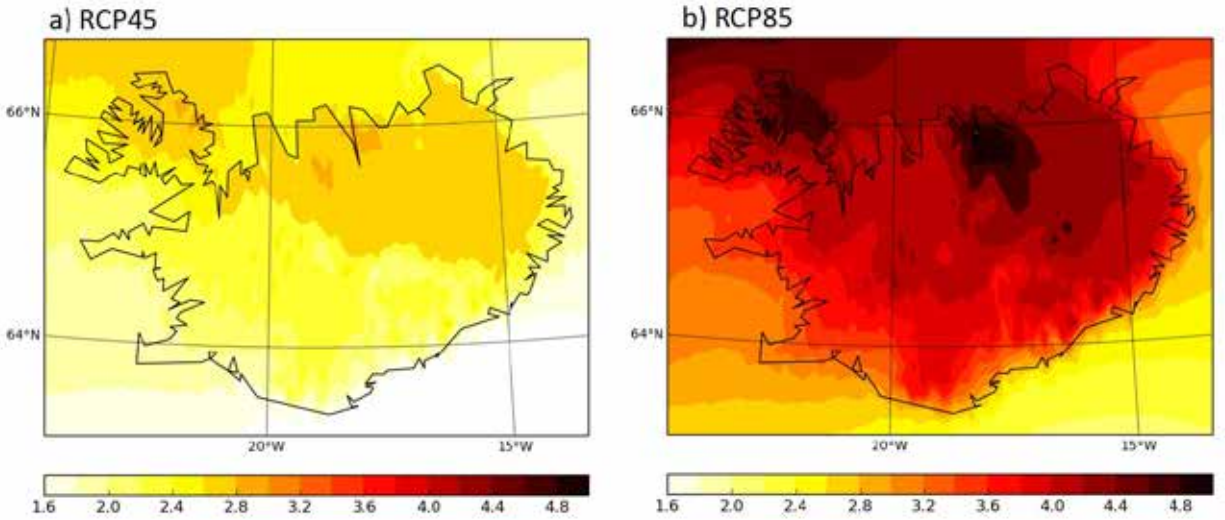
Í nýlegri rannsókn voru þessar reiknniðurstöður bornar saman og þær samsetningar valdar sem best hermdu eftir veðurfari á Íslandi á tímabilinu 1981–2000[64]. Í ljós kom að tvö háupplausnarlíkön með 12.5 km reikninet náðu best að herma veðurfar á viðmiðunartímabilinu og voru þau því notuð til að greina frekar niðurkvarðanir tveggja hnattrænna líkana fyrir tvær ólíkar sviðsmyndir á komandi öld. Í heildina eru þetta átta mismunandi samsetningar háupplausnarlíkans, hnattræns líkans og sviðsmyndar[65]. Mynd 4.13 sýnir niðurstöður um hlýnun á áratug fyrir allar samsetningarnar. Í samræmi við mynd 4.21 er hlýnunin í sviðsmynd RCP4.5 ákafari á fyrri hluta aldarinnar, sviðsmynd RCP8.5 sýnir hins vegar álíka ákafa hlýnun alla öldina.

Hlýnunin er auðvitað meiri í sviðsmynd RCP8.5 en RCP4.5 en ef litið er til allrar aldarinnar er hún ívið meiri í RCA4 líkaninu og einnig í niðurstöðum sem byggjast á innlagsgögnum úr HADGEM2.

Hlýnunin í töflu 4.13 er ekki jafndreifð yfir landið. Tafla 4.13 sýnir meðaltal hlýnunar frá tímabilinu 1981–2000 til 2081–2100 í sviðsmyndum RCP4.5 og RCP8.5. Hvor mynd er meðaltal fjögurra samsetninga í

Háupplausnar-líkan	Hnattrænt líkan	Sviðsmynd	Hlýnun um miðja öld (°C/áratug)	Hlýnun í lok aldar (°C/áratug)	hlýnun á öldinni. (°C/áratug)
RCA4	HADGEM2	RCP4.5	0.28	0.27	0.29
RCA4	MPI	RCP4.5	0.24	0.16	0.26
CCLM	HADGEM2	RCP4.5	0.26	0.25	0.26
CCLM	MPI	RCP4.5	0.22	0.15	0.21
RCA4	HADGEM2	RCP8.5	0.33	0.41	0.40
RCA4	MPI	RCP8.5	0.30	0.30	0.31
CCLM	HADGEM2	RCP8.5	0.32	0.41	0.37
CCLM	MPI	RCP8.5	0.27	0.27	0.28

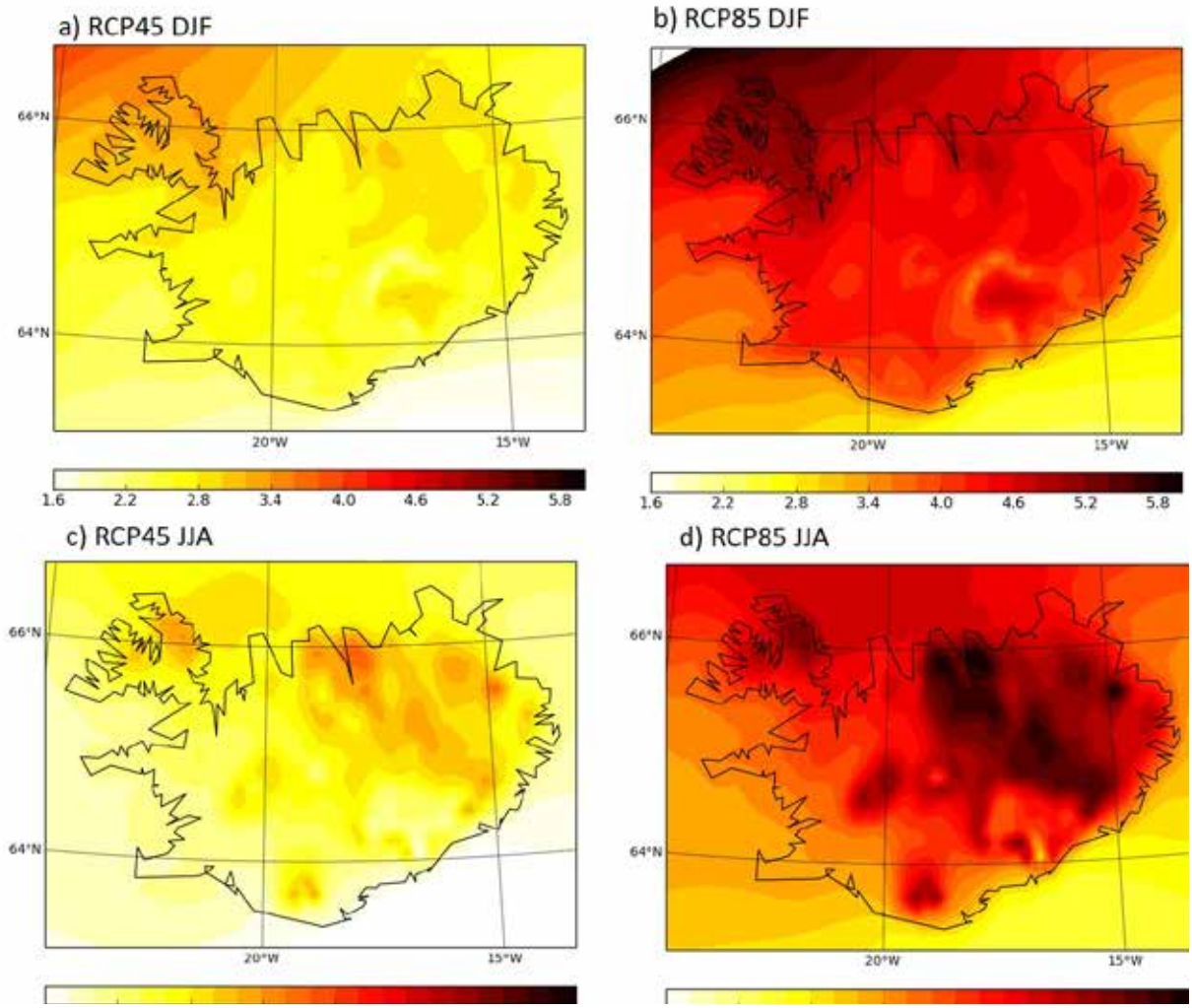
Tafla 4.13 Ákafi hlýnunar (°C/áratug) í átta samsetningum af háupplausnarlíkönum, hnattrænum líkönum og sviðsmyndum um losun gróðurhúsalofttegunda. Sýnd er hlýnun á áratug fyrir miðja öldina (2041–2060), lok aldarinnar (2081–2100) og alla öldina (2001–2100).



Mynd 4.31 Hlýnun (°C) frá tímabilinu 1981–2000 til 2081–2100 fyrir hvora sviðsmynd í töflu 4.13. Hvor mynd um sig er meðaltal fjögurra samsetninga af háupplausnarlíkani og hnattrænu líkani. Sjá nánar heimild 64.

töflu 4.13. Hlýnunin er á bilinu 2–3 (°C) í kaldari sviðsmyndinni en 3–5 (°C) í þeirri hlýrri. Í samræmi við niðurstöður fyrri rannsókna hlýnar meira yfir landi en hafi, og í báðum sviðsmyndum hlýnar meira norðanlands en sunnan.

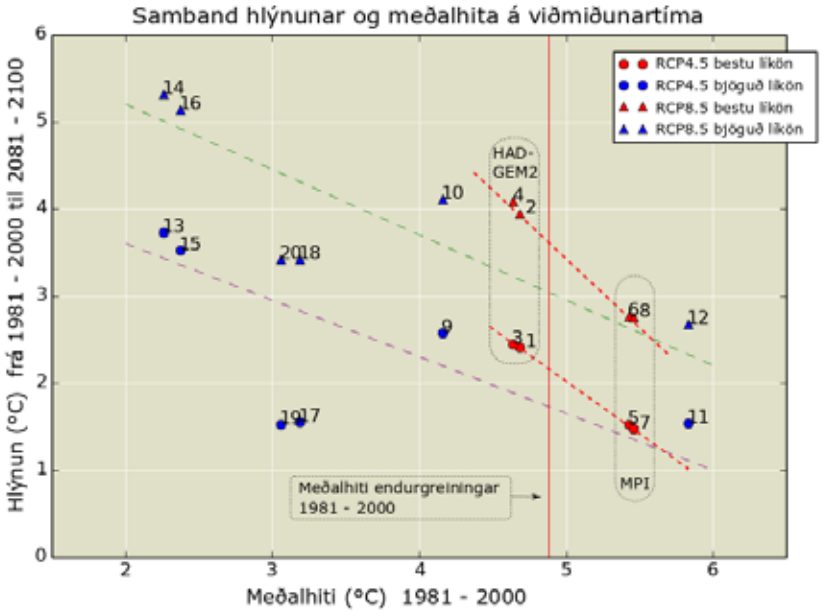
Meiri hlýnun norðanlands þarfnast nokkurrar umræðu, því hún gæti verið kerfisbundin skekkja í reikniniðurstöðum. Flest loftslagslíkön sýna meiri hlýnun á heimskautasvæðum norðursins en sunnar á hnettinum og er talið að það sé trúverðug niðurstaða. Mynd 4.19 sýnir meðaltal allra CMIP5 líkana fyrir sviðsmynd RCP4.5 og þar sést greinilega að það hlýnar meira á svæði meðfram austurströnd Grænlands. Þetta er nokkuð dæmigerð niðurstaða CMIP5 líkana og endurspeglar samdrátt hafísþekju á N-Grænlandshafi. Það getur hins vegar valdið kerfisbundinni skekkju að í



Mynd 4.32 Hlýnun (°C) yfir háveturinn (DJF) og hásumarið (JJA) frá tímabilinu 1981–2000 til 2081–2100 fyrir hvora sviðsmynd í töflu 4.13. Hvor mynd um sig er meðaltal fjögurra samsetninga af háupplausnarlíkani og hnattrænu líkani. Sjá nánar heimild 64.

niðurstöðum sumra líkana er mun meiri hafís á Grænlandssundi við lok 20. aldar en átti sér stoð í raunveruleikanum og reiknaður yfirborðshiti því of lágur. Í sviðsmyndakeyrslum fyrir 21. öldina hopar ísinn og veldur það því meiri hlýnun en eðlilegt er á þessu svæði[66]. Til að draga úr áhrifum þessarar skekkju er mynd 4.31 byggð á líkönum sem voru valin þannig að þau væru ekki óeðlilega köld á viðmiðunartímabilinu 1981–2000. Mynd 4.31 bendir þó til nokkurrar hlýnunar vegna samdráttar í útbreiðslu hafíss á Grænlandssundi. Mynd 4.32 sýnir frekari rök fyrir þessu, þ.e. að hlýnun að vetri verði meiri norðvestanlands en að sumarlagi hlýni mest á austurhluta landsins.

Mynd 4.33 sýnir samband meðalhita líkana á viðmiðunartíma og þess hversu mikið hlýnar. Rauðu táknin sýna líkönin í töflu 4.13 og á myndinni sést að í samanburði við endurgreininguna (þá sömu og á mynd 4.2, en fyrir 1981–2000) er yfirborðshiti á viðmiðunartímabilinu lítillega of lágur (< 0.4°C) í líkönum sem byggjast á HADGEM2, en of hár (um 0.5°C) í líkönum sem byggjast á MPI. Myndin sýnir einnig hvernig leggja má mat á það hvort meðaltöl sviðsmynda í töflu 4.13 séu bjöguð vegna kerfisbundinnar skekkju[67]. Skurðpunktur rauðrar brotalínu hvorrar sviðsmyndar og lóðréttu línunnar gefur mat á því hver hlýnunin hefði líklega verið ef öll líkön hefðu haft sama meðalhita og endurgreiningin á viðmiðunartíma. Þessa niðurstöðu má bera saman við meðalhita hvorrar sviðsmyndar í töflu 4.13. Fyrir sviðsmynd RCP4.5 gefur mynd 4.33 hlýnun um 2.2°C, eða 0.22°C á áratug, aðeins lægra en 0.26°C á áratug sem er meðaltal sviðsmyndar RCP4.5 í töflu 4.13. Fyrir



Mynd 4.33 Samband hlýnunar á 21. öld (°C) og meðalhita líkana á viðmiðunartíma (°C). Rauðu táknin sýna bestu líkönin (tafla 4.13). Þríhyrningar eru RCP8.5 en hringir RCP4.5. Rauðu brotalínurnar tengja líkön sem nota MPI innlagsgögn og líkön sem nota HADGEM2. Lóðrétta rauða línan sýnir meðalhita endurgreiningarinnar á viðmiðunartímabili. Bláu táknin sýna niðurstöður nokkurra CORDEX líkana sem voru of köld á viðmiðunartíma til þess að vera notuð í greiningu. Greininlegt samband er á milli þess hversu köld líkön eru á viðmiðunartíma og hversu mikið þau hlýna á 21. öld. Skurðpunktur við lóðréttu línuna gefur mat á þeirri hlýnun sem búast mætti við ef líkön væru óbjöguð. Aðlagað frá heimild 64.

sviðsmynd RCP8.5 er hlýnunin 3.7°C eða 0.37°C á áratug. Það er aðeins hærra en meðaltal sviðsmyndar RCP8.5 í töflu 4.13 sem er 0.34°C á áratug.

Niðurstöður þessa samanburðar benda ekki til þess að kerfisbundin hafísskekkja valdi verulegu ofmati á hlýnun á Íslandi á næstu öld – en þó kann hlýnunin að vera ofmetin norðvestanlands að vetri til. Ólíklegt er þó að umframhlýnunin á Norðurlandi sé alfarið vegna kerfisbundinnar skekkju, heldur gæti hlýnun á öldinni orðið 0.5–1°C meiri norðanlands en sunnan.

Hér er við hæfi að gera þann fyrirvara að mat á kerfisbundinni skekkju vegna of kalds viðmiðunartímabils gaf aðeins aðrar niðurstöður þegar fleiri líkön (sem flest voru allt of köld) voru tekin með í reikninginn. Bláu táknin á mynd 4.33 sýna samband hita á viðmiðunartíma og hlýnunar fyrir líkön sem þóttu of köld til að nota í ofangreindri rannsókn[64]. Þó að greinilegt samband sé á milli hlýnunar og hita á viðmiðunartíma myndi leiðrétting, sem byggi á fleiri líkönum, draga úr hlýnun í báðum sviðsmyndum.

Að jafnaði munar 2–3°C á hita við norður- og suðurströnd landsins og umframhlýnun norðanlands dregur úr þeim mun en jafnar hann ekki.

Mynd 4.14 sýnir hlutfallslegan fjölda sumardaga þar sem hámarkshiti fer yfir 15°C. Til loka aldarinnar aukast líkur á svo hlýjum dögum verulega frá því sem þær voru í CORDEX gögnum fyrir viðmiðunartímabilið, þær eru tvö- til þrefalt meiri í sviðsmynd RCP4.5 og þre- til fimmfalt meiri í sviðsmynd RCP8.5. Taflan sýnir einnig hlutfallslegan fjölda byggðan á athugunum á veðurstöðvum fyrir viðmiðunartímabilið, og greinilega munar nokkuð miklu milli athugana og líkanreikninga. Sérstaklega er þetta áberandi í niðurstöðum fyrir Akureyri og Egilsstaði. Megnið af þessum mun er líklega vegna þess að upplausn reiknínets líkana (12.5 km) er ekki næg til þess að endurspegla staðhætti nægilega vel. Gróf leið til að leiðrétta fyrir þessum mun er að hliðra niðurstöðum sviðsmyndarreikninga um mismun athugana og líkans á viðmiðunartíma. Skáletraðar tölur innan sviga sýna niðurstöður slíkrar leiðréttingar. Mynd 4.15 sýnir niðurstöður sambærilegs útreiknings fyrir líkur þess að hámarkshiti fari yfir 20°C.

Töflur 4.14 og 4.15 sýna að líkur á hlýjum sumardögum aukast verulega í báðum sviðsmyndum og dagar þar sem hámarkshiti fer yfir 15°C gætu orðið algengir (>50% daga) inn til landsins. Dögum þar sem hámarkshiti fer yfir 20°C fjölgar líka, en verða þó ekki algengir (< 25%).

*Tafla 4.14 Hlutfall daga (%) yfir hásumarið (JJÁ) þar sem hámarkshiti fer yfir 15°C. Sýndar eru niðurstöður byggðar á talningu á athugunum, og einnig niðurstöður teknar úr CORDEX líkönum fyrir sviðsmyndirnar tvær. Tölur innan sviga sýna grófa leiðréttingu á kerfisbundinni skekkju, sjá texta. Byggt á heimild 64. (*Athuganir frá Egilsstöðum ná út sumarið 1997, **fyrir Selfoss eru athuganir frá veðurstöðinni á Eyrarbakka notaðar).*

Hlutfall sumardaga með hámarkshita yfir 15°C				
Staður	Athuganir 1981–2000	Líkan 1981–2000	RCP4.5 2081–2100	RCP8.5 2081–2100
Akureyri	40	9	22 (53)	32 (61)
Egilsstaðir (*)	44	10	27 (61)	48 (82)
Kirkjubæjar-klaustur	39	20	45 (64)	73 (92)
Reykjavík	16	12	29 (33)	44 (48)
Selfoss (**)	21	26	43 (38)	76 (71)

*Tafla 4.15 Hlutfall daga (%) yfir hásumarið (JJÁ) þar sem hámarkshiti fer yfir 20°C. Sýndar eru niðurstöður byggðar á talningu á athugunum, og einnig niðurstöður teknar úr CORDEX líkönum fyrir sviðsmyndirnar tvær. Tölur innan sviga sýna grófa leiðréttingu á kerfisbundinni skekkju, sjá texta. Byggt á heimild 64. (*Athuganir frá Egilsstöðum ná út sumarið 1997, ** fyrir Selfoss eru athuganir frá veðurstöðinni á Eyrarbakka notaðar).*

Hlutfall sumardaga með hámarkshita yfir 20°C				
Staður	Athuganir 1981–2000	Líkan 1981–2000	RCP4.5 2081–2100	RCP8.5 2081–2100
Akureyri	7.9	0.5	4 (11)	10 (17)
Egilsstaðir (*)	9.0	1	8 (16)	15 (23)
Kirkjubæjar-klaustur	4.1	0.5	5 (9)	12 (16)
Reykjavík	0.3	0	1	3
Selfoss (**)	0.8	1	3 (4)	10 (11)

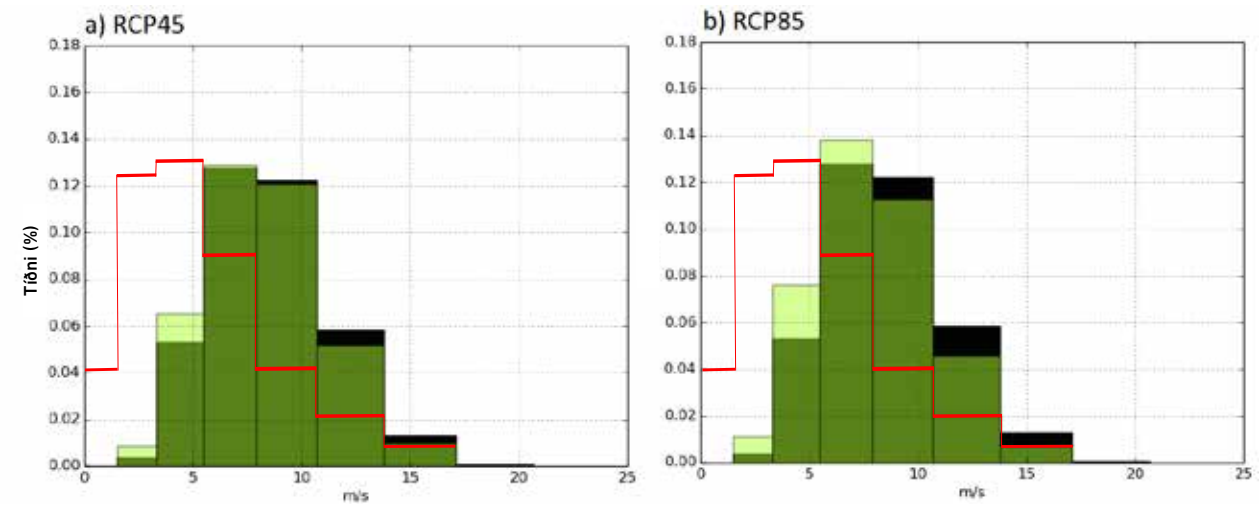
Úrkomubreytingar eru ekki ekki jafn eindregnar og hitabreytingar. Í öllum keyrslum RCA4 líkansins jókst úrkoma í sviðsmyndareikningum allstaðar á landinu, en í niðurstöðum reikninga með CCLM líkaninu dró úr úrkomu, sérstaklega austan til á landinu. Þetta ósamræmi gerir erfitt að túlka niðurstöður varðandi breytingar á úrkomu, þótt úrkoma aukist að meðaltali í báðum sviðsmyndum. Úrkomuaukningin var mest á haustin, en á ársgrundvelli jókst hún um nærri 75 mm fyrir hverja gráðu sem hlýnaði. Það samvarar um 4.5% aukningu á úrkomu fyrir hverja gráðu sem er mun meiri aukning en niðurstöður CMIP5 líkana sýndu. Talning á fjölda daga með úrkomu yfir 10 mm á sólarhring leiddi í ljós að þeim fjölgaði víðast á landinu, en aukningin var ólík milli líkana, svæða og sviðsmynda. Þessar niðurstöður má þó telja vísbendingu um að úrkomuákefð geti aukist á öldinni.

Jafnframt talningu á fjölda úrkomudaga voru einnig taldir þurrkadagar, þ.e. fjöldi daga þar sem engrar úrkomu varð vart. Tafla 4.16 sýnir niðurstöðu talningarinnar og sem fyrr hefur talningu sem byggð er á athugunum frá veðurstöðvum verið bætt við í töfluna. Eins og sjá má vanmeta líkön fjölda þurrkadaga á viðmiðunartímanum, sérstaklega á Akureyri og Egilsstöðum. Skáletraðar tölur innan sviga sýna niðurstöður eftir leiðréttingu og sjá má að hlutfallslegur fjöldi þurrkadaga eykst um 2–7% frá því sem athuganir sýna. Þetta eru ekki miklar breytingar og með tilliti til þess ósamræmis sem er í niðurstöðum líkana er ekki tilefni til þess að gera mikið úr þessari aukningu. Sem fyrr má þó telja niðurstöðurnar vísbendingu um að þurrkadögum geti fjölgað á öldinni.

Í báðum sviðsmyndum dregur úr vindhraða frá viðmiðunartíma, og gildir það fyrir allar samsetningar

Hlutfall daga án úrkomu				
Staður	Athuganir 1981–2000	Líkan 1981–2000	RCP4.5 2081–2100	RCP8.5 2081–2100
Akureyri	49	22	26 (53)	28 (55)
Egilsstaðir (*)	53	26	31 (58)	33 (60)
Kirkjubæjar-klaustur	37	31	36 (42)	38 (44)
Reykjavík	38	35	37 (40)	38 (41)
Selfoss (**)	33	37	42 (38)	44 (40)

*Tafla 4.16 Hlutfall daga (%) án úrkomu. Sýndar eru niðurstöður byggðar á talningu á athugunum, og einnig niðurstöður teknar úr Cordex líkönum fyrir sviðsmyndirnar tvær. Sjá nánar heimild 64. (*Athuganir frá Egilsstöðum ná til 1997, **fyrir Selfoss eru athuganir frá veðurstöðinni á Eyrarbakka notaðar).*



Mynd 4.34 Tíðnidreifing vindhraða í Reykjavík 1981–2000 (svartar súlur) og 2081–2100 (grænar og ljósgrænar súlur) fyrir báðar sviðsmyndir. Rauðu línurnar sýna vindhraðadreifingu byggða á mælingum á veðurstöðinni í Reykjavík. Mörk súlna miðast við vindstig. Sjá nánar heimild 64.

líkana í töflu 4.13, en þó var samdráttur meiri í hlýrri sviðsmyndinni. Yfir landi var þó samdráttur að meðaltali á bilinu 0–0.4 m/s en allt að tvöfalt meiri yfir hafi. Breytingar á dreifingu vindhraða skipta þó meira máli en breyting á meðalvindi. Mynd 4.34 sýnir breytingu á vindhraðadreifingu í Reykjavík frá viðmiðunartíma til loka aldarinnar.

Í báðum sviðsmyndum eykst tíðni hægviðris (kuls, golu) og stinningsgolu en það dregur úr tíðni meiri vinds (kalda, stinningskalda, allhvass og hvassviðris). Samanburður við vindhraðamælingar í Reykjavík á viðmiðunartímabilinu sýna að líkönin vanmeta tíðni andvara, kuls og golu, en ofmeta tíðni meiri vinds[68]. Með þeim fyrirvara að líkönin sýna of mikinn vind benda niðurstöðurnar til þess að frekar dragi úr vindhraða á öldinni. Hér mætti einnig hafa í huga að breytingar á gróðurfari munu mjög líklega draga úr vindi yfir landi. Ekki er þó ljóst hvort dregur úr tíðni verstu óveðra. Þegar kemur að óveðrum er áreiðanleiki CORDEX reikninga ekki nægur til að traustar niðurstöður fáist um breytingar á óveðratíðni. Nánar er fjallað um óveðratíðni í grein 12.1.1.

4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar

Lóðrétta hringrásin (AMOC)

Fjallað er um hafhringrás í Norður-Atlantshafi í V2008. Rætt er um hvernig skipta má hringrásinni upp í lárétt og lóðrétt kerfi. Láréttu hafstraumakerfin teygja sig í efri lögum sjávar þvert yfir úthöfin og flytja hlýsjó yfir á kaldari svæði og svalan sjó til baka. Golfstraumurinn og framlenging hans, Norður–Atlantshafsstraumurinn, eru hluti af slíku kerfi sem að mestu er knúið af vindum á Norður–Atlantshafi, og þá sérstaklega ríkjandi vestanáttum í norðurhluta þess og austanáttum (staðvindum) í suðurhlutanum. Angi af Norður–Atlantshafsstraumnum flytur tiltölulega hlýjan sjó norður fyrir Ísland og mætir þar Austur–Grænlandsstraumnum, sem flytur svalan sjó til suðurs meðfram austurströnd Grænlands. Á mörkum þessara tveggja strauma eru hita- og seltuskil í sjónum og hefur breytileiki þessara tveggja hafstrauma afgerandi áhrif á skilyrði á norðurmiðum.

Hlýsjórinn sem streymir norður á bóginn er saltari en svalsjórinn og þegar hann kólnar getur hann orðið nægilega þungur til að sökkva og mynda djúpsjó. Í Norður–Atlantshafi gerist slík djúpsjávarmyndun í Labradorhafi og í Norður–Grænlandshafi. Djúpsjórinn leitar svo suður á bóginn yfir á önnur hafsvæði. Lóðrétt hringrás hafsins stjórnast því að hluta af þáttum sem hafa áhrif á eðlismassa hlýsjávar í Norður–Atlantshafi, þ.e. varmatapi og seltubreytingum. Vegna þessara áhrifaþátta hefur þessi hringrás oft verið nefnd varma- og seltuhringrásin en á undanförnum árum hefur nafngiftin AMOC unnið á, en hún lýsir fyrirbærinu en ekki orsökum þess[69].

Þó að heppilegt sé að skipta hringrás hafsins upp í lárétt og lóðrétt straumakerfi eru þessar hringrásir nátengdar. Hlýsjór sem berst sunnan að í efri lögum sjávar að Íslandsströndum er hluti af báðum kerfum. Þessi kerfi munu þó líklegast bregðast ólíkt við loftslagsbreytingum – og viðbragð þeirra mun hafa áhrif á loftslag á Norður-Atlantshafi.

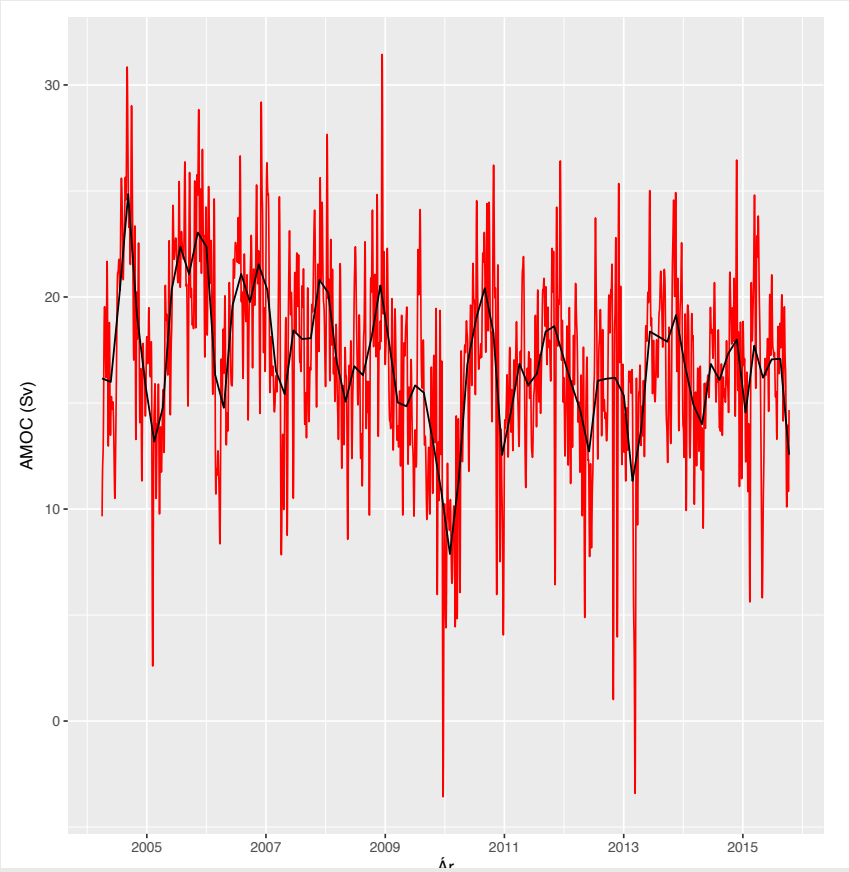
Ekki er talið líklegt að miklar breytingar verði á ríkjandi vindáttum við Norður-Atlantshaf á komandi öld og því er ekki líklegt að verulegar breytingar verði í láréttu yfirborðshringrásinni. Með hlýnandi sjó og breytingum á seltu yfirborðslaga kunna hins vegar að verða breytingar á lóðréttu hringrásinni. Hún virðist viðkvæm fyrir þeim breytileika úrkomu og ísbráðnunar sem gert er ráð fyrir á næstu áratugum. Líklegt er að á síðasta jökulskeiði hafi þessi hringrás raskast verulega, en um nokkurt skeið hefur verið ljóst að veðurfarssveiflur þá urðu samfara breytingum á hafhringrás.

Eins og rakið er í kafla 3 bentu fyrirliggjandi gögn ekki til þess að dregið hefði úr styrk AMOC á ritunartíma fimmtu matsskýrslu IPCC. Samfelldar mælingar á AMOC hófust þó ekki fyrr en á fyrsta áratug þessarar aldar og var skýrslan því ekki byggð á mörgum árum samfelldra mælinga.

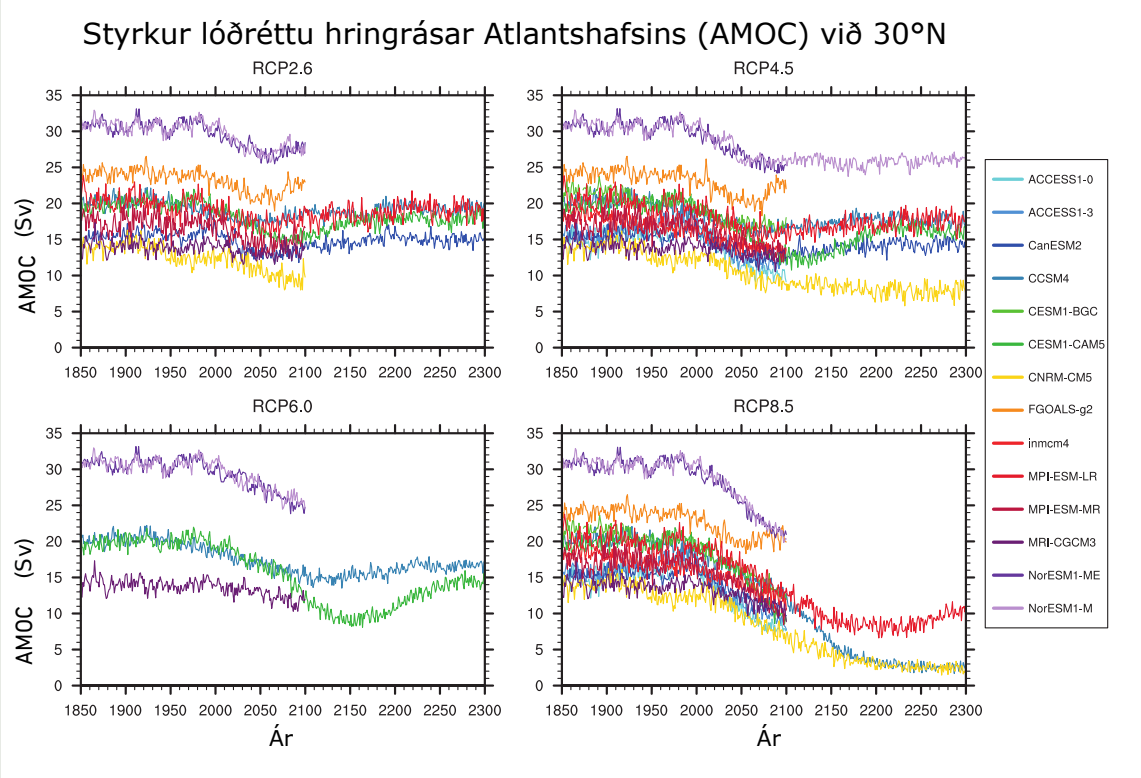
Mynd 4.35 sýnir mælingar á styrk AMOC frá 2004 til 2015. Myndin sýnir streymi yfirborðssjávar til norðurs yfir 26°N[70]. Að meðaltali er flæðið[71] 17 Sv en verulegar sveiflur eru í því, bæði innan árs og milli ára. Sýnt hefur verið fram á að samdráttur á styrk AMOC á tímabilinu 2004–2012 er innan þeirra marka sem búast má við vegna náttúrulegs innri breytileika hringrásarinnar[72,73]. Mælingar síðustu ára hafa því ekki breytt niðurstöðu IPCC að ráði, þ.e. enn hefur ekki orðið vart við óeðlilegan samdrátt í AMOC hringrásinni. Við þetta má bæta að tímabil mælinga er ákaflega stutt og erfitt að draga ályktanir um samdrátt að sinni. Breytingar í sjávarstöðu við austurströnd Bandaríkjanna hafa þó verið tengdar þessum mælingum og þau gögn benda til þess að samdráttur síðustu ára sé ekki einstakur[74].

Einnig er rakið í kafla 3 að mjög líklega dragi úr lóðréttri hringrás Atlantshafsins (AMOC) á öldinni. Samdrátturinn er um 11 [1–24]% í þeirri sviðsmynd þar sem minnst hlýnar (RCP2.6), en 34 [12–54]% í sviðsmyndinni þar sem mest hlýnar (RCP8.5). Mynd 4.36 sýnir niðurstöður loftslagslíkana fyrir sviðsmyndirnar fjórar, framlengdar til ársins 2300[75]. Í öllum tilvikum er gert ráð fyrir að samdráttur í losun hefjist fyrir 2150 og geislunarálag því stöðugt frá 2200, nema í RCP2.6 þar sem það dregur úr geislunarálagi frá og með fyrri hluta 21. aldar[76]. Samdráttur AMOC er yfirleitt meiri í líkönum þar sem hringrásin er sterk í upphafi 20. aldar og eftir að geislunarálag nær jafnvægi stöðvast samdrátturinn, en hringrásin nær þó ekki fyrri styrk.

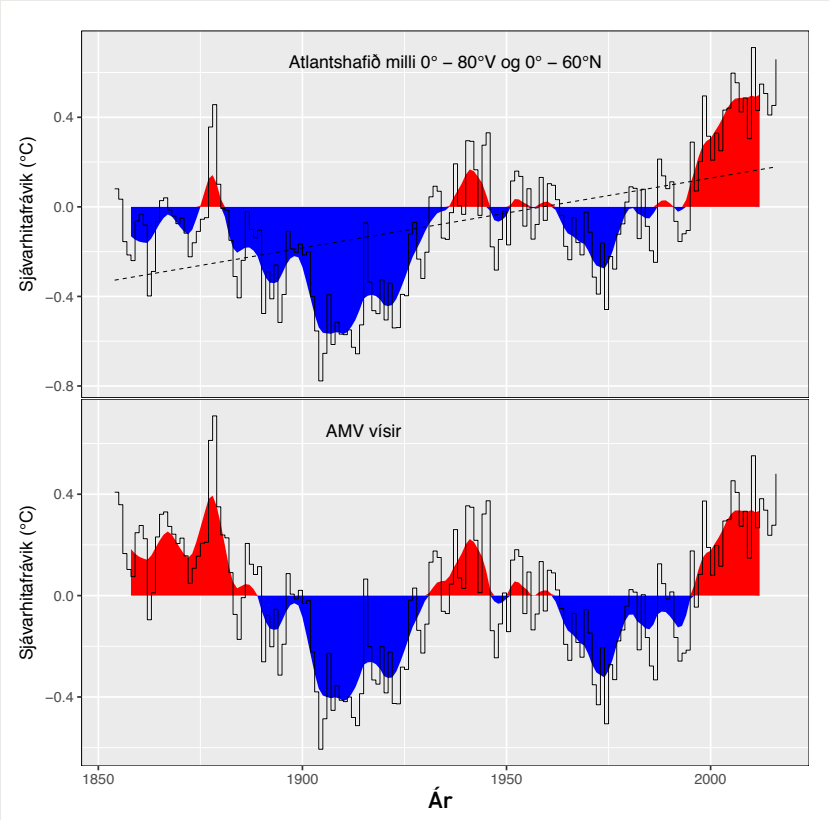
Árum saman hefur verið umdeilt hvort möguleiki sé á stórfelldri röskun eða jafnvel hruni á þessari hringrás, í líkingu við áðurnefndar sveiflur, þær sem urðu á síðasta jökulskeiði. Skýrsla milliríkjanefndar bendir á að það sé ólíklegt að AMOC muni skyndilega hrynja á 21. öld eða síðar en ekki sé hægt að útiloka hrun verði



Mynd 4.35 Styrkur AMOC hringrásarinnar (Sv) frá 2004–2015. Myndin sýnir niðurstöður mælinga í sniði í Norður–Atlantshafi við 26°N (sjá nánar tilvísun 70).



Mynd 4.36 Breytingar á styrk lóðréttrar hringrásar Atlantshafsins (Sv) við 30°N í sviðsmyndunum fjórum. Myndin sýnir niðurstöður 14 loftslagslíkana, en þó ekki fyrir allar sviðsmyndir. (Byggt á mynd 12.35 í IPCC (2013).)



Mynd 4.37 Langtímabreytileiki sjávarhita (°C) á Norður-Atlantshafi. Efri myndin sýnir meðaltal yfir svæðið milli 0°–80°V og 0°–60°N og einnig bestu línu gegnum mælirröðina. Neðri myndin sýnir vik frá bestu línu. Báðar myndir sýna ársgildi og útjafnaðan feril. Útjafnaði ferillinn á neðri myndinni er hinn eiginlegi AMV vísir.

hlýnun nægilega mikil og langvinn[76]. Mynd 4.36 (fyrir RCP8.5) er áhugaverð í þessu samhengi, en hún sýnir að í tveimur líkönum dregur hægt og rólega úr hringrásinni án þess að hún þó hrynji skyndilega.

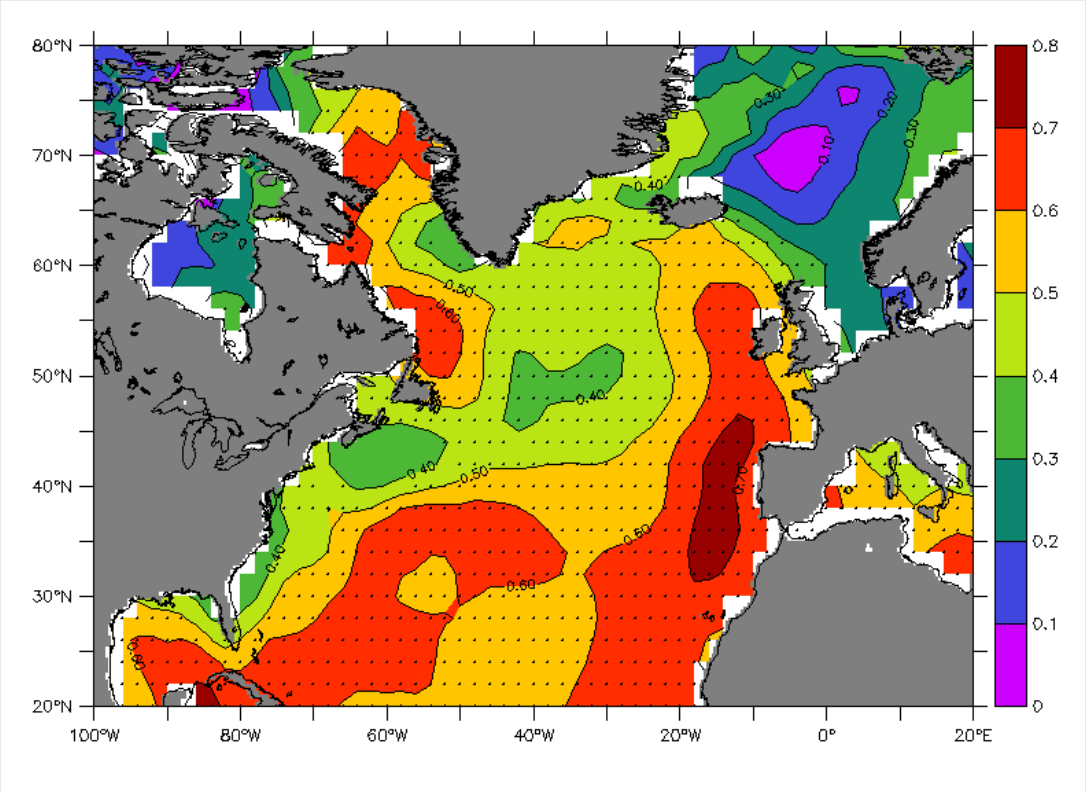
Milliríkjanefndin nefnir tvö atriði sem hafa ber í huga í þessu sambandi. Annars vegar er hugsanlegt að líkön séu ekki nægilega næm fyrir áhrifum hlýnunar, en hins vegar er mögulegt að bráðnun Grænlandsjökuls verði mun meiri en gert hefur verið ráð fyrir og ferskvatnsflæðið út í Atlantshafið muni draga enn meira úr djúpsjávarmyndun. Þrátt fyrir að hrun AMOC sé ólíklegt tekur skýrsla milliríkjanefndar fram að *lítil* vissa sé um þróun AMOC eftir 21. öldina.

Áratugabreytileiki í lofti og hafi (AMV)

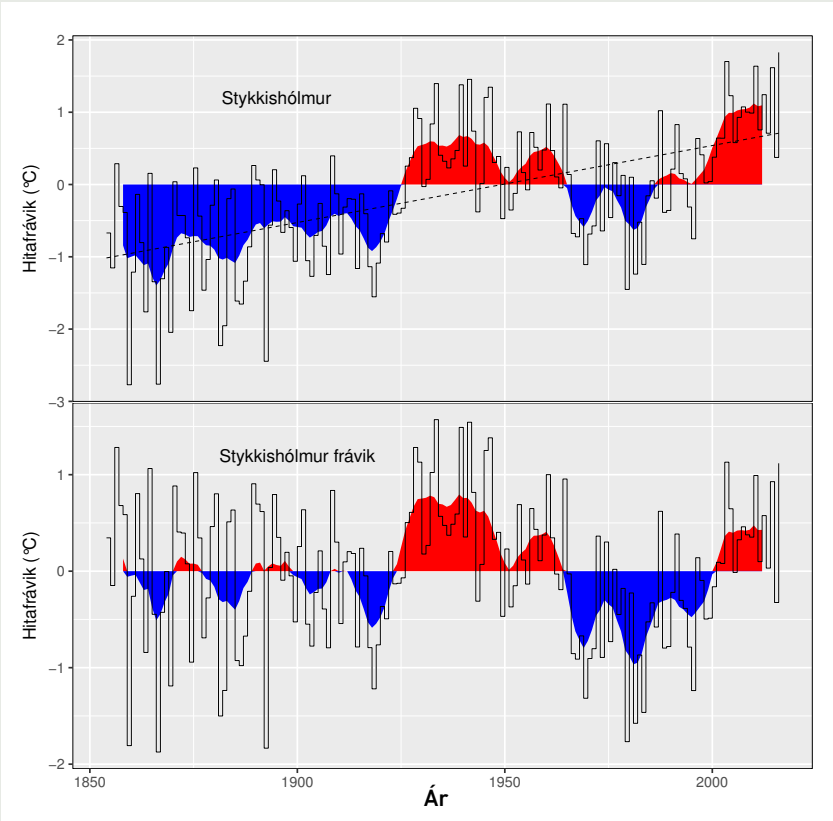
Sú sveifla í lofthjúpnum á Norður-Atlantshafssvæðinu sem mest ber á í gögnum er kölluð Norður-Atlantshafssveiflan (NAO) en hún lýsir tilviljanakenndum breytileika í mun á styrk Íslandslægðarinnar og Azoreyjahæðarinnar. Á Íslandi hefur þessi sveifla takmörkuð áhrif á hita, en áhrifa hennar gætir í úrkomu. Þessi breytileiki er þó aðallega milli ára, langtímabreytileika gætir hins vegar í sjávarhita og er gjarnan lýst með sk. AMV vísitölu[77,78]. Mynd 4.37 sýnir AMV vísitölu fyrir tímabilið 1854 til 2016 og þar sést að á síðari hluta 19. aldar kólnaði N-Atlantshaf, það hlýnaði síðan á fyrri hluta 20. aldar og kólnaði svo aftur. Síðustu áratugi hefur farið hlýnandi á ný. Gagnaröðin er stutt en útjafnaði ferillinn (sem er hinn eiginlegi AMV vísir) sýnir sveiflur sem taka um 70 ár að ganga yfir. Þessi sveifla er þó ekki með vel skilgreindan sveiflutíma, og fornveðurfarsrannsóknir[79] sýna að sveiflurnar geta tekið 55–70 ár og auk þess geta komið tímabil þar sem sveiflunnar verður ekki vart[80].

Mynd 4.38 sýnir á korti fylgni sjávarhita og AMV vísitölunnar. Punktarnir á myndinni afmarka það svæði þar sem fylgnin er marktæk[81] og það nær yfir megnið af Norður-Atlantshafi, en þó ekki norður fyrir Ísland. Fylgnin er mest sunnan- og austantil á hafsvæðinu, og er mest ríflega 0.7 á takmörkuðu svæði út af Pýreneaskaga. Á því svæði nær AMV vísitalan að útskýra um helming breytileika sjávarhita.

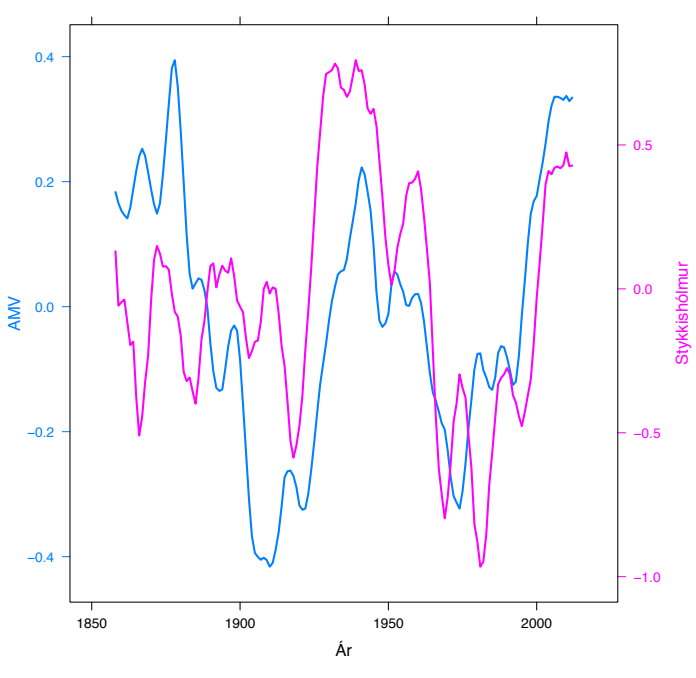
Margvísleg gögn sýna að AMV hefur áhrif á marga veðurtengda þætti umhverfis Atlantshafið, og skýrsla milliríkjanefndar nefnir m.a. misserisvindakerfi[82] í Vestur-Afríku, úrkomu á Sahelsvæðinu, veðurfar að



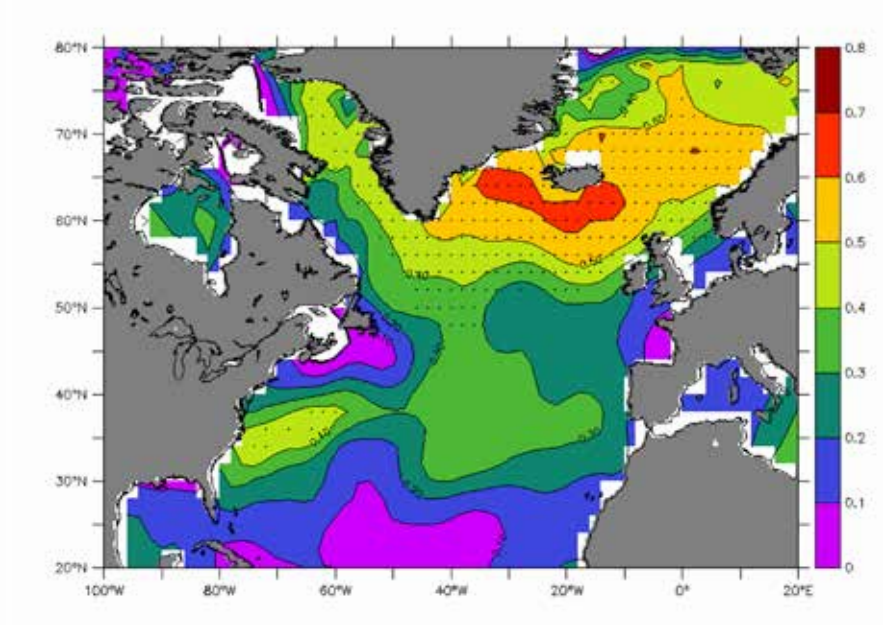
Mynd 4.38 Fylgni AMV-vísis og sjávarhita. Punktarnir sýna hvar fylgnin er martæk.



Mynd 4.39 Langtímabreytileiki hitafars (°C) í Stykkishólmi. Efri myndin sýnir hitaröðina og einnig bestu línu gegnum hana. Neðri myndin sýnir vik frá bestu línu. Báðar myndir sýna ársgildi og útjafnaðan feril sem er reiknaður á sama hátt og gert var fyrir AMV-vísitöluna.



Mynd 4.40 Samanburður á vísitölum AMV og Stykkishólms. Tölur á báðum ásum eru hitavik (°C), en kvarðarnir misgleiðir.

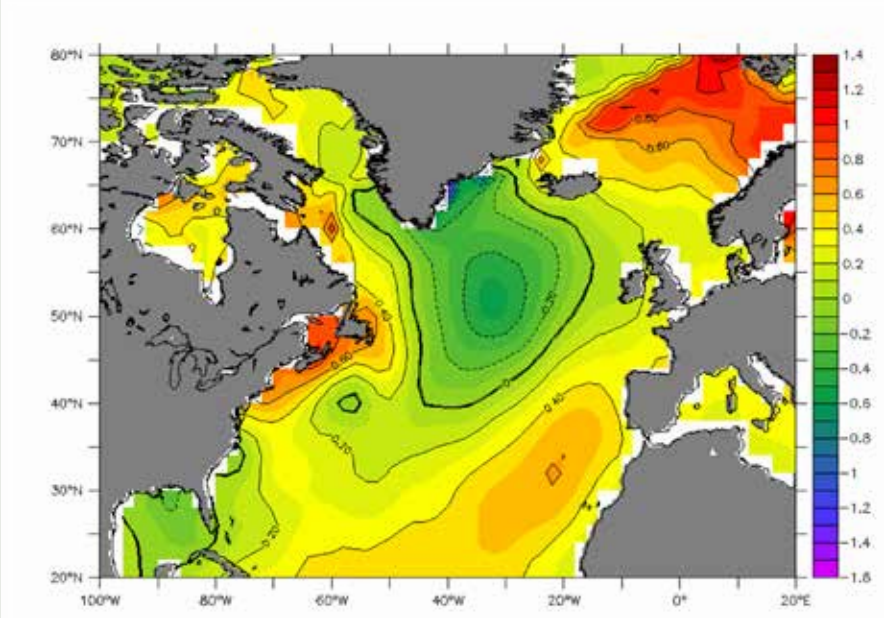


Mynd 4.41 Fylgni vísitölu fyrir Stykkishólm og sjávarhita. Punktarnir sýna hvar fylgnin er marktæk.

sumri til í Norður-Ameríku og Evrópu, veðurfar á norðurheimskautssvæðinu og tíðni öflugra fellibylja á Atlantshafi[83]. Þessara áhrifa gætir í veðurvísum (s.s trjáhringjum, samsætum og þykkt árslaga í ískjörnum)[84] og því hægt að leggja mat á þessar sveiflur síðustu árþúsundir. Auk þessa hefur AMV verið tengd veðurfarssveiflum utan Atlantshafsins.

Milliríkjanefndin bendir á að fornveðurfarsrannsóknir og líkanreikningar sýni að AMV-breytileiki sé nokkuð stöðugur eiginleiki veðurfars á Norður-Atlantshafssvæðinu, og ekki sé ástæða til að ætla að verulegar breytingar verði á eðli þessara áratugalöngu sveiflna á öldinni. Því er eðlilegt að gera ráð fyrir að núverandi AMV-hlýindatíma ljúki að lokum, en tilraunir til að spá því hvenær það gerist[85] hafa ekki skilað umtalsverðum árangri. Tekið er fram í skýrslu milliríkjanefndar að áhrif AMV á breytileika veðurfars á sumum svæðum verði *líklega* á næstu áratugum a.m.k. álíka stór og áhrif loftslagsbreytinga af mannavöldum[86].

Sá langtímabreytileiki sem AMV sýnir svipar til breytileika veðurfars á Íslandi á síðustu öld. Til að skoða þetta nánar má reikna vísitölu fyrir fjöláratugasveiflur í hitaröðinni frá Stykkishólmi. Mynd 4.39 sýnir hvernig vísitalan er fundin, og mynd 4.40 sýnir samanburð á



Mynd 4.42 Línuleg leitni hitabreytinga (°C/öld) á Norður-Atlantshafi á tímabilinu 1854 til 2016.

henni og AMV fyrir tímabilið 1854–2016. Á fyrri hluta tímabilsins ber þessum röðum illa saman, en eftir hlýnunina sem varð á fyrri hluta síðustu aldar hafa vísarnir tveir fylgst að í gegnum hlýinda- og kuldatímabil auk núverandi hlýindatíma. Fyrir sveiflur sem taka styttri tíma ber þessum vísum ekki vel saman, og fyrir tímabilið í heild er fylgni þeirra (r=0.38) ekki marktæk.

Það kann að koma á óvart að AMV útskýri ekki stærri hluta af langtímabreytileika í Stykkishólmi. Mynd 4.41 sýnir fylgnikort vísitölu fjöláratugabreytileika í Stykkishólmi og sjávarhita. Myndin sýnir að það svæði þar sem sjávarhiti hefur marktæk áhrif á hita í Stykkishólmi er ólíkt því svæði þar sem fylgnin við AMV var mest. Marktæk fylgni við sjávarhitabreytingar er mest sunnan- og vestanvið landið, en marktæk fylgni teygir sig líka langt norðaustur af landinu. Á svæðinu norðan- og austanvið landið var ekki marktæk fylgni við AMV vísitöluna.

Langtímahneigð og síðustu ár

Sjávarhitagögn ná ekki nema til miðbiks 19. aldar og skekkjur í þeim eru mestar fyrstu áratugina. Í heildina hefur Norður-Atlantshafið hlýnað á tímabilinu, en hlýnunin er mismunandi og hluti þess kólnaði. Mynd 4.42 sýnir kort af leitni bestu línu hitabreytinga á tímabilinu 1854–2016. Myndin sýnir að suður af Grænlandi er svæði þar sem ekkert hlýnaði á tímabilinu og teygir það svæði sig langleiðina til Íslands, og vel inn á það svæði þar sem sjávarhiti hefur marktæk áhrif á langtímabreytingar í Stykkishólmi. Á þessu svæði er umtalsverður breytileiki milli áratuga og suma áratugi hefur þess orðið vart að sjávarhiti fari langt undir meðaltal. Á síðustu árum hefur slíkur „kuldablettur“ sést á þessu hafsvæði, og hafa verið vangaveltur um að hann megi rekja til þess að hægt hafi á AMOC hringrásinni[87], og sé það m.a. tengt hafísbráðnun[88], breytingum í AMOC og AMV[89] og óviðrasömum og köldum vetrum[90]. Í ljósi þess breytileika sem er í hafinu á þessu svæði er ótímabært að draga stórar ályktanir af hitavikum síðustu ára.

Samfara hafísárunum á síðari hluta 7. áratugs síðustu aldar gekk seltufrávik (þ.e. sjór með óvenju lágt seltuinnihald) suður meðfram Austur-Grænlandi að Labrador og barst loks með yfirborðshringrás út á Atlantshafið[91]. Líklegt er að slíkir atburðir (sem kallaðir eru „stór seltufrávik“) hafi gerst endrum og sinnum á síðustu öld[92], en þeir eru taldir eiga upptök sín í Beauforthringstreyminu í Norður-Íshafi. Á síðustu árum hefur þar safnast fyrir mikið af tiltölulega ferskum sjó[93] og hafa verið vangaveltur um hverjar verði afleiðingar þess ef nýtt seltufrávik streymir út úr Íshafinu. Það gæti m.a. valdið i aukningu á hafís á Grænlandshafi og kuldakasti á hafsvæðinu nærri Íslandi. Óvíst er hversu umfangsmikil slík áhrif yrðu, en þau eru ólíkleg til að verða langvinn[94]. Á næstu árum er ástæða til að fylgjast náið með Beauforthafi, en eins og kom fram hér að framan er ekki ástæða til að ætla að breytileiki veðurfars nærri Íslandi minnki þó það hlýni.

Umræða

Haldi losun gróðurhúsalofttegunda áfram í sama mæli og verið hefur er langlíklegast að hlýna muni á Íslandi á öldinni. Samkvæmt niðurstöðum loftslagslíkana verður jafnaðar-hlýnunin fram að miðbiki aldarinnar á bilinu 1.3–2.3°C en 1.5–4.1°C til loka aldarinnar. Í báðum tilvikum eiga lægri mörkin við ef losun verður í samræmi við Parísarsamkomulagið. Óvissumörk á þessum tölum eru veruleg, eða um 4–5°C, og ræðst það bæði af áhrifum náttúrulegs breytileika (að svo miklu leyti sem mismunur líkana endurspeglar hann) og einnig af kerfisbundnum skekkjum í líkönum.

Ísland liggur á mörkum kaldtemprað- og heimskautaloftslags. Lífríkið hér ber merki þessa, en með hlýnun mun samsetning þess breytast á kostnað heimskautategunda (sjá kafla 8). Það eyja- og úthafsloftslag sem hér ríkir þýðir að árstíðasveifla hita er hér minni en á meginlöndum og hér er úrkomusamt. Hlýnun á næstu áratugum mun ekki breyta þessu en líklega verður hlýnun meiri að vetri en að sumri, sem dregur enn frekar úr útslagi árstíðasveiflu. Hlýnun á landinu verður líklega meiri en hlýnun á hafsvæðunum umhverfis það.

Á hafsvæðinu umhverfis landið er mun hlýrra en búast mætti við vegna hnattstöðu, og má rekja það að hluta til hafstrauma sem flytja hlýsjó að landinu. Rannsóknir á fornveðurfari sýna að breytingar á ástandi sjávar sunnan og norðan við landið geta haft veruleg áhrif á veðurfar hér á landi, og mikil fylgni er milli breytinga á hitafari í Stykkishólmi og breytinga í sjávarhita umhverfis landið. Ekki er líklegt að náttúrulegur breytileiki á öldinni verði mjög ólíkur því sem verið hefur og því líklegt að veðurfar á Íslandi muni áfram sveiflast í samræmi við breytingar í hafinu umhverfis landið. Þó ekki sé líklegt að stórfelldar breytingar verði á hringrás sjávar í Norður-Atlantshafi, gætu slíkar breytingar dregið úr hlýnun hér við land, eða jafnvel valdið tímabundinni kólnun.

Líkönum ber saman um að úrkoma aukist með hlýnun, en tölur eru á reiki, og ná frá 1.5% til 4.5% aukningu fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Í V2008 var sambærileg tala 2–3% og í skýrslu milliríkjanefndar eru tölur á bilinu 2–4% aukningu fyrir hverja gráðu sem hlýnar á svæði sem nær yfir Ísland, Grænland og Kanada[95]. Þetta óvissubil þarf ekki að koma á óvart, því eins og áður kom fram eru úrkomubreytingar mun sveiflukenndari en breytingar í hitafari.

Sterkt samband er milli hitafars og snjóhulu og að jafnaði styttist tími snjóhulu í byggð um rúmar 3 vikur fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Í síðustu skýrslu vísindanefndar er bent á að fari meðalhiti á láglendi yfir 7°C þá verði snjór óverulegur og hækki hiti um meira en 3°C þá verði snjóhula í fjöllum svipuð og hún er nú á láglendi.

Tafla 4.5 Hlýnun hvers mánaðar (°C) í sviðsmynd RCP2.6 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

Mánuður	5%	25%	50%	75%	95%
1	−2.2	0.9	1.8	2.6	3.8
2	−1.1	0.7	1.5	2.5	3.5
3	−1	0.4	1.8	2.7	3.5
4	−1.2	0.4	1.3	1.9	2.4
5	−0.9	0.5	0.9	1.6	2
6	−0.6	0.3	0.9	1.5	2.2
7	−0.8	0.6	1.1	1.5	2.4
8	−0.5	0.4	1.3	1.7	2.3
9	−0.4	0.5	1.5	1.8	2.4
10	−0.4	0.6	1.5	1.9	2.4
11	0	0.6	1.6	2.3	3
12	−0.7	0.6	1.8	2.9	3.4

Hlutfallsmark

Tafla 4.6 Hlýnun hvers mánaðar (°C) í sviðsmynd RCP4.5 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

Mánuður	5%	25%	50%	75%	95%
1	−1.1	1.8	2.8	4.1	6.8
2	−0.6	1.8	2.9	4	5.9
3	0.1	1.6	2.6	3.7	5.4
4	−0.4	1.5	2	3	3.9
5	−0.3	1.1	1.5	2.2	3.1
6	−0.2	0.7	1.5	2.1	3.1
7	−0.3	0.7	1.9	2.5	3.6
8	0.1	0.9	2	2.7	3.6
9	0.3	1	2.1	2.7	4
10	0.5	1.1	2.3	2.9	3.9
11	1	2.1	2.8	3.7	4.5
12	−0.7	2	3.2	4.3	5.3

Hlutfallsmark

Tafla 4.7 Hlýnun hvers mánaðar (°C) í sviðsmynd RCP6.0 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

Mánuður	5%	25%	50%	75%	95%
1	0.5	2.8	3.6	4.4	6.1
2	−0.1	2.7	3.3	4.3	5.7
3	0.9	2.1	3	4.4	5.4
4	0.5	1.6	2.5	3.5	4.4
5	0.2	1.3	2	2.7	3.6
6	0.2	1.1	1.7	2.7	3.5
7	0.3	1.4	2	3.2	3.6
8	0.6	1.1	2.2	3.2	3.7
9	0.4	1.5	2.4	3.2	3.9
10	0.4	1.6	2.8	3.3	3.8
11	0.4	2.5	3.3	3.7	4.9
12	0.9	2.8	3.8	4.6	5.6

Hlutfallsmark

Tafla 4.8 Hlýnun hvers mánaðar (°C) í sviðsmynd RCP8.5 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

Mánuður	5%	25%	50%	75%	95%
1	2.8	3.8	4.8	5.9	8.4
2	2.2	3.8	4.9	5.8	7.6
3	2	3.4	4.2	6.2	7.4
4	1.6	2.8	3.4	4.5	6.1
5	1.2	2.2	2.8	3.9	4.7
6	0.8	2.1	2.6	3.9	4.6
7	1.3	2.6	3.1	4.2	5.3
8	1.5	2.9	3.6	4.4	5.7
9	1.3	3.1	3.7	4.3	5.7
10	1.4	2.9	3.9	4.7	5.6
11	2.4	3.6	4.3	5.2	7.4
12	2.7	4	4.9	5.9	8.3

Hlutfallsmark

Tafla 4.9 Úrkomubreyting hvers mánaðar (%) í sviðsmynd RCP2.6 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

Mánuður	5%	25%	50%	75%	95%
1	−16.2	−1.9	2.6	8.1	14.9
2	−20.5	−5.8	0.6	6.8	14.5
3	−12.4	−3.8	1.9	6.8	16.8
4	−13.5	−6.4	2.2	5.8	15.6
5	−10.4	−5.4	2.6	11.2	17.9
6	−11.3	−3.1	1.3	5.6	18.7
7	−8.4	−3.1	4.8	10	24.8
8	−12.5	−0.8	2.5	10.2	29.8
9	−6.4	−0.7	4.8	10.8	24.2
10	−10.6	−2.8	2.8	6.1	15.4
11	−10.7	−3	2.8	8.3	19.9
12	−13.9	−4.6	1	4	16

Hlutfallsmark

Tafla 4.10 Úrkomubreyting hvers mánaðar (%) í sviðsmynd RCP4.5 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

Mánuður	5%	25%	50%	75%	95%
1	−13.2	−4	2	7	21.2
2	−13.9	−5.5	0.9	7.6	18.3
3	−14.3	−5.9	2	11.1	23.4
4	−8.1	−3.4	6.5	11.7	19.9
5	−14.5	−5.3	3	12.3	22.4
6	−9	−2.6	4.2	10.2	19.7
7	−5.3	−0.4	5.7	10.8	24.8
8	−10.7	−0.7	2.4	9.1	21.4
9	−8.6	2	6.8	13.6	25.8
10	−6.5	−1.2	3.8	13.4	20.7
11	−9.5	−3.1	5.4	11.1	19.8
12	−14.1	−4.1	1.1	6.7	30.9

Hlutfallsmark

Tafla 4.11 Úrkomubreyting hvers mánaðar (%) í sviðsmynd RCP6.0 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

Mánuður	5%	25%	50%	75%	95%
1	−17.5	−0.8	3.4	7	12.6
2	−22	−4.6	−1.5	5.9	20.7
3	−11.8	−5.9	0	9	19.1
4	−11.6	−4.2	6.5	10.8	24.5
5	−10.2	−4.4	5.4	16.7	24.8
6	−6.7	−2	4.5	10.1	14.7
7	−6.3	4.3	10.9	13.9	23.4
8	−8.4	−1.9	5.1	15.6	19.5
9	−1	2.7	9.5	13.1	33.6
10	−7.8	0.8	6.5	13	16.6
11	−8.3	−1.7	7.4	11	24.5
12	−10.7	−5.7	−0.7	7.7	23.2

Hlutfallsmark

Tafla 4.12 Úrkomubreyting hvers mánaðar (%) í sviðsmynd RCP8.5 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

Mánuður	5%	25%	50%	75%	95%
1	−10.7	−3.5	1.2	11.5	27.2
2	−12.8	−4.8	1.3	9.5	25
3	−17.9	−6.8	0.7	9.8	20.8
4	−11.2	−5.7	5.9	14.3	26.5
5	−10	−1.9	9.7	15.6	27.4
6	−10.6	−1.6	4.6	11.4	23.4
7	−6.8	2.5	7.9	14.4	37.2
8	−6.6	1.6	7	13.2	30.9
9	−4.7	2.5	10.8	18.7	25.5
10	−4.5	4.8	10.9	17.3	28.5
11	−11.3	−0.7	5.9	16	25.3
12	−10.9	−3.4	1.8	9.3	28.8

Hlutfallsmark

Tilvísanir

1 Sjá s. 327 í Þorvaldur Thoroddsen *Lýsing Íslands*, 2. bindi, 2. útg, Hið íslenska bókmenntafélag, Kaupmannahöfn 1911. Sambærilega fullyrðingu en annað orðalag má finna í 1. útg. frá 1881.

2 Myndin byggist á niðurstöðum úr ERA Interim endurgreiningunni. Nánar má lesa um endurgreiningar og íslensku endurgreininguna í hliðargrein 4A Endurgreiningar.

3 Fjallað er um útreikning meðalárstíðasveiflu í Björnsson, H. o.fl. 2007. Analysis of a smooth seasonal cycle with daily resolution and degree day maps for Iceland: H Bjornsson, EO Olason, T Jónsson, S Henriksen Meteorologische Zeitschrift, 16, 57-69.

4 Sjá nánar bls 38–39 og kort á bls 75 í Markús Einarsson. 1979. Veðurfar á Íslandi, Iðunn, Reykjavík.

5 Sjá nánar H Bjornsson, T Jonsson, SS Gylfadottir, EO Olason 2007. Mapping the annual cycle of temperature in Iceland Meteorologische Zeitschrift, 16:45:56.

6 Sjá nánar Crochet, P., T. Jóhannesson, T. Jónsson, O. Sigurðsson, H. Björnsson, F. Pálsson og I. Barstad 2007: Estimating the spatial distribution of precipitation in Iceland using a linear model of orographic precipitation. *J. of Hydrometeorol.*, 8(6) 1285-1306.

7 Kassarit sýna dreifingu gagna. Helmingur gagnanna (frá 25% hlutfallstölu að 75%) liggja innan kassans. Þverstrikið í kassanum sýnir miðgildið. Lóðréttu línurnar ná til útgilda séu þær ekki fjær kassanum en sem nemur 150% af hæð hans. Punktarnir eru gildi sem falla utan þessa.

8 Sjá athugasemd 3 í kafla 3.

9 Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Larsen, D.J. og Ólafsdóttir, S. 2013. Abrupt Holocene climate transitions in the northern North Atlantic region recorded by synchronized lacustrine records in Iceland. Quaternary Science Reviews 70, 48-62.

10 Langdon P.G., Caseldine, C.J., Croudace, I.W., Jarvis, S., Wastegård, S., og Crowford, T.C. 2011. A chironomid-based reconstruction of summer temperatures in NW Iceland since AD 1650. Quaternary Research 75, 451–460.

11 Larsen, D.J., Miller, G.H., Geirsdóttir, Á. og Thordarson, T. 2011. A 3000-year varved record of glacier activity and climate change from the proglacial lake Hvítárvatn, Iceland. Quaternary Science Reviews 30, 2715-2731.

12 Striberger, J., Björck, S., Holmgren, S. og Hamerlík, L. 2012. The sediments of Lake Lögurinn – A unique proxy record of Holocene glacial meltwater variability in eastern Iceland. Quaternary Science Reviews 38, 76-88.

13 Blair, C.L., Geirsdóttir, Á. og Miller, G.H. 2015. A high-resolution multi-proxy lake record of Holocene environmental change in southern Iceland. Journal of Quaternary Science 30, 281–292.

14 Ran, L., Jiang, H., Knudsen, K. L. og Eiríksson, J. 2008. A high-resolution Holocene diatom record on the North Icelandic shelf. Boreas 37, 399–413.

15 Knudsen, K. L., Søndergaard, M. K. B., Eiríksson, J. og Jiang, H. 2008. Holocene thermal maximum off North Iceland: Evidence from benthic and planktonic foraminifera in the 8600-5200 cal year BP timeslice. Marine Micropalaeontology 67, 120-142.

16 Sicre, M.-A., Hall. I., Mignot, J., Khodri, M., Ezah, U., Truong, M.-X., Eiríksson, J. og Knudsen, K.-L., 2011. Sea surface temperature variability in the subpolar Atlantic over the last two millennia. Paleoceanography 26, doi 10.1029/2011PA002169.

17 Ólafsdóttir, S., Jennings, A.E., Geirsdóttir, Á og Miller, G.H. 2010. Holocene variability of the North Atlantic Irminger Current on the south- and northwest shelf of Iceland. Marine Micropaleontology 77, 101-118.

18 Jiang, H., Muscheler, R., Björck, S., Seidenkrantz, M-S , Olsen, J., Sha, L., Sjolte, J., Eiríksson, J., Ran, L., Knudsen, K-L. og Knudsen, M.F. 2015. Solar forcing of Holocene summer sea-surface temperatures in the northern North Atlantic. Geology 43, 203-206.

19 Larsen, D.J., Miller, G.H., Geirsdóttir, Á. og Ólafsdóttir, S. 2012. Non-linear Holocene climate evolution in the North Atlantic: a high-resolution, multi-proxy record of glacier activity and environmental change from Hvítárvatn, Central Iceland. Quaternary Science Reviews 39, 14-25.

20 Wanamaker, A. D., Heinemeier, J., Scourse, J. D., Richardson, C. A., Butler, P. G., Eiríksson, J. og Knudsen, K. L. 2008. Very long-lived mollusks confirm 17th century AD tephra-based radiocarbon reservoir ages for North Icelandic shelf waters. Radiocarbon 50 (3), 399-412.

21 Wanamaker, A. D., Butler, P.G., Scourse, J.D., Heinemeier, J., Eiríksson, J., Knudsen, K.L. og Richardson, C.A. 2012. Surface changes in the North Atlantic meridional overturning circulation during the last millennium. Nature Communications 3: 899, doi:10.1038/ncomms1901.

22 Butler, P.G., Wanamaker, A.D., Scourse, J.D., Richardson, C.A. og Reynolds, D.J. 2013. Variability of marine climate on the North Icelandic Shelf in a 1357-year proxy archive based on growth increments in the bivalve Arctica islandica. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 373, 141–151.

23 Reynolds, D.J., Scourse, J.D., Halloran, P.R., Nederbragt, A.J., Wanamaker, A.D., Butler, P.G., Richardson, C.A., Heinemeier, J., Eiríksson, J., Knudsen, K.L. og Hall, I.R. 2016. Annually resolved North Atlantic marine climate over the last millennium. Nature Communications 7: 13502, doi:10.1038/ncomms13502.

24 Knudsen, K.L., Eiríksson, J. og Bartels-Jónsdóttir, H.B. 2012. Oceanographic changes through the last millennium off North Iceland: Temperature and salinity reconstructions based on foraminifera and stable isotopes. Marine Micropaleontology (84-85) 54–73.

25 Ran, L., Jiang, H., Knudsen, K. L. og Eiríksson, J. 2011. Diatom-based reconstruction of palaeoceanographic changes on the North Icelandic shelf during the last millennium. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 302 (1-2), 109-119, doi:10.1016/j.palaeo.2010.02.001. Sjá einnig: Greta B Kristjánsdóttir, M., Moros, J. T., Andrews, A. E., Jennings. 2016. Holocene Mg/Ca, alkenones,

and light stable isotope measurements on the outer North Iceland shelf (MD99-2269): A comparison with other multi-proxy data and sub-division of the Holocene. The Holocene 2016, 27 (1), 52 – 62. doi.org/10.1177/0959683616652703.

26 Cunningham, L. K., Austin, W.EN., Knudsen, K.L., Eiríksson, J., Scourse, J.D., Wanamaker, A.D., Butler, P.G., Cage, A.G., Richter, T., Husum, K., Hald, M., Andersson, C., Zorita, E., Linderholm, H.W., Gunnarson, B.E., Sicre, M-A., Sejrup, H.P., Jiang, H. og Wilson, R. JS. 2013. Reconstructions of surface ocean conditions from the northeast Atlantic and Nordic seas during the last millennium. The Holocene 23, 921-935.

27 Ólafsdóttir, S., Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Stoner, J.S. og Channell, J.E.T. 2013. Synchronizing Holocene lacustrine and marine sediment records using paleomagnetic secular variation. Geology 41, 535-538.

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

29 Belt, S.T. og Müller, J. 2013. The Arctic sea ice biomarker IP25: a review of current understanding, recommendations for future research and applications in palaeo sea ice reconstruction. Quaternary Science Reviews 79, 9-25.

30 Cabedo-Sanz, P., Belt, S.T., Jennings, A.E., Andrews, J.T. og Geirsdóttir, Á. 2016. Variability in drift ice export from the Arctic Ocean to the North Icelandic Shelf over the last 8000 years: A multi-proxy evaluation. Quaternary Science Reviews 146, 99-115.

31 Massé, G., Rowland, S.J., Sicre, M-A., Jacob, J., Jansen, E. og Simon T. Belt, S.T. 2008. Abrupt climate changes for Iceland during the last millennium: Evidence from high resolution sea ice reconstructions. Earth and Planetary Science Letters 269, 565-569.

32 Ogilvie, A.E.J. og Jónsson, T. 2001. "Little Ice Age" research: a perspective from Iceland. Climate Change 48, 9-52.

33 Berger, A., og Loutre, M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. Quaternary Science Reviews 10, 297-317.

34 Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M. og Widmann, M. 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. Quaternary Science Reviews 27, 1791–1828.

35 Marcott, S.A., Shakun, J.D., Clark, P.U. og Mix, A.C. 2013. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. Science 339, 1198-1201.

36 Kaufman, D.S. og 29 aðrir. 2004. Holocene thermal maximum in the western Arctic (0–180°W). Quaternary Science Reviews 23, 529-560.

37 Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Axford, Y. og Ólafsdóttir, S. 2009. Holocene and latest Pleistocene climate and glacier fluctuations in Iceland. Quaternary Science Reviews 28, 2107-2118.

38 Flowers, G.E., Björnsson, H., Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Black, J.L. og Clarked, G.K.C. 2008. Holocene climate conditions and glacier variation in central Iceland from physical modelling and empirical evidence. Quaternary Science Reviews 27, 797-813.

39 Wanner, H., Solomina, O., Grosjean, M. , Ritz, S.P. og Jetel, M. 2011. Structure and origin of Holocene cold events. Quaternary Science Reviews 30, 3109–3123.

40 Moros, M., Andrews, J.T., Eberl, D.D. og Jansen, E. 2006. Holocene history of drift ice in the northern North Atlantic: Evidence for different spatial and temporal modes. Palaeoceanography 21, PA2017.

41 Knudsen, K. L., Eiríksson, J., Jiang, H. og Jónsdóttir, I. 2009. Palaeoceanography and climate changes off North Iceland during the last millennium: comparison of foraminifera, diatoms and ice-rafted debris with instrumental and documentary data. Journal of Quaternary Science 24, 457–468.

42 Eiríksson, J., Knudsen, K. L., Larsen, G., Olsen, J., Heinemeier, J., Bartels-Jónsdóttir, H. B., Jiang, H., Ran, L., og Símonarson, L. A. 2011. Coupling of palaeoceanographic shifts and changes in marine reservoir ages off North Iceland through the last millennium. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 302, 95-108.

43 Ogilvie, A. E. J. 1992. Documentary evidence for changes in the climate of Iceland, A. D. 1500 to 1800. Í R.S. Bradley & P. D. Jones. Climate since A.D. 1500. Routledge. London & New York, 92-117.

44 Jennings, A.E. Hagen, S., Harðardóttir, J., Stein, R., Ogilvie, A.E.J. og Jónsdóttir, I. 2001. Oceanographic change and terrestrial human impacts in a post A.D. 1400 sediment record from the southwest Iceland shelf. Climatic Change 48, 83-100.

45 Snjóhula er metin á öllum mönnuðum veðurstöðum og flokkuð í alautt (0%), flekkótt (50%) og alhvítt (100%). Meðaltal mánaðar er síðan reiknað frá þessum hlutföllum, sem og landsmeðaltal. Hér er dagafjöldi reiknaður með því að nota jafngildisdaga, þ.e. ef mánaðarmeðtal snjóhulu á stöð er 50% er það jafngilt alhvítri jörð í 15 daga.

46 Helstu heimildir þessarar greinar eru: Uppala, S.M., P.W. Kallberg, A.J. Simmons, ofl. 2005. The ERA-40 Reanalysis. Q.J.R. Meteorol. Soc. 131, 612, 2961-3012. Dee D. P. o.fl. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system Q. J. R. Meteorol. Soc. 137: 553–597, April 2011 A Poli, P. o.fl. 2015. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the 20th century. J. of Climate, 29. 4083–4097. Nikolai Nawri, Bolli Pálmason, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson og Sigurður Þorsteinsson. 2017. The ICRA-2016 Atmospheric reanalysis project for Iceland. Veðurstofa Íslands report VÍ-2017-005.

47 Rekja má upphaf þessara fræða til greinar sem Páll Bergþórsson, síðar Veðurstofustjóri og Bo R. Döös birtu árið 1955 (Bergthorsson P. & B. Döös, 1955: Numerical weather map analysis. Tellus, 7, 329-340.)

48 Hér er sérstaklega vísaði til endurgreininga sem Reiknistofa í Veðurfræði gerði innan verkefnisins Loftslag og orkukerfi (LOKS), sjá nánar í Ólafur Rögnvaldsson, Hálfdán Ágústsson og Haraldur Ólafsson 2011. Aflræn niðurkvörðun veðurs innan LOKS verkefnisins. Rit Reiknistofu í veðurfræði. Reykjavík.

49 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. Sjá Taylor, K. E., R. J. Stouffer & G. A. Meehl. 2012. A summary of the CMIP5 experiment design. Bull. Am. Meteorol. Soc. 93, 485–498.

50 Sjá nánar í hliðargrein 3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5.

51 Niðurstöður V2008 byggðu á niðurstöðum CMIP3 verkefnisins og sk. SRES sviðsmynda (B1, A1B og A2). Í þessum eldri sviðsmyndum jókst geislunarálag minnst i B1 en mest í A2, og því var hlýnunin minnst í B1 en mest í A2. Þó RCP-sviðsmyndirnar frá CMIP5 séu ólíkar SRES sviðsmyndunum lætur nærri að fram til ársins 2100 sé aukning geislunarálags í RCP4.5 sambærileg við aukninguna í B1, og að A2 sé sambærileg við RCP8.5. Munurinn á CMIP5 og CMIP3 verkefnunum er þó ekki einungis að CMIP5 noti RCP sviðsmyndir um aukningu geislunarálags en CMIP3 noti SRES, heldur skiptir einnig máli að framþróun loftslagslíkana á þeim árum sem liðu milli CMIP3 og CMIP5 verkefnanna hefur gert líkönin flóknari. Loks má hafa í huga að mun fleiri stofnanir tóku þátt í CMIP5 verkefninu en CMIP3.

52 Knutti R. & Sedlacek J. 2012. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. Nature Climate Change 3, 369–373.

53 Þegar niðurstöður V2008 eru bornar saman við töflur 4.1 til 4.4 er vert að hafa í huga að viðmiðunartíminn er ekki sá sami. Í V2008 var hlýnun reiknuð frá meðaltali líkana fyrir tímabilið 2001–2016 en hér er gætt samræmis við fimmtu matsskýrslu IPCC og tímabilið 1986–2005 notað. Mismunur þessa viðmiðunartíma fyrir hitabreytingar er 0.39°C, 0.42°C, 0.44°C og 0.45°C í sviðsmyndum RCP2.6 til RCP8.5. Fyrir úrkomubreytingar er munur sömu tímabila 0.6%, 0.9%, 1.3% og 0.6% fyrir RCP2.6 til RCP8.5. Ekki er leiðrétt sérstaklega fyrir því í samanburðinum sem hér er gerður, en þetta gerir CMIP5 líkönin enn hlýrri og þurrari í samanburði við CMIP3 líkönin.

54 Sjá kafla 12.3 í skýrslu IPCC 2013. Sjá heimild 2 í kafla 3.

55 Í sviðsmynd B1 var hlýnun í Íslandsreitnum frá 2001–2016 til loka aldarinnar metin sem 1.4 [0–2.9]°C en í RCP4.5 er hlýnun miðað við sama tímabil 2.0 [-0.66–3.94]°C. Hlýnun í þessari sviðsmynd er því að jafnaði meiri en í eldri sviðsmynd (B1) en einnig er óvissubilið breiðara. Fyrir A2 og RCP8.5 er hlýnunin miðuð við 2001–2016 2.4 [1.0–3.6]°C og 3.65 [1.48–6.07]°C. Aftur hlýnar meira í nýju sviðsmyndunum og óvissubilið er breiðara.

56 Sjá kafla 12.4.9 í skýrslu vinnuhóps 1.

57 Sjá 4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar.

58 Hvað úrkomubreytingar varðar var breyting í B1 milli tímabilanna 2001–2016 til 2081–2100 metin sem 4.0 [-0.8 til 9.6] % í V2008 en í RCP4.5 fæst fyrir sama tímabil úrkomubreyting upp á 1.91 [-8.43 til 11.31] %. Í A2 sviðsmyndinni var úrkomubreyting metin sem 6.8 [-1.9 til 18.6] % í V2008 en í RCP8.5 fæst hér fyrir sama tímabil 2.53 [-6.27 til 20.8]%. Þó að úrkoma aukist minna í CMIP5 líkönunum þá eru óvissumörkin mjög rífleg og erfitt að draga ályktanir um mun CMIP3 og CMIP5 hvað úrkomubreytingar varðar.

59 Fetterer, F., K. Knowles, W. Meier, M. Savoie & A. K. Windnagel. 2016, Uppfært daglega. Sea Ice Index, Version 2.1. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: dx.doi.org/10.7265/N5736NV7.

60 van der Linden P. & J.F.B. Mitchell (ritstj.). 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Center, FitzRoy Road, Exeter, EX1 3PB, UK. 160 bls.

61 Giorgi, F. & Gutowski, W. J., 2015. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. Annu. Rev. Eniron. Resour. 40: 467-90.

62 Nikolai Nawri og Halldór Björnsson, 2010. Surface Air Temperature and Precipitation Trends for Iceland in the 21st Century, Veðurstofa Íslands 2010-05.

63 Ólafur Rögnvaldsson, Hálfdán Ágústsson og Haraldur Ólafsson. 2011. Aflræn niðurkvörðun innan LOKS verkefnisins. Rit Reiknistofu í Veðurfræði.

64 Monique Gosseling, 2017. CORDEX Climate Trends for Iceland in the 21st Century. Veðurstofa Íslands, VI-2017-009.

65 Háupplausnarlíkönin voru RCA4 frá sænsku veðurstofunni og evrópska CCLM líkanið. Hnattrænu líkönin voru HADGEM2 líkanið frá bresku veðurstofunni og MPI líkanið frá Max Plank stofnuninni í Hamborg. Sjá nánar heimild 64 og vefsvæðið www.cordex.org

66 Bracegirdle, T.J. & D.B. Stephenson, 2013. On the Robustness of Emergent Constraints Used in Multimodel Climate Change Projections of Arctic Warming. J. Climate, 26, 669–678, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00537.1.

67 Mynd 4.33 er aðlöguð frá heimild 64 en mat á áhrifum kerfisbundinnar skekkju fylgir aðferðafræði sem lýst er í heimild 66.

68 Vindhraðamælingar í Reykjavík kunna að vera bjagaðar á hluta þessa tímabils. Bjögunin hefði þó aukið vind og því bætt samanburð við loftslagslíkönin.

69 AMOC er skammstöfun fyrir Atlantic Meridional Overturning Circulation.

70 Mynd 4.35 sýnir uppfærðan hluta myndar 2 í heimild 72 og byggst á gögnum frá sk. RAPID verkefni en þau eru aðgengileg á vefsvæðinu www.rapid.ac.uk. Sjá nánar McCarthy, G.D.; Smeed, D.A.; Johns, W.E.; Frajka-Williams, E.; Moat, B.I.; Rayner, Darren.; Baringer, M.O.; Meinen, C.S.; Collins, J.; Bryden, H.L. 2015. Measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26°N. Progress in Oceanography, 130. 91-111. 10.1016/j.pocean.2014.10.006.

71 Styrkur hafstrauma er mældur í milljón rúmmetrum á sekúndu og er sú eining nefnd Sverdrup (Sv).

72 Smeed, D. A., McCarthy, G., Cunningham, S. A., Frajka-Williams, E., Rayner, D., Johns, W. E., Meinen, C. S., Baringer, M. O., Moat, B. I., Duchez, A. & Bryden, H. L., 2014. Observed decline of the Atlantic Meridional Overturning Circulation 2004 to 2012. Ocean Sci., 10, 28-38, doi: 10.5194/osd-10-29-2014.

73 Roberts, C. D., L. Jackson & D. McNeall. 2014. Is the 2004–2012 reduction of the Atlantic meridional overturning circulation significant?, Geophys. Res. Lett., 41, 3204–3210, doi:10.1002/2014GL059473.

74 Gerard D. McCarthy, G.D., Haigh, I. Hirschi J., GristJ.P. & Smeed, D:A. 2015. Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations. Nature. 521(7553). doi:10.1038/nature14491.

75 Með því að skoða þróun til ársins 2300 er litið lengra fram á við en almennt í þessum kafla. Enn má minna á að þessum sviðsmyndum er ætlað að spanna róf mögulegrar losunar gróðurhúsalofttegunda – en þær eru ekki spá um losun. Þegar litið er margar aldir fram á við er óljóst hvort þær ná að spanna róf losunar og ber því að taka niðurstöðum með þeim fyrirvara.

76 Nánari umfjöllun um viðbrögð AMOC við hlýnun má finna í kafla 12.4.7.2 og 12.5.52 í IPCC 2013; sjá tilvitnun 24 í kafla 3.

77 AMV er skammstöfun á Atlantic Multidecadal Variability, sem mætti útleggja sem fjöl-áratuga breytileika í Atlantshafi. Þessi breytileiki hefur líka verið kallaðu fjöláratuga sveifla, á ensku Atlantic Multidecadal Oscillation, og skammstafað AMO. Þessi síðari nafngift hefur þann ókost að vera mjög lík AMOC og einnig gefur orðið sveifla ranglega til kynna að um ákveðna sveiflutíðni sé að ræða.

78 Algengasta leiðin til að skilgreina þessa vísitölu er að reikna meðaltal yfirborðshita í Norður-Atlantshafi og fjarlægja áhrif hnattrænnar hlýnunar með því að reikna frávik frá bestu línu gegnum safnið. Vísitalan er síðan útjafnað meðaltal frávikanna. Ýmsar útgáfur eru af því við hvaða lengdar- og breiddargráður er miðað og hvernig útjöfnuðu gildin eru reiknuð og hvernig áhrif hnattrænnar hlýnunar eru fjarlægð. Hér er byggt á Enfield 2001 en notuð sjávarhitafrávik (miðað við 1854 – 2016) úr ERSSTv5 gagnasafninu, meðaltalið reiknað fyrir svæðið 0° – 80°V og 0° – 60°N og 9 punkta þríhyrningssía með hálfmættisvídd rúmlega 10 ár. Sjá Enfield, D. B., Mestas-Nunes, A. M., Trimble, P.J., 2001. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. Geophys. Res. Lett. 28:10, p. 2077–2080 doi:// 10.1029/2000GL012745 og Huang, B., Peter W. Thorne, o.fl. 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons. J. Climate, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1.

79 Knudsen, M. F., Seidenkrantz, M.-S., Jacobsen, B. H. & Kuijpers, A. 2011. Tracking the Atlantic Multidecadal Oscillation through the last 8,000 years, Nat. Comm., 2, 178, doi:10.1038/ncomms1186.

80 Zanchettin, D., Rubino, A. & Jungclaus, J. H. 2010. Intermittent multidecadal-to-centennial fluctuations dominate global temperature evolution over the last millennium, Geophys. Res. Lett., 37, L14702, doi:10.1029/2010GL043717.

81 AMV vísitalan sýnir verulega sjálffylgni og sem taka þarf tillit til þegar metið er hvort fylgnin við sjávarhitann sé marktækt frábrugðin núlli. Það var gert með aðferð Ebisuzaki 1997 og fylgnin metin fyrir alla netpunkta ERSSTv5 í Atlantshafi. Yfirleitt þurfti fylgnin að vera hærri en 0.4 til að vera marktæk, en út af austurströnd Norður Ameríku dugði það þó ekki til. Sjá nánar Ebisuzaki, W. 1997. A method to estimate the statistical significance of a correlation when the data are serially correlated, J. Climate, 10, 2147-2153.

82 Misserisvindakerfi eru einnig þekkt undir alþjóðlega heitinu *Monsoon.*

83 Sjá grein 14.7.6 í Christensen, J.H., K. Krishna Kumar, E. Aldrian, S.-I. An, I.F.A. Cavalcanti, M. de Castro, W. Dong, P. Goswami, A. Hall, J.K. Kanyanga, A. Kitoh, J. Kossin, N.-C. Lau, J. Renwick, D.B. Stephenson, S.-P. Xie & T. Zhou 2013. Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. Í skýrslu IPCC 2013; sjá heimild 2 í kafla 3.

84 Wang, Jianglin, Yang, Bao, Ljungqvist, Fredrik Charpentier, Luterbacher, Jürg, Osborn, Timothy J., Briffa, Keith R. & Zorita, Eduardo. 2017 Internal and external forcing of multidecadal Atlantic climate variability over the past 1,200 years. Nature Geoscience, 10 (7). 512–517 doi://10.1038/ngeo2962

85 N.S. Keenlyside, M. Latif, J. Jungclaus, L. Kornblueh & E. Roeckner, 2008. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector, Nature, 453, bls. 84-88. dx.doi.org/10.1038/nature06921.

86 Sjá grein 14.7.7 í heimild 83 hér að ofan.

87 Rahmstorf, S., Box, J., Feulner, G., Mann, M., Robinson, A., Rutherford, S., Schaffernicht, E. 2015. Exceptional twentieth-Century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. Nature Climate Change.

88 Sévellec, F., Fedorov A. V. & Liu W. 2017, Arctic sea-ice decline weakens the Atlantic Meridional Overturning Circulation Nature Climate Change 7, 604–610 2017 doi:10.1038/nclimate3353.

89 McCarthy, Gerard D.; Haigh, Ivan D.; Hirschi, Joël J.-M.; Grist, Jeremy P.; Smeed, David A. 2015 Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations. Nature, 521 (7553). 508-510.10.1038/nature14491.

90 de Jong, M. F. & L. de Steur. 2016. Strong winter cooling over the Irminger Sea in winter 2014–2015, exceptional deep convection, and the emergence of anomalously low SST, Geophys. Res. Lett., 43, 7106–7113, doi:10.1002/2016GL069596.

91 Dickson, R.R., Meincke, J., Malmberg, S.A. & Lee, A.J., 1988. The "great salinity anomaly" in the northern North Atlantic 1968–1982. Progress in Oceanography, 20(2), pp.103-151.

92 Belkin, I.M., Levitus, S., Antonov, J. & Malmberg, S.A., 1998. "Great salinity anomalies" in the North Atlantic. Progress in Oceanography, 41(1), pp.1-68.

93 Manucharyan, G.E. & Spall, M.A., 2016. Wind-driven freshwater buildup and release in the Beaufort Gyre constrained by mesoscale eddies. Geophysical Research Letters, 43(1), pp.273-282.

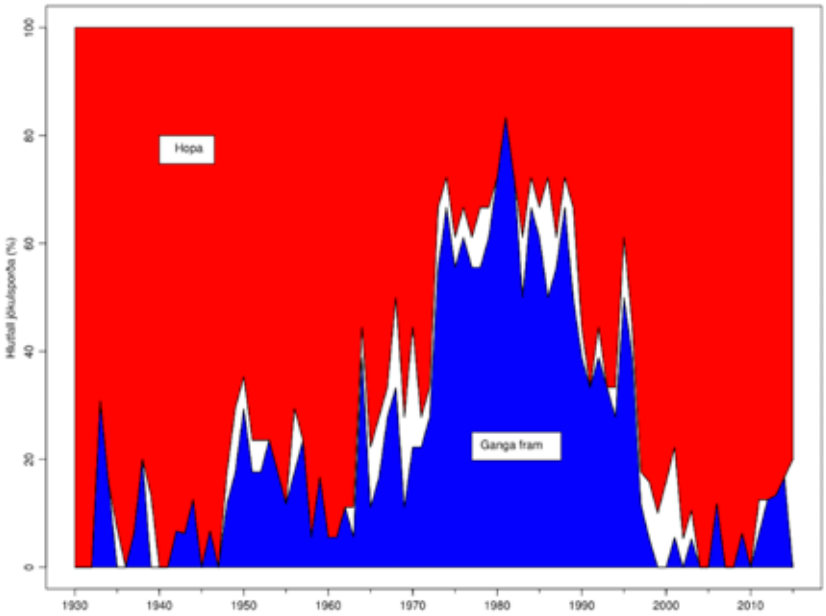
94 Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M.L., Krishfield, R. & Bamber, J.L.. 2015. Arctic circulation regimes. Phil. Trans. R. Soc. A, 3732052), p.20140160.

95 Þetta má reikna úr töflu 14.1 í heimild 83 í kafla 3 og kortum AI.12 – AI.15 í viðaukaskýrslu milliríkjanefndar (heimild 2 í kafla 3).

5 Breytingar á jöklum, vatnafari og sjávarstöðu

Samantekt

1. Íslenskir jöklar náðu mestri útbreiðslu í lok 19. aldar. Síðan hafa þeir hopað mikið og flatarmál þeirra dregist saman um nálægt 2000 km^2 sem er um 15% samdráttur. Hörfunin átti sér einkum stað á tveimur tímabilum, í hlýindum á 3. og 4. áratug síðustu aldar og frá 1995.
2. Á tímabilinu 2000 til 2014 nam samdrátturinn rúmlega 500 km^2, eða um 0.35% á ári.
3. Miklar breytingar hafa orðið á afrennslisleiðum frá jöklum. Við suðaustanverðan Vatnajökul rennur nú allt vatn sem kemur undan Skeiðarárjökli í Gígjukvísl.
4. Breytingar hafa víða orðið á jaðarlónum við jökla, ný lón hafa myndast, sum eldri hafa stækkað og önnur horfið.
5. Breytingar á farvegum jökuláa geta haft áhrif á samgöngumannvirki. Þannig stendur nú lengsta brú landsins, Skeiðarárbrú, að mestu á þurru.
6. Gera þarf ráð fyrir áframhaldandi breytingum á jökulám og jökullónum.
7. Niðurstöður reikninga með jöklalíkönum benda til þess að gangi sviðsmyndir um loftslagsbreytingar eftir muni íslenskir jöklar halda áfram að minnka.
8. Fram að miðbiki aldarinnar er líklegt að samdráttur Langjökuls verði á bilinu 20–40% en samdráttur Hofsjökuls 15–25%. Við lok aldarinnar gæti Langjökull hafa tapað 85% af rúmmáli sínu en Hofsjökull og syðri hluti Vatnajökuls um 60%.
9. Gangi hlýrri sviðsmyndir um loftslagsbreytingar eftir hverfa jöklar á Íslandi einn af öðrum á næstu tveimur öldum. Vatnajökull mun lifa lengst, a.m.k. á hæstu fjallatindum.
10. Afrennsli frá jöklum mun aukast og ná hámarki upp úr miðri öldinni en dragast saman á síðustu áratugum aldarinnar.
11. Þessar breytingar hafa áhrif á hönnunar- og rekstrarforsendur virkjana og ýmissa annarra innviða.
12. Mikill breytileiki er í vatnafari á landinu og mælingar sýna skammtíma- og áratugabreytingar samfara langtímahneigð.
13. Reikningar á afrennsli sýna að árstíðasveifla breytist þegar hlýnar.
14. Á hlýindaskeiði eftir aldamót nálgaðist mælt rennsli það sem sviðsmyndir með hlýnun gefa til kynna.
15. Gera má ráð fyrir að afrennsli aukist í takt við aukna úrkomu og bráðnun jökla, a.m.k. fram yfir miðja öldina.
16. Fyrst um sinn er líklegt að breytingar í árstíðasveiflu verði greinilegri en aukning afrennslis.
17. Betri þekking er nú á svæðisbundnum breytingum á sjávarstöðu en var þegar síðasta skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar var rituð. Meðal svæðisbundinna þátta má nefna varmaþenslu og breytingar í þyngdarsviði.
18. Bráðnun jökla hefur í för með sér breytingu á þyngdarsviði næst jöklunum sem dregur úr hækkun sjávar þar. Fyrir stór íshvel eru þessi áhrif meiri, jafnvel svo mikil að sjávarstaða getur lækkað á sumum svæðum. Hækkun sjávarstöðu fjær íshvelinu verður því meiri. Bráðnun Grænlandsjökuls dregur úr hækkun sjávar hér við land, bráðnun á Suðurskautslandinu hækkar sjávarstöðu við landið.
19. Rannsóknir á sjávarstöðubreytingum við Ísland benda til þess að sjávarstaða hafi hækkað meira á síðustu 500 árum en á 1500 árum þar á undan.
20. Utan Reykjavíkur er langtímamælingum á sjávarstöðu mjög ábótavant. Tryggja þarf að mælingar á sjávarstöðu nýtist til þess að fylgjast með langtímabreytingum.
21. Landris og landsig útskýra að nokkru þær sjávarstöðubreytingar sem nú verður vart við ströndina.
22. Mælingar á landhæðarbreytingum á Íslandi sýna að landsig er víða við ströndina vestanlands og fyrir miðju Norðurlandi en inn til landsins er landris. Frá



Mynd 5.1 Árlegt hlutfall (%) íslenskra jökla sem gengu fram og hopuðu á árunum 1931 til 2016. Aðeins eru taldir með jafngangsjöklar. Myndin sýnir gögn frá 10 til 20 jökulsporðum hvert ár. (Gögn frá Jöklarannsóknafélagi Íslands).

Austurlandi og vestur eftir suðurströndinni er landris, ákafast suðaustanlands.

23. Þar sem landris er ákafast er líklegt að sjávarstaða falli á öldinni.
24. Líklegt er að hækkun sjávarstöðu hér við land verði á bilinu 30–40% af hnattrænni meðalhækkun. Óvissumörk eru rífleg og hefur ísbráðnun á Grænlandi og Suðurskautslandi ráðandi áhrif á þetta hlutfall og getur aukið hækkun um tugi sentímetra.
25. Óafturkræft hrun á jöklum á Suðurskautslandinu kann að vera hafið. Það getur á nokkrum öldum valdið margra metra hækkun á sjávarborði heimshafanna.
26. Langtímahækkun sjávarstöðu er því óumflýjanleg víðast hvar við ströndina utan Suðausturlands.

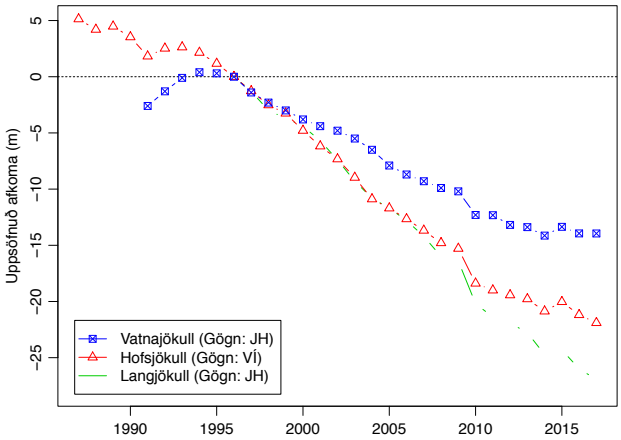
5.1 Jöklar

Fjallað var um breytingar á stærð íslenskra jökla á síðustu öld og líkleg afdrif þeirra í hlýnandi heimi í síðustu skýrslu vísindanefndar[1]. Þar kom fram að frá upphafi Íslandsbyggðar hefðu jöklar líklega víðast náð mestri útbreiðslu undir lok 19. aldar. Skeið jökulhörfunar stóð frá þessum tíma fram yfir 1960. Þá tók við tók við skeið stöðnunar og jafnvel framrásar í rúma þrjá áratugi en frá 1995 hafa allir jöklar hopað. Fram til loka 21. aldar má gera ráð fyrir að jöklar haldi áfram að hörfa og af stóru jöklunum mun Langjökull líklega rýrna mest og margir minni jöklar hverfa alveg, en nokkrir nafngreindir jöklar hafa þegar horfið.

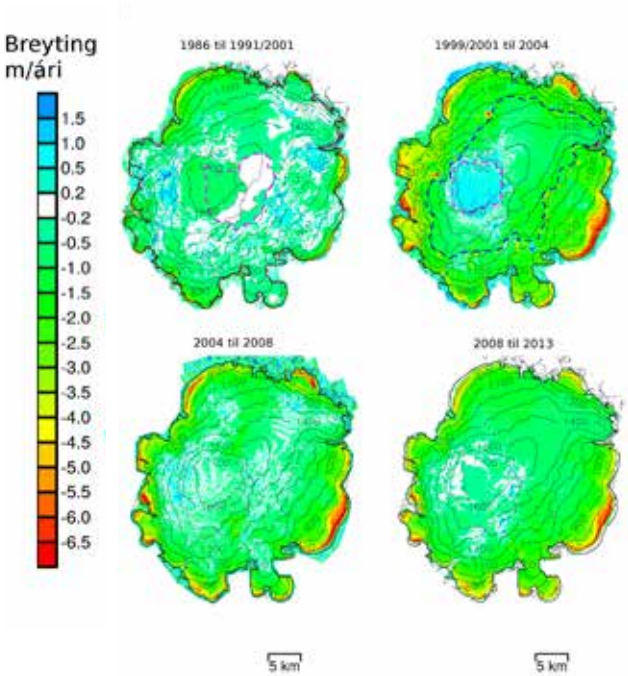
5.1.1 Ástand og breytingar frá lokum litlu ísaldar

Á vegum Jöklarannsóknafélags Íslands hafa verið tekin saman gögn um stöðu jökulsporða frá því á fyrri hluta síðustu aldar. Mynd 5.1 sýnir hlutfall jafngangsjökla, þ.e. jökla sem ekki eru framhlaupsjöklar, sem ganga fram eða hopa frá 1930[2]. Myndin sýnir að flestir jöklar sem fylgst er með hopa, og sum árin á þessari öld hafa allir jöklarnir hopað. Greining jökuljaðra og ummerkja um stöðu jökulsporða frá fyrri tíð á gervihnattamyndum, flugmyndum og á vettvangi[3] sýnir að flatarmál jökulhulins lands minnkaði úr u.þ.b. 12.5 þúsund km² í um 10.5 þúsund km², eða um nálægt 2000 km², frá mestu útbreiðslu jöklanna í lok 19. aldar til ársins 2014[3,4,5]. Þar af minnkaði flatarmál jöklanna um tæpa 1000 km² á tímabilinu 1945/46 til 2014. Hörfunin hefur hert á sér síðustu áratugina og jöklarnir minnkuðu um rúma 500 km² á tímabilinu 2000 til 2014 sem samsvarar um 35 km² eða 0.35% á ári.

Rannsóknir síðustu ára hafa varpað ljósi á rýrnun jöklanna frá hámarksútbreiðslu við lok 19. aldar. Nýjar rannsóknir á skriðjöklum Vatnajökuls í Austur-Skaftafellssýslu (frá Morsárjökli í vestri að Lambatungnajökli í austri)[6,7] sýna að síðan þeir náðu lengst fram hefur flatarmálið minnkað um 278 km² og yfirborðið víða lækkað um 150–270 m nærri sporðunum og upp í 300–400 neðarlega á Breiðamerkurjökli, ef



Mynd 5.2 Rýrnun stóru jöklanna (m), byggt á afkomumælingu. Frá 1995 er einungis eitt ár (2014–2015) með jákvæða afkomu. Mjög neikvæð afkoma ársins 2009-2010 er að mestu vegna ösku sem féll á jöklana í eldgosinu í Eyjafjallajökli. (Heimildir: sjá tilvísun 9. Eftir 2010 byggist myndin á óbirtum gögnum frá Jarðvísindastofnun HÍ, Landsvirkjun og Veðurstofu Íslands.)



Mynd 5.3 Árleg þynning (m/ári) Hofsjökuls 1986–1999/2001, 1999/2001–2004, 2004–2008 og 2008–2013. (Heimildir: sjá tilvísarnir 11 og 12.)

eingöngu er litið til þess hluta jökulsins sem er yfir sjávarmáli. Í dýpsta hluta Jökulsárlóns hefur þykkt jökulsins minnkað um yfir 500 m frá lokum 19. aldar ef tekið er tillit til íssins sem fyllti dalinn undir sjávarmáli þar sem lónið er nú. Í heildina er rýrnun þessara jökla, sem eru um 2000 km^2 að flatarmáli, metin 129±11 km^3 íss sem jafngildir 114 km^3 vatns. Hlutfallslegt rúmmálstap jöklanna síðan um 1890 er samkvæmt þessum rannsóknum 15–50%. Afkoma jöklanna var mjög neikvæð á árunum 2002–2010, eða –1.34±0,12 m að vatnsgildi á ári sem er með því mesta sem þekkist í heiminum á þessu tímabili[8].

Greiningar á kortum, gervihnattamyndum, auk niðurstaðna afkomumælinga á Vatnajökli, Hofsjökli og Langjökli síðustu áratugi sýna að þessir jöklar hafa allir tapað verulegum massa frá því um 1890[9,10]. Mynd 5.2 sýnir uppsafnað massatap á tímabilinu og tafla 5.1 sýnir ítarlegri upplýsingar.

Á árunum 2007–2013 var yfirborð íslenskra jökla og næsta nágrennis þeirra kortlagt með leysimælingum (lidar) í mikilli upplausn[11]. Með því að bera þessi kort saman við eldri mælingar má kortleggja þynningu jöklanna og meta heildarrýrnun þeirra. Mynd 5.3 sýnir þynningu Hofsjökuls frá 1986 til 2013[11,12]. Töflur 5.1 og 5.2 sýna samantekt á niðurstöðum fyrir nokkra jökla. Ljóst er að allir þessir jöklar hafa rýrnað á tímabilinu. Mynd 5.3 sýnir að Hofsjökull hefur þynnst langmest við sporðinn, þar sem hann er að hopa. Meðal áhrifa hopunar við jökulsporða má nefna farvega-breytingar jökuláa og myndun jaðarlóna.

Greining á loftmyndum af Drangajökli árin 1946,1960, 1975, 1985, 1994 og 2005 bendir til þess að á tímabilinu 1946 til 2005 hafi jökullinn að jafnaði tapað 0.26 m_{vatns} á ári. Hann hefur því rýrnað minna en jöklar miðhálendisins (tafla 5.1), enda stækkaði Drangajökull á hluta tímabilsins, a.m.k. milli 1985 og 1994[13]. Beinar mælingar á afkomu Drangajökuls á

Nafn jökuls	Ísþykkt [m]	Rúmmál íss [km3]	Hlutfallsleg rýrnun (%)	Breyting á ári [mvatns/ár]
Vatnajökull	15	121	4	–0.6
Hofsjökull	28	24	12	–1.2
Langjökull	30	27	14	–1.3

Tafla 5.1 Afkoma stóru jöklanna á tímabilinu 1995–2016. Fyrstu tveir dálkar sýna breytingar í þykkt (m) og rúmmáli (km^3). Síðasti dálkurinn sýnir breytingu sem vatnsgildi (m_{vatns}/ári), en þar er búið að reikna breytingu á jökulís yfir í samsvarandi rúmmál af vatni. (Heimildir: sjá tilvísun 9 og texta við mynd 5.2.)

Mynd 5.4 Skeiðarárbrú árið 2010. Ný brú yfir Morsá hefur nú tekið við hlutverki Skeiðarárbrúar. (Ljósmynd: Halldór Björnsson.)

árunum 2004–2015 sýna lækkun að jafnaði um 0.3m/ári á þessu tímabili. Þær mælingar ná aðeins til hluta jökulsins en ber nokkuð vel saman við niðurstöður úr samanburði hæðarlíkana frá 1999 og 2011 (tafla 5.2).

Nafn jökuls	Tímabil	Afkoma, vatnsgildi [m_{vatns}/ár]
Snæfellsjökull	1999–2008	–1.4
Drangajökull	~1999–2011	–0.5
Eyjafjallajökull	1998–2010	–1.2
Torfajökull	1998–2011	–1.9
Tindfjallajökull	1998–2011	–1.3

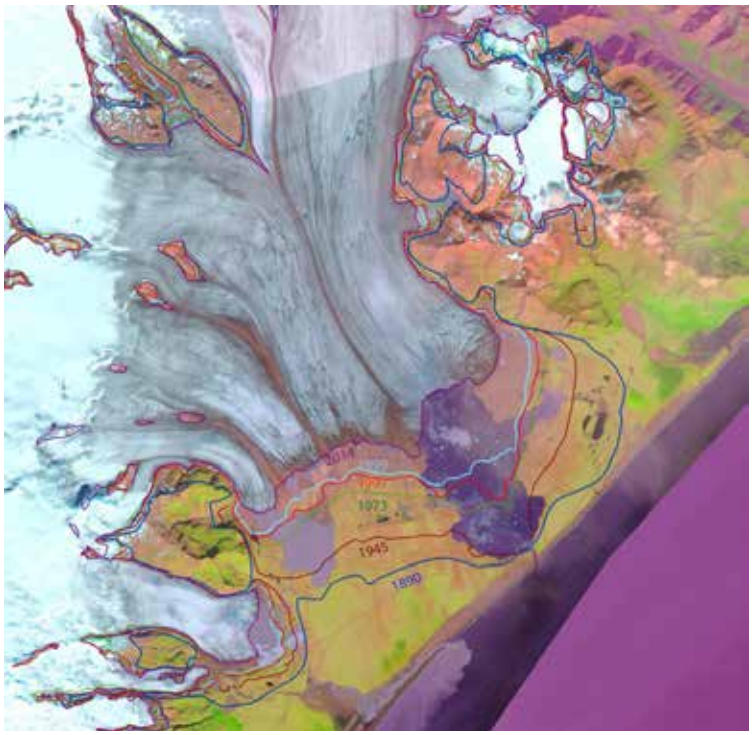
Tafla 5.2 Afkoma nokkurra minni jökla (m_{vatns}/ári) reiknuð út frá samanburði leysimælinga 2007–2012 við eldri kort. (Heimildir: sjá tilvísanir, 11, 13, 14 og 15.)

5.1.2 Breytingar á afrennsli frá jöklum og á jökullónum

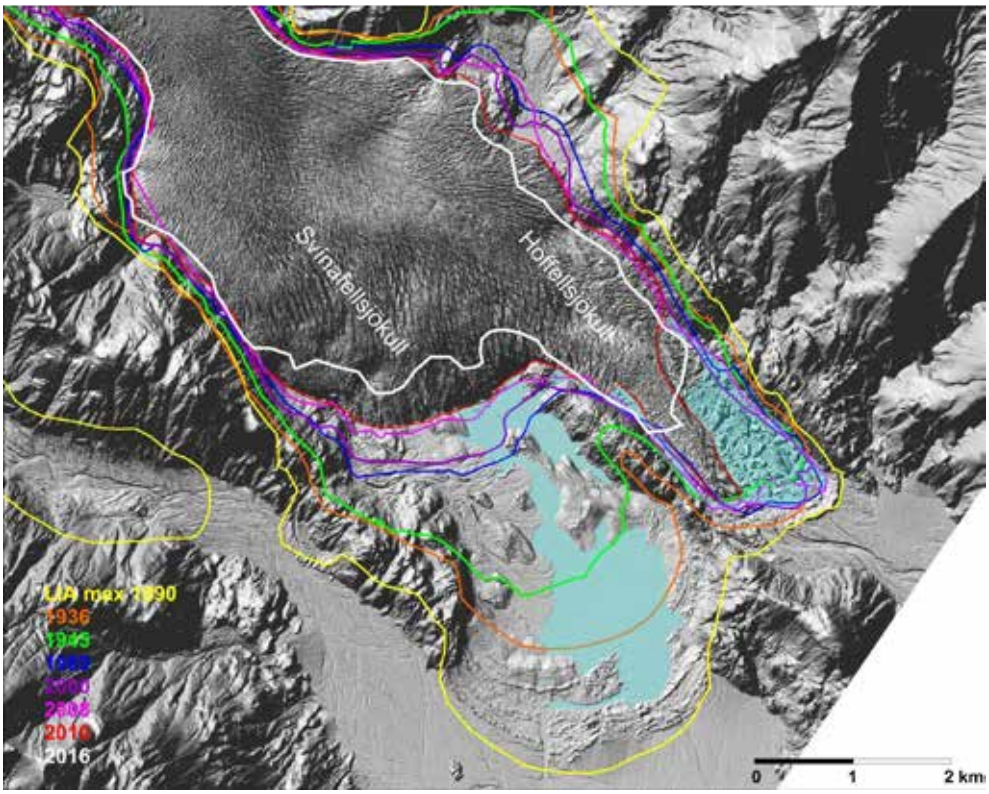
Breytingar á farvegum jökuláa voru ræddar í V2008 og bent á að brúarmannvirki gætu staðið á þurru í kjölfarið. Í júlímánuði 2009 fann Skeiðará sér farveg framan við jökulinn og sameinaðist Gígjukvísl[16]. Fyrir vikið stendur brúin yfir Skeiðará að mestu á þurru eins og sjá má á mynd 5.4. Ný brú yfir Morsá leysti Skeiðarárbrúna af hólmi haustið 2017. Einnig flutti Súla sig yfir í Gígjukvísl í júlí 2016[17] og nú er allt jökulvatn frá Skeiðarárjökli í Gígjukvísl.

Tafla 5.3 sýnir yfirlit um þær breytingar á farvegum jökuláa sem skráðar eru í heimildum. Þessi listi er fjarri því að vera tæmandi og finna má sagnir um farvegabreytingar í Landnámu.

Alþekkt er að þegar jöklar hörfa geta myndast lón fyrir framan þá. Mynd 5.5 sýnir dæmi um þetta en þar eru útlínur Breiðamerkurjökuls teiknaðar með nokkurra áratuga millibili eftir að jökullinn byrjaði að hörfa seint á 19. öld. Á söndunum fyrir framan jökulinn mynduðust stór jökullón. Í V2008 var bent á að jaðarlónum myndi fjölga á næstu árum og áratugum og má sem dæmi um ný jaðarlón nefna lón við Skeiðarárjökul og lón sem byrjaði að myndast um aldamótin 2000, í Fossdal í Esjufjöllum, en úr því hleypur til Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi. Mynd 5.6 sýnir skyggt hæðarlíkan byggt á leysimælingu á Hoffellsjökli og lóninu fyrir framan hann frá árinu 2010, en lónið hefur stækkað mikið síðan. Þá er líklegt að lítið lón fyrir framan Heinabergsjökul muni fara stækkandi og lón við Skeiðarárjökul stækka. Ný eða stærri lón geta dregið úr aurburði til sjávar sem hefur áhrif á aðstæður við ströndina og eins geta jökulhlaup fyllt ný lón af seti. Við hop jökla geta aðstæður til vatnssöfnunar breyst og því hafa sum jökullón tæmst endanlega og meðal þeirra má nefna Hnútulón við Brúarjökul, Háöldulón við Eyjabakkajökul, Fremra-Veðurárdalslón við Breiðamerkurjökul, Efstafellsvatn við Hoffellsjökul, Hvítalón við Köldukvíslarjökul og Hamarslón við Sylgjujökul. Auk þessa hafa Grænalón við Skeiðarárjökul, Gjávatn við Hoffellsjökul og Vatnsdalslón við Heinabergsjökul minnkað hratt á síðustu árum. Jökulstífluð lón, eins og Hnútulón og Háöldulón, geta myndast aftur ef gangur kemur í jökulinn.



Mynd 5.5 Breiðamerkurjökull árið 2014 og útlínur jökulsins 1890, 1945, 1973, 1991, 1999 og 2014. Gögn frá Veðurstofu Íslands. (Heimild: sjá tílvísun 18.)



Mynd 5.6 Skyggning af yfirborði Hoffellsjökuls í suðaustanverðum Vatnajökli sem mældur var með leysimælitækjum úr flugvél í ágústmánuði 2010. Eftir venju heimamanna eru jökultungurnar merktar Svínafellsjökull og Hoffellsjökull. Hörfun Svínafellsjökuls speglar vel tíðarfarið á öldinni en sporður Hoffellsjökuls, sem liggur í djúpri lægð og tekur við meginhluta ísflæðis að ofan, hörfaði lítið sem ekkert fram yfir síðustu aldamót. Þar hefur sporðurinn hins vegar þynnst svo síðustu ár að hluti hans er á floti og æ meir gætir kelfingar, einkum eftir að Austurfljót náðu fram í Suðurfljót 2008. Nú stækkar lónið þar hratt en jakar þekja enn hluta yfirborðsins. Sams konar atburðarás hefur einkennt Heinabergsjökul síðustu áratugi og vænta má að óbreyttu eða hlýnandi loftslagi að þróun Skeiðarárjökuls verði með þessum hætti á komandi áratugum. Lón við Skeiðarárjökul geta hins vegar fyllst af auri við jökulhlaup. Gögn frá Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands. (Kort byggt á leysimælingu sjá tilvísun 11.)

Nafn á vatnsfalli/færsla	Hvenær skipt um farveg
Jökulsá á Sólheimasandi breytir um farveg á kafla	Um 1650
Heinabergsvötn í Kolgrímu	Um 1948
Austurfljót Hornafirði í Suðurfljót	2008
Skeiðará í Gígjukvísl	1929, 1991 og 2009
Sæluhússvatn í Gígjukvísl	Um 1992
Veðurá tekur að renna í Stemmu	1930–1940
Stemma í Jökulsárlón	1990
Breiðá tekur að renna í Fjallsá	1954
Breiðá, upptök undan jökli flytjast til	2002
Eystri-Kvíá í Kvíá	Óljóst hvenær
Kvíslar í Skaftá í Hverfisfljót	1991, 1994 og hugsanlega 2011
Neskvísl Svínafellsjökli í Svínafellsá	2007
Skráma í Svínafellsá	Óljóst hvenær
Sauðá og Kringilsá skiptast á	Oft
Hrútá í Öræfum í Fjallsárlón	Um 2007
Skaftá hættir að renna í Langasjó	1966
Vestari-Jökulsá í Skagafirði, upptakakvíslar flytjast til	Oft
Bleikálukvísl í Fossá	Líklega á 7. áratug 20. aldar
Leirá Mýrdalssandi í Skálm	2013
Súla í Gígjukvísl	2016

Tafla 5.3 Dæmi um jökulár sem hafa skipt um farveg (sjá tilvísun 19).

5.1.3 Líklegar breytingar jökla á komandi öld

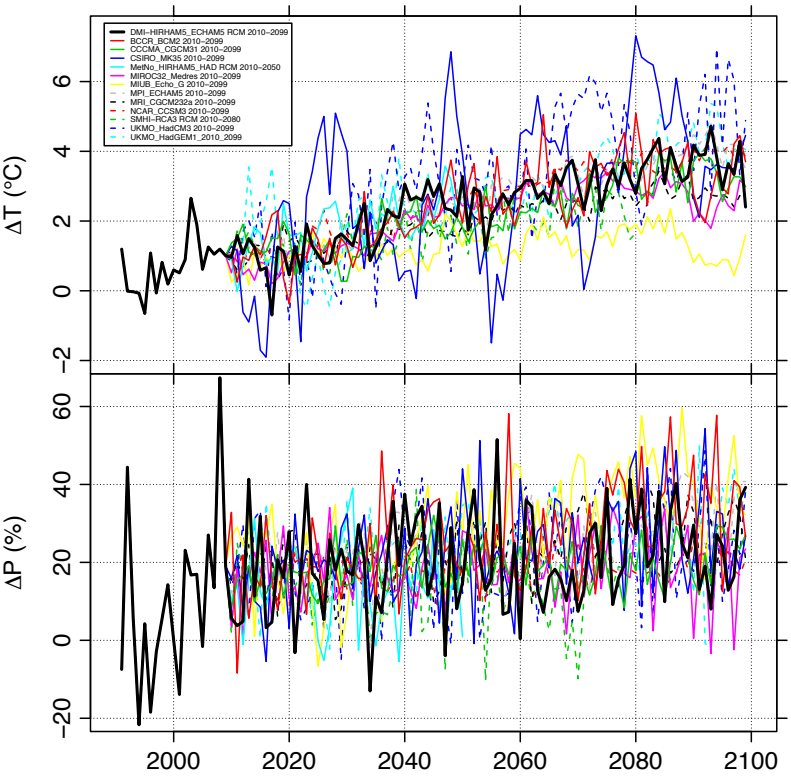
Í V2008 var fjallað um líklegar breytingar á jöklum á næstu öldum. Niðurstöður úr sviðsmyndakeyrslum loftslagslíkana voru notaðar sem inntaksgögn fyrir kvik ísflæðilíkön og afkomuþróun Langjökuls, Hofsjökuls og suðurhluta Vatnajökuls hermd næstu tvær aldir. Niðurstöður benda til þess að við lok aldarinnar muni allir jöklarnir hafa tapað verulegum massa. Um miðbik aldarinnar reiknast samdráttur Langjökuls, um 35% af rúmmáli hans árið 1990. Á sama tíma munu Hofsjökull og syðri hluti Vatnajökuls hafa minnkað um 25%. Við lok aldarinnar mun Langjökull, samkvæmt reikningunum, hafa tapað 85% af rúmmáli sínu en Hofsjökull og syðri hluti Vatnajökuls um 60%[20].

Þessir útreikningar hafa verið endurteknir tvívegis á síðustu árum en með ólíkum sviðsmyndum. Sambærileg niðurstaða fékkst[21,24] þegar sömu jöklar voru endurreiknaðir með uppfærðri sviðsmynd frá CE verkefninu[22], og eins þegar 13 sviðsmyndir, sem byggðust á greiningu á CMIP3 og svæðisbundnum loftslagslíkönum[23] voru notaðar. Í síðara tilvikinu voru sviðsmyndirnar kvarðaðar niður á veðurstöðvar í grennd við jöklana (mynd 5.7) og afkoma jöklanna reiknuð[24]. Með því að nota nokkrar sviðsmyndir má fá hugmynd um óvissuna í niðurstöðum (mynd 5.8). Fram að miðbiki aldarinnar reiknaðist samdráttur Langjökuls á bilinu 20–40% og um 30% að meðaltali. Fyrir Hofsjökul voru sambærilegar tölur 15–25% og 20% að meðaltali.

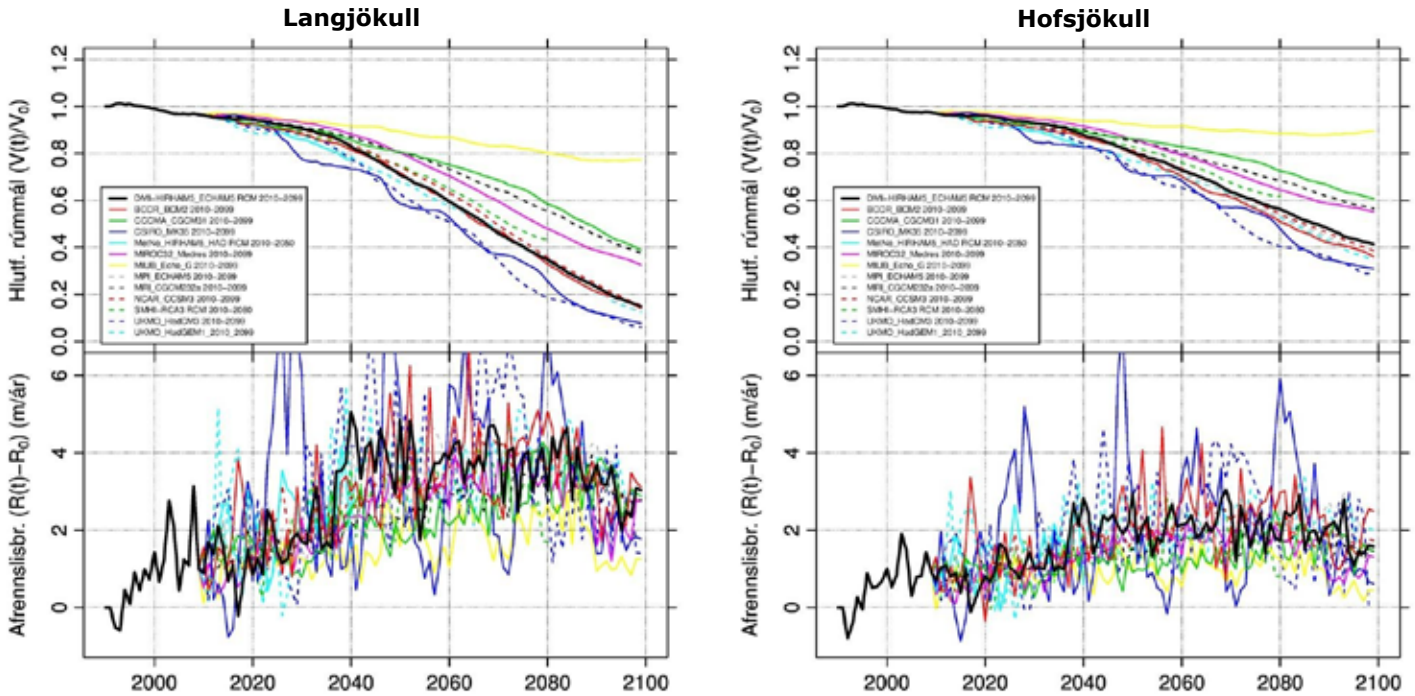
Breytingu afrennslis frá jöklunum er unnt að meta út frá árlegri rúmmálsbreytingu jöklanna. Mynd 5.8 sýnir að metið hámark afrennslis er mjög breytilegt eftir því hvaða sviðsmynd er notuð til að knýja líkanreikningana. Afrennslið nær þó hámarki upp úr miðri öldinni og er afrennslisaukningin þá á bilinu 2–4 m á ári frá Langjökli en nær 2 m á ári frá Hofsjökli í meira en hálfa öld. Ástæða þess að Langjökull bregst ákafar við hlýnun er sú að hann stendur lægra.

Sviðsmyndirnar 13 voru einnig notaðar til þess að reikna þróun Hoffellssjökuls í líkani sem stillt var af þannig að það næði að herma afkomubreytingar og breytingar í stærð jökulsins frá 1895 til 2010[25]. Niðurstöður sýndu að jafnvel þó að loftslag breyttist ekkert frá því sem það var á fyrsta áratug nýrrar aldar myndi jökullinn engu að síður dragast saman um 25% frá 2010 til loka aldarinnar. Í sviðsmyndum sem gerðu ráð fyrir loftslagsbreytingum var samdrátturinn um 30–45% fram að miðbiki aldarinnar, en við lok aldarinnar var minna en 20% af jöklinum eftir.

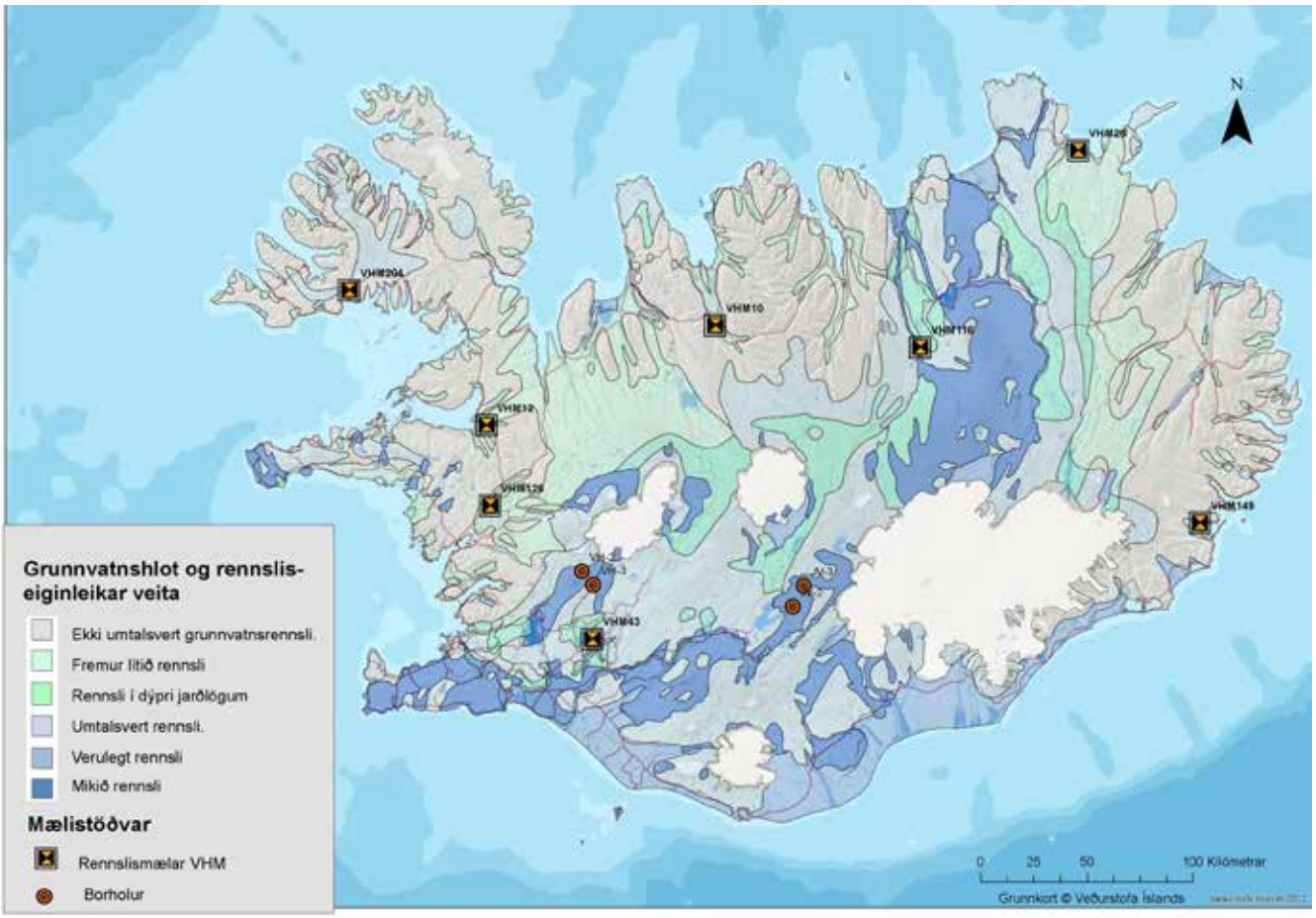
Loks hefur afkomuþróun suðausturhluta Vatnajökuls verið skoðuð sérstaklega með tilliti til breytinga á úrkomudreifingu og hlýnun[26]. Kvikt ísflæðilíkan var stillt af miðað við sögu þekktra jöklabreytinga, úrkomu og hita. Með því að lækka meðalhitann um 1°C og



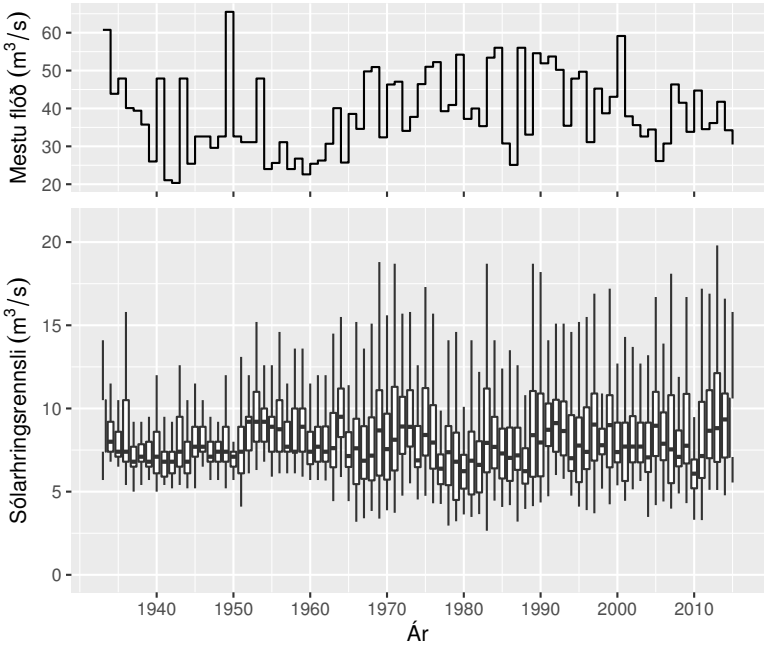
Mynd 5.7 Sviðsmyndir fyrir þróun hita og úrkomu fyrir Hveravelli miðað við niðurstöður 13 ólíkra loftslagslíkana. Sýndar eru breytingar á hita (ΔT, efri mynd) og úrkomu (ΔP, neðri mynd) miðað við tímabilið 1981–2000. (Heimild: sjá tilvísun 24.)



Mynd 5.8 Niðurstöður reikninga á breytingum Langjökuls og Hofsjökuls til 2100. Sýndar eru breytingar á rúmmáli og afrennsli miðað við árin 1981–2000 fyrir nokkur loftslagslíkön (sjá mynd 5.7). Dökka línan sýnir niðurstöður líkans dönsku veðurstofunnar sem liggur nærri miðju niðurstaðnanna. (Heimild: sjá tilvísun 24.)



Mynd 5.9 Grunnvatnshlot á Íslandi. Staðsetning nokkurra rennslis- og grunnvatnshæðarmæla.



Mynd 5.10 Rennsli (m^3/s) í Svartá í Skagafirði yfir árabilið 1932–2016. Efri myndin sýnir mestu flóð hvers árs (það flóð sem hefur hlutfallsmarkið 99%) en neðri myndin sýnir kassarit fyrir sólarhringsrennsli hvers árs. Nánari lýsingu á kassaritum má sjá í athugasemd 7 í kafla 4. Gögn frá Veðurstofu Íslands.

draga úr úrkomu um 20% frá því sem var á tímabilinu 1981–2000 var hægt að herma hámarksútbreiðslu jökla um 1890, en ef gert var ráð fyrir 3°C hlýnun þá töpuðu jöklarnir á endanum 80–90% af rúmmáli sínu.

Þær niðurstöður sem hér hafa verið raktar byggjast á sviðsmyndum sem háðar eru verulegri óvissu. Ekki er ljóst hvort þær nái til fulls að spanna náttúrulegan breytileika á úrkomu og hita og hina raunverulegu óvissu um þróun loftslags. Því er erfitt að meta líkur tiltekinnar rýrnunar jöklanna eða aukningar í afrennsli frá þeim. Rannsóknir síðustu ára hafa þó ekki breytt þeirri niðurstöðu V2008 að líklegast sé að jöklar á Íslandi hverfi að mestu á næstu fáum öldum gangi sviðsmyndir um loftslagsbreytingar eftir. Þessi niðurstaða er ekki séríslensk, gera má ráð fyrir að flestir jöklar á Norðurlöndum, utan Grænlands, hverfi að mestu á næstu 100–200 árum.

5.1.4 Afleiðingar fyrir afrennsli frá jöklum og á jökullón

Samdráttur jökla á Íslandi mun hafa verulegar breytingar á afrennsli í för með sér. Afrennsli frá svæðum, sem nú eru jökli hulin, kann að aukast um 25–100% á tímabilinu 2021–2050 miðað við meðaltal tímabilsins 1961–1990. Um helmingur þessarar breytingar er þegar kominn fram hér á landi. Um 2030–2040 er breyting í meðalafrennsli ársins frá svæðum sem nú eru jökli hulin talin geta orðið 1.5–2.5 m^3 vatns á ári fyrir Langjökul, Hofsjökul og S-Vatnajökul[24]. Þessar breytingar hafa áhrif á hönnunar- og rekstrarforsendur virkjana og ýmissa annarra innviða.

Miklar breytingar munu verða á árstíðasveiflu rennslis og dægursveiflu og í sumum tilvikum munu verða umtalsverðar afrennslisbreytingar vegna hnikunar á vatnaskilum á jökli og utan hans. Gera þarf ráð fyrir áframhaldandi breytingum á farvegum jökuláa og hefur stöðugleiki vatnaskila Skaftár og Hverfisfljóts á jökli þegar verið kannaður sérstaklega[27]. Líklegt er að vatn sem kemur frá hluta núverandi vatnasviðs Skaftár fari smám saman til Hverfisfljóts á næstu áratugum og afrennsli þar aukist. Fleiri ár þarf að hafa sérstaklega til athugunar og sýnir tafla 5.4 ár þar sem farvegabreytingar geta orðið á næstu árum.

Einnig verður að gera ráð fyrir að jaðarlónum haldi áfram að fjölga. Þau myndast helst þar sem jökulbotn er verulega lægri en landið fyrir framan og framburður undan jökli ekki nægur til að fylla í lægðina. Þegar þannig háttar til og jökullinn hörfar þá hlýtur dældin sem hann skilur eftir að fyllast af vatni. Eins og rakið var hér að framan eru þegar ný lón að myndast víða við jökulröndina og eldri lón að stækka[28].

Nafn á vatnsfalli
Skaftá
Tungnaá – Sylgja
Hverfisfljót
Djúpá í Fljótshverfi
Brunná í Fljótshverfi
Kerlingardalsá í Mýrdal
Hafursá í Mýrdal
Kreppa

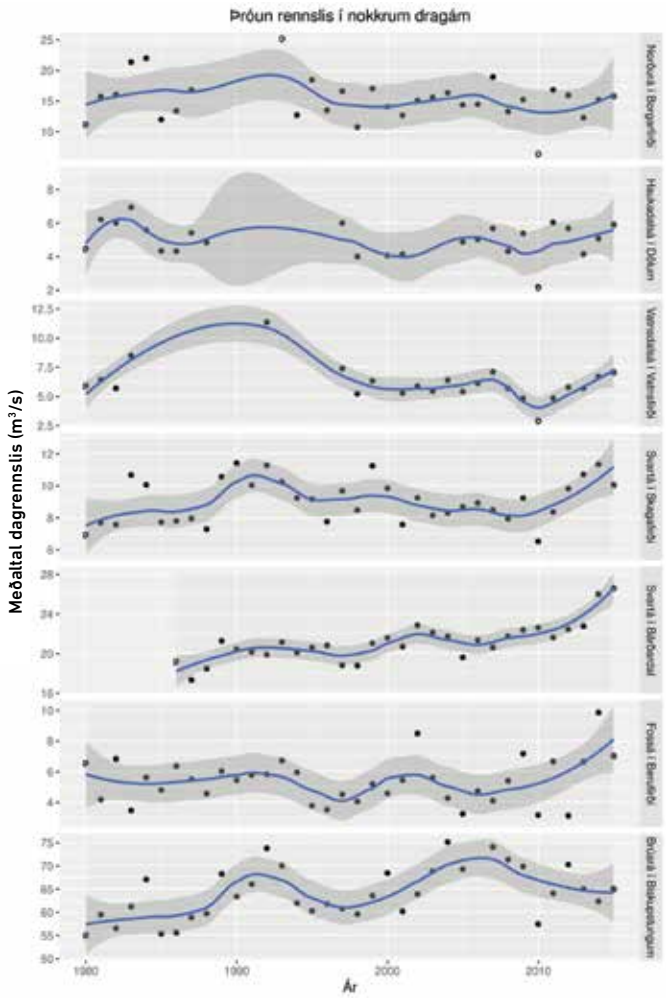
Tafla 5.4 Ár þar sem breytingar á farvegum eru yfirvofandi.

5.2 Vatnafar

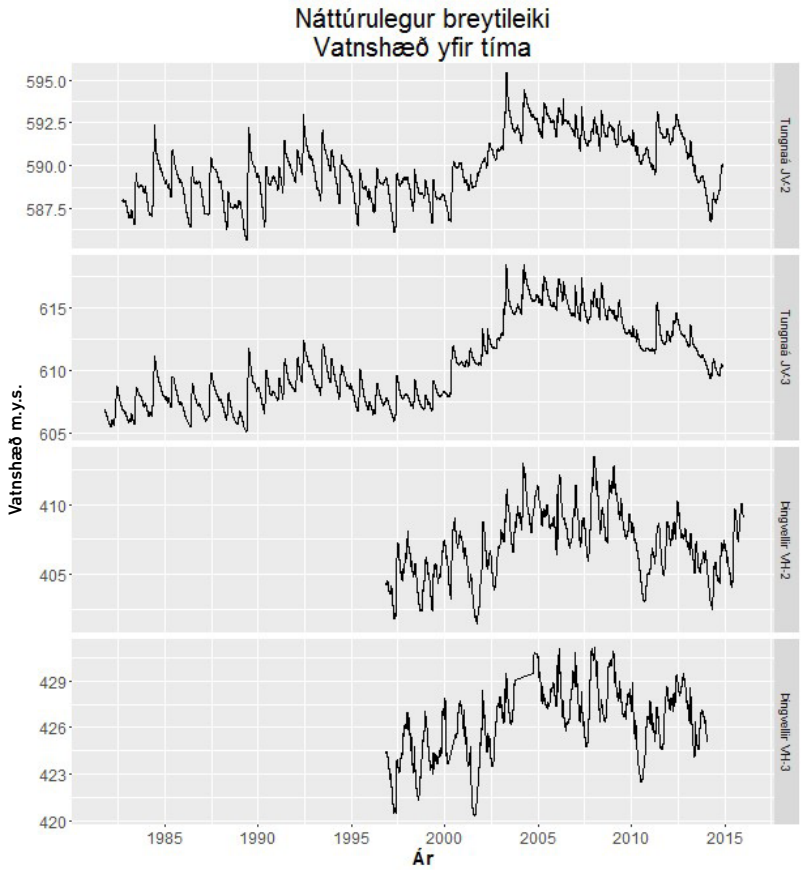
Í skýrslu vísindanefndar frá 2008 er skipting fallvatna niður í dragár, lindár og jökulár rakin og sérkenni hvers flokks skýrð[29]. Mynd 5.9 sýnir skiptingu landsins í grunnvatnshlot eins og þau eru skilgreind í vatnatilskipun Evrópusambandsins. Flokkunin endurspeglar hvernig jarðvegur og berggrunnur hafa áhrif á rennsli fallvatna. Dragár koma fram þar sem berggrunnur er elstur og þéttur en lindár eiga uppruna sinn á lekum svæðum þar sem yfirborðsvatn á auðvelt með að hripa niður og safnast fyrir í grunnvatnsgeymum. Jökulárnar eru, eins og nafnið ber með sér, afrennsli af jöklum. Grunnvatnsþáttur þeirra ræðst algjörlega af lekt jarðlaga þar sem áin rennur. Í dragám og jökulám er nokkur árstíðasveifla á rennsli þar sem sumarrennslið er meira en vetrarrennslið. Rennslið í dragám er yfirleitt mest í vorleysingum, en í jökulám eru rennslistopparnir að jafnaði tveir, einn að vori meðan snjó síðasta vetrar er að leysa og síðsumars verður yfirleitt annar hærri rennslistoppur þegar jökulbráð eykst. Árstíðasveifla á rennsli í lindám er alla jafna verulega minni en í jökulám og dragám.

5.2.1 Langtímabreytingar í vatnafari

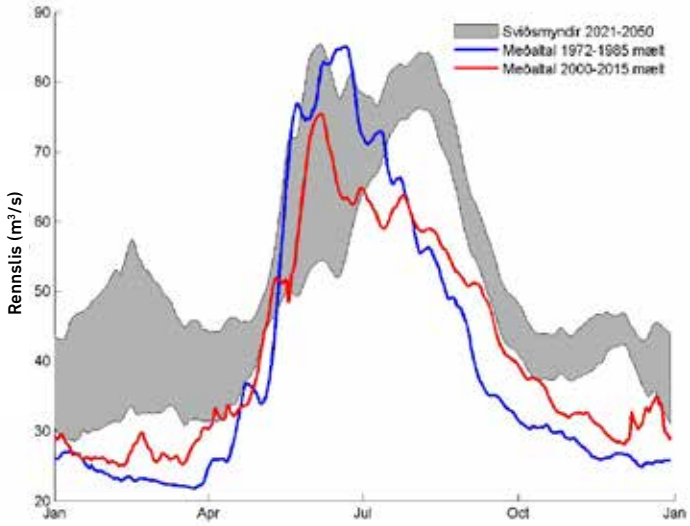
Ýmis gögn benda til verulegra langtímabreytinga í vatnafari. Mynd 5.10 sýnir rennsli Svartár í Skagafirði yfir á árabilinu 1933–2015, efri myndin sýnir mestu flóð og sú neðri dreifingu sólarhringsrennslis yfir árið.



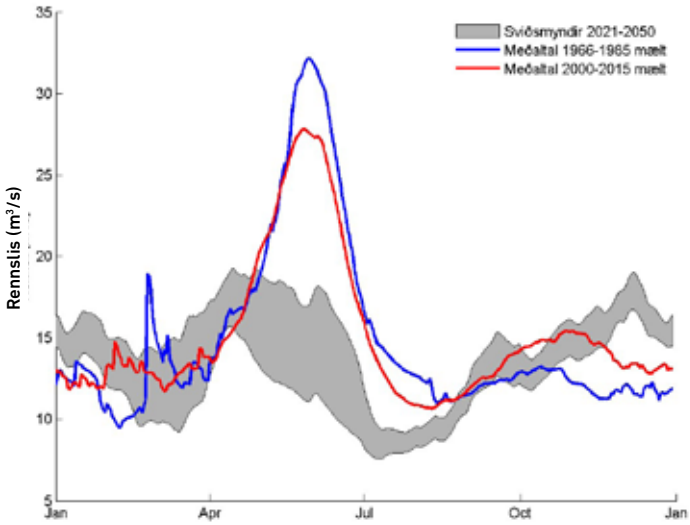
Mynd 5.11 Langtímaþróun í nokkrum vatnsföllum á tímabilinu 1980 til 2015. Sýnt er ársmeðaltal dagrennslis og útjafnaður ferill (m³/s). Skyggða svæðið sýnir óvissumat á útjafnaða ferlinum og óvissan er meiri á gagnarýrum tímabilum. Gögn frá Veðurstofu Íslands.



Mynd 5.12 Langtímabreytingar á vatnshæð (m.y.s.) í nokkrum borholum. Gögn frá Veðurstofu Íslands.



Mynd 5.13 Árstíðabreytingar rennslis (m^3/s) í Austari-Jökulsá. Sýnd eru meðaltöl mælinga frá 1972–1985 og 2000–2015. Skyggða svæðið sýnir niðurstöður líkanreikninga á afrennsli með nokkrum sviðsmyndum um hlýnun.



Mynd 5.14 Árstíðabreytingar rennslis (m^3/s) í Sandá í Þistilfirði. Sýnd eru meðaltöl mælinga frá 1966–1985 og 2009–2015. Skyggða svæðið sýnir niðurstöður líkanreikninga á afrennsli með nokkrum sviðsmyndum um hlýnun.

Lítið samband er á milli dæmigerðs rennslis og stærstu flóða. Það dregur úr rennsli á 8. áratugnum en á sama tíma verða flóðin stærri. Eins dregur úr stærð flóða undir lok síðustu aldar, án þess að sólarhringsrennsli breytist mikið. Sambærilegar áratugabreytingar á stærð flóða og tíðni sjást þegar rennslisraðir fyrir fleiri straumvötn eru skoðuð. Breytingin er ekki samstíga yfir allt landið heldur kemur fram á mismunandi tímum eftir landshlutum. Verulegur munur er t.d. á tímasetningu flóðatímabila í Geithellnaá og Svartá í Skagafirði. Nánar er fjallað um flóð og flóðahættu í grein 12.1.2.

Langtímabreytingar á rennsli reyndust einnig verulegar í rannsókn þar sem landinu var skipt upp í þrjú svæði og hiti, úrkoma og afrennsli skoðuð á hverju fyrir sig[30]. Verulegar sveiflur voru í afrennsli sunnan- og vestanlands en ekki marktæk langtímahneigð í heildarrennsli. Frekari dæmi um langtímabreytingar á afrennsli má sjá á mynd 5.11 sem sýnir þróun afrennslis í nokkrum dragám. Myndin sýnir að langtímabreytingar á rennsli eru verulegar og getur munað tugum prósenta milli áratuga. Myndin sýnir einnig að það er ekki mikil langtímahneigð í rennslisferlunum ef frá eru taldar lindárnar Svartá í Bárðardal og Brúará í Biskupstungum en þar er langtímahneigðin á heildarrennsli marktæk. Það að rennsli flestra straumvatna hér á landi sýni ekki langtímahneigð er í allgóðu samræmi við rannsóknir fyrir tímabilið 1961–2000 sem leiddu ekki í ljós neina marktæka hneigð rennslis fyrir tímabilið[31].

Frekari dæmi um langtímabreytingu má sjá á mynd 5.12 sem sýnir vatnshæð í fjórum borholum á Suður- og Suðvesturlandi. Breytingar á grunnvatnshæð eru yfirleitt frekar dempaðar og því oft auðveldara að túlka langtímabreytileika í borholum en breytingar á rennsli í ám. Alla jafna stafar hærra grunnvatnsborð af meiri úrkomu eða leysingu. Myndin sýnir verulega hækkun grunnvatnsborðs frá miðjum 10. áratug liðinnar aldar fram yfir miðbik fyrsta áratugar nýhafinnar aldar, en á

síðustu árum hefur hækkunin að einhverju leyti gengið til baka. Þótt í heildina sé hneigðin upp á við eru þessar mæliraðir of stuttar til að hægt sé að fullyrða að til lengri tíma megi búast við að grunnvatnsyfirborð á svæðinu hækki.

5.2.2 Áhrif loftslagsbreytinga

Í síðustu skýrslu Vísindanefndar frá 2008 kemur fram að líklegt er að með hlýnandi loftslagi aflagist árstíðasveifla afrennslis, hlutfall rigningar í úrkomu aukist að vetri og leysingaflóð að vori minnki að sama skapi[29]. Afrennsli frá jöklum mun aukast, sérstaklega yfir sumartímann, auk þess sem það mun líklega hefjast fyrr að vori og ná lengra fram á haust. Í dragám geta orðið veruleg vetrarflóð og gera má ráð fyrir að slík flóð geti tekið breytingum ef hlýnar að vetri. Þetta fer þó nokkuð eftir landsvæðum. Síðustu áratugi hafa mestu vetrarflóðin orðið vestanlands þar sem hálendi er í um 400 m hæð yfir sjávarmáli. Mestu leysingaflóð að vori eru hins vegar af Sprengisandi en þar liggur land að mestu í um 600–800 m hæð. Með hlýnun að vetri gætu flóð á því svæði færst yfir á vetrartímann þegar leysing nær inn á svæðið fyrr en áður.

Á síðustu árum hafa áhrif loftslagsbreytinga á árstíðasveiflu afrennslis í dragám og jökulám verið skoðuð nánar[32]. Sérstaklega voru skoðaðar árnar Sandá í Þistilfirði, sem hin dæmigerða dragá, og Austari-Jökulsá í Skagafirði sem er dragá með jökul- og grunnvatnsþátt. Líkanreiknaðar framtíðarsviðsmyndir rennslis benda til þess að hámark vorflóða minnki um 5–70% fram á miðja öldina, þau eigi sér stað um mánuði fyrr en áður, en á móti komi aukning í afrennsli að vetri. Þessarar þróunar er þegar farið að gæta í rennslisröðum, bæði í Austari-Jökulsá (mynd 5.13) og Sandá (mynd 5.14) þar sem sést að dregið hefur úr vorflóðum og afrennsli að vetri hefur aukist. Í Austari-Jökulsá breyttist tímasetning hámarksflóða upp úr aldamótum og færðist a.m.k. tímabundið framar í árið, en slíkra breytinga hefur þó enn ekki orðið vart í Sandá. Breytingar í tímasetningu og rúmtaki vorleysinga má þó greina í öðrum ám, t.d. Svartá í Skagafirði og Vatnsdalsá í Vatnsfirði. Breytingar á árstíðasveiflu afrennslis á Íslandi hafa verið skoðaðar í samhengi við breytingar á flóðatíðni í Evrópu, en þar má einnig greina breytingar í árstíðasveiflu afrennslis, sem rekja má til loftslagsbreytinga[33].

Myndir 5.13 og 5.14 sýna rennsli, bæði á frekar köldu tímabili fyrir 1990 og hlýrra tímabili eftir aldamótin. Á báðum myndum leitar árstíðasveifla rennslis á hlýja skeiðinu upp úr aldamótum í átt til þess sem sviðsmyndirnar spá í hlýrra loftslagi. Þó verður að gera þann fyrirvara við þessa túlkun að raðirnar eru stuttar og ekki ljóst að hversu miklu leyti breytingar sem þær sýna endurspegla langtímabreytingar.

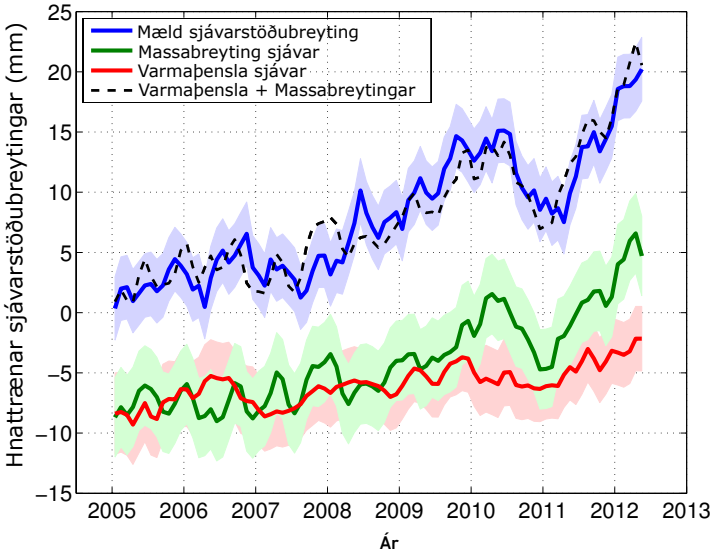
5.2.3 Samantekt

Mikill breytileiki er í vatnafari á landinu og mælingar sýna skammtíma- og áratugabreytingar samfara langtímahneigð. Enn er erfitt að greina þar á milli enda eru mæliraðirnar ekki langar. Hins vegar er ljóst að grunnvatn á gropnum og lekum svæðum hefur verið að aukast, sem líklega er tilkomið vegna meiri úrkomu og/eða leysingar jökla. Þá má merkja að á hlýjum áratugum nálgast mælt rennsli það rennsli sem reiknað er út í sviðsmyndum þar sem gert hefur verið ráð fyrir hlýnun.

Líklegt er að úrkoma á landinu aukist í takt við hlýnandi veðurfar á þessari öld (sjá grein 4.4.3) og að vetri til verði rigning algengari. Gera má ráð fyrir að afrennsli aukist með aukinni úrkomu og bráðnun jökla (sjá grein 5.1.3). Fyrst um sinn er líklegt að breytingar í árstíðasveiflu verði greinilegri en aukning afrennslis.

5.3 Sjávarstöðubreytingar

Stuttlega er fjallað um sjávarstöðubreytingar í skýrslu vísindanefndar frá 2008[34] og um hnattrænar sjárvarstöðubreytingar í kafla 3 hér að framan. Í 13. kafla skýrslu milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC, 2013) er þekking á sjávarstöðubreytingum á ritunartíma skýrslunnar dregin saman[35] og helstu niðurstöðum er lýst í grein 3.4. Stór hluti hnattrænnar hækkunar sjávarstöðu orsakast af varmaþenslu vegna hlýnunar hafsins en einnig skipta massabreytingar máli, þ.e. bráðnun jökla og á síðustu árum, massatap stóru ísbreiðanna, þ.e. Grænlandsjökuls og Suðurskautsjökulsins. Tekist hefur að draga verulega úr óvissu um framlag stóru ísbreiðanna og leggja tölulegt mat á framlag hvers þáttar. Tafla 5.5 sýnir samantekt á mælingum einstakra orsakaþátta og þar kemur fram að fyrir tímabilið 1993–2010 er mismunur á mældri sjávarstöðuhækkun og heildarframlagi þekktra áhrifaþátta innan óvissumarka.



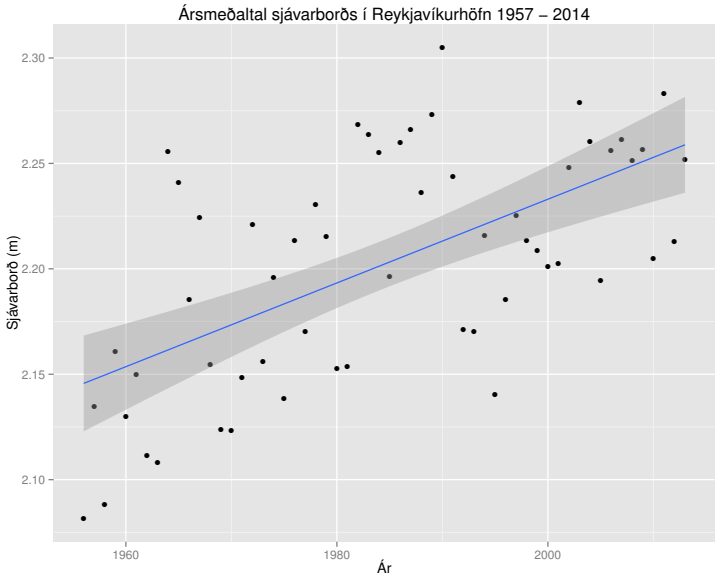
Mynd 5.15 Samanburður á mældum hnattrænum sjávarstöðubreytingum, massabreytingum sjávar (umreiknaðar yfir í sjávarstöðubreytingar) og varmaþenslu. Brotalínan sýnir að samanlagðar massabreytingar, og varmaþensla útskýra hnattrænar sjávarstöðubreytingar. (Sjá nánari umfjöllun í heimild 37.)

Áhrifaþáttur	1901–1990	1971–2010	1993–2010
Varmaþensla		0.8 [0.5–1.1]	1.1 [0.8–1.4]
Jöklar, nema á Suðurskautslandi og Grænlandi	0.54 [0.47–0.61]	0.62 [0.25–0.99]	0.76 [0.39–1.13]
Jöklar á Grænlandi, utan meginísbreiðunnar	0.15 [0.10–0.19]	0.06 [0.03–0.09]	0.10 [0.07–0.13]
Ísbreiðan á Grænlandi			0.33 [0.25–0.41]
Ísbreiðan á Suðurskautslandi			0.27 [0.16–0.38]
Vatnsgeymslur á landi	-0.11 [-0.16–-0.06]	0.12 [0.03–0.22]	0.38 [0.26–0.49]
Heildarframlag			2.8 [2.3–3.4]
Sjávarstöðuhækkun samkvæmt mælingum	1.5 [1.3–1.7]	2.0 [1.7–2.3]	3.2 [2.8–3.6]

Tafla 5.5 Hnattrænar sjávarstöðubreytingar frá upphafi 20. aldar til 2010 í mm á ári. Tölur innan hornklofa sýna 5 til 95% óvissumörk. Sýnd eru þrjú tímabil og hraði hækkunarinnar er mestur á því síðasta. Á síðasta tímabilinu skarast óvissubil heildarframlags allra áhrifaþátta og mælinga á sjávarstöðuhækkun. (Sjá nánar heimild 36.)

Bera má saman beinar mælingar á sjávarstöðu með gervihnöttum, mælingum á massabreytingum í sjó sem gerðar eru með gögnum frá GRACE gervitunglum og reiknaðri varmaþenslu sjávar, byggðum á hitamælingum með Argo mælum[37]. Mynd 5.15 sýnir niðurstöður slíks samanburðar og greinilega sést að samanlagðar breytingar á sjávarstöðu vegna massabreytinga og varmaþenslu falla mjög vel að mældum breytingum á sjávarstöðu. Myndin sýnir því að útskýra má hnattrænar breytingar á sjávarstöðu á síðasta áratug, en einnig sýnir hún hversu mikið framlag massabreytinga (ísbráðnun) hefur aukist á allra síðustu árum.

Á síðustu árum hefur skilningur á svæðisbundnum breytileika sjávarstöðu aukist verulega. Margar rannsóknir sýna að svæðisbundinn breytileiki er verulegur, á sumum svæðum rís sjávarborð mun hraðar en hnattræna meðaltalið, en á öðrum svæðum stendur það í stað eða jafnvel fellur[38].



Mynd 5.16 Afstæð sjávarstaða (m) í Reykjavík frá 1956–2014. Ekki er leiðrétt fyrir loftþrýstingi, sjávarhita eða landsigi. Einnig er sýnd besta lína, en halli hennar nemur 2.0 [1.4–2.6] mm á ári. Skyggða svæðið sýnir óvissumat á línunni. (Gögn frá Siglingasviði Vegagerðarinnar, sjá nánar umfjöllun í heimild 49.)

Svæðisbundin frávik geta stafað af nokkrum þáttum sem styttast að mestu út þegar hnattrænt meðaltal er reiknað. Í fyrsta lagi má nefna aflræna þætti, þ.e. breytingar á loftþrýstingi, vindi og hafstraumum sem geta aukið við hækkun á einum stað, en dregið úr henni á öðrum. Svæðisbundnar breytingar á eðlismassa sjávar (sérstaklega varmaþensla vegna hlýnunar, en í minna mæli vegna seltubreytinga) valda einnig breytingum á sjávarstöðu. Bráðnun jökla bætir vatni í heimshöfin, en bráðnunin hefur einnig áhrif á þyngdarsviðið í nágrenni jöklanna sem lækkar sjávarstöðu næst þeim en eykur hækkunina fjær[39]. Loks hefur staðbundið landris eða landsig áhrif á það hvort mælingar sýna hækkun eða lækkun sjávarborðs.

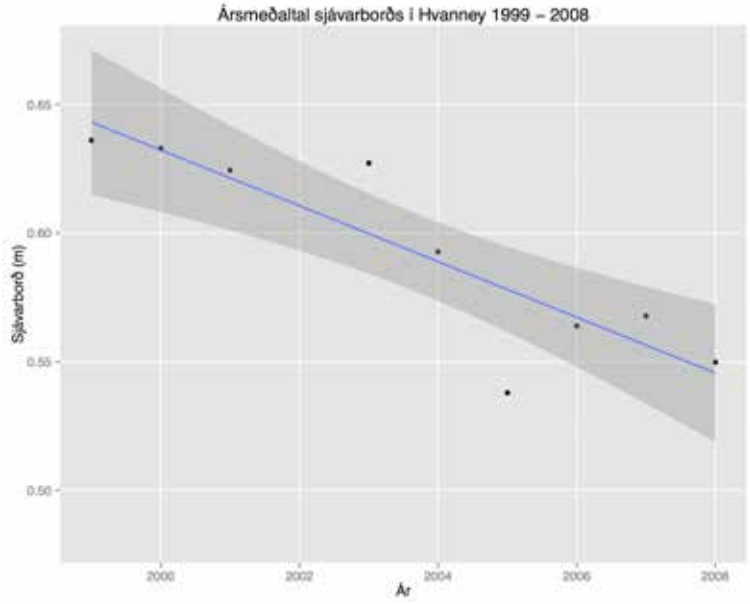
5.3.1 Sjávarstöðubreytingar við Ísland

Rannsóknir víða á Norður-Atlantshafi benda til þess að þar hafi hækkun sjávarstöðu hert á sér á 19. öld[40], en einnig sýna gögn frá strandsvæðum víða um heim að á fyrri hluta síðustu aldar hækkaði sjávarstaða hraðar en að meðaltali síðustu árþúsund[41].

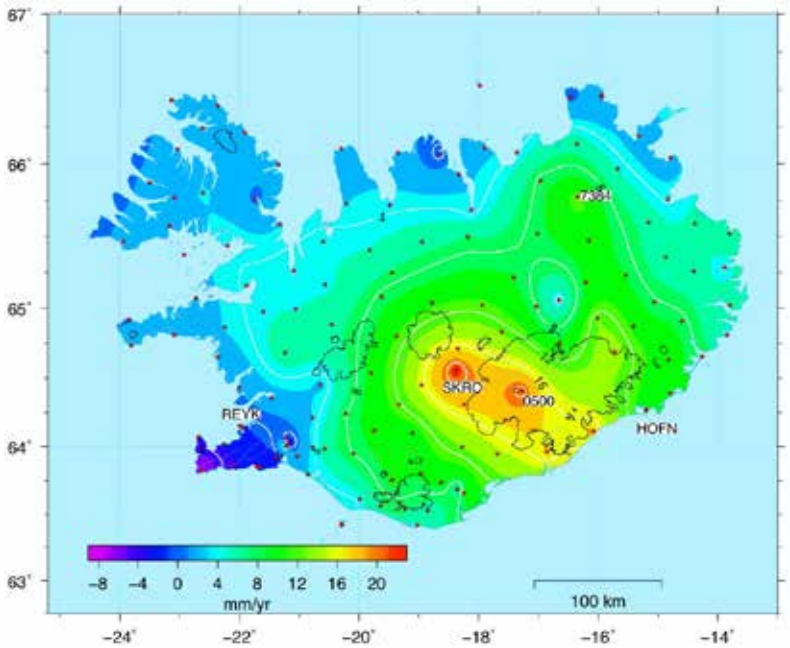
Ýmsar vísbendingar eru um sjávarstöðubreytingar við Ísland á síðari hluta nútíma. Rannsóknir á sjávarseti í Flóanum nærri Stokkseyri og Eyrarbakka og við Garðskagavita[42] benda til hárrar sjávarstöðu fyrir um 3200, 2800 og 2300 árum en lægri sjávarstöðu þess á milli, en einnig að í heildina hafi afstæð sjávarstaða á nokkrum svæðum hækkað um rúma tvo metra á 1000 ára tímabili frá því fyrir 3200 til 2200 árum síðan. Til að setja þetta í samhengi þá næmi þessi hækkun til jafnaðar um 20 cm á öld sem er sambærilegt við hnattræna hækkun á 20. öldinni.

Niðurstaða einnar fyrstu rannsóknar á sjávarstöðubreytingum á vestanverðu landinu var sú *„að landið hafi um langt skeið verið að smá síga og sjórinn að ganga á land fyrir sunnan Breiðafjörð og austur eftir Suðurlandi til Vestmannaeyja, en í norðanverðum Breiðafirði, Vesturlandi og umhverfis Húnaflóa hafi breyting sjávarhæðarinnar farið í gagnstæða átt, það lítil sem hún kann að hafa verið“*[43]. Hvað Vesturland varðar benda rannsóknir á setlagakjarna frá Viðarhólma á sunnanverðu Snæfellsnesi[44,45] til þess að sjávarstaða á Vesturlandi hafi lengst af breyst tiltölulega hægt á síðustu 2000 árum, en á tímabilinu reis sjávarstaða í heildina um 1.3 m sem samsvarar um 6.5 cm á öld. Á síðasta hluta tímabilsins hækkaði staðan þó hraðar og greining á síðustu 500 árum bendir til þess að hækkunarskeið hafi gengið yfir milli áranna 1620–1650, 1780–1850 og 1950–2000. Þegar hraði hækkunar var hvað mestur á þessum skeiðum er líklegt að hann hafi samsvarað um 30 cm á öld, sem er tæplega fimmfalt hraðar en árþúsundin þar á undan. Í heildina virðist sjávarstaða á síðustu 500 árum hafa hækkað um 0.6 m. Þessar niðurstöður eru í nokkuð góðu samræmi við niðurstöður rannsókna fyrir Norður-Atlantshafið.

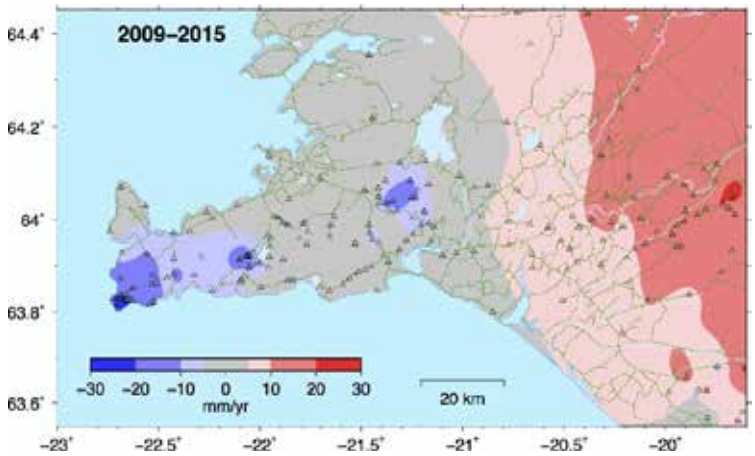
Lengsta mælirröð sjávarstöðu við Ísland er frá Reykjavík en þar hefur verið mælt frá árinu 1956. Mynd 5.16 sýnir ársmeðaltöl sjávarstöðu á þessum tíma[46], og ljóst er að sjávarstaða í Reykjavík hefur hækkað nokkuð. Halli bestu línu í gegnum punktasafnið sýnir að hækkunin nemur um 2.0 [1.4–2.6] mm á ári, eða um 20 [14–26] cm á öld[47]. Hækkunin er þó ekki jöfn, hún er meiri á fyrri hluta tímabilsins en síðari hluta þess. Sveiflur milli áratuga geta stafað af hita- og



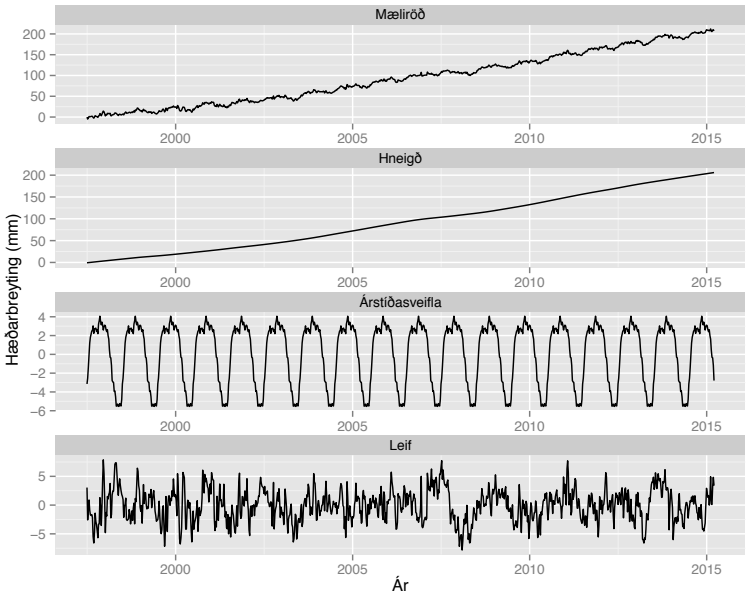
Mynd 5.17 Afstæð sjávarstaða (m) í Hvanney við Höfn í Hornafirði milli áranna 1999 og 2008. Sýnd eru ársmeðaltöl og besta lína. Halli línunnar er –11.0 [–6.3 til –15.8] mm á ári. Skyggða svæðið sýnir óvissumat á línunni. Ekki er leiðrétt fyrir loftþrýstingi, sjávarhita eða landsigi. (Gögn frá Siglingasviði Vegagerðarinnar, sjá nánar umfjöllun í heimild 49.)



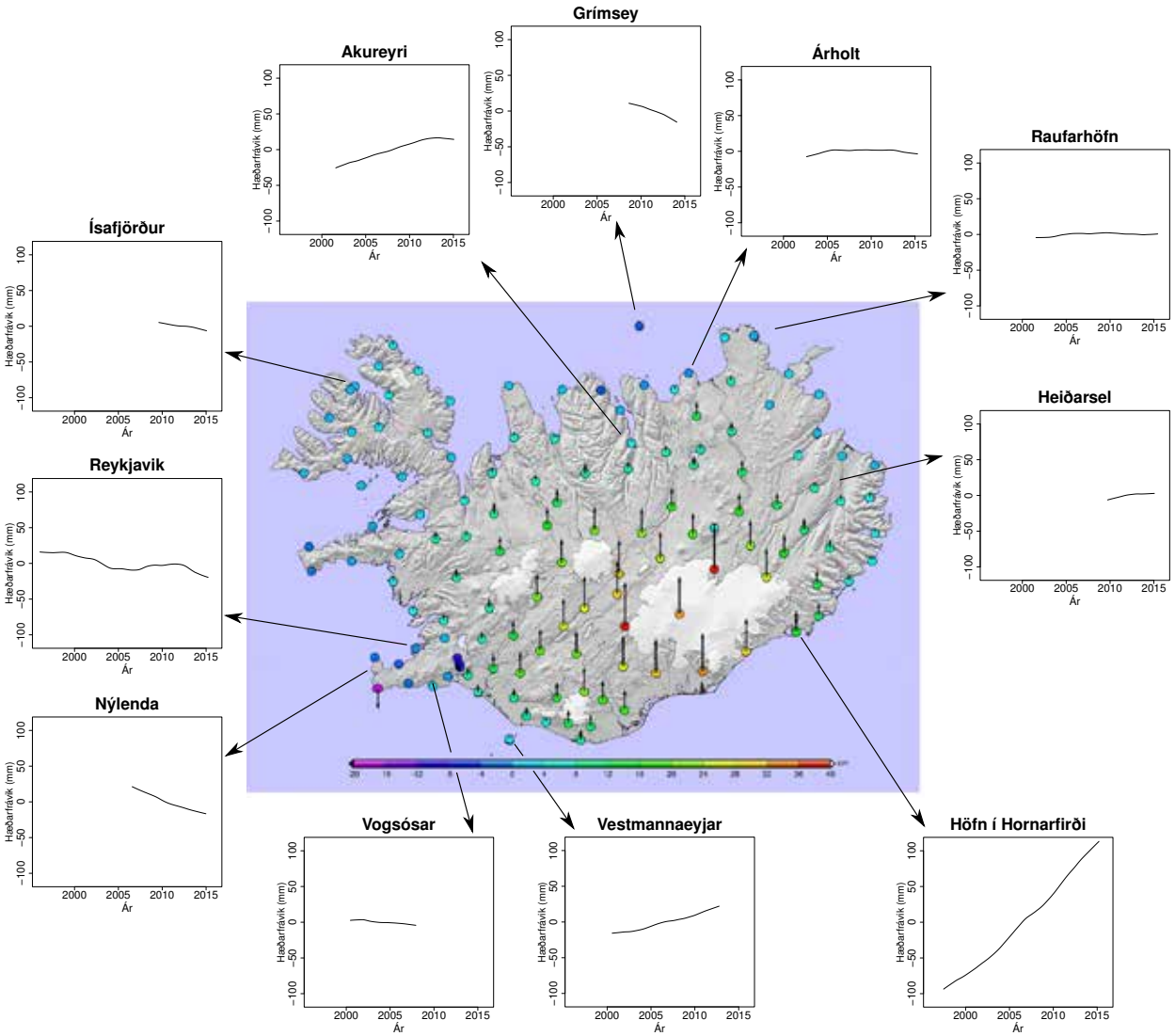
Mynd 5.18 Kort af lóðréttri hreyfingu lands á Íslandi fyrir tímabilið 1993 til 2004 byggt á GPS-mælingum. Tölur eru í mm á ári. (Sjá nánar heimild 50.)



Mynd 5.19 Lóðrétt hreyfing jarðskorpu SV-lands á tímabilinu 2009 til 2015, byggt á GPS mælingum. Breytingar í mm á ári. (Sjá nánar heimild 51.)



Mynd 5.20 Landhæðarbreytingar (mm) á Höfn í Hornafirði frá 1997 til 2015. Efst er mælirröðin en neðri myndirnar þrjár sýna skiptingu mæliraðarinnar í hneigð, árstíðasveiflu og leif (sjá nánar í texta). Athugið að lóðrétti ásinn er ekki sá sami á öllum myndum. (Gögn frá Veðurstofu Íslands, sjá nánar heimild 53.)



Mynd 5.21 Fyrir miðju: lóðréttar færslur á mælistöðvum grunnstöðvanets LMÍ á tímabilinu 2004 til 2016. Litir á punktum sýna hæðarbreytingu í mm, en einnig er tilfærslan sýnd með örvum. Línurit umhverfis: Niðurstöður frá GPS stöðvum nærri ströndinni en með þeim hefur verið mælt samfellt hluta tímabilsins 1996–2015. (Kort frá LMÍ, sjá heimild 54, GPS gögn frá Veðurstofu Ísland, sjá nánar heimild 53.)

loftþrýstibreytingum en gögnin á myndinni eru ekki leiðrétt fyrir hita og þrýstingi. Rannsóknir sýna að þótt tekið sé tillit til slíkra þátta verða ekki marktækar breytingar á langtímahækkun raðarinnar[48].

Nýleg greining á sjávarstöðu í Grindavík (fyrir tímabilið 1997 til 2015) bendir til þess að þar hækki sjávarstaða um 9 mm á ári[49]. Sjávarstaða fer þó ekki alstaðar hækkandi, því samkvæmt sömu rannsókn féll sjávarstaða í Hvanney við Höfn í Hornafirði. Mynd 5.17 sýnir fall sjávarstöðu í Hvanney áratuginn 1999 til 2008. Til jafnaðar nemur lækkun sjávarstöðu á myndinni 11.0 [6.3–15.8] mm á ári á þessu árabili.

5.3.2 Landhæðarbreytingar við Ísland

Þegar reynt er að rekja ástæður þess að sums staðar við Ísland rís sjávarborð en annars staðar fellur það skipta lóðréttar jarðskorpuhreyfingar máli. Niðurstöður úr GPS mælineti sýna að á tímabilinu 1993 til 2004 var lóðrétt hreyfing lands mjög ólík milli landshluta[50]. Mynd 5.18 sýnir samantekt á þessum niðurstöðum og sjá má verulegt landris inn til landsins og við suðausturströndina. Annars staðar á suðurströndinni og einnig við austurströnd landsins var nokkurt landris, en þó ekki jafnákaft og suðaustanlands. Við strandir norðanlands og vestan eru niðurstöður ekki jafnafgerandi, en á hluta Reykjanesskaga er verulegt landsig. Niðurstöður útreikninga benda til þess að landrisið við miðbik landsins og suðaustanlands stafi af þynningu jökla frá því í lok 19. aldar[50].

Landsig á Reykjanesskaga þarf ekki að koma á óvart, en þar er gliðnunarbelti á flekaskilum auk þess sem mjög staðbundið landssig getur fylgt jarðvarmavinnslu. Mynd 5.19 byggist á nýjum mælingum og sýnir ítarlegri mynd af jarðskorpuhreyfingu á suðvesturhorninu á síðustu árum[51]. Mesta landsigið er greinilega nærri jarðhitasvæðum í vinnslu, en víðast á Reykjanesskaganum er lóðrétt hreyfing lítil.

Samfelldar GPS mælingar eru nú gerðar á tugum staða á landinu á vegum nokkurra rannsókna- og vöktunaraðila. Samfelldar mæliraðir við ströndina eru þó færri, en tvær lengstu raðirnar eru frá 1996 (Reykjavík) og 1997 (Höfn í Hornafirði). Unnið hefur verið úr samfelldum GPS mælirröðum með svo kallaðri STL greiningu[52] sem gerir kleift að aðskilja hneigð mæliraðarinnar, árstíðasveiflu og slembikennda leif[53]. Mynd 5.20 sýnir niðurstöðu þessarar greiningar fyrir Höfn í Hornafirði. Efsta línuritið sýnir mælirröðina og augljóst er að eindregin hækkun einkennir hana. Næsta mynd sýnir langtímahneigð raðarinnar og hinar tvær sýna árstíðasveiflu og óreglulegar sveiflur. Þótt útslag árstíðasveiflu (um 10 mm) sé verulegt er það minna en landrisið, sem er til jafnaðar um 12 mm á ári. Ef grannt er skoðað kemur í ljós að hraði á landrisi hefur aukist á tímabilinu, fyrstu átta ár mælinga var landrisið rúmlega 8 mm á ári en síðustu átta ár er landrisið tæpir 14 mm á ári.

Á árinu 2016 luku Landmælingar Íslands og samstarfsaðilar þeirra endurmælingu á grunnstöðvanetinu. Kortið á mynd 5.21 sýnir landhæðarbreytingar á Íslandi frá 2004 til 2016 en umhverfis það er raðað niðurstöðum frá samfelldum GPS mælingum við ströndina[54]. Í grófum dráttum sýnir myndin landsig víða við ströndina vestanlands og við miðbik Norðurlands, en inn til landsins er landris. Landris er einnig á Norðvesturlandi og á hluta Norðausturlands. Annars staðar norðaustanlands og austan eru litlar landhæðarbreytingar en suðaustanlands og vestur með suðurströndinni er landris sem er ákafast næst jöklunum suðaustanlands. Tafla 5.6 sýnir nánari upplýsingar um landhæðarbreytingar á völdum stöðvum nærri ströndinni þar sem samfelldar GPS raðir eru nægilega langar. Orsakir landsigs fyrir miðju Norðurlandi (á austanverðum Tröllaskaga, á Flateyjarskaga og í Grímsey) eru ókunnar, sigið getur mögulega tengst flekahreyfingum, en ástæður þarf að rannsaka betur.

Haldist þessar breytingar stöðugar út öldina verður landris meira en metri við suðausturströndina, en annars staðar við suður- og austurströndina, og á Norðvesturlandi verður það á bilinu 10–40 cm. Á sama hátt og á sama tíma yrði landsig um vestanvert landið á bilinu 10–30 cm, víðast nær lægri mörkunum. Á stöku stað gæti landsigið orðið meira, þetta á sérstaklega við afmörkuð svæði á Reykjanesi, á norðaustanverðum Tröllaskaga og í Grímsey. Loks ber að hafa í huga að víða á Íslandi eru bæir byggðir á seteyrum en þar getur land sigið umfram hreyfingu berggrunnsins í nágrenninu, m.a. af völdum fargs vegna byggðar, og eru slíkar landhæðarbreytingar ekki inni í þessum tölum[55]

5.3.3 Spár um hnattræna hækkun sjávarborðs

Í samantektarskýrslu Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC) eru teknar saman spár um hnattrænar sjávarstöðubreytingar á komandi öld[56]. Hvað varðar hlýnun sjávar, breytingar á

Staður	Tímabil	Landhæðarbreyting (mm/ári)
Reykjavík	1996–2015	-1.49 [-1.56– -1.42]
Ísafjarðarbær	2009–2015	-1.82 [-2.08– -1.56]
Siglufjörður	2008–2012	-2.32 [-2.65– -2.00]
Grímsey	2008–2014	-4.72 [-4.97– -4.48]
Akureyri	2001–2015	3.39 [3.31–3.47]
Flatey á Skjálfanda	2007–2014	-1.47 [-1.65– -1.30]
Árholt á Tjörnesi	2002–2015	0.15 [0.07–0.23]
Kópasker	2007–2014	0.05 [-0.14–0.24]
Raufarhöfn	2001–2015	0.27 [0.22–0.33]
Heiðarsel á Fljótsdalshéraði	2009–2015	1.64 [1.39–1.88]
Höfn í Hornafirði	1997–2015	12.03 [11.96–12.11]
Vestmannaeyjar	2000–2012	3.18 [3.12–3.24]
Vogsósar í Selvogi	2000–2007	-1.04 [-1.18– -0.91]
Nýlenda á Reykjanesi	2006–2014	-4.62 [-4.71– -4.53]

Tafla 5.6 Landhæðarbreytingar á undanförnum árum á stöðum þar sem samfelldar GPS mælingar fara fram. Að Heiðarseli undanskildu eru allar stöðvarnar nærri ströndinni og þeim er raðað í röð réttsælis umhverfis landið frá Reykjavík að Nýlendu (vestast á Reykjanesi). Stöðvarnar voru valdar með tilliti til lengdar óslitinna mælirada og fjarlægðar frá sjó og eru sumar þeirra á Mynd 5.21. Tölur eru reiknaðar sem halli bestu línu gegnum gagnasafnið fyrir hvern stað, eftir að búið er að fjarlægja árstíðasveifluna með STL greiningu. Þær eru í mm á ári og neikvæðar tölur merkja landsig en jákvæðar landris (gögn frá Veðurstofu Íslands, sjá nánar heimild 53).

loftþrýstingi, vindi og hafstraumum byggjast þessar spár á útreikningum margra loftslagslíkana fyrir fjórar sviðsmyndir (RCP2.6–8.5)[57]. Niðurstöður loftslagslíkananna eru síðan notaðar til þess að reikna líklega bráðnun jökla og ísbreiða. Loks eru samanlagðar

Sviðsmynd	Hnattræn hækkun frá 1986–2005 til 2081–2100 (m)	Hækkun árið 2100 (m)
RCP2.6	0.40 [0.26–0.55]	0.44 [0.28–0.61]
RCP4.5	0.47 [0.32–0.63]	0.53 [0.36–0.71]
RCP6.0	0.48 [0.33–0.63]	0.55 [0.38–0.73]
RCP8.5	0.63 [0.45–0.82]	0.74 [0.52–0.98]

Tafla 5.7 Hnattræn hækkun sjávarborðs (m) samkvæmt fjórum sviðsmyndum IPCC. Fyrri dálkurinn ber saman meðaltöl tveggja tímabila, en sá síðari sýnir hækkun frá meðaltali 1986–2005 til ársins 2100. Sjá einnig mynd 3.7.

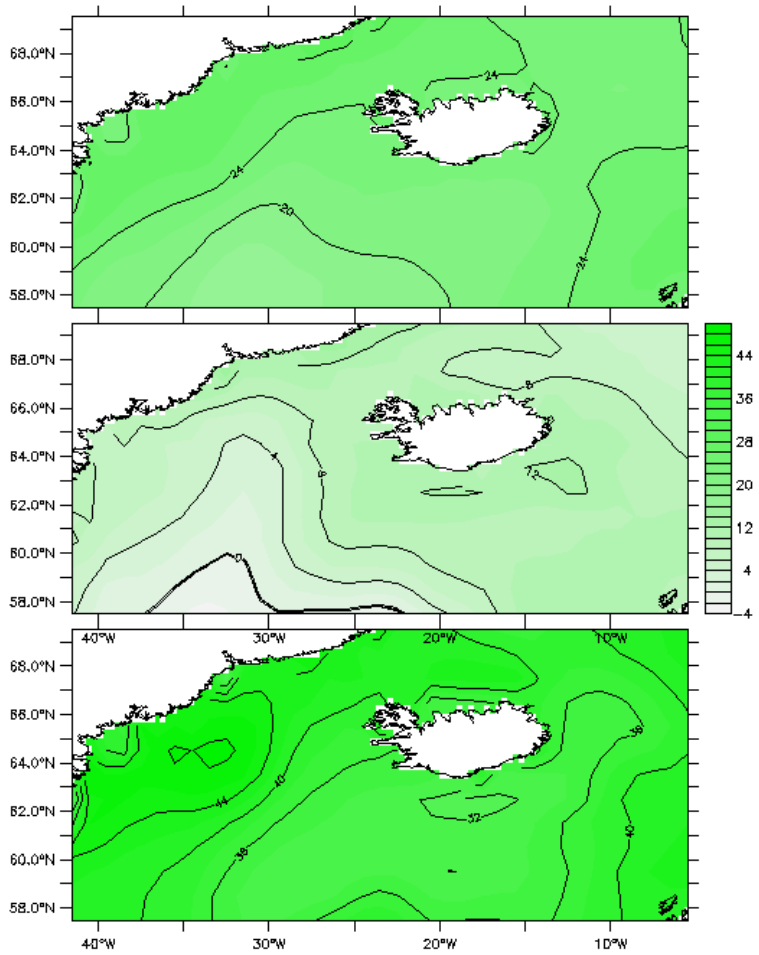
niðurstöður loftslags- og íslíkana notaðar til þess að leggja mat á líklega hækkun sjávarstöðu. Mynd 5.27 sýnir samantekt á hækkun sjávarstöðu sem hlutfall af hnattrænni hækkun samkvæmt þessum útreikningum og tölulegar upplýsingar eru sýndar í töflu 5.7.

Í hlýjustu sviðsmyndinni (RCP8.5) er hnattræn hækkun sjávarstöðu við lok 21. aldar á bilinu 52 til 98 cm en í þeirri köldustu (RCP2.6) er hækkunin 28 til 61 cm. Í hinum sviðsmyndunum er hækkun sjávarstöðu 36–71 cm (í RCP4.5) og 38–73 cm (í RCP6.0).

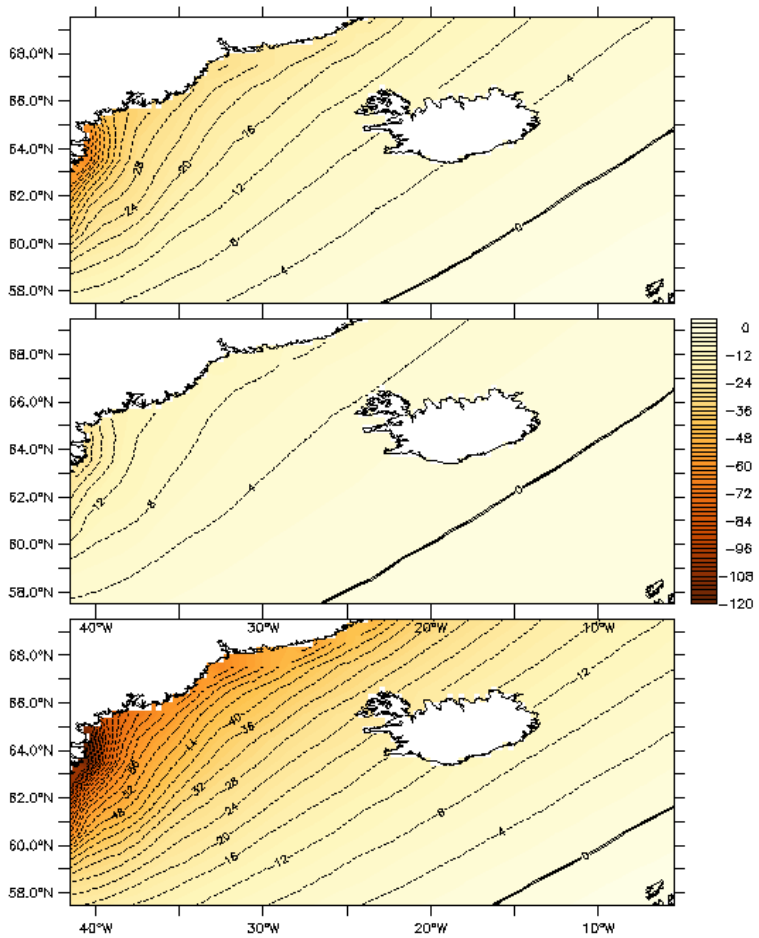
Tafla 5.7 byggist á niðurstöðum eðlisfræðilegra líkana. Tölfræðilíkön sem nota samband hnattrænna breytinga í hita og sjávarstöðu hafa einnig verið notuð til þess að spá fyrir um hækkun sjávarstöðu[56]. Í sumum þessara tölfræðilegu líkana er spáð mun meiri hækkun, eða rúmlega metra, í sviðsmynd RCP4.5.

5.3.4 Svæðisbundnar breytingar á sjávarstöðu í spám IPCC

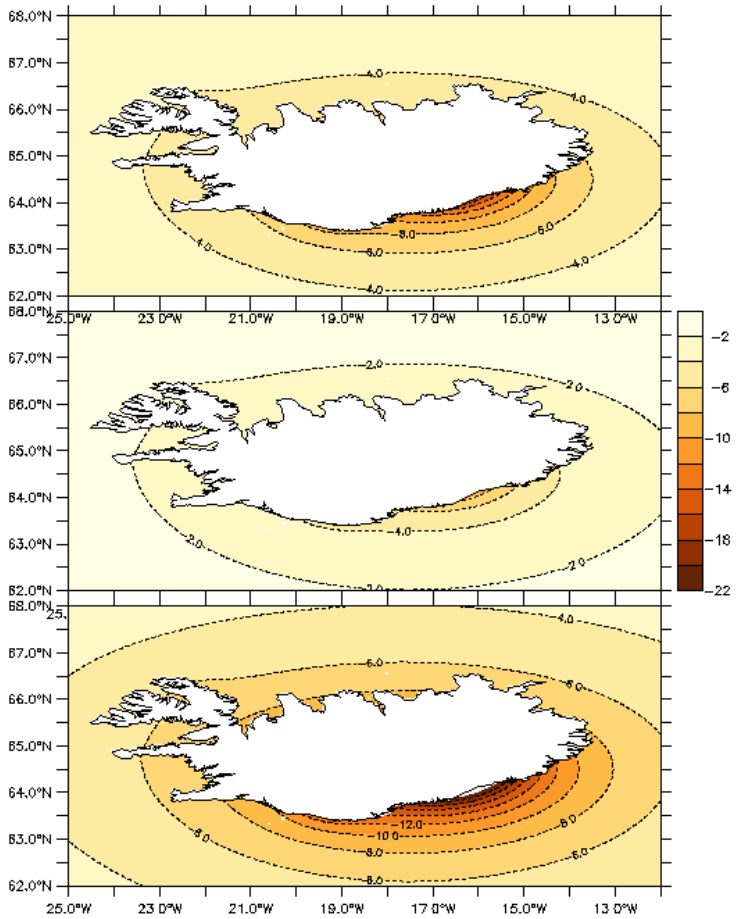
Til þess að leggja mat á svæðisbundnar breytingar á sjávarstöðu þarf að taka tillit til þeirra þátta sem valda svæðisbundum frávikum og minnst var á hér að framan. Til þess að sýna þessi áhrif verður í myndum notast við sviðsmynd RCP4.5 (nokkur hlýnun). Til að skoða breytingar á sjávarstöðu vera meðaltöl tveggja tímabila, 1985–2005 og 2081–2100 reiknuð og meðaltal fyrra tímabilsins dregið frá því síðara. Mynd 5.22 byggist á niðurstöðum 21 loftslagslíkans og sýnir áhrif aflrænna þátta og breytinga á eðlismassa (aðallega varmaþenslu) fyrir norðanvert Norður-Atlantshaf[58]. Efsta myndin sýnir kort af meðalhækkun en hinar



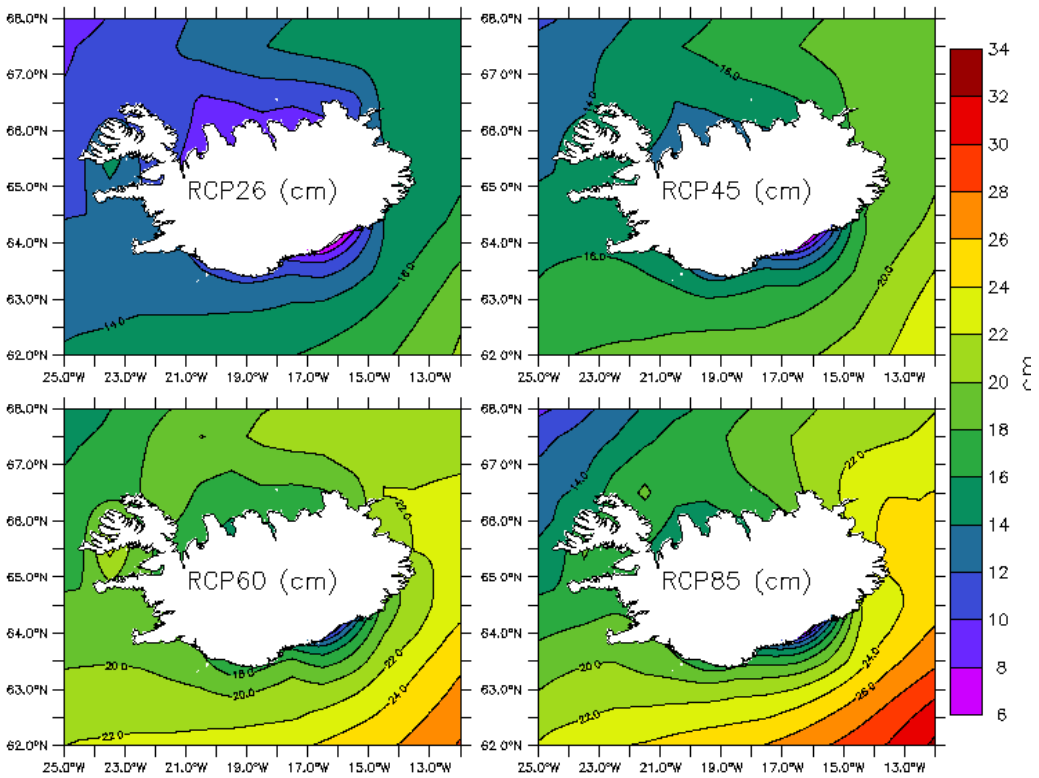
Mynd 5.22 Hækkun sjávarborðs í sviðsmynd RCP4.5 á Norður-Atlantshafssvæðinu vegna aflrænna þátta og breytinga á eðlismassa sjávar (aðallega varmaþenslu). Sýnd er breyting (í cm) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100. Efsta myndin sýnir meðaltal 21 loftslagslíkans, hinar myndirnar sýna neðri og efri vikmörk áhrifa aflrænna þátta. Vikmörkin eru reiknuð þannig að 5–95% af dreifingu gildanna liggi á milli neðri og efri marka. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)



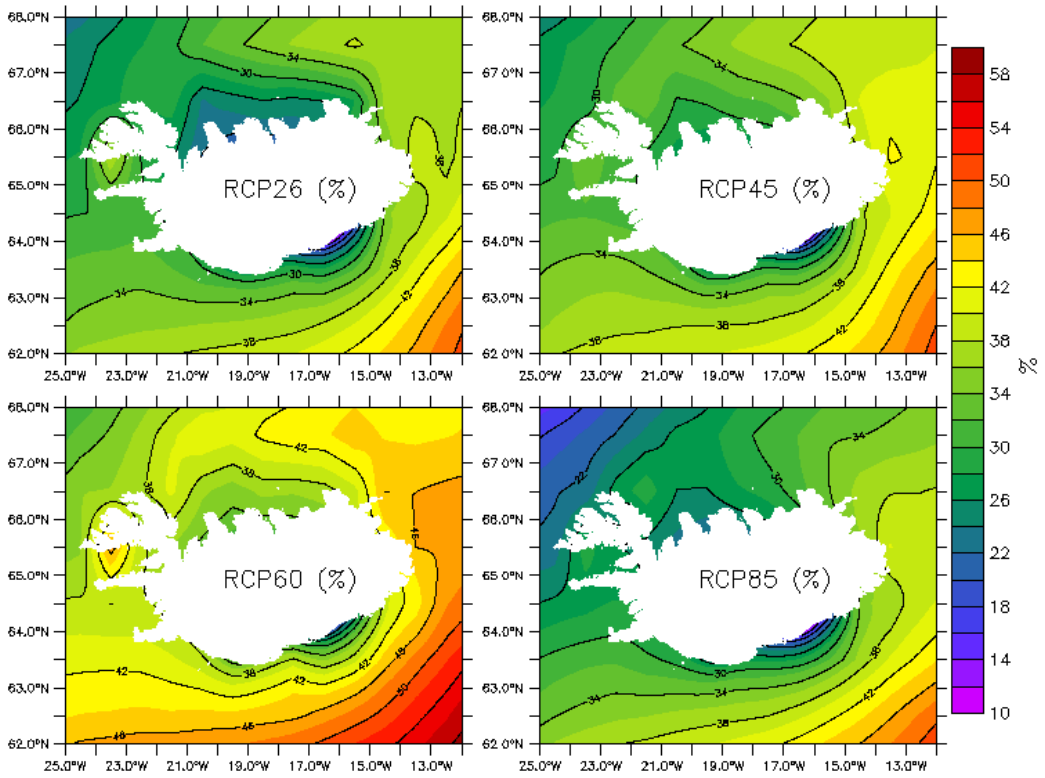
Mynd 5.23 Áhrif massataps ísbreiða á Grænlandi og Suðurskautslandinu á sjávarstöðu nærri Íslandi í sviðsmynd RCP4.5. Ráðandi þáttur á því svæði sem myndin sýnir er fingrafar bráðnunar íshvelsins á Grænlandi, þ.e. áhrif taps ísmassa Grænlandsjökuls á þyngdarsvið jarðar. Sýndar eru breytingar (í cm) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100. Efsta myndin sýnir meðaltal 21 loftslagslíkans, hinar myndirnar sýna neðri og efri vikmörk fingrafarsins. Vikmörkin eru reiknuð þannig að 5–95% af dreifingu gildanna liggi á milli neðri og efri marka. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)



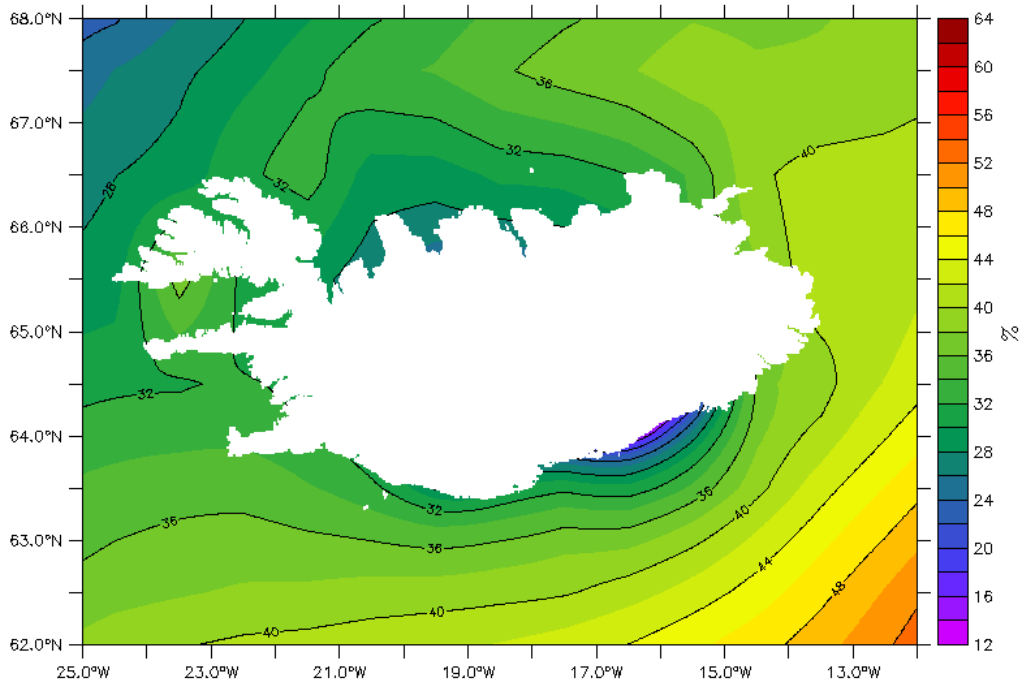
Mynd 5.24 Fingrafar massataps íslenskra jökla á sjávarstöðu nærri Íslandi í sviðsmynd RCP4.5. Myndin er byggð á gögnum frá IPCC sem hafa verið lagfærð eins og lýst er í texta. Sýndar eru breytingar (í cm) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100. Efsta myndin sýnir meðalfrávik, neðri myndirnar sýna efri og neðri vikmörk fingrafarsins. Vikmörkin eru reiknuð þannig að 5–95% af dreifingu gildanna liggi á milli neðri og efri marka. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)



Mynd 5.25 Sjávarstöðubreytingar (í cm) umhverfis Ísland frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100, í fjórum sviðsmyndum IPCC. Myndin sýnir summu mynda 5.9 til 5.11. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)



Mynd 5.26 Sjávarstöðubreytingar umhverfis Ísland sem hlutfall (%) af meðaltali hnattrænna breytinga frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100 í fjórum sviðsmyndum IPCC. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)



Mynd 5.27 Meðaltal hlutfallslegra breytinga í fjórum sviðsmyndum IPCC. Tölur eru prósentur af hnattrænni meðalhækkun sjávarstöðu. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)

myndirnar sýna óvissuna, þ.e. efri (95%) og neðri (5%) vikmörk. Að meðaltali er hækkunin við Ísland í þessari sviðsmynd (RCP4.5) um 21–22 cm á tímabilinu, en fyrir neðri mörk óvissubilsins sýnir kortið um 9–11 cm við landið (mynd 5.22, miðjumynd) og á bilinu 35–40 cm fyrir efri mörkin landið (mynd 5.22, neðsta mynd).

Til þess að reikna áhrif loftslagsbreytinga á jökla og ísbreiðurnar á Grænlandi og á Suðurskautslandinu eru notuð sérstök líkön fyrir jökla og ísbreiður. Þessi líkön eru notuð til að kvarða niðurstöður loftslagslíkana svo nota megi þær til þess að reikna líklegt massatap[59]. Mynd 5.23 sýnir hvaða áhrif massatap ísbreiða mun hafa á sjávarstöðu nærri Íslandi. Fingrafar massataps Grænlandsjökuls yfirgnæfir aðra þætti á myndinni, en það hefur áhrif til lækkunar sjávarstöðu við landið um –7±3 cm, mest við Vestfirði en minnst við Suðausturland. Ef skoðuð eru mörk 90% óvissu sést að útslag og halli fingrafarsins er meiri í efri mörkum þeirra (–18±8 cm) en mun minni í neðri óvissumörkum (–2.5±1.5 cm).

Gögn IPCC um fingrafar líklegrar jöklabráðnunar á Íslandi hafa ónóga upplausn til þess að staðsetja rétt jökla á Íslandi og fingrafar líklegs massataps jökla landsins er því ekki trúverðugt[60]. Til að lagfæra þetta var fingrafar jöklabráðnunar við Ísland reiknað í meiri upplausn þannig að jöklar væru rétt staðsettir. Notast var við sama heildarmassatap jökla á landinu og í sviðsmyndum hjá IPCC, en því dreift jafnt yfir alla jökla landsins[61]. Mynd 5.24 sýnir leiðrétt fingrafar líklegrar jöklabráðnunar á Íslandi. Ef suðurströnd landsins er undanskilin veldur jökulbráðnunin að meðaltali um 4 cm lækkun á sjávarstöðu. Við suður- og suðaustur-ströndina er lækkunin meiri og er um 14 cm þar sem hún er mest. Ef skoðuð eru mörk 90% óvissu sést að við suður- og suðausturströndina er lækkunin á bilinu 8 til 20 cm en annars staðar 2–8 cm.

Landshluti	Landhæðar-breyting (cm)	Hækkun sem hlutfall af hnattrænni	Hnattræn hækkun 50 cm	Hnattræn hækkun 75 cm	Hnattræn hækkun 100 cm
			Staðbundin hækkun sjávarstöðu (cm)		
Suðvesturland að Norðvesturlandi	–20 til –10	30 til 34 %	25 til 37	33 til 45	40 til 54
Norðvestanlands og innarlega í fjörðum norðanlands	10 til 30	28 til 30 %	–16 til 5	–9 til 13	–2 til 20
Austanverður Tröllaskagi að Flateyjarskaga	–30 til –10	28 til 30%	24 til 45	31 til 53	38 til 60
Skjálfandaflói og Öxarfjörður	0 til 20	30% til 32%	–5 til 16	3 til 24	10 til 32
Melrakkaslétta að Langanesi	0 til 10	32 til 38%	6 til 19	14 til 29	22 til 38
Austurland	0 til 20	38 til 40%	–1 til 20	9 til 30	18 til 40
Suðausturland	100 til 200	20 til 28%	–190 til –86	–185 til –79	–180 til –72
Suðurland	20 til 40	30 til 32%	–25 til –4	–18 til 4	–10 til 12
Sunnan- og vestanverður Reykjanesskagi	–30 til –10	32 til 34%	26 til 47	34 til 56	42 til 64

Tafla 5.8 Sjávarstöðubreytingar (cm) eftir landshlutum að gefnum sviðsmyndum um hnattræna hækkun og að viðbættum lóðréttum landhreyfingum. Hækkun sem hlutfall af hnattrænni hækkun og landhæðarbreytingar byggjast á mynd 5.27 og töflu 5.6, og gert er ráð fyrir að landris og landsig haldi áfram á sama hátt út öldina. Í dálkum fyrir landsig og hlutfallslega hækkun endurspeglar talnabilið dæmigerð gildi á viðkomandi svæði, í dálkunum fyrir staðbundna hækkun sýnir talnabilið mestu og minnstu sjávarstöðubreytingu sem hægt er að fá með tölunum í hinum tveimur dálkunum. ***Talnabilið er því ekki óvissumat.*** *Nánar er fjallað um óvissumat í grein 5.3.7 og þar er rakið að skekkja vegna óvissu um hlutfall bráðnunar á Suðurskautslandi og Grænlandi í hnattrænni hækkun getur numið allt að 50 cm sem legðist þá við tölurnar í töflunni.*

Ef breytingarnar á myndum 5.22 til 5.24 eru lagðar saman fæst mat á líklegri breytingu sjávarstöðu. Niðurstaða þessa er sýnd á mynd 5.25, bæði fyrir sviðsmynd RCP4.5 og einnig hinar þrjár sviðsmyndirnar. Í köldustu sviðsmyndinni hækkar sjávarstaða um 6–15 cm en um 10–20 cm í þeirri hlýjustu. Í öllum sviðsmyndum er hækkunin minnst suðaustanlands, þar sem áhrifa jöklabráðnunar á Íslandi gætir, hækkunin er mest austast á landinu (þar sem áhrif fingrafars Grænlandsjökuls eru minni). Vestanlands og norðan er hækkunin svipuð, í kaldari sviðsmyndunum er hækkunin norðan til 2–4 cm minni, en um 2 cm meiri í þeim hlýrri.

Mynd 5.26 sýnir sjávarstöðubreytingar við Ísland sem hlutfall af hnattrænum breytingum í sviðsmyndunum fjórum (sjá töflu 5.7). Hlutfallsleg hækkun er mjög áþekk í sviðsmyndunum fjórum og mynd 5.27 sýnir meðaltal þeirra. Líta má á myndina sem samantekið mat á líklegum svæðisbundnum breytileika á sjávarstöðuhækkun við strendur landsins. Vestanlands er hækkun sjávarstöðu rúmlega 30% af hnattrænni hækkun, norðanlands er hækkunin tæplega 30%, en eykst austur með landinu og er um 40% austast á landinu. Minnst er hækkunin suðaustanlands, eða 15–20% af hnattrænni hækkun. Hlutfallið umhverfis landið er að meðaltali um 33%.

5.3.5 Samantekt á líklegum sjávarstöðubreytingum við Ísland á 21. öldinni

Í útreikningum á sjávarstöðuhækkun hér að framan var ekki tekið tillit til landhæðarbreytinga. Með því að nota upplýsingar frá mynd 5.27 og töflu 5.6 má leggja mat á staðbundnar breytingar á strandsvæðum umhverfis landið[62]. Tafla 5.8 sýnir niðurstöður slíks útreiknings fyrir nokkur strandsvæði og þrjár ólíkar sviðsmyndir um sjávarstöðuhækkun. Sú lægsta þeirra samsvarar líklegri hækkun í sviðsmyndum RCP4.5 og RCP6.0, en sú hæsta er valin með tilliti til þess að tölfræðileg líkön benda til þess að hnattræn hækkun sjávarstöðu geti orðið 1 m eða meira.

Tafla 5.8 sýnir að á Suðurlandi og Suðausturlandi verður sjávarstöðuhækkun vart til vandræða, jafnvel þó að til verulegrar hnattrænnar hækkunar komi. Í öðrum landshlutum getur hækkunin orðið nokkur, og þar sem landsigs gætir nemur það tugum cm, jafnvel þó að hnattræn hækkun verði ekki nema hálfur metri. Slík hækkun er með því mesta sem gögn frá síðustu árþúsundum sýna. Nálgist hnattræn hækkun einn metra verður sjávarstöðuhækkun óvenjumikil í sögulegu tilliti á öllum svæðum þar sem landris er ekki verulegt.

Rétt er að hafa í huga varnagla sem slá má við töflu 5.8. Í fyrsta lagi ríkir óvissa um það hvort mælingar á landhæðarbreytingum á síðustu áratugum endurspegli líklegar breytingar á öldinni. Í öðru lagi er veruleg óvissa í spám um hækkun sjávarstöðu við Ísland (sjá grein 5.3.7 um meðhöndlun óvissu). Loks er mikilvægt að hafa í huga að hnattræn hækkun mun halda áfram á næstu öldum og árabilið 2081 til 2100 (sem mynd 5.27 byggist á) er einungis varða á þeirri leið.

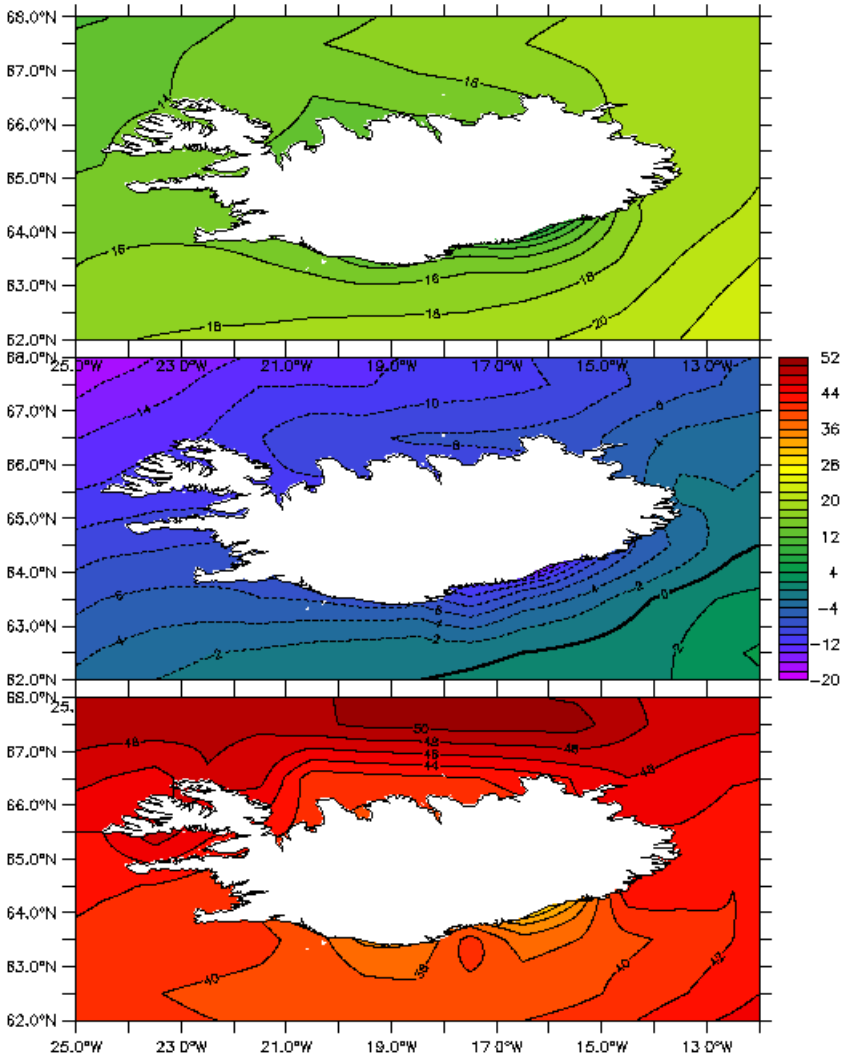
5.3.6 Horfur eftir 2100

Í skýrslu Milliríkjanefndar er hækkun sjávarstöðu á næstu öldum eftir 2100 rædd. Fram kemur að það sé nánast öruggt að hnattræn sjávarborðshækkun muni halda áfram eftir 2100, en umfang hennar verði mjög háð losun gróðurhúsalofttegunda. Ef losun verður mikil gæti hækkunin numið meira en metra á öld til ársins 2500, í hógværari losunarsviðsmyndum er hækkunin einungis rúmir tveir metrar á sama tíma[63].

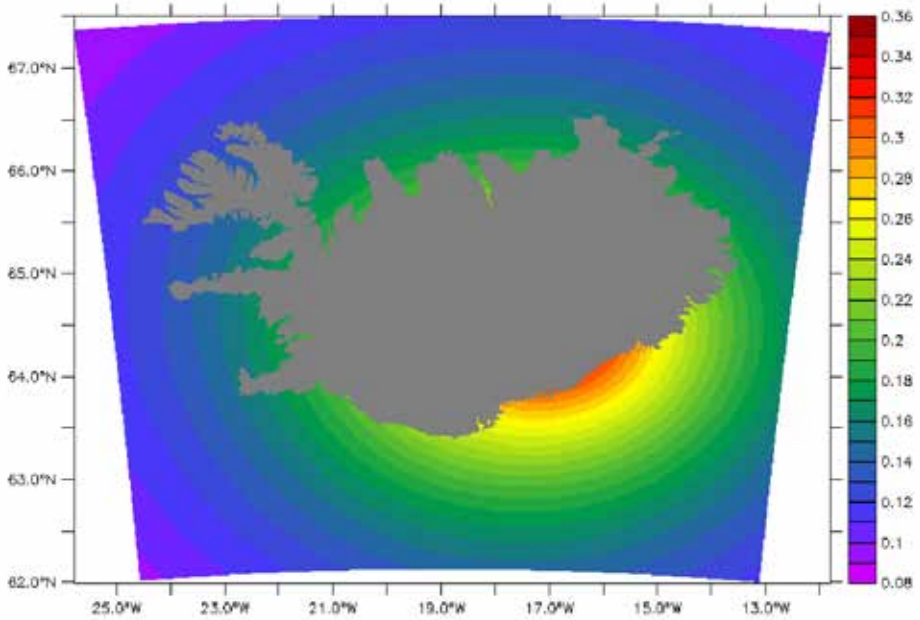
Rannsóknir síðan skýrslan kom út benda til þess að hækkun sjávaryfirborðs verði líklega meiri en þar kemur fram. Vitað er að á síðasta hlýskeiði (fyrir 130 til 115 þúsund árum) var hnattræn sjávarstaða um 5–10 m hærri en hún er nú[64]. Líklega var framlag Grænlandsjökuls til þessarar hækkunar einungis um 2 m sem þýðir að stóran hluta sjávarstöðuhækkunarinnar verður að útskýra með massatapi ísbreiðunnar á Suðurskautslandi[65]. Nýlegri líkanreikningar benda til þess að ísbreiðan á vestanverðu Suðurskautslandinu geti verið óstöðugri en áður var talið og geti lagt meira en metra til sjávarstöðuhækkunar á þessari öld og marga metra á næstu öldum[66].

Síðan skýrsla IPCC kom út hafa rannsóknir sýnt að óafturkræft hrun jökla við Amundsen-flóa á vestanverðu Suðurskautslandinu sé líklega hafið, en þar hefur þynning jökla og hlýnun sjávar leitt til þess að sífellt hraðar kelfir af jöklinum[67]. Hætta er á að þetta leiði til hruns á stórum hluta vestanverðs Suðurskautslandsins sem myndi að lokum hækka sjávarstöðu um meira en 3 metra[68]. Þó að slík atburðarás tæki mörg hundruð ár myndi hún valda langtímahækkun sjávarstöðu á við Ísland[69].

Nýlegar mælingar á sjávarstöðu benda til þess að á



Mynd 5.28 Sjávarstöðubreytingar í sviðsmynd RCP4.5, meðaltal og vikmörk. Sýndar eru sjávarstöðubreytingar (í cm) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100. Efsta myndin sýnir meðaltal allra líkana (sama og fyrir RCP4.5 á mynd 5.12) en hinar tvær myndirnar sýna vikmörkin. Vikmörkin eru reiknuð þannig að 5–95% af dreifingu gildanna liggi á milli neðri og efri marka. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og greinar 5.3.7 um meðhöndlun óvissu og 5.3.8 um aðferðir.)



Mynd 5.29 Áhrif aðlögunar að flotjafnvægi á sjávarstöðu við Ísland. Tölur eru í mm á ári. Myndin sýnir áhrif þess að bæta 5.5 Gt af massa við skorpuna undir Íslandi. Gert er ráð fyrir að kort af landrisi á Íslandi endurspegli dreifingu viðbótarmassans. (Sjá nánar heimild 74.)

undanförnum árum hafi hækkað örar í sjónum og því er ólíklegt að þær sviðsmyndir IPCC sem sýna minnstu sjávarstöðuhækkun gangi eftir[69]. Af framanskráðu má einnig vera ljóst að gera þarf ráð fyrir að sjávarstöðuhækkun muni halda áfram á næstu öldum. Ef framlag Suðurskautslandsins verður hlutfallslega meira en Grænlandsjökuls mun sjávaryfirborð við Ísland hækka meira en myndir 5.26 og 5.27 gefa til kynna. Þessi óvissuþáttur er ræddur frekar í næstu grein.

5.3.7 Meðhöndlun óvissu

Nokkrar mismunandi leiðir eru til þess að leggja mat á óvissu tengda sjávarstöðubreytingum nærri Íslandi. Eins og myndir 5.22 til 5.24 sýna er veruleg óvissa um sjávarstöðubreytingar vegna einstakra þátta sömu sviðsmyndar, og mynd 5.25 sýnir einnig nokkurn mun milli sviðsmynda. Fyrir hverja sviðsmynd á mynd 5.25 er því óvissa um meðalhækkunina. Mynd 5.28 sýnir þetta nánar fyrir sviðsmynd RCP4.5, efsta myndin sýnir meðalhækkunina (sama og sviðsmynd RCP4.5 á mynd 5.25), en neðri myndirnar tvær sýna mörk 95% óvissubilsins[70]. Það bil sem óvissan spannar við landið er að meðaltali 49 cm og þar sem meðalhækkunin er nærri 16 cm sýna lægri óvissumörkin sjávarstöðu falla við landið. Þessi spönn er einnig í samræmi við aðrar niðurstöður um óvissu í mati á svæðisbundinni hækkun sjávarstöðu[71].

Færa má fyrir því rök að óvissan sé mjög líklega ósamhverf, þ.e. ekki megi skrifa hana sem 16±25 cm. Í fyrsta lagi gerir útreikningurinn sem mynd 5.28 byggist á ráð fyrir að óvissa aflrænna þátta og massataps jökla og íshvela séu óháðar stærðir. Þessi forsenda er ekki alls kostar rétt á svæðinu umhverfis Ísland, þar sem litlar líkur eru til þess að varmaþensla og fingrafar Grænlandsjökuls lækki (eða hækki) sjávarstöðu samtímis. Kólnun hefði minni varmaþenslu í för með sér sem myndi lækka mat á líklegri sjávarstöðuhækkun, en jafnframt drægi líklegast úr fingrafari bráðnunar Grænlandsjökuls sem myndi auka mat á sjávarstöðuhækkun.

Hvað efri mörk óvissubilsins varðar hefur á síðustu árum komið í ljós að bráðnun ísbreiða getur lagt meira til sjávarstöðubreytinga á næstu öldum en ætla má út frá skýrslu IPCC. Fyrir sjávarstöðu við Ísland skiptir miklu hvort ísbreiða Suðurskautslandsins tapi hlutfallslega meiri massa en íshvel Grænlands. Sviðsmyndareikningar, þar sem hlutfall bráðnunar frá Suðurskautslandinu er aukið en að sama skapi dregið úr massatapi á Grænlandi, sýna að þetta gæti aukið hækkun sjávarstöðu við Ísland um allt að 50 cm[71], sem legðist þá við tölur um staðbundna hækkun í töflu 5.8.

Loks er mikilvægt að hafa í huga að umræða um óvissu á hækkun sjávarstöðu er ekki bara spurning um hækkun, heldur einnig spurning um tíma. Hugsum okkur stað þar sem gert er ráð fyrir að sjávaryfirborð hækki um 50 cm á öldinni með óvissubilinu 35 til 75 cm. Ef reyndin verður 75 cm hækkun á öldinni mun 50 cm hækkun hafa verið náð eftir 66 ár, en ef langtímahækkun verður 35 cm á öld er 50 cm hækkun náð eftir 140 ár. Einnig er vert að hafa grein 5.3.6 í huga, en þar kemur fram að sjávarstöðubreytingar halda áfram öldum saman.

5.3.8 Aðferðir

Gögnin sem notuð eru í þessum kafla fylgja 13. kafla skýrslu IPCC (2013)[72]. Upprunalegu gögnin voru á einnar gráðu neti sem var ófullnægjandi fyrir Ísland. Þau voru því brúuð á einnar bogmínútu net. Fyrir hafsvæðið umhverfis Ísland (25-12°V og 62-68°N) lækkaði fingrafar jöklabráðnunar sjávarstöðu í lok þessarar aldar að meðaltali um tæpa 4.8 cm í sviðsmynd RCP4.5. Metið var að um 20% af því stafaði frá strandjöklum utan meginísbreiðunnar á Grænlandi en afgangurinn af þessari lækkun væri vegna massaminnkunar íslenskra jökla. Reiknað var út hvað þetta fingrafar samsvaraði mikilli bráðnun íslenskra jökla og var niðurstaðan 1550 Gt. Þetta er helmingur þess massa sem nú er bundinn í íslenskum jöklum (um 3100 Gt) og samsvarar 152 m meðallækkun yfirborðs jöklanna. Til samanburðar myndi núverandi bráðnun íslenskra jökla lækka yfirborð þeirra um 100 m að meðaltali til loka aldarinnar og er þessi tala því ekki ótrúverðug ef loftslag hlýnar enn frekar. Með því að bera þessa niðurstöðu saman við meðaltal fingrafars jökulbráðnunar í hinum sviðsmyndunum var hægt að reikna hversu mikið massatap var að baki fingrafari hverrar sviðsmyndar. Niðurstöðuna má sjá í töflu 5.9.

Betrumbætt fingrafar jökulbráðnunar var síðan reiknað fyrir hvert tilvik í töflunni með því að dreifa jöklabráðnuninni jafnt yfir alla jökla landsins og reikna breytingar á þyngdarsviði sem þessi bráðnun veldur. Dæmi um niðurstöðu má sjá á mynd 5.24. Það er mikilvægt að hafa í huga að þessar niðurstöður byggjast ekki á líkanreikningum á íslenskum jöklum heldur eru

Tilvik Sviðsmynd, lággildi (L), miðgildi (M) og hágildi (H)	Meðallækkun íslenskra jökla (m)
RCP2.6 L	55
RCP2.6 M	126
RCP2.6 H	198
RCP4.5 L	79
RCP4.5 M	152
RCP4.5 H	300
RCP6.0 L	79
RCP6.0 M	151
RCP6.0 H	228
RCP8.5 L	112
RCP8.5 M	196
RCP8.5 H	287

Tafla 5.9 Bráðnun íslenskra jökla (m) reiknuð frá meðaltali fingrafars jökulbráðnunar umhverfis Ísland. Tölurnar í töflunni eru reiknaðar til þess að lagfæra dreifingu fingrafars jökulbráðnunar við Ísland í skýrslu IPCC. Þær eru ekki fengnar með líkanreikningum á íslenskum jöklum.

þær niðurkvörðun á sviðsmyndarreikningum hnattræns líkans. Því er óvarlegt að fullyrða að niðurstöðurnar í töflu 5.9 endurspegli í smáatriðum þær niðurstöður sem fengjust með eiginlegum líkanreikningum á íslenskum jöklum. Nánar má lesa um rannsóknir á líklegri bráðnun íslenskra jökla í grein 5.1.3.

Þegar betrumbætt fingrafar var reiknað var áhrifum strandjökla á Grænlandi sleppt. Þetta veldur að meðaltali um 1 cm vanmati á fingrafari jökla og þá er sjávarstöðuhækkun ofmetin að sama skapi. Þessar stærðir eru ekki verulegar miðað við aðra óvissu í þessari greiningu (sjá grein 5.3.7 um óvissu).

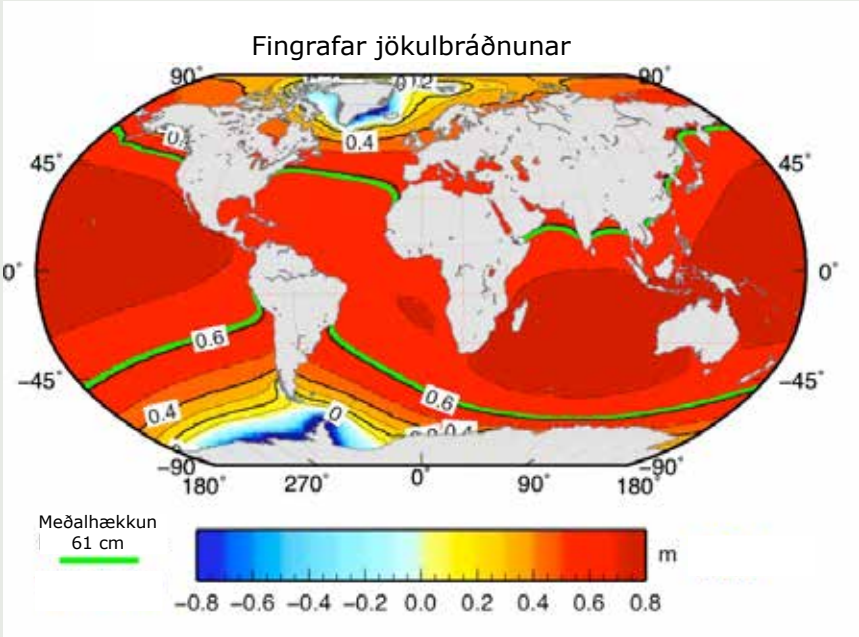
Í 13. kafla skýrslu IPCC er tekið tillit til breytinga á þyngdarsviði vegna aðlögunar að flotjafnvægi frá lokum síðasta jökulskeiðs. Eins og rakið er í hliðargrein (5A Fingrafar jöklabráðnunar og aðlögun að flotjafnvægi) eru þessi áhrif hverfandi hér við land en það endurspeglast ekki vel í hnattrænum samantektum á þessum áhrifum. Á Íslandi gætir hins vegar áhrifa aðlögunar vegna massataps íslenskra jökla frá lokum 19. aldar. Þessu fylgir innstreymi möttulefnis undir Íslandi og lagt hefur verið mat á að það sé á bilinu 4.5–6.5 Gt á ári[73]. Ef gert er ráð fyrir að kort af landrisi endurspegli hvernig þessi möttulmassi dreifist undir landið má reikna áhrif þessa viðbótarmassa á þyngdarsviðið og sjávarstöðu á sama hátt og gert var fyrir massatap jökla. Niðurstöðu slíks útreiknings má sjá á mynd 5.29 sem sýnir hækkun sjávarstöðu (í mm á ári) vegna 5.5Gt viðbótarmassa á ári[74]. Myndin sýnir að mest eru áhrifin um 0.3 mm á ári við suðausturströnd Íslands, en víðast við ströndina eru þau um 0.2 mm á ári. Ef þessar tölur eru framreiknaðar til loka 21. aldar myndi þessi viðbótarmassi valda 2–3 cm hækkun á sjávarstöðu.

Í ljósi óvissu um massa sem er að bætast við undir Íslandi og dreifingu hans var ekki talið tilefni til þess að framreikna niðurstöðurnar á mynd 5.29 fyrir samantektina á mynd 5.25. Þetta þýðir að hækkun sjávarstöðu á mynd 5.25 gæti verið vanmetin um 2–3 cm.

Mynd 5.29 sýnir að fingrafar bráðnunar íslenskra jökla á sjávarstöðu gengur til baka þegar landið leitar flotjafnvægis. Við lok síðasta jökulskeiðs tók megnið af þeirri aðlögun skemmri tíma en þúsund ár, og gera má ráð fyrir að ef núverandi jöklar hverfi muni áhrif fingrafarsins hverfa á nokkrum öldum. Sama ferli á sér stað á Grænlandi, en aðlögun að flotjafnvægi þar tekur líklega lengri tíma.

Niðurstöður þessa kafla sýna að gögn frá IPCC um líklegar sjávarstöðubreytingar má aðlaga til þess að meta líklegar sjávarstöðubreytingar við Ísland. Í þessum reikningum hefur niðurstöðum IPCC einungis verið hnikað að litlu leyti, ekki er um hnattræna lausn sjávarstöðulíkans að ræða[75]. Greiningin, sem gerð var fyrir þennan kafla, takmarkaðist við það að túlka niðurstöður IPCC (2013) með tilliti til íslenskra aðstæðna.

Af þessum niðurstöðum og óvissu þeirra má vera ljóst að veruleg þörf er á frekari rannsóknum á framtíðarbreytingum sjávarstöðu í kringum Ísland, þar sem massatap íslenskra jökla er reiknað beint á grundvelli loftslagslíkana og niðurstöðurnar svo notaðar til þess að reikna fingrafar jöklabráðnunar. Einnig er þörf á áframhaldandi mælingum á lóðréttum jarðskorpuhreyfingum og mati á áhrifum aðlögunar að flotjafnvægi á sjávarstöðu. Loks er mikilvægt að við mælingar á sjávarstöðu sé tryggt að mæliraðir séu nýtilegar til þess að fylgjast með langtímabreytingum. Til þess þarf breytingar á skipulagi mælikerfis. Æskilegast er að langtímamælingar á sjávarstöðu væru gerðar á nokkrum stöðum á landinu og samfelldar landhæðarbreytingar mældar á sama stað með GPS.



Mynd 5.30 Fingrafar jöklabráðnunar (m) í sviðsmynd þar sem gert er ráð fyrir að bráðnun íshvela og jökla hækki sjávarstöðu hnattrænt um 61 cm. Í hitabeltinu og annars staðar milli grænu línanna hækkar sjávarstaða umfram hnattræna meðalhækkun, en utan grænu línanna er sjávarstöðuhækkunin minni og næst íshvelunum fellur sjávarstaða. Hafa ber þó í huga að myndin sýnir einungis fingrafar jökulbráðnunar, ekki eru sýnd önnur áhrif, t.d. áhrif varmaþenslu sem breytir lokaniðurstöðunni. Myndin er þýdd frá heimild 78 með leyfi höfunda.

5A Fingrafar jöklabráðnunar og aðlögun að flotjafnvægi

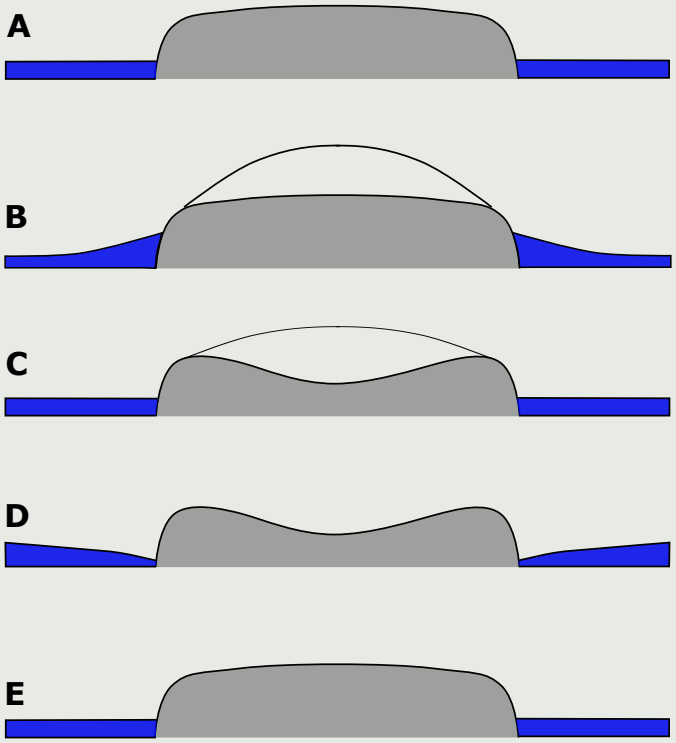
Fingrafarið

Styrkur þyngdarsviðsins er ekki jafn alls staðar á jörðinni, hann er aðeins minni við miðbaug en við heimskautin og auk þess hefur dreifing massa á og í jörðinni áhrif á þyngdarsviðið. Þannig geta stór fjöll eða fjallgarðar aflagað þyngdarsviðið í nágrenni sínu. Strax um miðbik 18. aldar voru gerðar tilraunir til þess að nota þessi áhrif til þess að vega einstök fjöll[76] en bættur skilningur á þeim þróaðist ekki fyrr en á 19. öld með hugmyndum um flotjafnvægi jarðskorpunnar[77].

Rétt eins og fjallgarðar innihalda jöklar mikinn massa sem aflagar þyngdarsviðið í nágrenninu og þetta viðheldur hærri sjávarstöðu næst jöklinum. Þegar jökulísinn bráðnar gerist því tvennt. Í fyrsta lagi bætist vatn við heimshöfin svo að í þeim hækkar. Í öðru lagi dregur úr aflögun þyngdarsviðsins sem lækkar sjávarstöðu næst jöklinum, en sjávarstöðuhækkun verður þá því meiri fjær jöklinum. Svæðisbundna breytingin sem af þessu leiðir er kölluð fingrafar bráðnunarinnar. Mynd 5.30 sýnir fingrafar jökulbráðnunar í einni sviðsmynda Ice2Sea verkefnisins[78]. Til þess að reikna þessa mynd var gert ráð fyrir að bráðnun jökla og ísbreiða myndi hækka hnattræna sjávarstöðu um 61 cm að meðaltali, og bráðnuninni var dreift á vesturhvel Suðurskautslandsins og Grænlandsjökul, auk jökla utan heimskautasvæða (m.a. á Íslandi). Grænar línur á kortinu sýna hnattrænu meðalhækkunina. Á svæðum innan grænu línanna hækkar sjávarstaða umfram hnattræna meðaltalið en utan þeirra hækkar minna. Næst ísbreiðum heimskautanna lækkar sjávarstaðan. Mikilvægt er að hafa í huga að fingrafarið er einungis einn þeirra þátta sem valda svæðisbundum mun á sjávarstöðuhækkun. Mynd 5.30 sýnir þannig ekki áhrif varmaþenslu sjávar, breytingar á vindum og hafstraumum eða aðlögun að flotjafnvægi.

Aðlögun að flotjafnvægi

Þegar jöklar bráðna léttir fargi af jarðskorpunni og þrýstingur í möttli jarðar fellur undir ísnum. Þrýstifallið knýr massaflæði undir skorpunni sem leitast við með tíð og tíma að jafna út áhrif fargléttingarinnar. Jarðskorpan leitar því aftur flotjafnvægis og landið rís undir jöklinum og nærri honum. Þetta landris getur



Mynd 5.31 Einfölduð skýringarmynd af áhrifum jökla og aðlögunar að flotjafnvægi á sjávarstöðu (nánari útskýring í megintexta). Myndin sýnir einungis áhrif breytinga á þyngdarsviði á sjávarstöðu, en ekki þau áhrif sem landris, landsig, varmaþensla eða aðrar breytingar á rúmmáli sjávar hafa á sjávarstöðu við ströndina.

haldið áfram löngu eftir að jökullinn er horfinn. Þannig eru svæði við Eystrasalt og í norðurhluta Kanada enn að rísa eftir að hinir stóru jöklar síðasta jökulskeiðs bráðnuðu fyrir um tíu þúsund árum.

Á Íslandi er jarðskorpan hins vegar þynnri og möttullinn undir henni deigari svo aðlögun að flotjafnvægi eftir ísöldina lauk fyrir mörg þúsund árum. Á móti kemur að áhrifa aðlögunar að flotjafnvægi vegna massataps jökla frá lokum 19. aldar gætir núna á Íslandi.

Það er ólíklegt að þeirri aðlögun að flotjafnvægi sem nú gætir á Íslandi ljúki með því að sjávarstaða umhverfis jökulvana landið verði sú sama og hún var áður en jöklar byrjuðu á ný að myndast á Íslandi, á síðari hluta nútíma. Eftir sem áður er ágætt að hafa þessa upphafs- og lokastöðu sjávarborðs í huga þegar hugsað er um hringrás jökulmyndunar, fingrafars jökla og aðlögun að flotjafnvægi.

Mynd 5.31 sýnir einfaldaða skýringarmynd af áhrifum þyngdarsviðsbreytinga vegna jökuls og aðlögunar að flotjafnvægi. Efsta myndin (A) sýnir íslaust land og sjávarstöðu. Þegar jökull vex á landinu (B) aflagar massi þess þyngdarsviðið svo sjávarstaða hækkar við strönd landsins. Á nægilega löngum tíma leitar landið og jökulfargið flotjafnvægis og sjávarstaða við ströndina lækkar í fyrra horf (C). Þegar jökullinn minnkar aflagast þyngdarsviðið og nú lækkar sjávarstaðan við ströndina (D). Loks þegar jökulvana landið hefur aftur náð flotjafnvægi er sjávarstaðan komin í sama horf og í upphafi. Þótt líklegast myndi landris og landsig við ströndina hafa veruleg áhrif á afstæða sjávarstöðu í þessari hringrás eru þau áhrif ekki sýnd á myndinni.

Tilvísanir

1 Sjá nánar um síðustu skýrslu (V2008) í athugasemd 3 í kafla 3. Sjá greinar 2.4.2 og 4.2.1 í V2008.

2 Myndin er uppfærsla byggð á mynd 2.17 í V2008. Sjá nánar á vef Jöklarannsóknafélagsins spordakost.jorfi.is.

3 Oddur Sigurðsson, Richard S. Williams, Jr. og Skúli Víkingsson 2013. Jöklakort af Íslandi. Veðurstofa Íslands. Sjá einnig heimildir 8 og 9 hér að neðan auk Brynjólfsson, S., ofl., 2014 Geomorphology and the Little Ice Age extent of the Drangajökull ice cap, NW-Iceland,with focus on its three surge-type outlets, Geomorphology 213, 2014, 292–304.

4 Daði Björnsson 2015. Heildarstærð jökla á Íslandi 2014. Loftmyndir ehf., minnisblað dags. í mars. 2015.

5 Gögn frá Jöklarannsóknafélagi Íslands auk óbirtra gagna frá Veðurstofu Íslands.

6 Hrafnhildur Hannesdóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir og Snævarr Guðmundsson 2014. Variations of SE-Vatnajökull ice cap (Iceland) 1650–1900 & reconstruction of the glacier surface geometry at the Little Ice Age maximum. Geogr. Ann. A, Phys. Geogr., 97(2), 237–264. doi:10.1111/geoa.12064.

7 Snævarr Guðmundsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson. 2017. Changes of Breiðamerkurjökull glacier, SE-Iceland, from its late nineteenth century maximum to the present. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography,10.1080/04353676.2017.1355216, ddx.doi.org/10.1080/04353676.2017.1355216.

8 Hrafnhildur Hannesdóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Sverrir Guðmundsson. 2015. Changes in the southeast Vatnajökull ice cap, Iceland, between – 1890 & 2010. The Cryosphere, The Cryosphere, 9, 565–585, doi:10.5194/tc-9-565-2015. Sjá einnig Hrafnhildur Hannesdóttir 2014. Variations of southeast Vatnajökull – past, present & future. PhD ritgerð, Raunvísindadeild, Háskóli Íslands, 197 bls.

9 Finnur Pálsson, Sverrir Guðmundsson, Helgi Björnsson, E. Berthier, Eyjólfur Magnússon, Snævarr Guðmundsson og Hannes H. Haraldsson 2012. Mass & volume changes of Langjökull ice cap, Iceland, ~1890 to 2009, deduced from old maps, satellite images & in situ mass balance measurements. Jökull, 62, 81–96.

10 Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Sverrir Guðmundsson, Eyjólfur Magnússon, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, E. Berthier, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson. 2013. Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: trends & variability since the Little Ice Age. Geophys. Res. Lett., 40, 1–5, doi:10.1002/grl.50278.

11 Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson og E. Berthier 2013. Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements & changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface of Icelandic glaciers. Ann. Glaciol., 54(63), 63–74. doi:10.3189/2013AoG63A422.

12 Gögn frá Veðurstofu Íslands, Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands og Háskólanum í Innsbruck.

13 Eyjólfur Magnússon, Joachin Muñoz-Cobo Belart, Finnur Pálsson, Hálfdán Ágústsson og Philippe Crochet. 2015. Geodetic mass balance record with rigorous uncertainty estimates deduced from aerial photographs and lidar data – Case study from Drangajökull ice cap, NW-Iceland. *The Cryosphere*, 10, 159-177, 2016 doi:10.5194/tc-10-159-2016.

14 Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson 2011. LiDAR mapp¬ing of the Snæfellsjökull ice cap, western Iceland. Jökull, 61, 19–32.

15 Sverrir Guðmundsson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Etienne Berthier, Finnur Pálsson, Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir & Jorgen Dall. 2011. Response of Eyjafjallajökull, Torfajökull and Tindfjallajökull ice caps in Iceland to regional warming, deduced by remote sensing. Polar Research, 30, 7282.

16 Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson & Helgi Björnsson. 2009. Breytingar á austanverðum Skeiðarárjökli og farvegi Skeiðarár 1997-2009 og framtíðarhorfur. Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands, greinargerð RH-08-2009, 22 p.

17 Tímasetning höfð eftir landeiganda Núpsstaðaskógar, Hannesi Jónssyni.

18 Oddur Sigurðsson dró útlínur eftir Landsat gervihnattamyndum 1975, 1991, 1999 og 2014 á samsettan myndgrunn Landmælinga Íslands, byggðum á Landsatmyndum frá 2014. Útlínur 1890 byggjast á ystu mörkum jökuls á litlu-ísöld og útlínur 1945 byggjast á AMS kortum 1:50000 Series C762. Myndin sýnir ekki breytingar á ströndinni á þessum tíma. Sambærilega, en ítarlegri úttekt á hopi Breiðamerkurjökuls, má sjá í heimild 7, og í Helgi Björnsson, Finnur Pálsson & Sverrir Guðmundsson 2001. Jökulsárlón at Breiðamerkursandur, Vatnajökull, Iceland: 20th century changes and future outlook. Jökull 50, 1-18.

19 Óbirt gögn: Oddur Sigurðsson, Veðurstofa Íslands. Sjá einnig: Finnur Pálsson og Helgi Björnsson 2007, Könnun á lögun og lengd Öldutanga undir jökulís á mótum Hoffells- og Svínafellsjökla í Hornafirði, Jarðvísindastofnun Háskólans, mars RH-28-2007.

20 Sjá einnig Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Helgi Björnsson, P. Crochet, Elías. B. Elíasson, Sverrir Guðmundsson, Jóna F. Jónsdóttir, Haraldur Ólafsson, Finnur Pálsson, Ólafur Rögnvaldsson, Oddur Sigurðsson, Árni Snorrason, Óli G. Blöndal Sveinsson og Þorsteinn Þorsteinsson. 2007. Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. Reykjavík, Orkustofnun, skýrsla OS-2007/011.

21 Sverrir Guðmundsson, Helgi Björnsson, Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson og Oddur Sigurðsson 2009. Similarities and differences in the response to climate warming of two ice caps in Iceland. Hydrology Research, 40, 495–502. doi: 10.2166/Nh.2009.210. Sjá einnig kafla 6.5 í Fenger ofl. 2007 (heimild 22).

22 Rummukeinen, M., K. Ruosteenoja og K. Kjellstrom. 2007. Climate Scenarios. Í: Fenger, J. (ritstj.): Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources – Their role in the Nordic Energy System. Kaupmannahöfn, 2007:005.

23 Nawri, N., og Halldór Björnsson. 2010. Air Surface and Precipitation Trends for Iceland in the 21st Century. Veðurstofa Íslands, skýrsla 2010-005.

24 Myndir 5.7 og 5.8 eru íslenskaðar útgáfur af mynd 5.7 í Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, A. Ahlstrøm, L. M. Andreassen, S. Beldring, Helgi Björnsson, P. Crochet, Bergur Einarsson, H. Elvehøy, Sverri Guðmundsson, R. Hock, H. Machguth, K. Melvold, Finnur Pálsson, V. Radi, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson 2011. Hydropower Snow and Ice. Í: Þorsteinn Þorsteinsson og Halldór Björnsson (ritstj.): Climate Change and Energy Systems – Impacts, Risks and Adaptation in the Nordic and Baltic Countries. Norðurlandaráð, Kaupmannahöfn. TemaNord 2011:502. Myndirnar byggjast á útreikningum Sverris Guðmundssonar hjá Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands.

25 Aðalgeirsdóttir, G., Guðmundsson, S., Björnsson, H.,Pálsson, F., Jóhannesson, T., Hannesdóttir, H.,Sigurðsson, S.Þ. & Berthier, E. 2011. Modelling the 20th and 21st century evolution of Hoffellsjökull glacier, SE-Vatnajökull, Iceland. Cryosphere, 5, 961–975. doi:10.5194/tc-5-961-2011.

26 Hrafnhildur Hannesdóttir, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Sverrir Guðmundsson, Philippe Crochet, Hálfdán Ágústsson, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Sven Þ. Sigurðsson, Helgi Björnsson. 2015. Downscaled precipitation applied in modelling of mass balance and the evolution of southeast Vatnajökull, Iceland. J. Glaciol. 61 (229), doi:10.3189/2015JoG15J024.

27 Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon og Helgi Björnsson 2016. Greinargerð um könnun á legu vatnaskila Skaftár og Hverfisfljóts og stöðugleika þeirra þegar jökullinn hörfar. Raunvísindastofnun Háskóla Íslands, Reykjavík, skýrsla RH-06-2016.

28 Sjá t.d. Benediktsson, I. O., Jonsson, S. A., Schomacker, A., Johnson, M. D., Ingolfsson, O., Zoet, L., Iverson, N. R. & Stotter, J. 2016 Progressive formation of modern drumlins at Mulajokull, Iceland: stratigraphical and morphological evidence. Boreas, 45, bls. 567–583. auk Magnússon, E., F. Pálsson, H. Björnsson & S, Guðmundsson. 2012. Removing the ice cap of Öræfajökull central volcano, SE-Iceland: Mapping and interpretation of bedrock topography, ice volumes, subglacial troughs and implications for hazards assessments. Jökull, 62, 131-150 og einnig Schomacker, A. 2010, Expansion of ice-marginal lakes at the Vatnajökull ice cap, Iceland, from 1999 to 2009. *Geomorphology* , 119, 232-236.

29 Sjá almenna umfjöllun um vatnafar í grein 2.4.1 og umfjöllun um líklega þróun á öldinni í grein 4.2.2 í V2008.

30 Lawrence D., Barthelmie R., Crochet, P., Lindström G., Kolcova T., Kriauciuniene J., Larsen S., Pryor S., Reihan A., Roald L., Tietavainen, H, og Wilson, D. 2011 Analysis of historical hydroclimatological time series for the Nordic and Baltic regions, í Thorsteinsson T. og Björnsson, H. (ritstj.) Climate Change and Energy Systems, Impacts Risk and Adaptation in the Nordic and Baltic countries, ThemaNord 2011:502 Norræna Ráherranefndin, Kaupmannahöfn.

31 Jónsdóttir, J. F., Uvo, C. B. & Clarke, 2008. R. T. Trend analysis in Icelandic discharge, temperature and precipitation series by parametric methods. Nordic Hydrology 39(5-6), 425-436.

32 Einarsson, B. & Jonsson, S. 2010. The effects of climate change on runoff from two watersheds in Iceland. IMO Report 2010-016, Reykjavik, Iceland.

33 Blöschl, G. ofl. 2017, Changing climate shifts timing of European floods, Science, 357, 6351,. 588-590 doi: 10.1126/science.aan2506

34 Skýrsla vísindanefndar frá 2008 fjallaði um orðnar sjávarstöðubreytingar í kafla 2.3.2 og spár um breytingar í kafla 4.5. Spár voru ræddar í samhengi við hnattrænar breytingar, ekki var reynt að taka tillit til svæðisbundinna frávika á Norður-Atlantshafi.

35 Sjá Church ofl. 2013. Sea level Change. Kafli 13 í IPCC 2013; sjá tilvitnun 2 í kafla 3.

36 Taflan er stytt útgáfa af töflu 13.1 í heimild 35.

37 Í Grace verkefninu (2002–2017) voru þyngdarsvið jarðar og breytingar kortlagðar með meiri nákvæmni en áður hafði verið gert. Sjá nánar á vefsvæðinu *grace.jpl.nasa.gov*. Innan Argo verkefnisins (*www.argo.ucsd.edu*) eru gerðar mælingar í hafi með ótal baujum. Mynd 5.2 byggist á mynd 13.6 í AR5 skýrslu IPCC 1 í heimild 35 hér að ofan, en sú mynd er uppfærð frá mynd 2 í Boening, C ofl. 2012. The 2011 La Nina: So Strong the Oceans fell. Geophys. Res. Lett., 39, L19602. doi:10.1029/2012GL053055.

38 Roelof Rietbroek o.fl. 2016. Revisiting the contemporary sea level budget on global and regional scales. PNAS. doi:www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1519132113.

39 Sjá undirkafla 5A Fingrafar jöklabráðnunar og aðlögun að flotjafnvægi.

40 Gerhrels R. o.fl. 2006. Rapid sea-level rise in the North Atlantic Ocean since the first half of the nineteenth century. The Holocene 16(7) 949–965.

41 Gehrels R., Woodworth P. L. 2012. When did modern rates of sea-level rise start?, Global and Planetary Change, 100: 263–277.

42 Simonarson, L.A. & Leifsdottir, O.E. 2002. Late-Holocene sea- level changes in south and southwest Iceland reconstructed from littoral molluscan stratigraphy. The Holocene 12, 149-158.

43 Guðmundur G. Bárðarson. 1923. Fornar sjávarminjar við Borgarfjörð og Hvalfjörð. Rit Vísindafjelags Íslendinga I, 119. bls. 74-75.

44 Gehrels, W.R., Marshall, W.A., Gehrels, M.J., Larsen, G., Kirby, J.R., Eiriksson, J., Heinemeier, J., Shimmield, T. 2006. Rapid sea-level rise in the North Atlantic Ocean since the first half of the nineteenth century. Holocene 16, 949–965.

45 Margot H. Saher, W. Roland Gehrels, Natasha L. M. Barlow, Antony J. Long, Ivan D. Haigh, Maarten Blaauw. 2015. Sea-level changes in Iceland and the influence of the North Atlantic Oscillation during the last half millennium. Quaternary Science Reviews 108. 23–36, doi:10.1016/j.quascirev.2014.11.005.

46 Myndin sýnir sjávarstöðu í hnitakerfi Sjómælinga Íslands, en það hnitakerfi er 1.82 m hærra en hnitakerfi Reykjavíkurborgar. Þetta hefur ekki áhrif á þær breytingar á sjávarstöðu sem myndin sýnir.

47 Tölur innan hornklofa sýna 5–95% vikmörk matsins.

48 Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson. 2006. Úrvinnsla sjávarfallagagna: Sjávarföll og hægfara sjávarborðsbreytingar í Reykjavíkurhöfn. Jarðvísindastofnun Háskólans.

49 Ef sjávarstaða í Grindavík er borin saman við Reykjavík kemur í ljós að miðað við fast sjávarborð í Reykjavík rís sjávarstaða í Grindavík um 7 mm á ári. Það þýðir að ef sjávarstaða í Reykjavík rís um 2 mm á ári er risið í Grindavík u.þ.b. 9 mm á ári. Sjá nánar Guðjón Scheving Tryggvason. 2016. Sjávárborðsrannsóknir, – Úrvinnsla sjávarborðsmælinga frá Grindavík, Landeyjahöfn og Hornafirði. Vegagerðin, útgáfa A – júní 2016.

50 Þóra Árnadóttir ofl. 2009. Glacial rebound and plate spreading: results from the first countrywide GPS observations in Iceland Geophysical Journal, 177, 691–716. GPS netið er samvinnuverkefni Landmælinga Íslands, Jarðvísindastofnunar Háskóla Íslands, Veðurstofu Íslands og erlendra háskóla.

51 Sigrún Hreinsdóttir og Þóra Árnadóttir. 2016. óbirt gögn.

52 R. B. Cleveland, W. S. Cleveland, J.E. McRae & I. Terpenning. 1990. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. Journal of Official Statistics, 6, 3–73.

53 Úrvinnsla á GPS mæliröðunum var unnin af Simone Zonetti, Veðurstofu Íslands, á vegum norræna öndvegissetursins SVALI. Úrvinnslan byggist á sk. STL greiningu (sjá tilvitnun 52 hér að framan). Tímaraðirnar á myndum 5.7 og 5.8 byggjast á óbirtum gögnum Veðurstofu Íslands.

54 Kvarðinn, Janúar 2017. Samanburður á niðurstöðum grunnstöðvanetsmælinganna ISNET2004 og ISNET2016, Landmælingar Íslands.

55 Þorsteinn Jóhannesson. 2010. Spá um hækkun sjávarborðs á Siglufirði og Ólafsfirði. Verkfræðistofa Siglufjarðar.

56 Sjá einnig umfjöllun um hnattrænar sjávarstöðubreytingar í grein 3.8 hér að framan. Umfjöllun hér byggist á 13. kafla IPCC 2013, sjá heimild 35 hér að framan), sérstaklega greinum 13.6 og 13.7 og töflum 13.5 og 13.6. Ítarlega umræðu um tölfræðileg líkön má finna í 13.6. Sú umfjöllun er ekki rakin hér, en samantekt á niðurstöðum tölfræðilegra líkana má sjá í töflu 13.6 í skýrslu IPCC.

57 Sjá undirkafla 3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5. Eins og í fyrri köflum þýðir „frá 1986–2005 til 2081–2100“ að meðaltal fyrra tímabilsins er dregið frá meðaltali þess seinna.

58 Myndir 5.9 til 5.16 byggjast á gögnum sem fylgja 13. kafla IPCC skýrslunnar, en fyrir þessa samantekt var hafsvæðið nærri Íslandi teiknað sérstaklega. Sjá nánar grein 5.3.8 um aðferðir.

59 Sjá nánar í Church, J.A. ofl. 2013. Sea Level Change Supplementary Material. Kafli 13SM í IPCC 2013, sjá heimild 35 hér að framan.

60 Sjá t.d. mynd 13.18b í IPCC 2013, sjá einnig heimild 35 hér að framan.

61 Sjá nánar um aðferðir í undirkafla 5.3.8.

62 Til að reikna reitina í töflunni er sjávarstöðuhækkun reiknuð frá hnattrænu hækkuninni og hlutfallinu. Síðan er landsigi bætt við þá tölu, en landris dregið frá. Sem dæmi má taka að ef hnattræn hækkun verður 1 m er hún á bilinu 38 til 40 cm við Austurland. Þar er landris á bilinu 0 til 20 cm svo að lægsta mögulega staða er 38–20 = 18 cm en hæsta staða er 40 cm.

63 Hér er byggt á töflu 13.8 í heimild 35 hér að framan, en hún sýnir mögulega hækkun á næstu öldum fyrir þrjár ólíkar sviðsmyndir. Fram kemur að taflan kunni að vera vanmat, og því er hér byggt á efri mörkum þess bils sem gefið er í henni. Sjá einnig Golledge, N.R o.fl. 2015. The multi-millenial Antarctic commitment to future sea-level rise. Nature 562, 421–425. doi:10.1038/nature15706.

64 Sjá umfjöllun í grein 3.4.

65 Sjá Dahl-Jensen D o.fl. 2013. Eeminan interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. Nature, 493, 489–493. doi:10.1038/nature11789.

66 DeConto R. & Pollard D. 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. Nature, 531, 591–597 doi:10.1038/nature17145.

67 Rignot E, o.fl. 2014. Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. Geophysical Research Letters, 41, 3502–3508.

68 Feldmann J & Levermann A. 2015. Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin. PNAS, 112, 14191–14196, 10.1073/pnas.1512482112.

69 Sjá umfjöllun í undirkafla 3D Rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna.

70 Til að gæta samræmis við mynd 13.19a í heimild 35 hér að framan er óvissan reiknuð á sama hátt og lýst er í heimild 35, jöfnu 13.SM.1. Með þessari aðferð er óvissan háð summu fervika ólíkra áhrifaþátta. Forsendur aðferðarinnar um óháða áhrifaþætti eru þó líklega ekki réttar nærri Ísland eins og lýst er í texta.

71 Sjá mynd 12c í: Perrette, M., Landerer, F., Riva, R., Frieler, K., og Meinshausen, M. 2013. A scaling approach to project regional sea level rise and its uncertainties, Earth Syst. Dynam., 4, 11–29, doi:10.5194/esd-4-11-2013.
Ef ekki er tekið tillit til óvissu um hlutfallslegt framlag íshvelanna verður heildaróvissan minni, sjá t.d. greiningu Slangen A.B.A o.fl. 2012. Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios. Clim. Dyn., 38, 1191–1209. doi:10.1007/s00382-011-1057-6.

72 Sjá viðauka með gögnum í heimild 35 hér að framan. Gögnunum var hlaðið niður frá vefsvæði loftslagsgagnaseturs Hamborgarháskóla (icdc.zmaw.de).

73 Sørensen, L. S., A. H. Jarosch, G. Aðalgeirsdóttir, V. R. Barletta, R. Forsberg, F. Pálsson, H. Björnsson, T. Jóhannesson. 2017. The effect of signal leakage and glacial isostatic rebound on GRACE-derived ice mass changes in Iceland. Geophys. J. Int., doi: doi.org/10.1093/gji/ggx008.

74 Mynd 5.16 er byggð á niðurstöðum greinar Sørensen o.fl. (sjá heimild 73 hér að ofan) og korts af landrisi sem A. H. Jarosch lét nefndinni góðfúslega í té.

75 Mikilvægt er að á næstu árum verði líklegt massatap íslenskra jökla reiknað með jöklalíkani og fingrafarsáhrif þess reiknuð í sjávarstöðulíkani, t.d. SELEN, sjá Spada G, o.fl, 2013. The gravitationally consistent sea-level-fingerprint of future terrestrial ice loss. Geophys. Res. Lett., 40, 1-5. doi: 10.1209/2012GL053000.

76 Bouguer, Pierre, 1749. La figure de la terre, déterminée par les observations de Messieurs Bouguer & de la Condamine, de l' Académie Royale des Sciences, envoyes par ordre du Roy au Pérou, pour observer aux environs de l' Equateur : avec une relation abregée de ce voyage, qui contient la description du pays dans lequel le opérations ont été faites. Sjá umfjöllun á bls 223 – 227 í Jeffries, H. 1976. The Earth, Its Origin History and Physical Constitution.6th Ed. Cambridge University Press.

77 Í kjölfar landmælinga á Indlandi gerðu John H. Pratt og George. B. Airy sér grein fyrir því að til að vinna rétt úr niðurstöðum þyrfti að taka tillit til massa Himalayafjalla og þeirri aflögun jarðskorpunnar sem stafaði af fargi þeirra. Sjá t.d.: Gilluly, J. Waters. A.C & Woodford, A.O, 1968. Principles of Geology (3rd Ed) . W. H. Freeman & Co. 687 s.

78 Mynd 5.30 er byggð á niðurstöðum útreiknings með líkani sem tekur tillit til breytinga á þyngdarsviði. Sjá: Spada, G., Bamber, J.L. & Hurkmans, R.T.W.L., 2013. The gravitationally consistent sea level fingerprint of future terrestrial ice loss. Geophysical Research Letters, 40(3) 482-486.

6 Súrnun sjávar

Samantekt

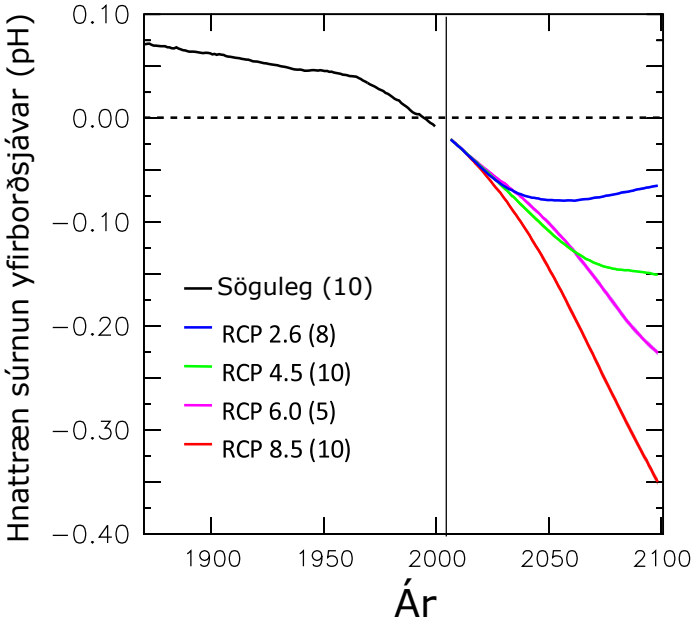
1. Súrnun hafsins er staðreynd, staðfest með beinum mælingum og fræðilegum reikningum.
2. Til að komast hjá stórfelldum breytingum á lífríki og vistkerfum í höfunum þarf að minnka losun CO_2 stórlega. Framtíð hafsins ræðst af því hvernig losun manna á koltvíoxíði verður háttað og til hvaða aðgerða verður gripið fyrr en síðar.
3. Súrnun sjávar hefur nú þegar haft neikvæð áhrif á lífríki hafsins og skelfiskræktun.
4. Vegna aðstæðna í hafinu hér nyrst í Atlantshafi er súrnun sjávar miklu örari þar en að jafnaði í heimshöfunum. Því er líklegt að sjórinn hér við land hafi súrnað meira eftir iðnvæðingu heldur en heimshöfin að jafnaði. Örastar breytingar eru í yfirborði sjávar og líklegt er að náttúruleg árstíðasveifla á sýrustigi í yfirborði sjávar sé komin út fyrir það svið sem lífríkið hafði aðlagast fyrir iðnvæðingu. Súrnunin er hægari í dýpri sjávarlögum en nær til botns á 1800 m dýpi þar sem súrnun er vöktuð í Íslandshafi.
5. Kalkmyndandi lífríki er talið einkar viðkvæmt fyrir áhrifum súrnunar. Vegna eiginleika sjávar og lágs sjávarhita er kalkmettunarstig í hafinu við Ísland og í Norðurhöfum almennt náttúrulega lágt. Við þessar aðstæður leiðir súrnun fyrr til undirmettunar kalks heldur en að jafnaði í heimshöfunum.
6. Líklegt er að neikvæð áhrif súrnunar á lífríki og vistkerfi sjávar komi fyrr fram á íslenskum hafsvæðum en að jafnaði í heimshöfunum. Áhrif á efnahagslega mikilvægar tegundir geta birst óvænt eins og gerðist í ostruræktun við Kyrrahafsstrendur N-Ameríku. Áhrifin geta komið fram, án þess að eftir því sé tekið, hjá tegundum í lífríkinu sem eru ekki nýttar.

6.1 Inngangur

Hafið tekur upp hluta þess koltvíoxíðs sem losað er í andrúmsloftið og veldur það súrnun sjávar. *Sýrustig yfirborðssjávar hefur fallið um 0.1 pH-stig frá upphafi iðnbyltingar, sem samsvarar 26% aukningu í styrk vetnisjóna H^+ (mikil vissa). Fall sýrustigs yfirborðssjávar nemur 0.0014 til 0.0024 pH stigum á ári. Auk þessarar upptöku á CO_2 úr lofthjúpnum geta náttúruleg ferli breytt sýrustigi sé litið til áratuga eða lengri tíma.*

Þessa staðreynd má finna í kafla um súrnun sjávar í fimmtu matsskýrslu IPCC (2013)[1] og í þessum kafla verður farið yfir þær forsendur sem liggja að baki hennar, auk þess sem súrnun sjávar á Íslandsmiðum og áhrif verða rædd sérstaklega. Hraðasta súrnunin sem minnst er á í setningunni hér að ofan (0.0024 pH stig á ári) mælist í Íslandshafi, svæðinu milli Íslands og Jan Mayen.

Súrnun sjávar vísar til þess að sýrustigið, pH, lækki með tímanum, áratugum, vegna þess að sjórinn tekur upp koldíoxíð úr lofti, sem sífellt eykst vegna athafna manna. Það eru náttúrulegar árstíðasveiflur á sýrustigi sjávar vegna myndunar lífræns efnis við ljóstillífun og eyðingu þess við niðurbrot. Enn fremur getur sýrustigið breyst vegna annarra náttúrulegra efnaferla, eldgosa í sjó, langtímabreytinga á frjósemi sjávar og vegna brennisteins- og nitursambanda sem berast í andrúmsloft



Mynd 6.1 Áætluð framtíðarþróun meðalsýrustigs (pH) í yfirborði hafsins frá 1870 til 2100 miðað við sögulegar mælingar og sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Eins og fram kemur í grein 3.10 myndi samdráttur losunar í takt við sviðsmynd RCP2.6 nægja til þess að uppfylla ákvæði Parísarsamkomulagsins um að halda hlýnun innan við 2°C og þetta er eina sviðsmyndin þar sem súrnun sjávar hættir. Í aðdraganda Parísarsamkomulagsins sendu aðildarþjóðir Sþ loforð um samdrátt í losun, og losun í samræmi við þau fer nærri því að fylgja RCP4.5 (Sjá tilvísun 3).

og sjó. Súrnun sjávar er skilgreind sem lækkun á pH-stigi vegna athafna manna[1]. Hér verður einkum tekið mið af langtímabreytingum á sýrustigi sjávar og tengslum þeirra við styrk koltvíoxíðs í andrúmslofti.

Mynd 6.1 sýnir hvernig sýrustig í yfirborði hafsins lækkaði að meðaltali á liðinni öld. Hvað framtíðin ber í skauti sér er háð því hvernig til tekst við að hemja losun á CO_2. Með róttækri minnkun losunar, sem RCP2.6 ferillinn sýnir og er nálægt markmiði Parísarsamkomulagsins[2], er ennþá mögulegt að snúa þróuninni við þannig að pH fari heldur að hækka á síðari hluta aldarinnar[3]. Óheft losun, samkvæmt sviðsmynd RCP8.5 leiðir til mikillar lækkunar sýrustigs, um 0.4. Einungis minnkandi losun sem nemur ásetningi aðildarþjóða Parísarsamkomulagsins mun duga til þess að hægja á þróuninni, sýrustig mun þó halda áfram að falla út öldina.

6.2 Efnafræðihlið súrnunar sjávar

Frá upphafi iðnvæðingar hefur losun á koldíoxíði, CO_2, í andrúmsloft vegna brennslu á jarðefnaeldsneyti, vegna iðnaðar og landnotkunar, leitt til þess að styrkur CO_2 í lofti hefur vaxið úr 278 ppm árið 1750 og ekki farið undir 400 ppm síðan 2015[4]. Heimshöfin hafa fram til ársins 2010 tekið upp um um 155PgC, eða um 28% af því CO_2 sem losað hefur verið til andrúmslofts, 555PgC[5,6].

Ef ekki hefði notið upptöku sjávar á CO_2 úr lofti hefðu gróðurhússáhrif í andrúmslofti orðið enn öflugri og áhrif hlýnunar enn meiri en ella. Á móti kemur, að þegar CO_2 leysist upp í sjó veldur það verulegum áhrifum á kolefniskerfið þar. Meðalgildi pH í yfirborðssjó hafsins hefur lækkað um 0.1, úr 8.2 í 8.1. Þar eð pH er styrkur H^+ á lograkvarða þýðir meðallækkun pH í yfirborði heimshafanna að styrkur H^+ hefur vaxið um 26%.

Sveiflur á sýrustigi sjávar, pH, stjórnast fyrst og fremst af flæði CO_2 milli lofts og sjávar, ásamt lífríkisferlunum, tillífun sem felur í sér bindingu kolefnis úr sjó í lífrænan vef og öndun/rotnun á lífrænu efni sem leiðir til losunar á CO_2 í sjó. Þegar lofttegundin CO_2 berst um yfirborð hafsins úr lofti til sjávar hefur það áhrif á fjögur efnaferli sem breyta styrk efna sem samanlagt mynda ólífræna kolefniskerfið í sjó: Uppleyst CO_2 (sjór), kolsýra (H_2CO_3), vetniskarbónat (HCO_3^-) og karbónat (CO_3^{2-}). Samanlagður styrkur efnaferlanna fjögurra er nefndur TCO_2 (tafla 6.2). Efnajafnvægin eru þessi:

CO_2(loft)	⇆	CO_2 (sjór)	(1)
CO_2 (sjór) + H_2O	⇆	H_2CO_3	(2)
H_2CO_3	⇆	$H^+ + HCO_3^-$	(3)
HCO_3^-	⇆	$H^+ + CO3^{2-}$	(4)

Fyrsta efnajafnvægið lýsir uppleysingu koltvíoxíðs í sjó. Allar lofttegundir andrúmsloftsins leysast upp í sjó, uppleysanleiki þeirra er mismunandi en hann eykst

þegar hitastig lækkar. Uppleysanleiki koltvíoxíðs fer vaxandi í sjó sem flæðir með Golfstraumi norður Atlantshaf og er í fyrstu um 25°C. Sjórinn kólnar á leiðinni og uppleysanleikinn er tvöfalt meiri þegar komið er í Norðurhöf. Þetta er ein helsta ástæða þess að sjórinn í N–Atlantshafi tekur upp mikið CO_2 úr lofti. Það myndast vetnisjónir, H^+, í efnajafnvægjum 3 og 4. Við aukinn styrk H^+ í sjó lækkar pH, sjórinn súrnar. Það fara meira en 99.9% af vetnisjónum sem myndast í efnajafnvægi 3 í að eyða karbónati, efnajafnvægi 4 gengur þá til vinstri og styrkur vetniskarbónats (HCO_3^-) eykst en styrkur CO_3^{2-} lækkar. Í súrnun sjávar felst því lækkun pH (aukinn styrkur H^+) og lækkun á styrk karbónats, CO_3^{2-}, en hækkun á styrk vetniskarbónats (HCO_3^-). Karbónat er annað byggingarefnið til myndunar kalks, $CaCO_3$, á móti Ca^{2+}, kalsínjón, sem er eitt af aðalefnum í seltu sjávar og því í nægum styrk til kalkmyndunar:

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3(s) \qquad (5)$$

Súrnun sjávar getur því haft áhrif á kalkmyndun hjá lífverum hafsins þegar styrkur $CO3^{2-}$ lækkar og leysni kalks, $CaCO_3$, eykst. Efnajafnvægin 1–4 eru í samhangandi og jafnvægisfastarnir, sem eru vel þekktir, eru háðir hita, seltu og þrýstingi (dýpi). Sé styrk einhvers þáttar breytt, þá hliðrast allt kerfið í átt að nýju jafnvægi. Í venjulegum yfirborðssjó með pH=8.1 eru 90% kolefnisins sem vetniskarbónat, um 9% sem karbónat en aðeins um 1% sem lofttegundin CO_2 uppleyst í sjónum.

Súrnun sjávar er afleiðing efnafræðilegra eiginleika sameindarinnar CO_2, koltvíoxíðs, en gróðurhúsaáhrif eru afleiðing eðliseiginleika sameindarinnar CO_2. Þó er súrnun ekki óháð hlýnun sjávar. CO_2, sem sjór dregur í sig úr lofti, tekur ekki þátt í gróðurhússáhrifunum en hlýnun sjávar dregur úr uppleysanleika CO_2 í sjó og þar með getu sjávar til að taka upp og binda CO_2 úr lofti.

6.3 Áhrif súrnunar á kalkmyndum í lífríki hafsins

Lækkun á styrk karbónats, CO_3^{2-}, við súrnun sjávar leiðir til þess að efnajafnvægi 5 hliðrast. Það á við um uppleysanleika kalks. Kalk, $CaCO_3$, er fast efni og langmest af því kalki sem er í hafinu og á hafsbotni hafa lífverur myndað. Kalk getur leyst upp í sjó en uppleysanleiki þess er háður aðstæðum; hita, þrýstingi (dýpi) og styrk kalsíns og karbónats í umhverfinu. Eiginleikar kalks eru breytilegir eftir kristalbyggingu þess, t.d. er uppleysanleiki breytilegur. Helstu byggingarform kalks, sem lífverur sjávar mynda, eru kalsít, aragónít og magnesíumblandað kalsít. Aragónít og magnesíumblandað kalsít eru uppleysanlegri kalkgerðir en kalsít. Þar eð súrnun sjávar leiðir til lækkandi styrks á karbónati eru lífverur sem mynda aragónít taldar viðkvæmari heldur en þær sem mynda kalsít. Aðstæður gagnvart kalkleysni eru settar fram sem Omega-gildi, **Ω**, kalkmettunarstig. Omega-gildið er varmafræðileg stærð sem ræðst af styrk jóna, Ca^{2+} og CO_3^{2-}, og umhverfisaðstæðum, hita, seltu og þrýstingi. Fyrir aragónít er kalkmettunarstig, **Ω** ar, skilgreint sem:

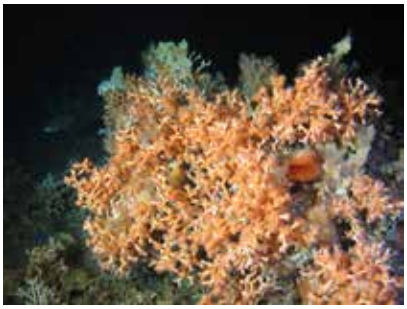
$$\Omega_{ar} = \frac{[Ca^{2+}][CO^{2-}]}{K_{sp}}$$

þar sem Ksp er leysnimargfeldi kalks á aragónítformi. Það er nú orðin venja, þegar rætt er um breytingar vegna súrnunar, að taka mið af kalki á aragónítformi, því lífverur sem mynda aragónítkalk eru viðkvæmari gagnvart súrnun en þær sem mynda kalsít. Þriðja kristalform kalks í sjávarlífverum er magnesíumblandað kalsít, sem er einnig uppleysanlegra en kalsít. Í töflu 6.1 eru dæmi um kalkmyndandi lífverur í hafinu við Ísland, á botni eða uppi í sjó, og myndar hver sína gerð kalks.

Kalkmettunarstig má nota til að lýsa því hvort aðstæður eru almennt hagstæðar lífríkinu til kalkmyndunar eða hvort líklegt sé að kalk leysist upp:

- **Ω**<1 Undirmettun og kalk hefur tilhneigingu til að leysast upp.
- **Ω**=1 Sjór í efnafræðilegu jafnvægi gagnvart kalkleysni.
- **Ω**>1 Sjór er yfirmettaður og aðstæður almennt hagstæðar kalkmyndandi lífríki.

Þó að sjór sé yfirmettaður og omega >1, þá er ólífræn útfelling á kalki í raun mjög hægfara ferli og heimshöfin eru víðast hvar yfirmettuð í yfirborði, hlý svæði sérstaklega þar sem há omega-gildi eru algeng. Kalk leysist betur upp í köldum sjó en heitum og því eru omega-gildi á köldum svæðum, t.d. í Norðurhöfum, náttúrulega lægri en t.d. á hitabeltissvæðum. Fyrir vikið

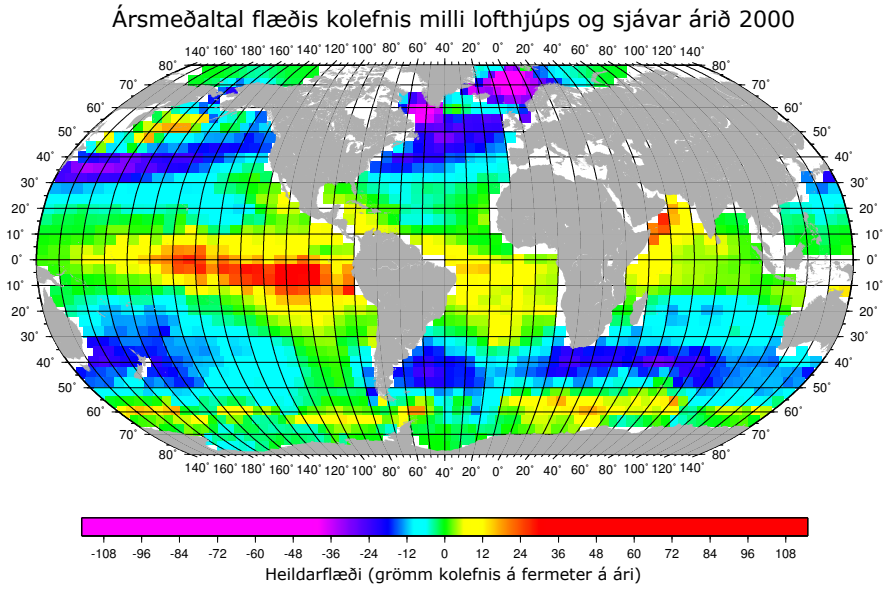
Kalkgerð	Dæmi	Mynd
Kalsít	Kalksvifþörungar (Coccolithophores) *Emiliania huxleyi* Mynd: Jeremy R. Young, Natural History Museum of London.	
Aragónít	Rifmyndandi kaldsjávarkórallar. *Lophelia pertusa* í Lónsdjúpi. Mynd: Hafrannsóknastofnun	
Magnesíum-blandað kalsít	Kalkmyndandi rauðþörungar í Arnarfirði *Lithothamnion spp.* Undirstaða kalkþörungavinnslu Mynd: Hrönn Egilsdóttir	

Tafla 6.1 Helstu gerðir kalks sem lífverur sjávar mynda.

færist kalkmettunarstig nú hraðar að undirmettun, Ωar<1, á köldum svæðum en þeim sem heitari eru. Norður-Íshafið, þar sem Ω er um 1.5 við yfirborð, færist stöðugt nær þessum mörkum[7].

6.4 Mat á breytingum við vaxandi styrk CO_2 lofti

Á grundvelli vel þekktra staðreynda um jafnvægisfasta CO_2 í sjó má lýsa því hvernig ólífræna kolefniskerfið í sjó hliðrast til þegar umhverfisaðstæður breytast, t.d. þegar styrkur CO_2 í lofti vex og jafnvægi næst við yfirborðssjó. Í töflu 6.2 aftast í kaflanum eru bornir saman eiginleikar sjávar sem er í jafnvægi við andrúmsloft eins og það var fyrir iðnvæðingu (280 ppm CO_2), eins og svipar til okkar daga (400 ppm), eins og verður við tvöfaldan styrk CO_2 í lofti (560 ppm) með og án 2°C hlýnunar, og loks eins og verður ef CO_2 styrkur í lofti nær 900 ppm. Sjórinn í dæminu gæti verið hlýsjór sunnan Íslands að vetrarlagi, fyrir iðnvæðingu 5°C heitur en við tvöföldun á CO_2 í lofti orðinn 7°C.



Mynd 6.2 Flæði CO_2 milli lofts og sjávar á ársgrundvelli. Á bláum og fjólubláum svæðum dregur hafið til sín CO_2 að jafnaði en á gulum og rauðum svæðum er flæðið að jafnaði úr sjó til lofts. Mynd uppfærð frá heimild 8.

Í töflu 6.2 sést að:

- Á okkar tímum hefur sýrustig fallið um 0.14 og styrkur H^+ vaxið um 37% frá því sem var í sjónum fyrir iðnvæðingu, mun meira en að jafnaði í heimshöfunum (26%).
- Á okkar tímum er styrkur karbónats, CO_3^{2-}, 24% lægri en fyrir iðnvæðingu og mettunarstig aragónít-kalks hefur lækkað úr 2.18 í 1.67.
- Hækkandi hiti vinnur á móti lækkandi CO_3^{2-} og mettunarstigi. Tveggja gráðu hlýnun við tvöfaldan CO_2 styrk í lofti hækkar mettunarstig aragónítkalks um 0.1, úr 1.27 í 1.38.
- Þegar CO_2 í lofti eykst enn frekar í 560 ppm færast breytingar á karbónatkerfi sjávar áfram í sömu átt, og ef hann nær 900 ppm CO_2 verður pH fallið í 7.7 og sjórinn orðinn undirmettaður af aragónítkalki.
- Meðalgildi á sýrustigi yfirborðssjávar, pH, er um 8.1. Það sýnir að sjór er í raun veikt basískur. Jafnvel við óhefta losun verður sýrustigið áfram basískt. Í framtíð heldur sjór áfram að hlýna án þess að verða heitur og súrna án þess að verða beinlínis súr.

Kalkmettunarstig má reikna með hliðsjón af mældum efnaeiginleikum sjávar eða að gefnum forsendum eins og gert er í töflu 6.2. Kalkmettunarstigið er efnafræðilegur mælikvarði, góður til að meta upptöku sjávar á CO_2 með tíma og hvort sjór sé undir- eða yfirmettaður. Hins vegar tengjast áhrif súrnunar á kalkmyndandi lífverur ekki kalkmettunargildum á einhlítan hátt.

6.5 Svæðatengdur breytileiki á súrnun hafsins

Losun koltvíoxíðs til andrúmslofts er miklu meiri á norðurhveli en á suðurhveli en veðrakerfin og blöndun í lofthjúpnum sjá til þess að styrkur CO_2 í lofthjúpnum á Suðurskautslandinu fylgir norðurhvelinu eftir með eins til tveggja ára seinkun. Við yfirborð heimshafanna eru aðstæður breytilegar með tilliti til flæðis CO_2 milli lofts og sjávar. Því er flæðið ærið misjafnt. Á sumum svæðum dregur hafið til sín meira CO_2 úr lofti en það gefur frá sér. Á öðrum svæðum er þessu öfugt farið. Mynd 6.2 af heimshöfunum sýnir glöggt að Norður-Atlantshaf sker sig úr því á hverju ári tekur það til sín miklu meira CO_2 en það lætur frá sér[8]. Það veldur súrnun. Rannsóknir á ferlum í lífríki og haffræði Norður-Atlantshafsins sem koma þar við sögu eru því og verða í brennidepli.

Varðandi heimshöfin öll er talið að sjór dragi til sín úr lofti um 9.7 Gt CO_2 á ári meira kolefni heldur en flæðir úr sjó til lofts. Það er um fjórðungur þess sem losað er af manna völdum[9].

6.6 Rannsóknir á áhrifum súrnunar sjávar á lífríki

Súrnun sjávar var lítt í umræðunni fyrr en undir lok síðustu aldar. Undanfarna tvo áratugi hafa stóraukist rannsóknir á súrnun sjávar og afleiðingum fyrir lífríki hafsins. Alþjóðleg verkefni hafa beinst að súrnun sjávar og ráðstefnur um súrnun eru haldnar reglulega.

Hafrannsóknastofnun hefur tekið þátt í norrænum og evrópskum rannsóknum á súrnun sjávar og lagt fram niðurstöður rannsókna á íslenskum hafsvæðum. Árlega birtast hundruð vísindagreina um rannsóknir á súrnun[10].

Vegna þess að önnur helsta breyting á eiginleikum sjávar við súrnun er lækkun á styrk karbónats, $CO3^{2-}$ má búast við áhrifum á kalkmyndandi lífverur í sjó. Hin meginbreytingin, lækkun pH, aukinn styrkur H^+, getur haft víðtækari áhrif þar eð fjölmörg lífefnaferli eru tengd styrk H^+, pH[10]. Rannsóknir á áhrifum súrnunar beindust í fyrstu einkum að kalkmyndandi lífverum, t. d. sviflægum kalkþörungum og kóröllum[11]. Rannsóknir hafa orðið víðtækari með tilraunum á rannsóknastofum og úti í náttúrunni[12]. Sveiflur í lífríki, umhverfi og koldíoxíðstyrk í lofti á fyrri tímum í sögu Jarðar hafa sagt sögu um útrýmingu tegunda[13]. Vaxandi þekking er núorðið fléttuð inn í líkön og þannig er reynt að skyggnast inn í framtíðina. Með þeim hætti hafa áhrif á efnahagslega mikilvæg vistkerfi[14] og tegundir verið rannsökuð. Fyrir tilstilli Norrænu ráðherranefndarinnar hefur verið tekin saman skýrsla um súrnun sjávar í Norðurhöfum og Norður-Íshafi því þar er pH og kalkmettunarstig náttúrulega lágt[15]. Í mikilvægum yfirlitsgreinum hafa fjölmargir sérfræðingar dregið saman rannsóknaniðurstöður og lagt mat á hugsanlega þróun fram eftir öldinni og áhrif af breytingum á sjó og lífríki[16,17,18].

Þegar eru dæmi um það að súrnun sjávar hafi haft neikvæðar efnahagslegar afleiðingar. Svo háttar til um haffræðilegar aðstæður á landgrunninu og strandsvæðum við Kyrrahafsstrendur N-Ameríku að kalkmettunarstig er lágt og áhrif súrnunar sjávar geta orðið meiri þar en víðast annars staðar. Á þessum slóðum hefur súrnun haft mikil efnahagsleg áhrif á rekstur eldisstöðva þar sem klaktar eru út ostrulirfur til áframeldis. Í stöðvum, þar sem dælt var inn strandsjó, tók að bera á framleiðslubresti 2006 og meðfylgjandi tekjutapi sem rannsóknir sýndu að rekja mætti til lágs kalkmettunarstigs, Ωar, í sjónum á svæðinu[19]. Við þessu var brugðist með því að fylgjast náið með eiginleikum sjávarins sem var notaður, beita efnafræðiaðferðum til að hækka kalkmettunarstigið en sum fyrirtæki fluttu starfsemi sína brott af svæðinu[20]. Athyglisvert er að ostrulirfur í ræktunarstöðvunum þurftu sjó með lágmarks kalkmettunarstig til þess að ná þroska og byrja að mynda kalkskel. Í lífssögu ostrunnar ræðst þetta á 1–2 dögum eftir klak. Lirfur sem komast ekki yfir þennan áfanga eru úr sögunni.

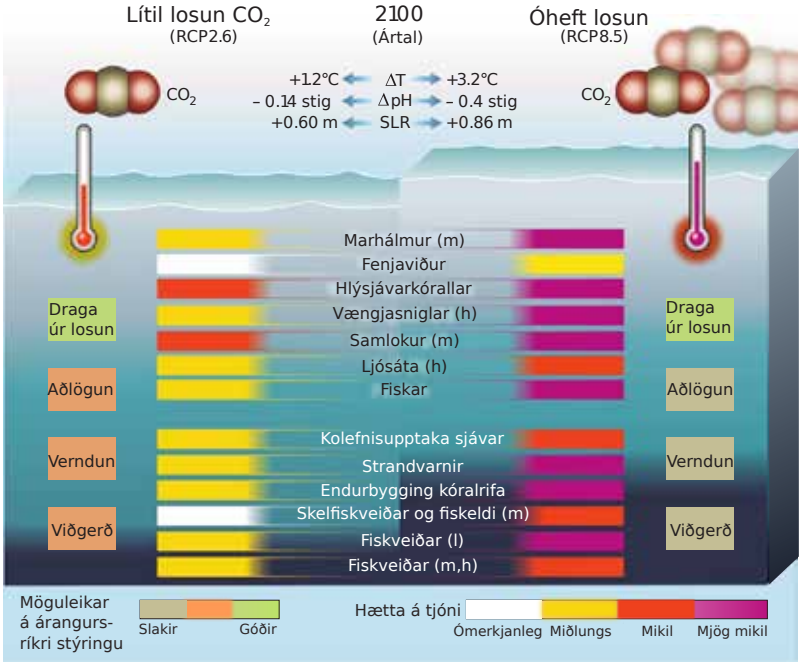
6.7 Afleiðingar súrnunar, tvær sviðmyndir

Sumarið 2015, skömmu fyrir fundinn sem leiddi til Parísarsamkomulagsins, var birt yfirlitsgrein þar sem fjallað var um líkleg áhrif umhverfisbreytinga og hvernig lífríki og vistkerfi hafsins yrðu árið 2100, annars vegar við losun CO_2 samkvæmt RCP2.6 ferlinum og hins vegar við óhefta losun, samkvæmt RCP8.5 ferlinum[18]. Í yfirlitsgreininni voru dregnar saman niðurstöður úr tilraunum, beinum mælingum og úr líkönum. Á mynd 6.3 er helstu niðurstöðum lýst á myndrænan hátt.

Vinstri hluti myndarinnar sýnir sviðsmynd RCP2.6 með 1.2°C hlýnun, sjávarborðshækkun 0.60 m og pH lækkun um 0.14 einingar. Hér má rifja upp að í þessari sviðsmynd tekur pH að hækka á ný eftir miðja öldina (mynd 6.1). Á litakvarða sem gefur til kynna áhættuna sem fylgir breytingunum er gulur litur einkennandi fyrir þessa sviðsmynd sem þýðir hófleg áhrif. Bæði hlýsjávarkórallar og samlokur (kalkmyndandi skeljar) hafa þó rautt litarmerki sem gefur til kynna mikil áhrif. Hlýsjávarkórallar mynda aragónítkalk og þurfa hátt kalkmettunarstig, a.m.k. Ωar>3.25. Mettunarstig aragóníts verður trúlega orðið lægra en svo á búsvæðum rifmyndandi kóralla við 560 ppm CO_2 styrk í lofti[21]. Því munu svæðum með hlýsjávarkóröllum og tilheyrandi vistkerfum trúlega fækka næstu áratugi. Einnig kemur fram á hvítum reit, merktum samlokum á vinstri hluta myndarinnar, að þær megi áfram rækta en það verður aðeins í stöðvum sem geta stýrt kalkmettunarstigi sjávar sem þar er notaður.

Á hægri hluta myndarinnar er RCP8.5 sviðsmyndin með 3.2°C hlýnun, sjávarborðshækkun 0.86 m og pH lækkun um 0.4 einingar. Á litakvarðanum, sem gefur til kynna áhættuna sem fylgir breytingunum eru einkum rauðir og fjólublár litir sem gefa til kynna að miklar eða mjög miklar afleiðingar einkenna RCP8.5 sviðsmyndina. Aðeins fenjaviður (mangroves) sleppur með hófleg áhrif.

Mjög mun hægja á upptöku hafsins á koltvíoxíði frá andrúmslofti, sérstaklega við óhefta losun. Höfin taka nú upp um 25% af koltvíoxíði sem berst í andrúmsloftið með bruna. Minni hlutdeild hafsins eykur líkur á enn sterkari gróðurhúsaáhrifum.



Mynd 6.3 Breytingar á eðlisþáttum og efnafræði sjávar og áhrif á lífríki og þjónustu vistkerfa, tvær sviðsmyndir. Í annarri sviðsmyndinni er dregið verulega úr losun (RCP2.6) en í hinni er losun óheft (RCP8.5). Breytingar á hita (ΔT) og sýrustigi (ΔpH) eru frá 1870 – 1899 til 2090 – 2099, en hnattræn breyting í sjávarstöðu (SLR) frá 1901 til 2100. Áhrif RCP2.6 eru mun vægari, en mikilvæg þjónusta vistkerfa og nytjar þeirra mun þó eiga undir högg að sækja sem gerir kröfu til skilvirkrar stýringar. Stafir innan sviga merkja staðsetningu (l:breiddargráður lægri en 30°; m: 30°–60°; h: > 60°. Heimild myndar er 18, sjá einnig heimild 28.)

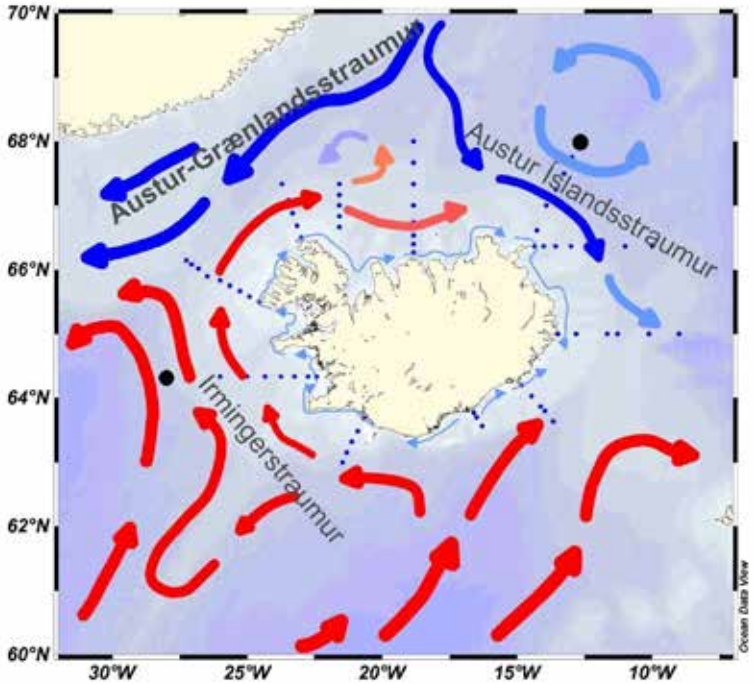
Í stuttu máli voru heildarniðurstöður settar fram í fjórum atriðum:

- Í fyrsta lagi að höfin hafa sterk áhrif á veðrakerfi og að þau þjóna velferð manna á margvíslagan hátt.
- Í öðru lagi hafa hnattrænar breytingar nú þegar haft áhrif á einstakar lífverur og vistkerfi strandsvæða. Jafnvel við stórminnkaða losun, RCP2.6, er hætt við miklum áhrifum á ýmsar tegundir áður en að aldamótum kemur. Áhrifin koma fram á öllum breiddargráðum frá hitabelti til pólsvæða.
- Í þriðja lagi verður nauðsynlegt að draga úr losun að mörkum sviðsmyndar RCP2.6 til að komast hjá miklum og óafturkræfum breytingum á vistkerfum hafsins og nýtingarmöguleikum.
- Í fjórða lagi minnka möguleikar manna til að bregðast við, eða finna mótvægi við breytingar sem fylgja vaxandi styrk CO_2 í andrúmsloftinu.

Þessar sviðsmyndir eru dökkar, einkum hvað varðar þróun lífríkis hafsins, ef losun koltvíoxíðs fylgir RCP8.5 ferlinu út öldina. Þá mun lífríki hafsins hafa tekið miklum breytingum vegna hlýnunar og súrnunar hér við land sem annars staðar. Rannsóknir á áhrifum súrnunar á nýliðun Atlantshafsþorsks við þær aðstæður sem verða í lok aldarinnar samkvæmt RCP8.5 benda til þess að afföll á þorsklirfum muni verða allt að fjórðungi meiri en nú gerist[22]. Súrnun mun bætast við aðra umhverfisþætti sem hafa áhrif á nýliðun og þar með árgangastyrk og afrakstur.

6.8 Hafið við Ísland

Árið 1983 hófst samvinnuverkefni Hafrannsóknastofnunar og Lamont-Doherty Earth Observatory við Columbiaháskólann í New York um rannsóknir á árstíðabreytingum á CO_2 í sjó og flæði CO_2 milli lofts og sjávar, annars vegar í hlýjum Atlantssjó suðvestur af landinu og hins vegar norðan landsins í svalsjó Íslandshafs (mynd 6.4). Sjórinn á þessum stöðum er hvor með sínum einkennum. Atlantssjórinn að uppruna frá hlýsjávarsvæðum sunnar í Atlantshafi en svalsjórinn hefur einkenni frá Norðurhöfum, hann er kaldur og með lægri seltu. Gagnasöfnun fyrstu tvö árin leiddi til nýrrar þekkingar á samspili lífríkis, gróðurs og veðurs á þessum svæðum svo ákveðið var að halda verkefninu áfram og efla tækjakost[23]. Þetta er upphafið að tveimur gagnarunum sem hefur verið viðhaldið síðan og eru mikilvægar því þær sýna hvernig hlýsjórinn og svalsjórinn hafa svarað sífelldri aukningu á styrk CO_2 í lofti. Þetta verkefni er nú hluti af vöktun Hafrannsóknastofnunar á ástandi sjávar við Ísland, vetur, vor, sumar og haust. Það eru ekki síst mælingar um miðjan vetur sem reynast gagnlegar til að meta langtímabreytingar á yfirborðssjó, því á þeim árstíma er



Mynd 6.4 Yfirborðsstraumar við Ísland og stöðvanet sjórannsókna Hafrannsóknastofnunar. Tveir staðir í stöðvanetinu þar sem fylgst er með súrnun sjávar eru merktir sem svartir punktar. (Heimild: sjá umfjöllun í tilvísun 29.)

svifþörungavöxtur nær enginn en flæði varma og lofttegunda milli lofts og sjávar í hvað mestum ham.

Rannsóknir hér við land á öðrum árstímum hafa auk þess veitt mikilvægar upplýsingar um árstíðasveiflur á sýrustigi og koltvíoxíðstyrk og samskipti lofts og sjávar[24]. Enn ítarlegri upplýsingar um skammtímasveiflur nást með mælibauju sem nú er á mælistaðnum í Íslandshafi í samvinnu Hafrannsóknastofnunar og bandarísku Haf- og veðurfræðistofnunarinnar NOAA[25].

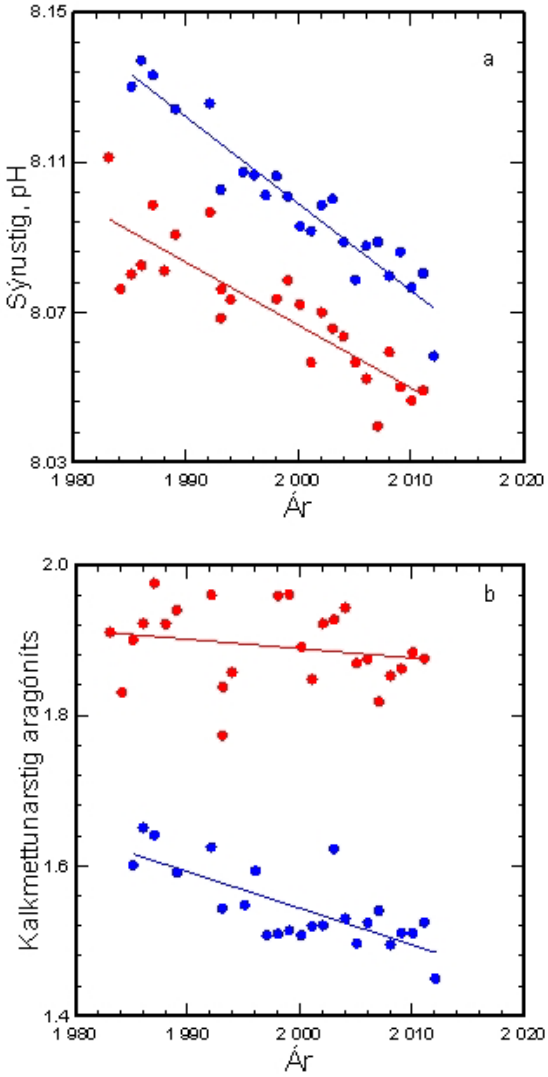
Aðeins er til ein önnur álíka löng mælingaruna, sú er frá heittempruðu hafsvæði Atlantshafs í grennd við Bermuda. Styttri runur eru til frá öðrum heimshöfum. Þær bera allar vitni um það hvernig höfin súrna[26].

Mynd 6.5 sýnir að súrnunareinkennin á þessum tveimur hafsvæðum hér við land eru hvert með sínum hætti og tengist það mismunandi uppruna og eiginleikum sjávarins. Sýrustig, pH, yfirborðssjávar í Íslandshafi um miðjan vetur er hærra en í hlýsjónum sunnan landsins en sýrustigið þar fellur hraðar en í hlýsjónum og reyndar hraðar en annars staðar í höfunum, 0.0024/ár[27]. Í hlýsjónum fellur pH álíka hratt og algengt er á mörgum öðrum hafsvæðum, eða um 0.0017/ár.

Kalkmettunarstigið í sjó hér við land er lágt af náttúrulegum ástæðum, einkum vegna lágs sjávarhita hér norðarlega í Atlantshafi. Það er lægra og fellur örar með tíma í svalsjónum en í hlýsjónum (mynd 6.5b). Kalkmettunarstig aragóníts, Ωar, í svalsjó Íslandshafs hefur fallið u. þ. b. 0.15 á rannsóknatímanum. Það er nú um 1.45 í yfirborðssjó á veturna, það lækkar með dýpi og á um 1700 m dýpi er sjórinn við mettunarmörk, Ωar=1. Vegna vaxandi CO_2 mjakast kalkmettunarmörkin jafnt og þétt upp á við og þannig breiðist undirmettaður sjór með Ωar<1 yfir sífellt stærri hluta hafsbotnsins í Íslandshafi. Í hlýsjónum er kalkmettunarstigið hærra, Ωar um 1.9 (mynd 6.5), það hefur lækkað hægar og það sveiflast meira en í Íslandshafi. Það tengist einkum meiri hlýnun og seltubreytingum í hlýsjónum á rannsóknatímanum heldur en í Íslandshafi (sjá nánar í grein 7.1). Hlýnunin hefur unnið á móti lækkandi kalkmettun vegna súrnunar.

6.8.1 Árstíðasveiflur – langtímabreytingar

Í yfirborði hafsins við Ísland eru miklar árstíðasveiflur, ekki einungis á hita, heldur sveiflast sýrustig, pH, einnig og kalkmettunarstig, Ωar. Myrkustu vetrarmánuðina er nánast engin ljóstillífun, þörungavöxtur, en hann eykst með hækkandi sól. Þá binda þörungar koltvíoxíð og mynda lífrænan vef. Við það hækkar pH og Ωar. Öndverða ferlinu, öndun og niðurbroti lífræns efnis, fylgja gagnstæðar breytingar sem færa pH og Ωar að lokum aftur að vetrargildum. Í Íslandshafi er árleg sveifla pH 0.12 stig og Ωar 0.75. Sumar tegundir í lífríki hafsins valda sveiflunum og aðrar eru háðar aðstæðum sem koma fram með þeim. Lífríkið hefur þróast og mótast af aðstæðunum á jarðsögulegum tíma. Því er



Mynd 6.5 Sýrustig (a) og kalkmettunarstig (b) í yfirborði hlýsjávar (rautt) og svalsjávar (blátt) að vetrarlagi. (Mynd uppfærð frá heimild 25.)

ástæða til að skoða áhrif súrnunar sjávar á náttúrulegu árstíðasveiflurnar. Það vekur spurningar um það hvernig árstíðasveiflur sýru- og kalkmettunarstigs hafi hliðrast frá því sem var fyrir iðnvæðingu. Niðurstöður frá mælingadufli NOAA í Íslandshafi benda til þess að nú orðið sé pH allt árið neðan þess sveiflusviðs sem það var áður á og kalkmettunarstig mestallt árið[26]. Svipaðar breytingar í yfirborði sjávar eiga sér stað víðar í höfunum og stuðla, ásamt öðrum umhverfisþáttum, t.d. hlýnun, að breytingum á vistkerfum. Afleiðingar fyrir lífríkið munu ráðast af því hve langt súrnun hafsins mun ganga, eins og ráða má af mynd 6.3.

6.9 Áhrif á lífríki við Ísland

Í lífríki hafsins við Ísland eru fjölmargar kalkmyndandi tegundir. Sumar þeirra, t.d. hörpudiskur og kræklingur, eru nýttar sem matvæli og kalkþörungar eru unnir af hafsbotni til kalkframleiðslu. Margar aðrar tegundir eru hluti af fjölbreytilegu lífríki og hafa mismikla þýðingu í fæðuvef hafsins. Það er erfitt að spá um hver verði áhrif súrnunar hér við land. Þau geta birst óvænt eins og gerðist í ostruræktun við Kyrrahafsstrendur N-Ameríku. Áhrifin geta komið fram, án þess að eftir því sé tekið, hjá tegundum í lífríkinu sem eru ekki nýttar. Með grunnþekkingu á lífríkinu og tengslum tegunda við umhverfisþætti og kalkmettunarstig er unnið að því að bæta þekkingu á áhættunni sem fylgir súrnun sjávar hér við land[12].

Stærðir	Styrkur CO2 fyrir iðnvæðingu, 280 ppm	Nútíma styrkur CO2, 400 ppm	% breyting miðað við fyrir iðnvæðingu	2x styrkur CO2 frá iðnvæðingu 560 ppm	% breyting miðað við fyrir iðnvæðingu	2 x styrkur CO2 og hlýnun um 2°C 560 ppm	% breyting miðað við fyrir iðnvæðingu	Framtíðar-styrkur CO2 900 ppm	% breyting miðað við fyrir iðnvæðingu
Hitastig [°C]	5	5		5		7		5	
Selta	35	35		35		35		35	
Sýrustig, pH	8.173	8.038		7.906		7.909		7.714	
H+ [mol/kg]	6.707×10^{-9}	9.171×10^{-9}	+37	1.243×10^{-8}	+85	1.234×10^{-8}	+84	1.931×10^{-8}	+288
CO2 (uppl.) [µmol/kg]	14.5	20.8		29.1		27.1		46.7	
HCO3- [µmol/kg]	1932.1	2018.5		2085.1		2067.9		2156.6	
CO32- [µmol/kg]	144.6	110.5	-24	84.2	-42	91.3	-37	56.1	-61
TCO2 [µmol/kg]	2091.3	2149.8		2198.4		2186.3		2259.3	
Kalkmettunarstig, Ωar	2.18	1.67		1.27		1.38		0.84	

Tafla 6.2 Reiknaðir eiginleikar kolefniskerfis í sjó miðað við koltvíoxíð í lofti: a) fyrir iðnvæðingu, 280 ppm, b) á okkar tíma, 400 ppm, c) við tvöfaldan styrk þess er var fyrir iðnvæðingu, 560 ppm, með og án 2°C hlýnunar, og d) í framtíð ef styrkur koltvíoxíðs í lofti nær 900 ppm. Miðað er við seltu= 35.0, basastig 2300 µmol/kg og að andrúmsloft og yfirborðssjór séu í jafnvægi.

Tilvísanir

1 Rhein, M., S.R. Rintoul, S. Aoki, E. Campos, D. Chambers, R.A. Feely, S. Gulev, G.C. Johnson, S.A. Josey, A. Kostianoy, C. Mauritzen, D. Roemmich, L.D. Talley og F. Wang, 2013. Observations: Ocean. Í Climate Change 2013; sjá heimild 2 í kafla 3.

2 Sjá umfjöllun um Parísarsamkomulagið í grein 3.10.

3 Bopp, L., Resplandy, L., Orr, J.C., Doney, S.C., Dunne, J.P., Gehlen, M., Halloran, P., Heinze, C., Ilyina, T., Seferian, R. & Tjiputra, J. 2013. Multiple stressors of ocean ecosystems in the 21st century: projections with CMIP5 models. Biogeosciences 10. 6225-6245

4 Sjá umfjöllun í grein 3.1.

5 Khatiwala, S., ofl. 2013. Global ocean storage of anthropogenic carbon. Biogeosciences 10(4)2169-2191.

6 Takahashi, T. 2004. The fate of industrial carbon dioxide. Science 305, 352-353.

7 AMAP, AMAP Assessment 2013. Arctic Ocean Acidification 2013. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP): Oslo, Norway, 99 bls.

8 Takahashi, T. ofl. 2009. Climatological Mean and Decadal Change in Surface Ocean p CO2, and Net Sea-air CO2 Flux over the Global Oceans. Deep-Sea Research II 56. 554-557.

9 Sjá einnig umfjöllun í grein 3.5.

10 J.-P., G. & H.L. 2011. Ocean acidification: Background and history, in Ocean acidification, G.J.-P.H.L. (ritstj.). Oxford University Press: New York. 326 bls.

11 Orr, J.C., ofl. 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. Nature, 437, 681-686.

12 Hrönn Egilsdóttir 2017. Calcifying organisms in changing shallow and deep marine environments, PhD dissertation, Faculty of Earth Science, University of Iceland, 119 s.

13 Zeebe, R. E. 2011. Where are you heading Earth? Nature Geosci. 4,216-417.

14 Faya, G., J.S. Linka & J.A. Hareb 2017. Assessing the effects of ocean acidification in the Northeast US using an end-to-end marine ecosystem model. Ecological Modelling. 347: p. 1-10.

15 AMAP, 2014. Arctic Ocean Acidification 2013: An Overview. AMAP, Osló, Noregi. 27 bls.

16 Schiermeier, Q. 2011. Earth´s Acid test. Nature 471. 154-156.

17 Kroeker, K.J., ofl. 2013. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. Global Change Biology 19, 1884–1896.

18 Gattuso, J.-P., ofl. 2015. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO2 emissions scenarios. Science 349, bls. 6243.

19 Barton, A., ofl. 2012. The Pacific oyster, Crassostrea gigas, shows negative correlation to naturally elevated carbon dioxide levels: Implications for near-term ocean acidification effects. Limnol. Oceanogr. 57(3) 698–710.

20 Chan, F., ofl. 2007. The West Coast Ocean Acidification and Hypoxia Science Panel: Major Findings, Recommendations, and Actions 2016. California Ocean Science Trust: Oakland, California, USA.

21 Hoegh-Guldberg, O., ofl., Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. Science 318, bls. 1737-1742.

22 Stiasny, M.H., Mittermayer, F.H., Sswat, M., Voss, R., Jutfelt, F., Chierici, M., Puvanendran, V., Mortensen, A., Reusch, T.B. & Clemmesen, C., 2016. Ocean acidification effects on Atlantic cod larval survival and recruitment to the fished population. PloS one, 11(8) p.e0155448.

23 Takahashi, T., ofl. 1985. Seasonal variability of the carbon-nutrient chemistry in the ocean areas west and north of Iceland. Rit Fiskideildar 9. 20-36.

24 Takahashi, T., ofl. 1993. Seasonal variation of CO2 and nutrient salts over the high latitude oceans: A comparative study. Global Biogeochemical Cycles 7(4) 843-878.

25 Sutton, A.J., ofl. 2016. Using present-day observations to detect when anthropogenic change forces surface ocean carbonate chemistry outside preindustrial bounds. Biogeosciences 13(17) 5065-5083. Sjá einnig www.pmel.noaa.gov/co2/story/Iceland.

26 Bates, N.R., ofl. 2014. A time-series view of changing ocean chemistry due to ocean uptake of anthropogenic CO2 and ocean acidification. Oceanography 27(1) 126–141.

27 Olafsson, J., ofl. 2009. Rate of Iceland Sea acidification from time series measurements. Biogeosciences 6. 2661-2668.

28 IGBP, IOC & SCOR, 2013. Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third Symposium on the Ocean in a High- CO2 World. International Geosphere-Biosphere Programme: Stockholm, Sweden.

29 Myndin er lítillega aðlöguð úr Astthorsson, O.S., Valdimarsson, H., Gudmundsdottir, A. & Óskarsson, G.J., 2012. Climate-related variations in the occurrence and distribution of mackerel (Scomber scombrus) in Icelandic waters. ICES journal of marine science, 69(7) 1289-1297.

7 Breytingar á ástandi sjávar og áhrif á lífríki í sjó

Samantekt

1. Langtímavöktun á ástandi sjávar á landgrunninu umhverfis Ísland hefur sýnt breytileika, bæði milli ára og áratuga, sem oftast tengjast víðáttumeiri veðurfarssveiflum í Norður-Atlantshafi.
2. Frá því rétt fyrir aldamót fram til ársins 2016 hafa hiti og selta í sjónum umhverfis Ísland oftast verið um og yfir meðaltali.
3. Breytingar á ástandi sjávar hafa á undanförnum áratugum haft veruleg áhrif á framvindu mikilvægra þátta vistkerfisins í sjónum.
4. Af uppsjávarfiskum hér við land eru loðna, makríll og sandsíli þær tegundir sem hafa sýnt hvað mestar breytingar í stofnstærð og útbreiðslu á undanförnum árum og sem líklegast eiga sér skýringar í breyttum umhverfisaðstæðum.
5. Loðnan hefur hopað og haldið sig lengra norður í höfum og vestar yfir landgrunni Austur Grænlands. Jafnframt hefur dregið úr nýliðun og stofninn minnkað. Á árunum 2010–2016 hafa um 1–3 milljón tonn af makríl verið mæld innan íslenskrar lögsögu ár hvert og afli aukist úr um 40 þúsund tonnum í um 150 þúsund tonn.
6. Á hlýindatímabilinu sem hófst rétt fyrir aldamót hefur hrygningarstofn þorsks stækkað stöðugt og hefur hann ekki verið stærri í um 40 ár. Samanburður á stofnvísitölum fyrir árin 1985–1996 (kalt tímabil) annars vegar og 2002–2015 (hlýtt tímabil) sýnir hins vegar að miðja útbreiðslu hefur aðeins í litum mæli hliðrast inn á kaldari svæði. Litlar breytingar í útbreiðslu og nýliðun styðja þá kenningu að við Ísland sé þorskurinn á kjörsvæði sínu og því vel aðlagaður til að takast á við breytingar sem átt hafa sér stað í umhverfi sjávar.
7. Stofnstærðir suðlægari þorskfiskategunda (t.d. ýsa, spærlingur, lýsa) hafa stækkað og útbreiðslusvæði þeirra hliðrast til norðurs á seinustu árum.
8. Margir minni stofnar og flækingar af suðrænum uppruna, sem hingað til hafa aðallega fundist undan suðurströndinni, hafa á undanförnum árum einnig veiðst í auknum mæli á landgrunninu fyrir norðan land.
9. Frá útkomu seinustu loftslagsskýrslu hafa átta fisktegundir veiðst í fyrsta sinn á Íslandsmiðum og samtals frá hlýindatímabilinu sem hófst fyrir aldamótin hafa 34 áður óþekktar fisktegundir veiðst innan 200 mílna lögsögunnar.
10. Á undanförnum árum hafa markverðar breytingar orðið á útbreiðslu og fjölda nokkurra hvalategunda í hafinu kringum Ísland. Talið er að þessar breytingar tengist að mestu breyttum fæðuskilyrðum á landgrunninu við Ísland. Bæði landsel og útsel hefur fækkað við Ísland á undanförnum árum og kann það að einhverju leyti að tengjast breytingum á fæðuskilyrðum.
11. Fækkun hefur orðið á flestum sjófuglastofnum og líklega stafar hún af breyttum lífsskilyrðum, þ.e. breytingum í stofnum uppsjávarfiska (loðnu, sandsíli) og dýrasvifs.
12. Breytingar þær sem á undanförnum árum hafa átt sér stað í vistkerfi sjávar eru að verulegu leyti taldar tengjast náttúrulegri sveiflu. Undirliggjandi er þó einnig sú hnattræna hlýnun sem tengist gróður-

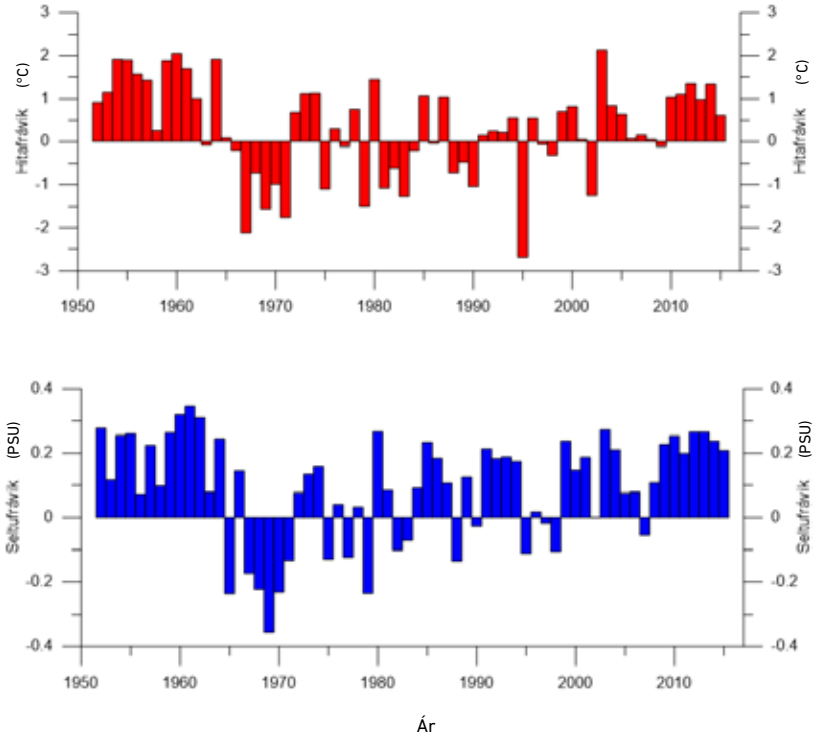
húsalofttegundum en enn sem komið er er mjög erfitt að aðgreina hinar náttúrulegu breytingar frá þeim sem tengjast almennri hlýnun jarðar.

13. Skýringar á orsakasamhengi umhverfisþátta og breytinga í vistkerfi sjávar kalla á mun ítarlegri rannsóknir en framkvæmdar hafa verið til þessa. Á næstu árum og áratugum er mikilvægt að vakta og skrá hvernig vistkerfi Íslandsmiða bregst við veðurfarsbreytingum, bæði þeim staðbundnu og eins þeim hnattrænu.

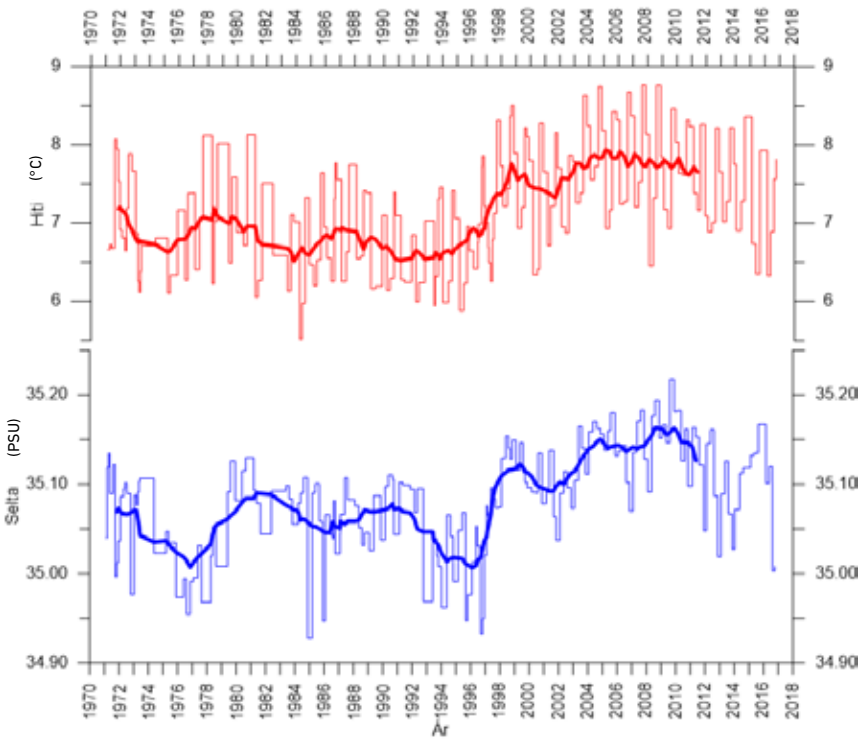
7.1 Langtímabreytingar á ástandi sjávar

Ísland er staðsett á straumamótum þar sem hlýr sjór Norður-Atlantshafsstraumsins (Golfstraumsins) og Irmingerstraumsins streymir til norðurs og mætir köldu suðurflæði Austur-Grænlandsstraumsins og Austur-Íslandsstraumsins[1,2]. Lítill hluti Irmingerstraumsins streymir til norðurs vestan Íslands og nær síðan inn á landgrunnið fyrir norðan landið. Langtímarannsóknir hafa sýnt breytileika, bæði milli ára og áratuga, á ástandi sjávar á landgrunninu norðan Íslands og tengjast tímabil hlýnunar og kólnunar oftast víðáttumeiri veðurfarsbreytingum í Norður-Atlantshafi[3,4]. Breytileiki hita og seltu sjávar á landgrunninu umhverfis Ísland er mismikill og eru sveiflur norðan við landið yfirleitt mun meiri en sunnan við það vegna nálægðar við pólsjóinn í Austur-Grænlandsstraumi, svalsjóinn í Austur-Íslandsstraumi, hafísáhrifa, breytinga á innflæði norður fyrir land og kaldari vinda úr norðri. Þessar breytingar á ástandi sjávar hafa haft veruleg áhrif á framvindu mikilvægra þátta vistkerfisins í sjónum, líkt og rakið hefur verið í fyrri skýrslum um loftslagsbreytingar[5,6] og vísindagreinum[7,8,9].

Mat á árferði í sjónum við Ísland er að hluta byggt á gögnum sem safnað er í svokölluðum vorleiðöngrum Hafrannsóknastofnunar en þá er farið um miðin umhverfis landið og gerðar mælingar á ástandi sjávar, gróðri og átu. Mynd 7.1, sýnir vik (frá meðaltali áranna 1961–1980) í hita og seltu að vori árin 1952–2016 í efstu 200 m á sniði fastra athugunarstöðva norður frá Siglunesi. Á hafísárunum (1965–1971) var sjávarhiti mun lægri og selta minni en áður hafði mælst. Enn fremur var ástand sjávar fremur óstöðugt í rúma tvo áratugi eftir hafísárin en þá skiptust óreglulega á 1–3 ára tímabil hlýrra og kaldra ára. Frá 1998 og til ársins 2016 hafa hiti og selta hins vegar oftast verið um og yfir meðaltali fyrir norðan landið, að undanskildu árinu 2002 er hafís barst inn á Norðurmið í byrjun árs. Flæði Atlantssjávar inn á Norðurmið ber þangað hlýjan og selturíkan sjó sem hefur áhrif á veðurfar á Norðurlandi. Jafnframt berast með innflæðinu næringarsölt sem eru nauðsynleg svifþörungum. Einnig berst með innflæðinu dýrasvif frá landgrunninu vestan landsins og sunnan.



Mynd 7.1 Hita- og seltufrávik í efstu 200 metrum sjávar að vori 1952–2016 á sniði norður frá Siglunesi að 67°N. Sýnd eru vik frá meðaltölum áranna 1961–1980. (Mynd frá Héðni Valdimarssyni, byggt á gögnum Hafrannsóknastofnunar.)



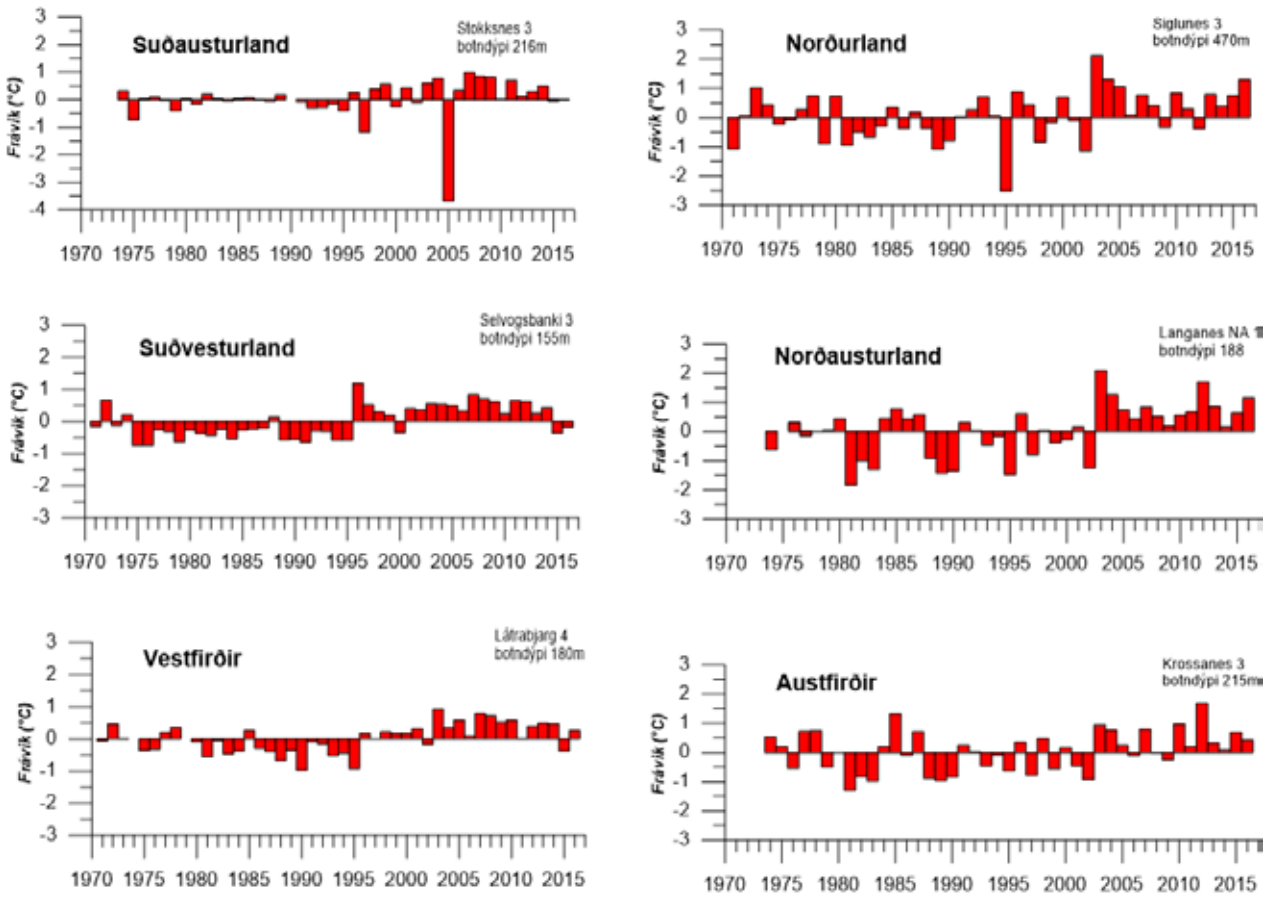
Mynd 7.2 Meðalhiti og selta í efstu 200 metrum sjávar nær ársfjórðungslega árin 1971–2016 í kjarna hlýsjávar vestur af landinu (stöð Fx9). (Mynd frá Héðni Valdimarssyni, byggt á gögnum Hafrannsóknastofnunar.)

Auknu flæði Atlantssjávar norður fyrir land fylgir því almennt aukin framleiðni þörunga og dýrasvifs og þar með bætt fæðuskilyrði fyrir fiskistofna[9]. Undan suður- og vesturströndinni eru greinileg áraskipti í vorkomu og vexti þörunga, sem og átumagni. Breytileikann þar má að einhverju leyti rekja til leysinga og vinda en þeir þættir hafa mikil áhrif á þörungagróðurinn sem dýrasvifið lifir á[6]. Ljóst er þannig að sviptingar í lægstu þrepum fæðukeðjunnar í sjónum geta sagt til sín í vexti og viðkomu nytjastofna í sjónum en hvernig því orsakasamhengi er nákvæmlega háttað er lítið vitað um og því mikilvægt að efla rannsóknir hvað það varðar.

Snið fastra athugunarstöðva umhverfisrannsókna í Faxaflóa nær til vesturs yfir landgrunnið og út í kjarna Irmingerstraumsins á og úti fyrir landgrunnsbrúninni[10]. Ysta stöðin á sniðinu er staðsett í kjarna straumsins og hún gefur til kynna eiginleika Atlantssjávarins sem streymir til norðurs um Grænlandssund. Rannsóknir hafa sýnt sterka samsvörun milli flæðis í yfirborðshringstreymi Norðvestur-Atlantshafs og seltu á 9. stöð á Faxaflóa (Fx9). Langtímabreytingar í hita og seltu á þessari stöð eru einnig í takti við djúpstöðvar á öðrum föstum rannsóknasniðum suður og suðaustur af Íslandi og því má segja að stöðin sýni ástand sjávar í Atlantshafi sunnan Grænlands-Skotlandshryggjar. Hiti og selta á stöð Fx9 hækkuðu tiltölulega hratt á árunum 1996–1998 (mynd 7.2), í kjölfar lágra gilda frá því um 1990, en síðan varð aftur nokkur lækkun. Árið 2003 hækkuðu hiti og selta á ný og síðan hafa gildi verið há fram til 2014 en 2015 og vorið 2016 var hiti í efri sjávarlögum í hlýsjónum vestan og sunnan við landið nokkuð lægri en verið hefur að jafnaði síðustu tvo áratugi.

Hiti sjávar við botn á Íslandsmiðum endurspeglar að nokkru hitadreifingu í efri lögum sjávar. Botnhitinn er að jafnaði lægri fyrir norðan og austan landið vegna áhrifa kaldsjávar úr norðri, en hærri fyrir sunnan og vestan land vegna áhrifa hlýsjávar úr suðri og dýpra blöndunarlags. Mynd 7.3 sýnir breytingar (frávik) á meðalhita 50–100 m yfir botni í maí/júní á sex stöðum umhverfis landið. Hiti við botn hefur að jafnaði verið yfir meðaltali síðasta áratuginn allt í kringum landið. Undantekning var árið 2005 er skilin við Suðausturland færðust til vesturs um skamma hríð. Mælingar að vori árið 2016 sýna að botnhiti er áfram um eða yfir meðaltali þessa árstíma fyrir norðvestan, norðan og austan land. Botnhiti við Suðausturland og Suðvesturland hefur hins vegar lækkað og er nú undir langtímameðaltali.

Breytingar þær sem urðu á ástandi sjávar við Ísland á sjöunda og áttunda áratug seinustu aldar hafa aðallega verið taldar tengjast auknu útstreymi pólsjávar úr Íshafinu. Hækkun hita og seltu á hafsvæðinu umhverfis



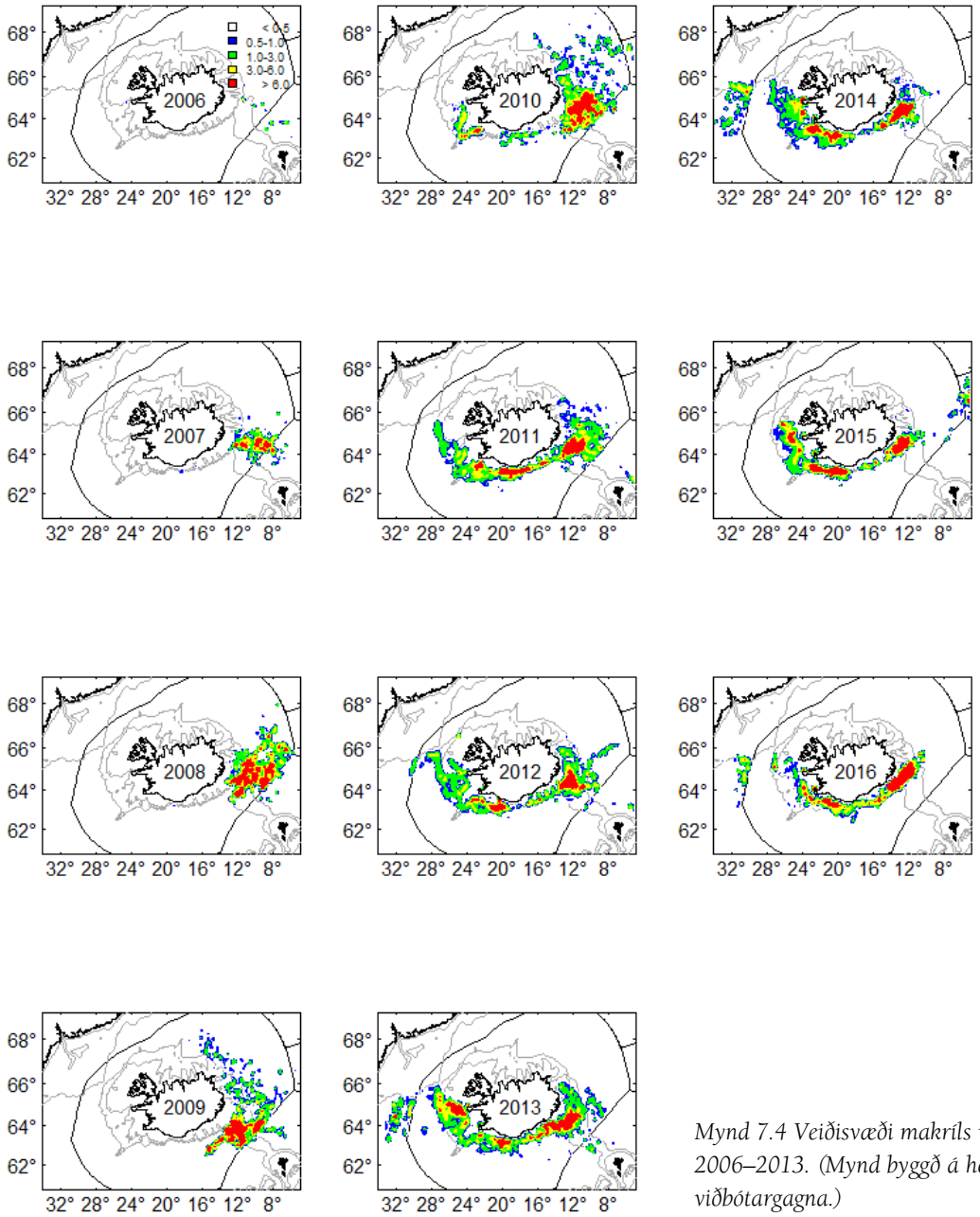
Mynd 7.3 Hitafrávik botnhita (°C) á sex mælistöðvum umhverfis landið. Upplýsingar til hægri á hverri mynd gefa til kynna heiti sniðs, númer mælistöðvar á sniðinu og botndýpi. Meðaltal er tekið af vatnssúlu 50–100 metra yfir botni. Vikin eru frá meðaltali mælitímans. (Mynd frá Héðni Valdimarssyni, byggt á gögnum Hafrannsóknastofnunar.)

Ísland, sem og á víðáttumeira svæði í Norður-Atlantshafi og Norðurhöfum, frá því um miðjan 10. áratuginn hefur á hinn bóginn verið talin jafnast á við hlýindatímabilið sem var á árunum frá um 1920–1960[4]. Hækkun hita og seltu í Íslandsdjúpi suður af landinu og í Irmingerhafi hefur verið sett í samhengi við umfangsmeiri breytingar sem orðið hafa í virkni og hringrás sjávar í Norðvestur-Atlantshafi[11,12,13,14]. Þannig hafa gögn frá rekduflum sýnt nokkra hliðrun í hafsstraumum í byrjun 21. aldar[15]. Þá hefur breytilegt flæði hlýsjávar norður á bóginn og inn í hringrás Norðvestur-Atlantshafs og verið tengt áhrifum af breytilegri stöðu skotvinda[16].

7.2 Lífríki í sjó

Á undanförnum árum hefur verið greint frá margvíslegum breytingum í útbreiðslu fiska og annarra sjávarlífvera í heimshöfunum og í flestum tilfellum hafa þær verið tengdar veðurfarsbreytingum þeim sem nú eru að eiga sér stað[17,18,19]. Þrátt fyrir það eru viðbrögð fiskistofna við veðurfarsbreytingum enn sem komið er tiltölulega lítt þekkt. Þetta stafar að hluta til af því að erfitt er að meta nákvæmlega útbreiðslumörk þeirra og breytingar þar á. Þá má nefna að leitun margra fisktegunda á ákveðin búsvæði leiðir oft til flókinna viðbragða við hlýnun og öðrum þáttum veðurfarsbreytinga. Síðast en ekki síst eru margar fisktegundir undir stöðugu álagi frá veiðum og því er oft erfitt að greina á milli langtímaáhrifa veiða og umhverfisbreytinga.

Eins og getið er um hér að framan hafa athuganir undanfarinna ára sýnt hlýnun og hækkandi seltu, fyrst á hafsvæðinu sunnan og vestan Íslands en síðan einnig norðan við landið[10]. Á nær samfelldu hlýindatímabili sem varað hefur í sjónum hér við land frá því um 1996 hefur hiti hækkað um 1–2°C. Ennfremur hefur hiti frá því um aldamótin 2000 verið með hæsta móti miðað við seinustu áratugi. Á sama tíma hafa átt sér stað verulegar breytingar í útbreiðslu og stærð margra fiskistofna[10]. Þessar breytingar varða nokkra mikilvæga



Mynd 7.4 Veiðisvæði makríls við Ísland 2006–2013. (Mynd byggð á heimild 24 auk viðbótargagna.)

nytjastofna, nokkra tiltölulega algenga stofna sem ekki eru nýttir í dag, flækinga og loks áður óþekktar tegundir. Hér í framhaldi eru dregnar saman helstu breytingar sem átt hafa sér stað á síðustu áratugum í lífríki sjávar við Ísland og þær ræddar í tengslum við nýlegar sveiflur, sem og langtímabreytingar á ástandi sjávar.

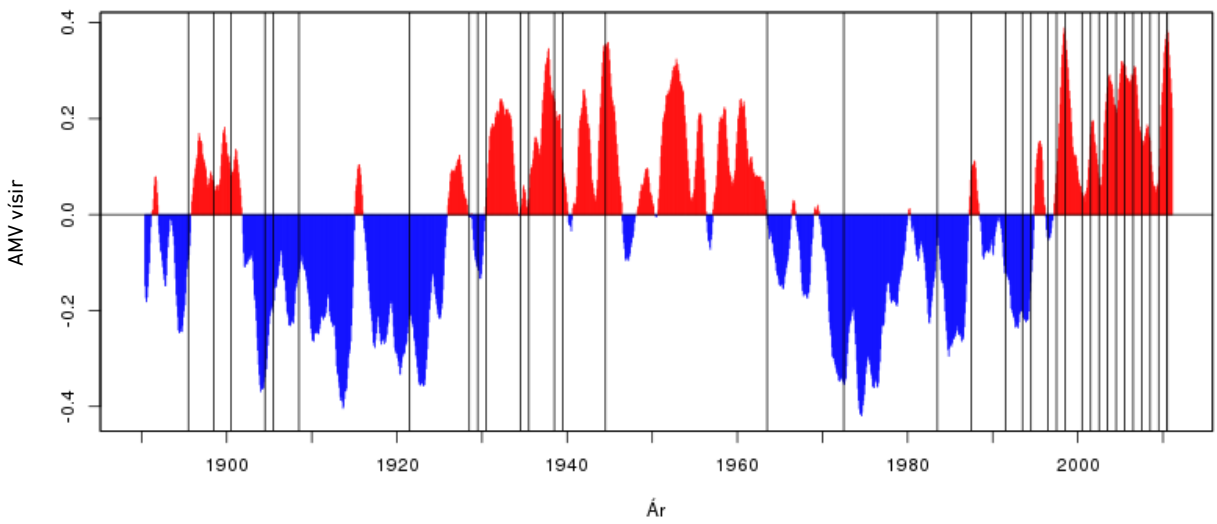
7.2.1 Uppsjávarfiskar

Af uppsjávarfiskum hér við land eru loðna, makríll og sandsíli þær tegundir sem sýnt hafa hvað mestar breytingar í stofnstærð og útbreiðslu á undanförnum árum og sem líklegast eiga sér skýringar í breyttum umhverfisaðstæðum. Hér verður fjallað nánar um loðnu og makríl.

Loðna

Loðnan er einn af fáum nytjastofnum Íslendinga af kaldsjávaruppruna (aðrir sem nefna má eru grálúða, hlýri og rækja) og hún er einstök að því leyti að fullorðin sækir hún á sumrin æti sitt norður í kaldan sjó Íslandshafs og Grænlandssunds þar sem hún meira en þrefaldar þyngd sína[20]. Á haustin gengur hún til baka upp á íslenska landgrunnið og flytur þangað orku af norðlægum slóðum. Loðnan er ein mikilvægasta fæðutegund annarra nytjastofna, svo sem þorsks, grálúðu, ufsa og fleiri tegunda.

Loðnan hefur hopað í hlýindunum á undanförnum árum og haldið sig lengra norður í höfum og vestar yfir landgrunninu við Austur-Grænland. Jafnframt hefur



Mynd 7.5 Sveifla yfirborðshita í Norður-Atlantshafi (AMV vísir) og komur makríls á Íslandsmið. Rauður litur táknar jákvætt hitafrávik og blár neikvætt. Svört þverstrik gefa til kynna ár þar sem vitað er með vissu af makríl við Ísland. (Sjá nánar í tilvísunum 23 og 24.)

dregið úr nýliðun og stofninn minnkað mikið. Sú tilgáta hefur verið sett fram[21] að norðlæg útbreiðsla seiða og rek þeirra yfir á austur-grænlenska landgrunnið, þ.e. á nýjar og sennilega lakari uppeldisstöðvar, séu þættir í orsakaferli sem leitt hefur til nýliðunarbrestsins. Mikilvægt er hins vegar í þessu sambandi að hafa í huga að loðnan er skammlíf tegund og léleg nýliðun, þó að ekki sé nema eitt ár, getur haft mikil áhrif á stofnstærðina. Á sama hátt kann góð nýliðun eitt árið að stuðla að því að stofninn nái sér að verulegu leyti. Í ljósi þessa er nánast ógerningur, miðað við núverandi þekkingu, að spá fram í tímann um þróun loðnustofnsins.

Makríll

Í Norðaustur-Atlantshafi nær útbreiðslusvæði makríls frá Azor- og Grænhöfðaeyjum inn í Miðjarðar- og Svartahaf og norður til Norður-Noregs og jafnvel inn í Hvítahaf. Makríll hefur löngum verið talinn flækingur á Íslandsmiðum og komur hans hingað aðallega verið bundnar þremur tímabilum, þ.e. veiði á stökum fiskum í upphafi 20. aldar, hlýindatímabili á árunum 1925–1955 og síðan á hlýindunum sem hófust undir lok 20. aldar, en frá því tímabili eru upplýsingar um komur og veiði ítarlegastar[22,24]. Á árunum 2002–2006 fékkst makríll á nokkrum stöðum við landið og jafnframt jókst meðafli í síldveiðum. Sumarið 2007 urðu síðan veruleg umskipti í útbreiðslu og magni makríls við Ísland en þá varð hans vart nær samfellt frá Austfjarðamiðum og vestur með allri suðurströndinni. Útbreiðslan var svipuð árin 2008-2013 en árin 2014 og 2016 teygði makríllinn sig enn vestar og inn í grænlenska lögsögu. Árið 2015 var útbreiðslan hins vegar áberandi mikil djúpt suður af Íslandi (mynd 7.4). Á árunum 2010–2016 hafa um 1.1–3.1 milljón tonn af makríl verið mæld að sumarlagi innan íslenskrar lögsögu og afli aukist úr um 36 þúsund tonnum árið 2007 í um 150 þúsund tonn árin 2011–2016.

Á undanförnum árum hefur útbreiðsla verulegs hluta makrílstofnsins í Norðaustur-Atlantshafi hliðrast um nær 1400 mílur til vesturs og um 600 mílur til norðurs. Breytingar á fæðugöngum makrílstofnsins eru þekktar frá fyrri tíð en aldrei fyrr, svo vitað sé, hafa þær verið jafnvíðtækar og nú. Margir samverkandi þættir eru án efa ástæða þess að makríll er nú við Ísland í jafnmiklu magni og raun ber vitni. Auk sterks stofns og góðra fæðuskilyrða skipta líklegast mestu máli hagstæð staðbundin hitaskilyrði sem og hin víðáttumeiri veðurfarsfyrirbrigði í Norður-Atlantshafi. Eitt þessara fyrirbrigða er náttúruleg langtímasveifla heitra og kaldra tímabila í yfirborðshita á Norður-Atlantshafi, sem oft er sýnd með sk. AMV vísi[23]. Sögulegar upplýsingar um makríl hér við land (mynd 7.5) samsvara í stórum dráttum jákvæðu bylgjunni í AMV-sveiflunni og bendir það til þess að á hlýindatímabilum í Norður-Atlantshafi hliðrist útbreiðsla makrílstofnsins til norðurs og vesturs.

Sú spurning er áleitin hvort makríll sé kominn til að vera á Íslandsmiðum en við henni eru ekki einhlít svör. Því ráða margir samverkandi þættir og þar skipta

líklegast mestu máli sjávarhiti, stærð stofnsins og ástand átustofna á beitarsvæðum hans, eins og þegar hefur verið vikið að. Meðan sjávarhiti helst hár má búast við áframhaldandi komum makríls í íslenska lögsögu en lækki hins vegar hiti, og eins ef stofninn minnkar, þá má telja líklegt að það dragi úr göngum vestur og norður á bóginn. Miklir hagsmunir eru í húfi fyrir Íslendinga og því mikilvægt að fylgjast áfram vel með magni og útbreiðslu makríls, sem og öllum umhverfisaðstæðum, í þeim tilgangi að skilja betur hvernig samverkun umhverfis og stofns ræður göngum[24].

7.2.2 Botnfiskar

Þorskur

Í seinustu skýrslu voru raktar ítarlega þær miklu breytingar sem áttu sér stað í útbreiðslu og stærð þorskstofnsins á seinustu öld og að stórum hluta voru taldar tengjast breytingum í veðurfari á Íslandsmiðum og í Norður-Atlantshafi[6]. Á hlýindatímabilinu sem hófst árið 1996 hefur hrygningarstofn þorsks stækkað stöðugt og hefur hann ekki verið stærri í 40 ár[25]. Rannsóknir á útbreiðslu þorsks á grundvelli aflagagna úr stofnmælingu að vori sýna að miðja útbreiðslusvæðis stofnsins hefur aðeins í litlum mæli hliðrast inn á kaldari svæði þegar borin eru saman tiltölulega kalt tímabil frá 1985–1995 og hlýtt tímabil frá 1996–2015. Á sama hátt sýnir samanburður á svæðisbundnum stofnvísitölum fyrir árabilin 1985–1996 annars vegar og 2002–2015 hins vegar aðeins óverulega aukningu þorsks á kaldari svæðum við Ísland á seinna tímabilinu[26]. Nýliðun þorskstofnsins hefur verið fremur stöðug síðan 1998 en aftur á móti mun minni en árin 1955–1985. Stórir árgangar á þeim árum tengdust að hluta lirfureki til Grænlands og síðan göngum þess fisks til baka á Íslandsmið við kynþroska. Í seinni tíð hefur tekið fyrir þetta lirfurek og var ástæða þess upphaflega talin tengjast lakara ástandi þorskstofnsins, dreifingu hrygningar og/eða breytingum í straumakerfinu vestan Íslands og í Irmingerhafi. Það hve þorskstofninn hefur sýnt litlar breytingar í útbreiðslu og hve nýliðun hefur verið stöðug frá um 1996 styður þá kenningu að þorskurinn sé við Ísland á kjörsvæði sínu og þannig vel aðlagaður til þess að takast á við þær breytingar sem hafa átt sér stað í umhverfi sjávar.

Ýsa

Á landgrunninu fyrir sunnan Ísland hefur ýsa verið talin vera nálægt norðurmörkum útbreiðslu sinnar. Árin 1998–2003 voru allir árgangar, nema 2001 árgangurinn, yfir meðaltali en árin 2004–2014 hafa allir árgangar, nema árgangar 2007 og 2014, verið undir meðallagi[25]. Á fyrra tímabilinu stækkaði ýsustofninn verulega og samfara því, sem og vegna hærri hita sjávar, stækkaði útbreiðslusvæðið norður með vesturströnd Íslands og inn á landgrunnið fyrir norðan land. Á síðara tímabilinu hefur ýsustofninn aftur minnkað en þrátt fyrir það áfram haft víðáttumikla útbreiðslu fyrir norðan land. Samanburður á útbreiðslusvæði ýsu í stofnmælingu botnfiska á Íslandsmiðum köldu árin 1985–1989 og hlýju árin 2004–2015 sýnir að miðja þess hefur hliðrast um 300 km norður með vesturströnd Íslands milli tímabilanna[26]. Þess má einnig geta að stofnstærðir tveggja annarra þorskfiskategunda, spærlings og lýsu, hafa stækkað og útbreiðslusvæði þeirra færst til norðurs á seinustu árum.

Skötuselur

Þar til um árið 2000 var útbreiðslusvæði skötusels aðallega bundið við afmörkuð svæði í hlýja sjónum undan suðurströndinni. Skötuselur fékkst fram að þeim tíma aðallega sem aukaafli við humarveiðar og frá 1965 til 2000 var ársaflinn um 700 tonn. Á árunum 1998–2007 var hver einasti nýliðunarárgangur stór en eftir það hafa þeir aftur verið minni. Aukin nýliðun hefur verið rakin til þess að hagfellt uppeldissvæði hafi stækkað samfara hækkuðum hita og seltu[27]. Veiðistofninn stækkaði einnig hratt á þessum árum vegna góðrar nýliðunar og samfara því stækkaði einnig útbreiðslusvæðið og náði eftir það með allri suður- og vesturströndinni og inn á landgrunnið fyrir norðan land. Aukin stofnstærð hefur leitt til aukinna veiða sem numið hafa að meðaltali um 2500 tonnum sl. 10 ár. Á allra seinustu árum hefur veiðistofninn minnkað en útbreiðslusvæðið er þó áfram mun víðáttumeira en fyrir hlýindatímabilið sem hófst í kringum 1996 (mynd 7.6)[25].

Minni stofnar og flækingar

Nokkrir minni fiskstofnar af suðrænum uppruna sem hingað til hafa aðallega fundist undan suðurströndinni hafa á undanförnum hlýjum árum einnig veiðst í auknum mæli á landgrunninu fyrir norðan land. Sem

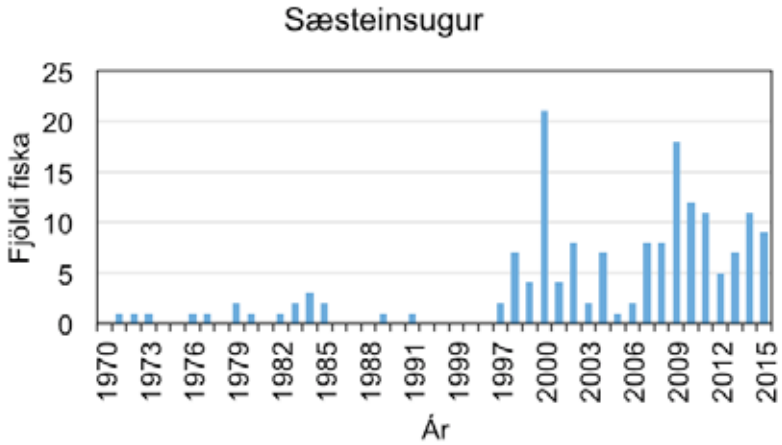
Mynd 7.6 Útbreiðsla skötusels í stofnmælingu botnfiska að vori árin 1985–2016. (Mynd frá Jóni Sólmundssyni, byggt á gögnum Hafrannsóknastofnunar.)

dæmi um þessar tegundir má nefna litlu brosmu, blágómu, fjólumóra og sænál[10]. Sænál er sérlega áhugaverð þar sem stofnstærð hennar og útbreiðslusvæði virðist hafa verið að stækka í öllu Norður-Atlantshafi. Útbreiðslusvæðið hefur fram til þessa verið frá ströndum Azoreyja og Portúgals norður að miðri vesturströnd Noregs. Við Ísland var hún þar til nýlega aðeins þekkt undan suðurvesturströndinni. Árið 2001 veiddist svo sænál í fyrsta sinn í áratug en þar var um að ræða einn fisk sem fékkst undan vesturströnd landsins. Árin 2002, 2003, 2004 og 2007 veiddust svo fleiri fiskar suður og vestur af landinu. Haustið 2004 veiddist sænál í fyrsta skipti svo vitað sé fyrir norðan land og árin 2005, 2006 og 2007 fengust upplýsingar um fleiri fiska sem veiddust úti fyrir Norðurlandi. Þessi dæmi sýna að sænál finnst nú nánast allt í kringum landið[28].

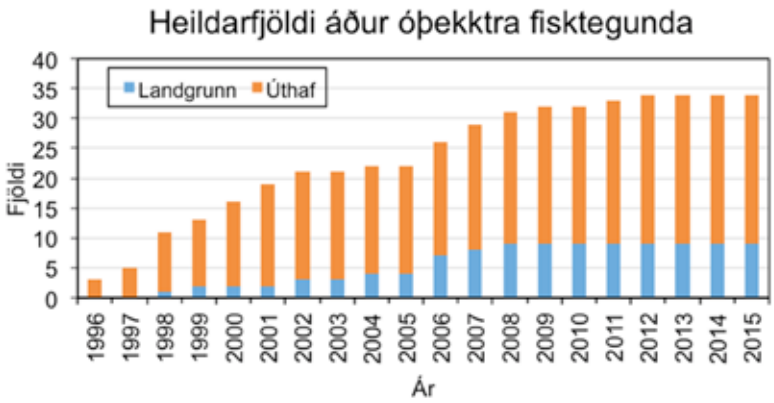
Nokkrir suðrænir flækingsfiskar hafa á seinustu árum veiðst oftar við Ísland en áður hefur þekkst. Meðal þeirra eru t.d. augnasíld, hornfiskur, sæsteinsuga og tunglfiskur[10]. Gögn Hafrannsóknastofnunar um veiði á sæsteinsugu gefa til kynna að á árunum 1970–1997 hafi þær veiðst stöku sinnum hér við land og þá oftast aðeins 1–2 fiskar. Samfara hlýnuninni frá því um miðjan 10. áratug seinustu aldar hefur sæsteinsuga hins vegar veiðst árlega og fjöldinn aukist á seinustu árum (mynd 7.7). Í raun hefur fjöldinn sem veiðst hefur stundum verið enn meiri en myndin gefur til kynna þar sem skráningar gefa í sumum tilfellum (t.d. árin 2007 og 2008) ekki til kynna nákvæman fjölda fiska sem veiddist. Tunglfiskur hefur á sama hátt veiðst í auknum mæli á allra seinustu árum[29]. Að nokkru kann sú aukning að tengjast makrílveiðum í úthafinu suðvestur af Íslandi en nýleg rannsókn á gögnum sem ná yfir rúmlega 100 ára veiði tunglfisks hér við land sýnir svo ekki verður um villst að veiðin og þá líklega einnig útbreiðslan er mjög í takt við hitabreytingar í Norður-Atlantshafi samkvæmt AMV-vísinum.

7.3.4 Áður óþekktar fisktegundir innan íslenskrar lögsögu

Í seinustu skýrslu vísindanefndar (V2008) var greint frá því að á 11 ára tímabili frá 1996–2007 hefðu 26 fisktegundir veiðst í fyrsta sinn innan 200 sjómílna lögsögunnar[6]. Á þeim níu árum sem síðan eru liðin hafa bæst við átta tegundir sem fram til þessa hafa ekki talist til íslensku fiskafánunnar. Mynd 7.8 sýnir skráningar nýrra tegunda á Íslandsmiðum frá 1995–2016[10,30,31]. Sjá má að ein eða fleiri tegund sem ekki hafði veiðst áður



Mynd 7.7 Skráningar um veiði á sæsteinsugu í gögnum Hafrannsóknastofnunar á árunum 1970–2015.

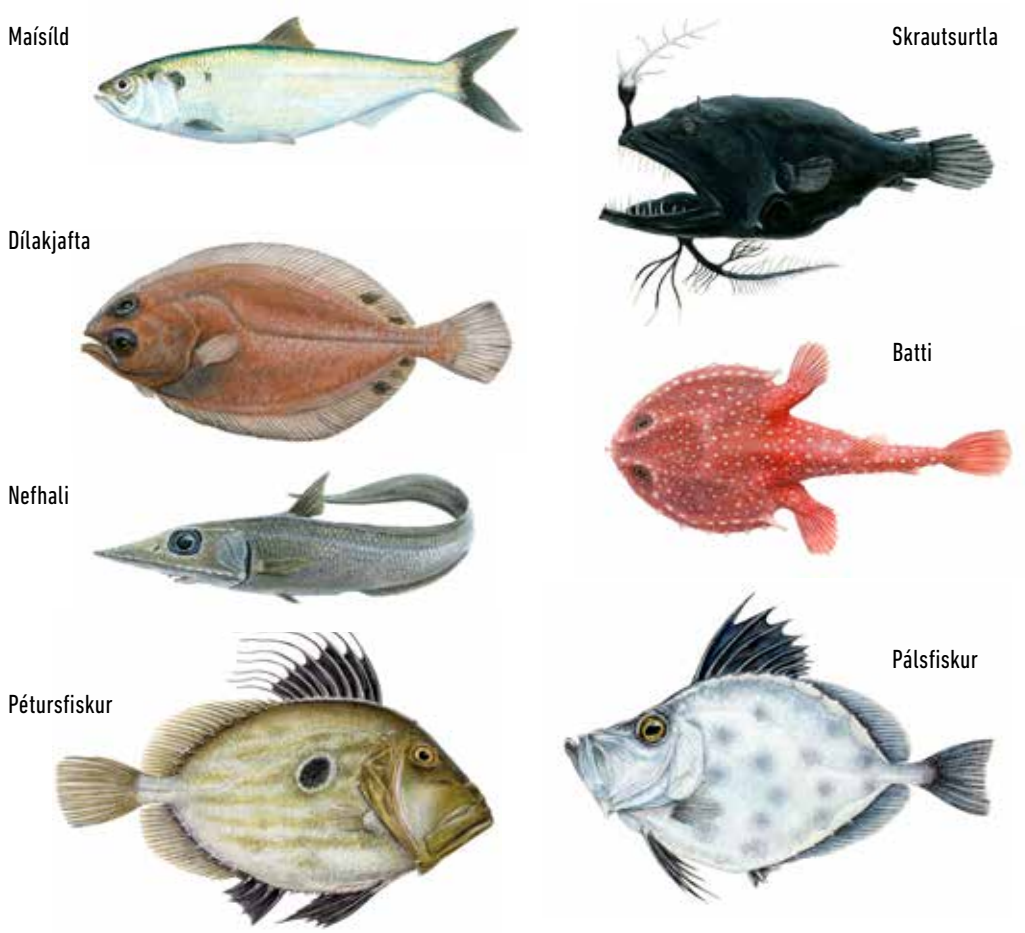


Mynd 7.8 Heildarfjöldi áður óþekktra suðrænna fisktegunda, flokkaðar eftir því hvort þær halda sig yfir landgrunni eða í úthafi, sem veiðst hafa í fyrsta sinn á Íslandsmiðum á árunum 1996–2015. (Byggt á gögnum Hafrannsóknastofnunar.)

hefur veiðst á hverju ári, að undanskildum árunum 2003, 2005, 2010, 2013, 2014 og 2015. Það að ekki hafi veiðst nýjar tegundir á seinustu þremur árum kann að benda til þess að alla vega tímabundið sé að draga úr aðflutningi suðrænna tegunda í lögsöguna. Hugsanlega kann það að tengjast lækkun á hita og seltu sunnan Íslands hin allra seinustu ár. Alls hafa 18 af hinum áður óþekktu tegundum veiðst á aðeins einni stöð og þá sem einn einstaklingur (deplagleypir, tröllageirsíli, rákungur, svartmeiti, luktarlaxsíld, spéfiskur, trölli, násurtla, oddhali, pétursfiskur, maísíld, hringaháfur, eyjasurtla, skriðáll, batti, skrautsurtla og þveráll). Átta tegundir (svartdjöfull, kjáni, kryppuangi, svartskoltur, vígatanni, djúpmóri, silfursporður og randarangi) hafa veiðst á 2–11 stöðvum en ávallt sem stakir fiskar. Af aðeins átta tegundum (bláhá, flundru, blaðhaus, pálsfisk, græna marhnút, silfurpolla, dílakjöftu og nefhala) hafa veiðst fleiri en einn einstaklingur á sömu stöð og af þeim hafa bláháfur og flundra veiðst oftast og víðast. Nokkrar af þessum áður óþekktu tegundum eru sýndar á mynd 7.9 og hér að neðan er fjallað frekar um bláhá og flundru.

Bláháfur veiddist í fyrsta sinn svo vitað sé innan íslenskrar efnahagslögsögu sumarið 1996 við tilraunaveiðar á vegum Japana á túnfiski djúpt suður af Íslandi[32,33]. Á árunum 1997–2005 var bláháfur síðan áfram meðafli við túnfiskveiðarnar og fjöldi fiska sem veiddist á hverri vertíð á bilinu 30 til 848 fiskar. Veiðarnar voru mestar á svæði sem afmarkast milli 60–62°N og 16–24°V, og nyrstu veiðistaðir voru um 50 mílur undan suðurströnd Íslands. Að öllum líkindum endurspeglar þessi útbreiðsla fremur sóknina í túnfiskveiðinni en hina raunverulegu útbreiðslu bláháfsins. Ennfremur bendir þetta til þess að bláháfur sé tiltölulega algengur í úthafinu suður af Íslandi og að veiði í seinni tíð tengist því hinum nýju tilraunaveiðum fremur en hlýnandi veðurfari. Bláháfur finnst á suðlægum slóðum í öllum heimshöfum og árleg veiði er talin um 750–1500 tonn.

Flundra veiddist fyrst með vissu við mynni Ölfusár í september 1999[34]. Áður sama ár höfðu bændur í nágrenninu veitt „undarlegan“ kola en hann barst ekki Hafrannsóknastofnun til skoðunar. Síðan þá hefur flundra fundist nær árlega og á mörgum stöðum og allt í kringum landið. Vorið 2007 fékkst hrygnandi flundra í fyrsta sinn í dragnótaveiðum undan vesturströndinni. Það er augljóst að flundra hefur breiðst hratt út og víða



Mynd 7.9 Nokkrar suðrænar fisktegundir sem veiðst hafa í fyrsta sinn á Íslandsmiðum á undanförnum árum. Maísíld (Alosa alosa), dílakjafta (Lepidorhombus boschii), nefhali (Coelorinchus labiatus), pétursfiskur (Zeus faber), skrautsurtla (Linophryne pennibarbata), batti (Dibranchus atlanticus), pálsfiskur (Zenopsis conchifera). Myndir © Jón Baldur Hlíðberg (www.fauna.is).

á grunnslóð við Ísland frá því að hún fannst fyrst[10]. Undan ströndum Evrópu er flundra bundin við grunnslóð og árósa. Hún er veidd til manneldis í Eystrasalti, dönsku sundunum og Norðursjó og hefur árlegur afli verið um 20 þús. tonn. Í umfjöllun um framandi sjávarlífverur við Ísland benda höfundar á að flundra hafi sennilega borist til Íslands af mannavöldum með kjölfestuvatni skipa og sama telja þeir jafnvel eiga við um græna marhnút[35].

Í ljósi vitneskju um heildarútbreiðslusvæði þeirra áður óþekktu tegunda sem hér hefur verið fjallað um er ekki ólíklegt að sumar þeirra séu fornir íbúar hafsvæðanna suður af Íslandi[32]. Veiði þeirra hér við land á undanförnum árum kann því að nokkru að tengjast aukinni sókn á nýjar og dýpri veiðislóðir. Hins vegar verður jafnframt að telja líklegt að veiði margra hinna áður óþekktu fisktegunda nú á undanförnum árum endurspegli raunverulega hliðrun sem átt hefur sér stað í útbreiðslu fiskafánunnar í Norður-Atlantshafi. Þetta á sérstaklega við um tegundir eins og rákung, pálsfisk, pétursfisk og dílakjöftu sem veiðst hafa hér við land á slóðum þar sem veiðiálag hefur um árabil verið mikið og stöðugt.

7.3 Sjávarspendýr

Hafrannsóknastofnun hefur síðan 1987 staðið að víðtækum, reglubundnum hvalatalningum í mið- og norðaustanverðu Atlantshafi í samstarfi við erlendar systurstofnanir[36]. Talningarsvæðið nær yfir meginhluta sumarútbreiðslusvæðis helstu stórhvalastofna og meginmarkmið talninganna er að leggja grunn að

stofnstærðarmati fyrir helstu tegundir stórhvala, einkum nytjastofna hvala svo sem langreyði og hrefnu, en einnig veita nytsamlegar fjöldaupplýsingar og gögn um útbreiðslu annarra stórra hvala og smárra.

Í þessum rannsóknum hafa m.a. komið í ljós markverðar breytingar á útbreiðslu og fjölda nokkurra hvalategunda í hafinu kringum Ísland[37]. Þannig hefur hnúfubak miðsvæðis í Norður-Atlantshafi fjölgað úr 1,800 í 11,600 dýr á árabilinu 1987–2007 og langreyði úr 15,200 í 20,600 á sama tímabili. Á hinn bóginn hefur hrefnu á íslenska landgrunninu fækkað úr 43,600 dýrum árið 2001 í 10,700 dýr árið 2009. Samfara aukningu í fjölda langreyðar stækkaði útbreiðslusvæði hennar út í dýpri hluta Grænlandshafs og á sama tíma hliðraðist útbreiðsla steypireyðar norður á bóginn. Talið er líklegt að þessar breytingar í útbreiðslu og fjölda hvala tengist að stærstum hluta breyttum fæðuskilyrðum, svo sem minnkuðu magni ljósátu, minnkun loðnustofns og hliðrun í útbreiðslu loðnu norður á bóginn, sem og hruni í sandsílisstofni á landgrunni fyrir sunnan Ísland[37,42].

Bæði landsel og útsel hefur fækkað nær stöðugt frá því fyrstu talningar til stofnmats voru gerðar á árunum kringum 1980. Afföll vegna óbeinna veiða eru talin hafa minnkað seinustu ár og dregið hefur úr nýtingu selabænda á landselsstofninum og því er fækkun talin tengjast annað hvort veiðum í ósum laxveiðiáa (landselur), óskráðum veiðum eða breytingu á fæðuframboði vegna umhverfisbreytinga . Mikilvægt er að rannsaka þessa þætti og reyna að meta hlut hvers og eins þeirra á næstu árum[25,38].

7.4 Sjófuglar

Ísland og hafsvæðið umhverfis landið eru mikilvæg útbreiðslusvæði nokkurra stærstu sjófuglastofna í Norðaustur-Atlantshafi. Útbreiðsla sjófugla umhverfis Ísland er aðallega talin ráðast af fæðuskilyrðum þar sem varpstaðir virðast ekki vera takmarkandi. Síðustu tvo til þrjá áratugi hafa farið fram endurteknar talningar á fimm tegundum sjófugla, þ.e. langvíu, stuttnefju, álku, ritu, og fýl, í Krísuvíkurbergi og Hafnarbergi á Reykjanesskaga (talið fyrst 1985) og Skoruvík á Langanesi (talið fyrst 1996)[39]. Þessi svæði voru valin til vöktunar vegna þess að þau eru tiltölulega aðgengileg, hvort í sínum landshluta og aðskilin af 600 km strandlengju. Fyrir suðvestan eru fuglabjörgin umlukin tiltölulega hlýjum Atlantssjó en fyrir norðaustan er sjórinn kaldari. Einnig hafa farið fram talningar í Drangey og á Snæfellsnesi. Þrjú mynstur hvað varðar þróun stofnstærða hafa komið í ljós við þessar talningar. Breytingar á fjölda rita voru ekki samstíga milli landshluta. Á suðvesturhorni landsins fór rituhreiðrum fjölgandi í kjölfar lágmarks um miðjan níunda áratuginn. Á Langanesi var fjöldi ritu við upphaf rannsókna tiltölulega mikill en hrundi síðan árið 2005 niður í um fjórðung af því sem áður var. Langvía og álka voru í jafnvægi eða fjölgaði lítillega fram undir aldamót, en vorið 2005 hafði þeim fækkað bæði suðvestanlands og á Langanesi. Fallið í langvíu og álku árið 2005 hefur verið talið tengjast fæðuskilyrðum í sjónum og þá líklegast skorti á loðnu og síli sem eru aðalfæða þessara tegunda. Fýl og stuttnefju fækkaði á báðum athugunarsvæðum allt rannsóknatímabilið, fýl að meðaltali um 2–3% á ári og stuttnefju um 7% á ári. Fækkun í báðum þessum stofnum hefur verið talin stafa af breyttum lífsskilyrðum, sennilega breytingum í átustofnum sem rekja má til loftslagsbreytinga. Hvað stuttnefju varðar hefur einnig verið bent á ofveiði við Vestur-Grænland sem áhrifaþátt[40].

Vöktun á viðkomu lunda við Vestmannaeyjar hefur leitt í ljós árlegan viðkomubrest síðan 2005 og það meðal annars leitt til þess að veiðar á lunda voru verulega takmarkaðar síðan 2009. Rannsóknir á langtímabreytingum í lundastofninum við Vestmannaeyjar benda til þess að stofnstærðin sveiflist í öfugu hlutfalli við sjávarhita (AMV-breytileikinn) þannig að stofnstærðin minnki á hlýviðrisskeiðum í Norður-Atlantshafi og stækki svo aftur á tímabilum þegar kalt er í sjónum[41]. Hafískomur hafa einnig mjög neikvæð áhrif á viðkomu lunda en mun skammvinnari (2–3 ár). Hitastigið er þó ekki álitið vera hinn beini áhrifavaldur en þess í stað talið að skýringar sé að leita í áhrifum hitastigs á mikilvægustu fæðutegund lundans, þ.e. sandsílið. Lítið er hins vegar vitað um langtímabreytingar í sandsílastofninum við Vestmannaeyjar en rannsóknir sem gerðar hafa verið frá árinu 2006 sýna að sílið hefur hrunið á sama tíma og viðkomubrestur hefur verið hjá lunda[42]. Við Vestmannaeyjar virðist skorta aðrar fæðutegundir fyrir lunda sem komið geta í stað sandsílis. Hrun sandsílis kann að tengjast þeim hitabreytingum sem átt hafa sér stað á undanförnum árum[42] og svo áhrifum þeirra á þörungablóma að vori[43]

en einnig hefur verið bent á samkeppni um fæðu og aukið afrán sem hugsanlega áhrifavalda[42]. Skýringar á orsakasamhengi umhverfisþátta og fæðuvefs sjávar kalla hins vegar á mun ítarlegri rannsóknir en framkvæmdar hafa verið til þessa.

7.5 Að lokum

Niðurstöður þær sem fjallað hefur verið um hér að ofan sýna að markverðar breytingar hafa átt sér stað í vistkerfi sjávar við Ísland á undanförnum 20 árum. Að ýmsu leyti virðast þessar breytingar svipaðar þeim sem urðu á náttúrulegu hlýindatímabili sem ríkti í Norður-Atlantshafi frá 1920–1960. Nú er hins vegar aukning svokallaðra gróðurhúsalofttegunda talin veigamikil orsök þeirra veðurfarsbreytinga sem eru að eiga sér stað á jörðinni allri en engin leið er á þessu stigi að aðgreina þær breytingar frá náttúrulegum sveiflum í vistkerfi sjávar við Ísland. Hugsanlega er nú ekki um að ræða skammvinnt hlýindatímabil eins og á fyrri hluta síðustu aldar heldur upphaf víðtækari breytinga sem kunna að hafa varanleg áhrif á umhverfi og lífríki sjávar. Því er mikilvægt, á næstu árum og áratugum, að vakta og skrá hvernig vistkerfi Íslandsmiða bregst við veðurfarsbreytingum, bæði þeim staðbundnu sem og þeim er tengjast Norður-Atlantshafi öllu.

Tilvísanir

1 Unnsteinn Stefánsson 1962. North Icelandic waters. Rit Fiskideildar 3. 1-269.
2 Unnsteinn Stefánsson 1999. Hafið. Háskólaútgáfan, Reykjavík. 480 bls.
3 Svend A. Malmberg & Stefán S. Kristmannsson 1992. Hydrographic conditions in Icelandic waters, 1989-1990. ICES Marine Science Symposia 195. 76-92.
4 Svend A. Malmberg & Héðinn Valdimarsson 2003. Hydrographic conditions in Icelandic waters, 1990-1999. ICES Marine Science Symposia 219. 50-60.
5 Veðurfarsbreytingar og afleiðingar þeirra. 2001. Umhverfisráðuneytið, Reykjavík. 32 bls.
6 Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi. Sjá kafli 3, tilvitnun 3.
7 Unnsteinn Stefánsson & Jakob Jakobsson 1989. Oceanographic variations in the Iceland Sea and their impact on biological conditions. Bls. 456-467 í: Proceedings of the sixth conference of the Comité Arctique International, 13-15 May 1985 ritstj. Rey, L. & Alexander, V. E.J. Brill, Leiden.
8 Hjálmar Vilhjálmsson 1997. Climatic variations and some examples of their effects on marine ecology of Icelandic and Greenland waters, in particular during the present century. Rit Fiskideildar 13. 9-29.
9 Ólafur S. Ástþórsson, Ástþór Gíslason & Steingrímur Jónsson 2007. Climate variability and the Icelandic marine ecosystem. Deep-Sea Research II, 54. 2456-2477.
10 Héðinn Valdimarsson, Ólafur S. Ástþórsson & Jónbjörn Pálsson 2012. Hydrographic variability in Icelandic waters during recent decades and related changes in distribution of some fish species. ICES Journal of Marine Science 69. 816-825.
11 Það hringstreymi sem hér er átt við er á ensku kallað „Subpolar Gyre“, oft skammstafað SPG. Sjá nánar umfjöllun um hafhringrás í Norður-Atlantshafi í grein: 4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar.
12 Berch, M. 2002. North-Atlantic Oscillation-induced changes of the upper layer circulation in the Northern North Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research 107 1-10.
13 Hakkinen, S. & Rhines, P.B. 2004. Decline of Subpolar North Atlantic circulation during the 1990s. Science 304. 555-559.
14 Hátún, H., Sandö, A.B., Drange, H., Hansen, B. & Héðinn Valdimarsson 2005. De-stabilation of the North Atlantic thermohaline circulation by a gyre mode. Science 309. 1841-1844.
15 Hakkinen, S. & Rhines, B.P. 2009. Shifting surface currents in the northern North Atlantic Ocean. Journal of Geophysical Research 114. 1-12.
16 Hakkinen, S., Rhines, P.B. & Worthen, D.L. 2011. Warm and saline events embedded in the meridional circulation of the northern North Atlantic. Journal of Geophysical Research 116. 1-13.
17 Hollowed, A.B., Barange, M., Ito, S., Kim, S., Loeng, H. & Peck, M.A. 2011. Preface. Effects of climate change on fish and fisheries: forecasting impacts, assessing ecosystem responses, and evaluating management strategies. ICES Journal of Marine Science 68. 984-985.
18 Heath, M.R., Neat, F.C., Pinnegar, J.K., Reid, D.G. Sims, D.W. & Wright, P.J. 2012. Review of climate change impacts on marine fish and shellfish around UK and Ireland. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 22. 337-367.
19 Barange, M., King, J., Valdés, L. & Turra, A. 2016. Introduction to the Symposium: Effects of Climate Change on the World Oceans. The evolving and increasing need for climate change research on the oceans. ICES Journal of Marine Science 73. 1267-1271.
20 Hjálmar Vilhjálmsson 1994. The Icelandic capelin stock. Capelin (Mallotus villosus) in the Iceland-East Greenland-Jan Mayen ecosystem. Rit Fiskideildar 13. 1-281.
21 Ólafur K. Pálsson, Ástþór Gíslason, Hafsteinn G. Guðfinnsson, Björn Gunnarsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hildur Pétursdóttir, Sveinn Sveinbjörnsson, Konráð Þórisson & Héðinn Valdimarsson 2012. Ecosytem structure of the Iceland Sea and recent changes to the capelin (*Mallotus villosus*) population. ICES Journal of Marine Science 69. 1242-1254.
22 Ólafur S. Ástþórsson, Héðinn Valdimarsson, Ásta Guðmundsdóttir & Guðmundur J. Óskarsson 2012. Climate-related variations in the occurrence of mackerel (*Scomber scombrus*) in Icelandic waters. ICES Journal of Marine Science 69. 1289-1297.
23 Sjá nánar umfjöllun um AMV í grein 4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar. Á mynd 7.5 er notast við aðeins aðra aðferð við að reikna AMV vísitöluna en gert er í kafla 4, og hér sjást því breytingar innan áratugs betur en þar.
24 Ólafur S. Ástþórsson, Héðinn Valdimarsson, Ásta Guðmundsdóttir & Guðmundur J. Óskarsson 2015. Makríll og ástand sjávar við Ísland í rúm 100 ár. Ægir 108. 10-14.
25 Anon 2016. Nytjastofnar sjávar 2015/2016 og aflahorfur 2016/2017. Hafrannsóknir 1985. 1-159.
26 Ólafur S. Ástþórsson & Jón Sólmundsson 2016. Botnfiskar og sjávarhiti 1985-2015. Fyrirlestur fluttur á málstofu um „Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki sjávar og sjávarútveg“ 18. mars 2016. Byggt á gögnum Hafrannsóknarstofnunar.
27 Jón Sólmundsson, Einar Jónsson & Höskuldur Björnsson 2010. Phase transition in recruitment and distribution of monkfish (*Lophius piscatorius*) in Icelandic waters. Marine Biology 157. 295-305.
28 Ólafur S. Ástþórsson & Jónbjörn Pálsson. 2008. Stóra sænál stingur sér niður víðar en áður við Ísland. Náttúrufræðingurinn 77. 59–62.
29 Jónbjörn Pálsson & Ólafur S. Ástþórsson. 2017. New and historical records of Ocean sunfish, Mola mola, in Icelandic waters. Journal of Fish Biology. 90:3 bls 1126–1132.
30 Jónbjörn Pálsson. 2013. Sjaldgæfir fiskar á Íslandsmiðum 2011. Ægir 106. 10-12.
31 Jónbjörn Pálsson. 2014. Sjaldgæfir fiskar á Íslandsmiðum 2012 og 2013. Ægir 107. 14-16.
32 Gunnar Jónsson & Jónbjörn Pálsson. 2013. Íslenskir fiskar. Mál og menning, Reykjavík. 494 bls.

33 Ólafur S. Ástþórsson & Jónbjörn Pálsson. 2006. New fish records and records of rare southern fish species in Icelandic waters in the warm period 1996-2005.
34 Gunnar Jónsson, Jónbjörn Pálsson & Magnús Jóhannesson. 2001. Ný fisktegund, flundra *Platichtys flesus* (Linnaeus, 1758) veiðist á Íslandsmiðum. Náttúrufræðingurinn 70. 83-89.
35 Karl Gunnarsson, Guðrún G. Þórarinsdóttir & Óskar S. Gíslason. 2015. Framandi sjávarlífverur við Ísland. Náttúrufræðingurinn 85. 4-14.
36 Gísli A. Víkingsson. 2015. Decadal changes in distribution, abundance and feeding ecology of baleen whales in Icelandic and adjacent waters – A consequence of climate change? Dr phil. ritgerð, University of Tromsø, Tromsø. 54 bls. +12 sjálfstæðar greinar.
37 Gísli A. Víkingsson, Pike, D.G., Héðinn Valdimarsson, Schleimer, A., Þorvaldur Gunnlaugsson, Silva, T., Bjarki Þ. Elvarsson, Mikkelsen, B., Øien, N., Desportes, G., Valur Bogason & Hammond, P.S. 2015. Distribution, abundance, and feeding ecology of baalen whales in Icelandic waters: have recent environmental changes had an effect? Frontiers in Ecology and Evolution 3. 1-18.
38 Jóhann G. Þorbjörnsson, Erlingur Hauksson, Guðjón Sigurðsson, Sandra Granquist. 2017. Aerial census of the Icelandic harbour seal (Phoca vitulin) population in 2016: Population estimate, trends and current status / Landselstalning 2016: Stofnstærðarmat, sveiflur og ástand stofns. Haf- og vatnarannsóknir 9. 1-22.
39 Arnþór Garðarsson. 2006. Nýlegar breytingar á fjölda íslenskra bjargfugla. Bliki 27. 13-22.
40 Þorkell L. Þórarinsson, Böðvar Þórisson & Erpur S. Hansen. 2014. Farhættir og vetrarstöðvar íslenskra svartfugla. Veiðidagbók Umhverfisstofnunar: 18. 40-43.
41 Erpur S. Hansen. 2016. Neikvæð fylgni lundaveiði við sjávarhita í 135 ár. Fyrirlestur fluttur á málstofu um „Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki sjávar og sjávarútveg“ 18. mars 2016.
42 Kristján Lilliendahl, Erpur S. Hansen, Valur Bogason, Marinó Sigursteinsson, Margrét L. Magnúsdóttir, Páll M. Jónsson, Hálfdán H. Helgason, Gísli J. Óskarsson, Pálmi F. Óskarsson & Óskar J. Sigurðsson. 2013. Viðkomubrestur lunda og sandsílis við Vestmannaeyjar. Náttúrufræðingurinn 83. 65-79.
43 Silva, T., Ástþór Gíslason, Licandro, P., Guðrún Marteinsdóttir, Ferreira, A.S.A., Kristinn Guðmundsson & Ólafur S. Ástþórsson. 2014. Long-term changes of euphausiids in shelf and oceanic habitats southwest, south and southeast of Iceland. Journal of Plankton Research 36. 1262-1278.

8 Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki Íslands

Samantekt

1. Loftslagsbreytingar, hlýnun, og aukinn styrkur CO_2 í andrúmsloftinu hafa mikil áhrif á lífsskilyrði plantna og dýra á landi. Aukinn styrkur CO_2 hefur áhrif á framleiðni plantna sem lýsir sér m.a. í meiri vexti þeirra. Loftslagsbreytingar hafa áhrif á ýmsa aðra umhverfisþætti, s.s. veðurfarssveiflur, úrkomu, snjóhulu, bráðnun jökla og vatnafar almennt. Allir þessir umhverfisþættir hafa síðan bein og óbein áhrif, s.s. á flæði næringarefna í vistkerfum, valda breytingum á búsvæðum plantna og dýra, útbreiðslu þeirra og fjölbreytni tegunda, bæði staðbundið og á landsvísu.
2. Stýrðar rannsóknir/tilraunir hafa sýnt að viðbrögð gróðurlenda við hlýnun eru misjöfn. Litlar breytingar hafa orðið í mosaþembum en í fjalldrapamóum hefur hlýnunin leitt til aukins vaxtar viðarkenndra tegunda á kostnað mosa. Fjalldrapamóar friðaðir fyrir beit sýna svipaða svörun, hvað varðar aukinn vöxt, og fjalldrapamóar í reitum þar sem hitastig hefur verið hækkað.
3. Niðurstöður stýrðra rannsókna/tilrauna til að meta áhrif loftslagsbreytinga á viskerfi ferskvatna sýna m.a. að í misheitum lækjum hér á landi jókst magn þörunga og blágrænbaktería á botni, samfara auknum hita og næringarefnainnflæði, og lífsferlar botnlægra hryggleysingja breyttust. Aukinn hiti leiddi einnig til breytinga í fæðuvef og vistkerfi lækjanna. Jafnframt sýna rannsóknir að heildarfrumframleiðni og þéttleiki vatnadýra í flestum fæðuþrepum jókst en það dró úr fjölbreytileika samfélaga þeirra og fjölbreytni þörunga minnkaði. Hið síðasttalda veldur áhyggjum um áhrif loftslagsbreytinga á lífríki ferskvatns á Íslandi.
4. Fyrstu niðurstöður stýrðra rannsókna sem nýta jarðvegshlýnun frá heitum berggrunni til að skoða áhrif hlýnunar á þurrlendisvistkerfi sýna að vistkerfin hafa umtalsvert þanþol gagnvart hlýnun, um rúmlega 5°C, en þegar hlýnunin fer upp fyrir þau mörk þá „hrynja“ vistkerfin.
5. Rannsóknir á gróðurfarsbreytingum á Íslandi síðustu áratugi, með langtímavöktun gróðurreita í úthaga og fjarkönnun, hafa leitt í ljós töluvert mikla aukningu gróðurs á árunum 1982–2013. Helstu ástæður þessarar aukningar eru taldir nokkrir samverkandi þættir s.s. minni sauðfjárbeit á afréttum og láglendi og hlýrra loftslag sem eykur vöxt gróðurs en leiðir einnig til hopunar jökla og þ.a.l. landnáms gróðurs á nýjum svæðum.
6. Hlýnun loftslags hefur haft áhrif á margar fuglategundir á Íslandi. Útbreiðslumörk margra tegunda eru að breytast vegna hlýnunar og breytinga sem verða á búsvæðum þeirra. Tíðni landnáms nýrra fuglategunda hér á landi hefur aukist eftir því sem leið á 20. öldina. Komu- og varptími sumra farfugla, eins og jaðrakans, hefur breyst í takt við hlýnun loftslags. Breyttur varptími getur haft áhrif á afkomu margra fuglategunda. Varpfuglum í sjófuglabyggðum við norðanvert Atlantshaf hefur fækkað verulega frá síðustu aldamótum og flestir sjófuglastofnar virðast fara minnkandi.
7. Áhrif loftslagsbreytinga á íslensk spendýr eru í flestum tilvikum óbein og tengjast fyrst og fremst breytingum á fæðuframboði. Breytileiki í veðrakerfum og hafstraumum hefur áhrif á sjávarlífverur og sýnt hefur verið fram á að það hafi áhrif á fæðuval sumra spendýra. Gera má ráð fyrir

að fækkun í sjófuglastofnum hafi áhrif á afkomu refa, sérstaklega á þeim svæðum þar sem sjófuglar eru stór hluti fæðunnar.

8. Með hlýnandi loftslagi og vegna breytinga á gróðurfari, þ.m.t. aukinni skógrækt, hafa orðið breytingar á útbreiðslu margra smádýra (skordýra og annarra hryggleysingja). Einnig hefur landnám nýrra tegunda aukist en merki þess sjást nú víða.
9. Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki í ferskvatni eru flókin og mismunandi eftir gerð straum- og stöðuvatna og aðstæðum á hverjum stað. Snjóbráðnun á hálendinu getur haft mikil kælingaráhrif á ár og læki. Gera má ráð fyrir að við frekari hlýnun styttist sá tími sem ís hylur vötn og í sumum tilfellum hætti vötn alfarið að leggja á veturna. Hlýnun vatns í lækjum og ám mun í heildina leiða til aukinnar frumframleiðni, aukins vaxtarhraða dýra og minni fjölbreytileika lífvera. Búast má við að kulvísum tegundum fjölgi en kulsæknar tegundir lífvera láti undan síga og útbreiðsla þeirra dragist saman. Á meðal fiska sem virðast vera sérstaklega viðkvæmir fyrir hlýnun, einkum í grunnum vötnum, er bleikja og eru skýr dæmi um fækkun hennar hér á landi.
10. Miklar líkur eru á því að hlýnandi loftslag muni auðvelda ýmsum tegundum dýra og plantna, þ.m.t. lífverum sem valda sjúkdómum, s.s. sníkjudýrum og örverum, að nema hér land en hlýnun mun einnig hafa veruleg áhrif á útbreiðslu framandi tegunda sem þegar eru fyrir í landinu. Aukin skaðsemi af völdum framandi ágengra tegunda getur aukist með hlýnandi loftslagi. Mikilvægt er að fyllstu varúðar sé gætt við innflutning, notkun og dreifingu á framandi lífverum, hvort sem um er að ræða hættu á að skaða náttúrulegt lífríki landsins eða t.d. ýmsa ræktun. Mótvægisaðgerðir vegna loftslagsbreytinga verða að taka tillit til verndunar líffræðilegrar fjölbreytni.
11. Við vinnslu þessa kafla kom áþreifanlega í ljós að mikill skortur er á rannsóknum og vöktun á lífríki landsins í tengslum við loftslagsbreytingar. Hægt var að finna ýmsar rannsóknir og vöktun sem gefa góðar vísbendingar um orsakasamhengi milli loftslagsbreytinga og ýmissa náttúrufarsþátta. Það sem skortir hins vegar verulega er vöktunar- og rannsóknaráætlun á lykilþáttum íslenskrar náttúru þar sem tengsl við loftslagsbreytingar eru beinn þáttur í slíkri vöktunaráætlun en ekki reynt að skýra út orsakasamhengi milli breytinga á umhverfisþáttum og náttúrufari eftir á.

Mynd 8.1 Haftyrðill, mynd eftir teikningu Benedikts Gröndal frá 1899–1900.

8.1 Inngangur

Veðurfar hefur mikil áhrif á lífsskilyrði lífvera. Í þessum kafla er fyrst og fremst fjallað um lífríki á landi, þ.m.t. ferskvatni, þótt ekki verði komist hjá því að tengja það að einhverju leyti við hafið umhverfis Ísland, en um það er ritað sérstaklega í kafla 7 í þessari skýrslu. Loftslagsbreytingar geta bætt lífsskilyrði sumra tegunda en haft neikvæð áhrif á aðrar. Við hlýnun loftslags má gera ráð fyrir að hánorrænar tegundir sem eru aðlagaðar köldu lofslagi fari að öllu jöfnu halloka fyrir tegundum sem þrífast betur við hærri hita eða þola betur veðurfarssveiflur. Mynd 8.1 sýnir haftyrðil sem er gott dæmi um hánorræna fuglategund sem ekki verpir lengur hér á landi, en tegundin verpti síðast 1995 í Grímsey og var þar á suðurmörkum útbreiðslusvæðis síns.

Ísland er í kaldtempraða beltinu en hefur, sérstaklega á hálendinu og nyrstu annesjum, mörg einkenni

heimskautasvæða[1]. Lofslagsbreytingar frá landnámi eru nokkuð vel þekktar frá hlýviðraskeiði sem var við upphaf landnáms á 9. öld til litlu-ísaldar (~1300–1900) og svo til heimshlýnunar á okkar dögum[2]. Á þessu tímabili sveiflast veðurfar á Íslandi á milli þess að vera á mörkum temprða beltisins og heimskautasvæða og einkennist lífríki landsins af því, en auk þess er landið eyja sem einnig hefur áhrif á tegundasamsetningu[3]. Það er þó ekki bara veðurfar sem hefur áhrif á lífsskilyrði lífvera heldur líka aðrir þættir í náttúrunni, s.s. tíðar raskanir m.a. vegna eldvirkni, og svo bein og óbein áhrif af mannavöldum, s.s. eyðing búsvæða vegna ýmissa framkvæmda, innflutningur ágengra framandi tegunda og mengun.

Við loftslagsbreytingar er það ekki eingöngu hærri hiti sem ræður afkomu plantna og dýra heldur einnig ýmsar breytingar sem verða á vistkerfum og búsvæðum tegunda. Hækkun á styrk koldíoxíðs, CO_2, í andrúmslofti hefur t.d. bein áhrif á ljóstillífun plantna og getur þannig leitt til meiri vaxtar gróðurs (sjá einnig grein 8.3.1). Auk þess sem styrkur CO_2 eykst og hiti hækkar verða jafnframt breytingar á ýmsum öðrum þáttum í náttúrunni, s.s. veðurfarssveiflum, úrkomu, snjóhulu, bráðnun jökla og vatnafari almennt (sjá einnig greinar 5.1 og 5.2). Allar þessar umhverfisbreytingar geta síðan haft bein og óbein áhrif á flæði næringarefna í vistkerfum sem getur valdið breytingum á búsvæðum plantna og dýra, útbreiðslu þeirra og fjölbreytni, bæði staðbundið og á landsvísu. Mjög erfitt er því að segja fyrir um hvaða breytingar verða nákvæmlega í náttúrunni í framtíðinni og hver áhrifin verða á útbreiðslu og stofnstærðir tiltekinna tegunda. Almennt má segja að hærri meðalhiti hér á landi undanfarin ár hafi aukið gróðurþekju en aðrir áhrifaþættir spila þar einnig inn í, svo sem minni beit og landgræðsla[4]. Við hækkun vatnshita í ám eru líkur til þess að magn og framleiðni þörunga á botni aukist og að lífsferlar botndýra og framleiðni breytist (sjá grein 8.3.3).

Hér á eftir verða tekin nokkur dæmi um rannsóknir og vöktun sem sýna breytingar sem hafa orðið í náttúru Íslands og rekja má að einhverju leyti til loftslagsbreytinga. Í fyrstu er fjallað um rannsóknir þar sem reynt er að líkja eftir hugsanlegum afleiðingum loftslagsbreytinga, t.a.m. hlýnun, auknu magni af koltvísýringi í andrúmslofti, breyttu rennsli í ám og ákomu áburðarefna af landi. Markmið þessara stýrðu rannsókna er að líkja eftir þeim aðstæðum sem geta skapast vegna loftslagsbreytinga og meta hvernig lífríki landsins bregst við breyttum aðstæðum. Þar á eftir eru rakin nokkur dæmi um breytingar sem hafa orðið í náttúrunni og rekja má a.m.k. að einhverju leyti til loftslagsbreytinga. Rétt er að taka fram að hér er ekki um tæmandi yfirlit að ræða.

8.2 Stýrðar rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á vistkerfi Íslands

Á Íslandi eru og hafa verið í gangi þrjú stór verkefni á landi með stýrðum rannsóknum til að kanna hvaða áhrif hlýnun hefur á lífríki og aðra náttúrufarsþætti til lengri tíma. Þetta eru verkefnin:

1. ITEX
2. EURO-LIMPACS og aðrar rannsóknir á jarðhitasvæðum á Hengilssvæðinu
3. FORHOT

ITEX (*International Tundra Experiment*) verkefnið er stórt, alþjóðlegt samstarfsverkefni um áhrif loftslagsbreytinga á gróðurfar norðurslóða[5]. Á Íslandi fer það fram í fjalldrapamóum á Auðkúluheiði og mosaþembum í Þingvallahrauni en notuð eru opin harðplastskýli til að hækka lofthita um 1–2°C (mynd 8.2). Rannsóknirnar hófust hér á landi á árunum 1995–1997 og hefur þeim síðan verið fylgt eftir, eða í um 20 ár. Viðbrögð gróðurlenda við hlýnun hafa verið misjöfn. Breytingar hafa verið litlar í mosaþembum þar sem rótarlaus mosinn er lítið háður jarðvegsþáttum, en í fjalldrapamóum hefur hlýnunin leitt til aukins vaxtar viðarkenndra tegunda á kostnað mosa[6]. Fjalldrapamóar á sama svæði sem hafa verið friðaðir fyrir beit sýna svipaða svörun, hvað varðar aukinn vöxt, og fjalldrapamóar í reitum þar sem hitastig hefur verið hækkað. Segja má að bæði hlýnun og beitarfriðun bæti lífsskilyrði í fjalldrapamóum og lífmassi aukist[7]. Niðurstöðurnar koma vel heim og saman við það sem hefur verið að gerast á mörgum lágarktískum túndrusvæðum í heiminum þar sem útbreiðsla runnagróðurs er mjög að aukast í kjölfar hlýnunar[8,9]. Það styrkir einnig niðurstöður ITEX að síðustu 20 ár hafa orðið sambærilegar breytingar á gróðurfari á ómeðhöndluðum samanburðarreitum verkefnisins í kjölfar þeirra loftslagsbreytinga sem þegar hafa orðið á tímabilinu[10].

Mynd 8.2. ITEX-tilraunasvæði á Auðkúluheiði sem sett var upp 1997. Í skýlum sem eru opin í toppinn (OTC) hækkar sumarhitinn um 1–2°C. Gróður er mældur innan og utan skýlanna og fylgst með breytingum með árunum. Innsetta myndin sýnir mun á stærð krækiberja innan og utan skýla haustið 1999. (Sjá tilvísun 6, ljósmyndir: Borgþór Magnússon.)

EURO-LIMPACS verkefnið hófst árið 2004, en markmið þess var að meta áhrif hnattrænna breytinga á vistkerfi ferskvatna í Evrópu[11,12]. Einn liður í þeim rannsóknum fólst í að nýta læki í Hengladölum (mynd 8.3) á SV-landi sem vegna jarðhita eru misheitir, til að spá fyrir um hugsanleg áhrif hlýnunar og afleiðingar hennar, t.a.m. aukinnar ákomu næringarefna af landi á vistkerfi lækjanna. Helstu niðurstöður sýndu að magn þörunga og blágrænbaktería á botni jókst samfara auknum hita og næringarefnainnflæði[13] og lífsferlar botnlægra hryggleysingja breyttust með auknum hita þannig að fleiri kynslóðir rykmýs náðu að þroskast í heitari lækjunum en þeim kaldari[14]. Enn fremur breyttust fæðuvefir[15], síðframleiðsla jókst[16,17] og virkni vistkerfa lækjanna breyttist samfara auknum hita[18]. Eftir að EURO-LIMPACS verkefninu lauk árið 2008 hafa önnur alþjóðleg rannsóknaverkefni tekið við og standa rannsóknir tengd þeim enn yfir. Sameiginleg markmið þeirra rannsókna er m.a. að mæla á hvaða hátt vistkerfi fallvatna bregðast við aukinni hlýnun og næringarefnaákomu. Helstu niðurstöður þeirra rannsókna sýna að heildarframframleiðni, þekja og lífmassi vatnaplantna og blágrænna baktería jókst með hlýnun[19], en fjölbreytni þörunga minnkað[20]. Þá varð einnig aukning í niðurbrotshraða og niturbindingu í lækjunum við hlýnunina, sem jók frjósemi vatnsins[21]. Þéttleiki vatnadýra í flestum fæðuþrepum varð meiri við hlýnun, en það dró hins vegar úr fjölbreytileika samfélaga þeirra[18]. Fæðuþrepum fjölgaði einnig í lækjunum og rándýr (fiskar og hryggleysingjar) urðu meira áberandi samfara hækkandi hita[13]. Heildarlífmassi breyttist þó ekki afgerandi og almennt má segja að þrátt fyrir aukna framleiðni þá fóstri heitari lækirnir tegundafátækari samfélög en venjulegir kaldir lækir. Það er einkum hið síðasttalda sem veldur áhyggjum um áhrif loftslagsbreytinga á lífríki ferskvatns á Íslandi.

Niðurstöðum rannsókna á áhrifum heits affallsvatns frá Nesjavallavirkjun á botndýralíf í fjörubelti Þingvallavatns svipar til niðurstaðna rannsóknanna á heitu og köldu lækjunum í Hengladölum. Rannsóknirnar í Þingvallavatni sýndu m.a. að hlýnun vatns upp að vissu marki ýtti undir vöxt og viðgang botndýra, mismikið eftir tegundum, en við frekari hlýnun dró úr þéttleika og fjölbreytni. Við miðlungshlýnun vatns, allt að ~10°C umfram bakgrunnsgildi, jókst heildarþéttleiki hryggleysingja, einkum meðal lirfa rykmýstegundanna *Paratanytarsus sp.* og *Cricotopus sylvestris* og vatnabobba (*Radix peregra*). Vatnabobbi sýndi auk þess merki um aukinn vaxtarhraða og lægri dánartíðni. Frekari hlýnun vatns, 10–17°C umfram bakgrunnsgildi, leiddi bæði til fækkunar á fjölda tegunda og þéttleika dýra[22].

FORHOT (*Natural soil warming in natural grasslands and a Sitka spruce forest in Iceland*) er yngsta verkefnið sem hófst af fullum krafti 2013[23]. Þar, líkt og í straumvatnsverkefninu í Hengladölum, er jarðvegshlýnun nýtt frá heitum berggrunni til að rannsaka áhrif

Mynd 8.3 Unnið við mælingar og sýnatökur í köldum og heitum lækjum í Hengladölum þar sem reynt hefur verið að spá fyrir um áhrif loftslagshlýnunar á vistkerfi straumvatna. Báðir lækirnir á myndinni eru úr uppsprettum. Að jafnaði er hiti í þeim til vinstri um og yfir 20°C en vatnshiti í þeim til hægri er undir 8°C. (Ljósmynd: Jón S. Ólafsson.)

hlýnunar á þurrlendisvistkerfi[24]. Í því eru borin saman skammtímaáhrif hlýnunar á ræktaða greniskóga og náttúruleg graslendi í nágrenni Hveragerðis, sem byrjuðu að hitna eftir Suðurlandsskjálftann 29. maí 2008. Það að vitað er hvernær þurrlendisvistkerfin tóku að hlýna gerir FORHOT samanburðarhæft við aðrar stýrðar upphitunartilraunir í heiminum[25]. Fyrstu niðurstöður verkefnisins sýna að þurrlendisvistkerfin hafa umtalsvert þanþol gagnvart hlýnun um rúmlega 5°C, en þegar hlýnunin fer upp fyrir þau mörk þá „hrynja" vistkerfin, þ.e. miklar breytingar verða þá á tegundasamsetningu gróðurs[26], smádýra og örvera þeirra, jarðvegsuppbygging breytist[27] og hringrás næringarefna og kolefnis opnast þannig að mikið af efnum berst út í grunnvatn eða upp til andrúmslofts[28]. Þessar fyrstu niðurstöður FORHOT sýna mikilvægi þess að halda hlýnun norðurslóða innan þeirra marka sem gert er ráð fyrir í Parísarsamkomulaginu.

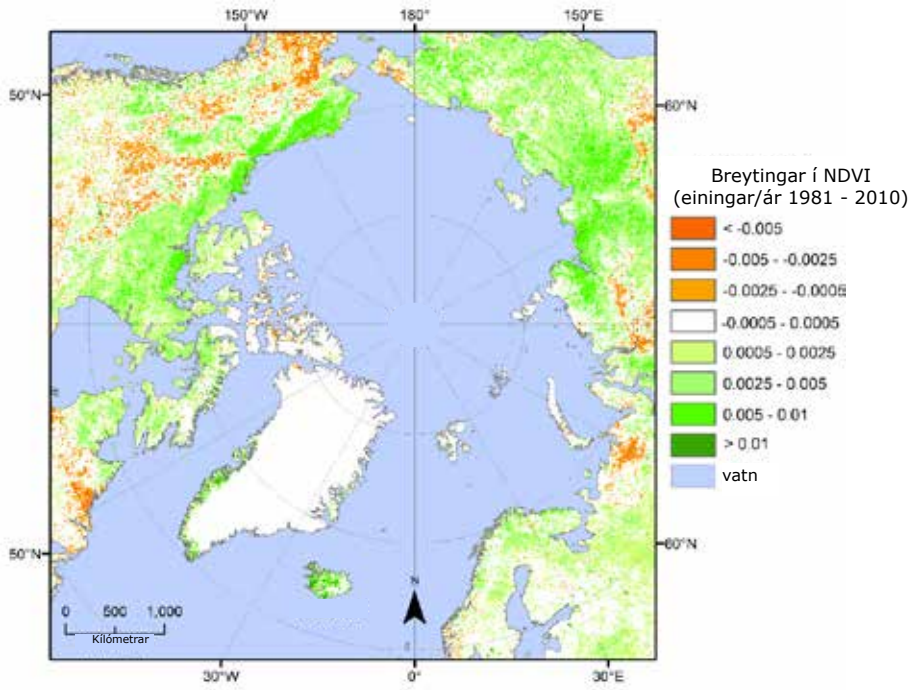
Stýrðar rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á lífríkið eru mjög mikilvægar til að styrkja fræðilegan skilning og spár um hvaða áhrif breytt loftslag getur haft á Íslandi og hvaða afleiðingar gæti þurft að takast á við, bæði vistfræðilega og fjárhagslega.

8.3 Áhrif loftslagsbreytinga á gróðurfar og dýralíf

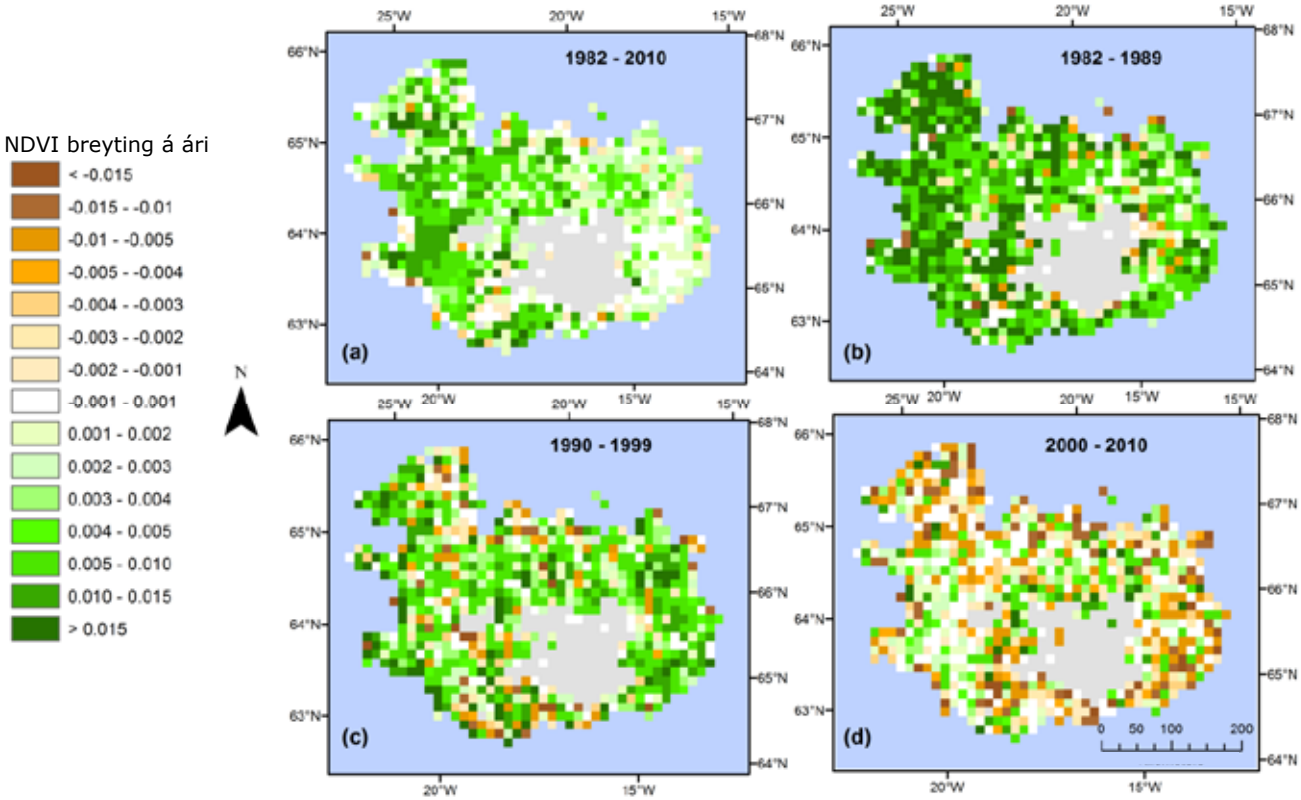
8.3.1 Gróðurfar

Í síðustu skýrslu vísindanefndarinnar[29] var fjallað um ýmsar eldri rannsóknir og vöktun á áhrifum loftslagsbreytinga á vistkerfi landsins sem fram fóru fyrir 2008. Þar má t.d. nefna rannsóknir á áhrifum hækkaðs styrks CO_2 í andrúmslofti á framleiðni grastegundarinnar finnungs[30] á Snæfellsnesi. Hækkandi styrkur koldíoxíðs (CO_2) í andrúmslofti hefur aðallega tvíþætt áhrif á gróðurfar. Annars vegar hefur hækkandi styrkur CO_2 bein áhrif á ljóstillífun þar sem plöntur (frumframleiðendur) umbreyta sólarorku í efnaorku með því að binda CO_2 í sykrur. Séu aðrir umhverfisþættir ekki takmarkandi má gera ráð fyrir að hækkandi styrkur CO_2 í andrúmslofti leiði til meiri framleiðni og þ.a.l. meiri vaxtar gróðurs[31].

Hins vegar hefur aukinn styrkur CO_2 einnig áhrif á loftslag en veðurfarsþættir hafa mikil áhrif á lífsskilyrði plantna og þar með á gróðurfar landsins. Þeir þættir sem mestu skipta fyrir gróður eru lengd vaxtartíma, hiti, úrkoma og vindafar. Áhrifin geta verið bein og



Mynd 8.4 Leitni í hámarksgróðurstuðli (NDVI) á landi, að sumri, árin 1982–2010 í löndum umhverfis norðurskautið. Vesturhluti Íslands er meðal svæða þar sem grænkun varð hvað mest á tímabilinu. (Heimild: sjá tilvísun 33.)



Mynd 8.5 Leitni í hámarksgróðurstuðli (NDVI) á Íslandi að sumri eftir tímabilum á árunum 1982–2010. Vesturland og Norðvesturland eru meðal svæða þar sem grænkun varð hvað mest á tímabilinu. (Heimild: sjá tilvísun 33.)

Mynd 8.6. Rústamýravist. (Ljósmynd: Borgþór Magnússon.)

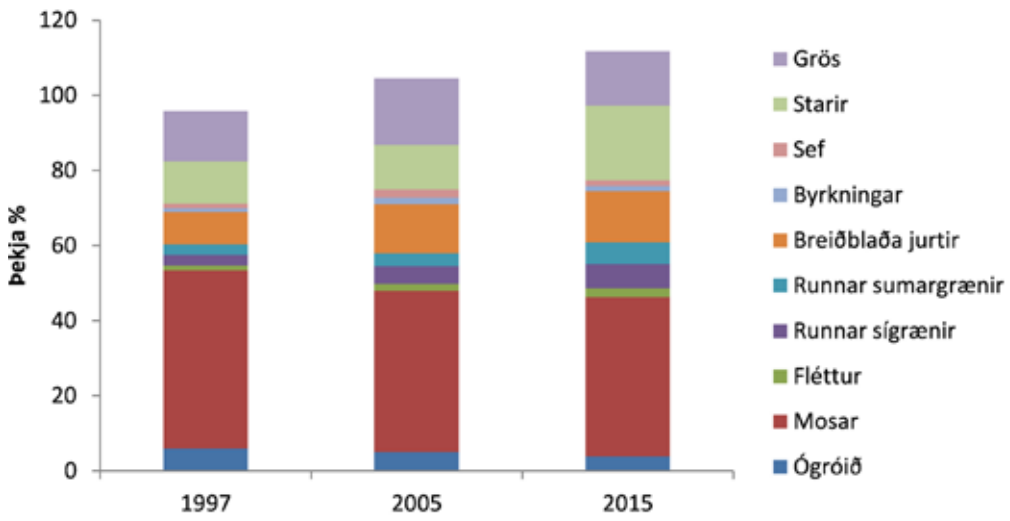
óbein. Bein áhrif hækkandi hita birtast einkum í auknum vexti og útbreiðslu en óbein áhrif í auknu framboði næringarefna, sem er háð jarðvegsraka og því aðstæðum á hverjum stað, vegna hraðari umsetningar þeirra í jarðvegi. Hærri meðalhiti yfir vaxtartíma veldur því m.a. að gróðurmörk færast ofar í landið. Hlýindi að vetri, ásamt breytingum á snjóa- og svellalögum, geta einnig haft veruleg og oft neikvæð áhrif á gróður[29]. Vindur hefur mikil áhrif á gróðurfar. Hann færir hita plantna nær lofthita og getur haft óbein áhrif á vetrarskemmdir trjáa og runna, snjóalög og jarðvegseyðingu. Sömuleiðis geta breytingar á gróðurfari haft mikil áhrif á vindhraða við yfirborð. Hávaxinn gróður, einkum tré og runnar, gerir yfirborðið grófara og dregur úr vindhraða[32]. Þar með batna staðbundin skilyrði fyrir annan gróður, a.m.k. á meðan trjálagið verður ekki of þétt.

8.3.1.1 Breytingar á gróðurfari

Endurtekin landúttekt á gróðurfari landsins er af skornum skammti, en eina gróðurlendið sem hefur verið metið endurtekið frá því um 1972 eru íslensku birkiskógarnir, sem fóru að auka útbreiðslu sína upp úr 1990 (sjá einnig umfjöllun í grein 9.3).

Rannsóknir á gróðurfarsbreytingum á Íslandi með fjarkönnun síðustu áratugi hafa einnig leitt í ljós töluvert miklar breytingar á gróðurfari. Rannsóknirnar sýndu mikla aukningu gróðurs, mælt sem NDVI[33] frá 1982 fram til ársins 2013 (mynd 8.4). Á tímabilinu 1982–1989 varð aukningin mest, minni næstu 10 ár þar á eftir, 1990–1999, og á árunum 2000–2010 virtist draga verulega úr aukningu á gróðri þótt hana megi víða sjá. Mesta aukning í gróðri sést á Vesturlandi og Norðvesturlandi (mynd 8.5). Fróðlegt er að bera þessar niðurstöður saman við hlýnun á Íslandi síðustu áratugina (mynd 4.13), sem sýnir að hlýnunin er meiri vestan- og norðvestantil á landinu og var einna áköfust um aldamótin. Nánari greining á gróðuraukningunni benti til að helstu ástæður hennar væru nokkrir samverkandi þættir, s.s. minni sauðfjárbeit á afréttum og láglendi og hlýrra loftslag sem eykur vöxt gróðurs en leiðir einnig til hopunar jökla og þ.a.l. landnáms gróðurs á nýjum svæðum. Einnig á landgræðsla og skógrækt hlut að máli. Þau svæði sem sýndu minni grósku en áður voru þar sem miklar breytingar urðu af mannavöldum, t.d. Hálslón Kárahnjúkavirkjunar en einnig af náttúrulegum ástæðum, s.s. vegna tveggja eldgosa, í Eyjafjallajökli 2010 og Grímsvötnum 2011.

Mynd 8.6 sýnir rústamýri, en það er vistgerð sem hefur dregist saman með hlýnandi veðurfari frá lokum 19. aldar. Rústamýrar finnast eingöngu þar sem er sífreri í jörðu. Núna finnst þessi vistgerð aðeins á fjórum svæðum hérlendis[34] og þekur um 70 km^2. Með áframhaldandi hlýnun munu rústir í hálendismýrum sennilega hverfa að mestu hér á landi[35] og eftir standa hengistaraflóavist eða aðrar mýravistir hálendisins.



Mynd 8.7 Meðalþekja plöntuhópa og ógróins yfirborðs í 24 föstum reitum í láglendishögum og á afréttum á Norðurlandi og Suðurlandi. Reitirnir voru settir niður og mældir 1997–1998 og endurmældir 2005 og 2015. (Heimild: sjá tilvísun 38.)

8.3.1.2 Hagaverkefnið

Í skýrslu vísindanefndar frá 2008 var fjallað um langtímamælingar í rannsóknareitum í úthaga sem eru hluti af verkefninu *Vöktun haglendis*. Mælingarnar fara fram víða á Norðurlandi og Suðurlandi en þær hófust á árunum 1997–1998[36] og síðan var aftur mælt 2005 og síðast 2015. Í öllum reitum fór fram ástandsmat, einfaldar gróðurmælingar og ljósmyndun var endurtekin á öllum stöðum. Mæld var gróðurþekja, rof, grashæð, beitarummerki, uppskera og pH, nitur og kolefni í jarðvegi. Mynd 8.7 sýnir helstu niðurstöður þessara mælinga. Niðurstöður fyrri mælinga 2005 sýndu aukna framleiðni gróðurs og þekju frá 1997, en niðurstöður frá 2015 sýna að gróska lands hefur enn aukist og að dregið hefur úr rofi og beitarálagi, bæði á láglendi og til heiða. Breytingar á gróðri og ástandi lands eru þó minni nú en á fyrra tímabili milli 1998 og 2005. Líkleg skýring á þessu er veruleg loftslagshlýnun á landinu frá því um 1995 til 2005, en hægt hefur á henni síðustu ár (sjá nánar grein 4.3), en fremur litlar breytingar hafa hins vegar orðið á fjölda hrossa og sauðfjár í landinu undanfarin 20 ár[37] og beitaráhrif því líklega svipuð og áður.

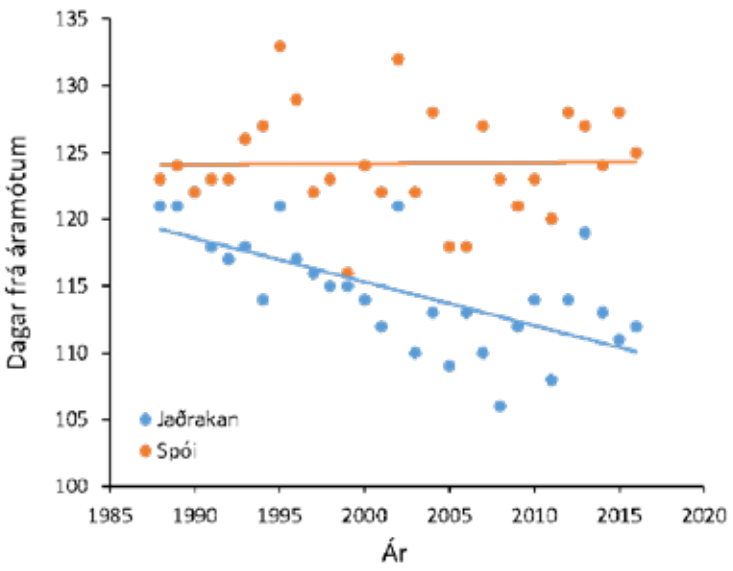
Erfitt getur verið að skilja í sundur áhrif hlýnandi veðurfars og breytinga sem samtímis hafa orðið á landnýtingu, einkum búfjárbeit. Til að fá óyggjandi svör við því hvort breytingar á gróðurfari og öðru lífríki eru vegna loftslagsbreytinga eða annarra þátta er mikilvægt að gera beinar tilraunir samhliða vöktunarmælingum, t.d. með því að friða stór svæði fyrir beit í grennd við framangreinda rannsóknareiti. Með því að rannsaka svæði þar sem áhrifa landnýtingar gætir ekki má fá áreiðanlegri hugmynd um áhrif loftslagsbreytinganna einna og sér.

Mikilvægt er einnig að rannsaka svæði þar sem ekki gætir neinna áhrifa frá landnotkun fyrr eða síðar, sérstaklega beit. Slík svæði eru vandfundin á Íslandi en gömul jökulsker bjóða upp á einstakar aðstæður til að meta áhrif loftslagsbreytinga óháð landnotkun. Nýlega voru endurteknar mælingar í föstum rannsóknareitum í jökulskerjum í Breiðamerkurjökli og Vatnajökli. Í áratugi hefur reglulega verið fylgst með breytingum á gróðurfari í jökulskerjum og sumstaðar í yfir 50 ár, s.s. í Káraskeri og Bræðraskeri, eða frá árinu 1965. Fleiri plöntutegundir vaxa nú á jökulskerinu Máfabyggðum en fyrir 35 árum síðan[39]. Niðurstöður vöktunarinnar sýna að plöntutegundum hefur fjölgað og gróðurmörk breyst með hlýnandi loftslagi. Fjölgun plöntutegunda getur einnig verið afleiðing náttúrulegrar framvindu enda tekur það bæði mislangan tíma fyrir tegundir að dreifast inn á ný svæði og að skapa skilyrði fyrir þær að nema land og þrífast.

8.3.2 Dýralíf

8.3.2.1 Fuglar

Eins og áður hefur komið fram ræður veðurfar miklu um hvar tegundir dýra og plantna geta lifað. Margar



Mynd 8.8. Komutími farfugla að vori. Ættingjarnir jaðrakan og spói eru báðir farfuglar og algengir varpfuglar á láglendi Íslands. Jaðrakan er skammdrægur farfugl sem hefur vetursetu í V-Evrópu en hann hefur flýtt komu sinni til Íslands að vori síðustu ár. Spói er langdrægur farfugl sem hefur vetursetu í V-Afríku en hann hefur ekki breytt komutíma sínum. Munur á þessum tveimur tegundum endurspeglar vel þann mun sem er almennt á fartíma skammdrægra og langdrægra farfugla á Norðurhveli. Stofnar langdrægra farfugla standa almennt mun verr og er það rakið til þess að þeir hafa ekki aðlagað komutíma sinn og varp hækkandi hita. Gögnin sýna fyrstu komutíma jaðrakans og spóa í Laugarás í Biskupstungum og hafa verið birt til 2009 en eru hér uppfærð til 2015. (Heimild: sjá tilvísun 46).

tegundir fugla eru t.d. aðlagaðar votlendi, allt frá vötnum til sjávar, aðrar mólendi, lauf- eða barrskógum, og enn aðrar hánorrænum túndrum eða heiðum. Það er ekki eingöngu fæðuframboðið og hæfileikinn til að nýta tiltekna fæðu sem ræður búsvæðavali fugla heldur einnig aðlögun að loftslaginu hvort sem það er kuldi heimskautasvæðanna eða steikjandi hiti þegar nær dregur miðbaug. Sumar tegundir geta aðlagað sig breyttum aðstæðum, ef breytingarnar eru ekki of miklar, en aðrar verða að flytja sig til í leit að aðstæðum sem henta. Hvarf haftyrðils, hánorrænnar tegundar sem síðast verpti í Grímsey hér á landi, má að öllum líkindum a.m.k. að hluta rekja til hlýnandi veðurfars. Um 35 nýjar fuglategundir hafa hins vegar reynt að nema land á síðustu öld og margar sest hér að. Má þar nefna fuglategundir eins og svartþröst, stara, sílamáf, stormmáf, brandönd og helsingja og virðist tíðni landnáms hafa aukist eftir því sem leið á 20. öldina[40]. Mildara veðurfar, einkum að vetri til, getur aukið líkur á því að fuglar sem flækjast hingað nái fótfestu, en myndun nýrra búsvæða er einnig mikilvægur þáttur. Má í því sambandi til dæmis nefna skógarfuglana glókoll, skógarsnípu og krossnef sem nýlega hófu hér varp[41,42,43].

Varpfuglum í sjófuglabyggðum við norðanvert Atlantshaf hefur fækkað verulega frá síðustu aldamótum og flestir sjófuglastofnar virðast fara minnkandi en nánar er fjallað um sjófugla í grein 7.4.

Til að auka skilning okkar og fylgjast með breytingum sem geta orðið á útbreiðslu og fari fugla eða annarra dýra vegna loftslagsbreytinga þarf m.a. að vakta útbreiðslumörk þeirra og sjá hvort tengsl eru milli hlýnunar og útbreiðslubreytinga. Einnig má rannsaka breytingar á fartíma farfugla, einkum að vori, en fartími getur tengst afkomu í gegnum tækifæri til varps og hugsanlegra breytinga á varptíma[44]. Þá má einnig rannsaka tengsl milli afkomu (varpárangurs og lífslíkna) og hita beint.

Rannsóknir í Evrópu og Norður-Ameríku sýna að skammdrægir farfuglar hafa flýtt komu sinni meira en langdrægir. Stofnbreytingar innan þessara hópa sýna einnig að tegundum langdrægra farfugla, sem ekki hafa náð að laga fartíma sinn að breyttum aðstæðum, fækkar hraðar en hinum[45]. Hér á landi væru skammdrægir farfuglar þeir sem hafa vetursetu í Vestur-Evrópu en langdrægir þeir sem hafa vetursetu í Afríku eða við sunnanvert Atlantshaf. Komutími íslenskra farfugla hefur verið lítið kannaður en þó eru til upplýsingar um komutíma algengra farfugla í uppsveitir Árnessýslu á tímabilinu 1988–2009[46]. Greining á gögnunum sýnir að íslenskir farfuglar flýttu almennt komutíma sínum á tímabilinu svo miklu munar og sýnir komutími bæði tengsl við vorhita á Íslandi og Norður-Atlantshafssveifluna[47]. Þar sem breytileiki í hita í apríl, þeim mánuði sem flestir farfuglar koma til landsins, var mjög mikill á þessu tímabili sýna niðurstöðurnar kannski frekar sveigjanleika íslenskra farfugla heldur en að hér sé um langtímatilhneigingu að ræða. Mynd 8.8 sýnir

Mynd 8.9 Jaðrakan. (Ljósmynd: Erling Ólafsson.)

Mynd 8.10 Æðarblikar. (Ljósmynd: Trausti Baldursson.)

samanburð á komutíma jaðrakans (mynd 8.9) og spóa, en breytingar á fartíma eru drifnar áfram af nýliðum í stofninum, þ.e. að ungar sem koma fyrr úr eggi að vori virðast koma fyrr að vori þegar þeir fljúga fyrst norður til landsins tveimur árum seinna[48]. Fjölgun jaðrakans, einkum í kaldari landshlutum, virðist mega rekja til þess að jaðrakanar, sem verpa almennt fyrr í hlýrri vorum, liggja skemur á og ungarnir eru fljótari að verða fleygir[48]. Við þetta aukast líkur á að fuglarnir komist á vetrarstöðvar og þá líkurnar á því að þeir skili sér aftur á varpstöðvar hér á landi. Þá sýna nýjar rannsóknir að varpárangur jaðrakans á stórum svæðum er betri þegar vor eru hlý en þau tengsl geta skýrt útbreiðsluaukningu tegundarinnar um landið[49].

Stofnbreytingar hjá æðarfugli (mynd 8.10) hafa verið tengdar við breytileika í veðurfari[50]. Stofnvísitölur eru m.a. byggðar á fjölda hreiðra sem æðarbændur telja í vörpum og ná fáeinar tímaseríur allt aftur til aldamótanna 1900 en flestar eru styttri. Einnig eru til upplýsingar um tímasetningu varps og eggjafjölda úr fáeinum vörpum[50]. Niðurstöður rannsóknanna sýna að stofnstærð æðarfugls er lítt næm fyrir venjulegum sveiflum í veðri. Öfgakennd vetrarveður eins og frostaveturinn 1918 geta hins vegar haft veruleg áhrif á lífslíkur fullorðinna fugla. Jafnframt sýna rannsóknir erlendis að ísmyndun að vetri og hve hratt ís bráðnar að vori hefur áhrif á afkomu æðarfugla[51]. Tengsl veðurfars, varptíma og stofnbreytinga sýna talsverðan breytileika milli varpa en líklegt er að staðbundnar aðstæður, t.d. fæðuframboð, hafi meiri áhrif á æðarfugl heldur en veðurfar af þeim breytileika sem hefur verið síðustu öldina[52,53].

Hér á landi er lítið um rannsóknir sem hafa haft þann tilgang að tengja breytileika í veðurfari við lýðfræði fugla eða annarra dýra. Breytileiki í lýðfræði, sem rekja má til veðurfars, bendir til þess að loftslagsbreytingar geti og muni hafa áhrif, t.d. á varptíma æðarfugls[44]. Nýlegar rannsóknir á grágæs[54] sýna t.d. að verulegur munur er eftir landshlutum á varptíma og varpárangri grágæsa en þær verpa almennt fyrr og gengur betur þar sem er hlýrra. Einnig sýna rannsóknir á jaðrakan, sem nefndar voru fyrr, að varpárangur þeirra er betri þegar

Mynd 8.11. Refur. (Ljósmynd: Wilhelm Gunnarsson.)

vor eru hlý. Líklegt er að hliðstæður finnist í mörgum stofnum ef að er gáð[49]. Vond staða sjófuglastofna við Ísland er að koma æ betur í ljós og hefur verið rakin til breytinga á fæðuframboði sem líklega eru drifnar af loftslagsbreytingum. Rannsóknir á kríum á Vesturlandi benda til sömu þróunar[55]. Nánar er fjallað um breytingar á stofnum sjófugla hér við land í grein 7.4.

Talsvert vantar á að hægt sé að spá fyrir um áhrif loftslagsbreytinga á íslenska fugla nema með mjög almennum hætti. Til þess skortir langtímavöktun og rannsóknir, bæði á vistfræðilegum ferlum hér á landi og á vetrarstöðvum fuglanna og betri tengingu rannsókna við aðra þætti sem hafa áhrif t.d. á búsvæði þeirra. Hér má t.d. nefna gróðurfarsbreytingar og breytta og aukna landnotkun, s.s. í landbúnaði og skógrækt, sem oft má rekja til breytinga á veðurfari.

8.3.2.2 Spendýr

Nokkrar nýlegar rannsóknir fjalla um áhrif loftslagsbreytinga á íslensk spendýr. Í flestum tilvikum eru áhrifin óbein og tengjast fyrst og fremst breytingum á fæðuframboði. Eina upprunalega spendýrið hér á landi er heimskautarefurinn (mynd 8.11). Refurinn er rándýr og hér á landi er hann tækifærissinni í fæðuvali. Stofnstærð refs fylgir því ekki sveiflum í stofnstærð tiltekinnar bráðar eins og þekkt er víða annars staðar þar sem refir geta verið að miklu leyti háðir ákveðinni bráð, s.s. læmingjum. Nýlegar rannsóknir[56] á stofnstærð refsins hér á landi sýna hvernig viðkoma getur tekið breytingum vegna hæfni refsins til að skipta yfir í bráð hvers stofnstærð er óháð refsins og jafnvel úr fasa við sveiflur í stofnstærð hans. Refastofninn hér á landi minnkaði verulega á 20 ára tímabili vegna falls í rjúpnastofninum og skorts á öðrum fæðutegundum, líklega vegna kulda og óhagstæðs veðurfars en einnig var á tímabili eitrað fyrir ref. Þótt rjúpnastofninn tæki ekki við sér óx refastofninn engu að síður upp í fyrri stærð, og langtum meira en það, með því að nýta aðrar tegundir, aðallega heiðagæs á hálendinu, fýl og vaðfugla. Þessir bráðarstofnar voru þá í örum vexti í kjölfar betri veðurskilyrða. Hin jákvæðu áhrif sem loftslagsbreytingar virðast hafa haft á refastofninn hér á landi eru í andstöðu við það sem hefur verið að gerast annars staðar á heimskautasvæðum en þar hefur tegundinni staðið ógn af afleiðingum loftslagsbreytinga, m.a. vegna aukinnar samkeppni við rauðrefi og stofnbreytinga hjá læmingjum (lægri toppar og minni sveiflur)[57]. Þó að íslenskir refir hafi notið góðs af hlýnandi veðurfari undanfarin 30 ár virðast sum áhrif af völdum breytinga í veðurkerfum og sjávarstraumum[58] vera neikvæð, t.d. varðandi líkamsvöxt og stofnstærð refa[59]. Jafnframt hefur verið sýnt fram á að staðbundnar sveiflur í hita, úrkomu og vindi hafa marktæk áhrif á nýliðun og afkomu yrðlinga[60]. Breytileiki í veðrakerfum og hafstraumum hafa áhrif á sjávarlífverur og hefur verið sýnt fram á að fæðuval hjá minkum má tengja breytingum á vísitölum tengdum hafstraumum í Norðvestur-Atlantshafi og Norður-Atlantshafssveiflunni[61,62]. Minkar hafa lifað villtir á Íslandi allt frá því þeir sluppu fyrst úr minkabúum á fyrri helmingi síðustu aldar. Þeir eru útbreiddir um allt land og teljast til framandi ágengra tegunda en fæða þeirra er bæði af landrænum og hafrænum uppruna. Samkvæmt veiðitölum fjölgaði minkum samfellt frá þeim tíma sem þeir tóku að sleppa og allt til ársins 2006 en fækkaði hratt eftir það. Þar sem refir á vesturhluta landsins lifa einkum á sjófugli, má

Mynd 8.12 Hagamús.
(Ljósmynd: Ester Rut Unnsteinsdóttir.)

gera ráð fyrir að fækkun í sjófuglastofnum muni einnig hafa áhrif á afkomu refa. Svo virðist sem nokkur fækkun hafi verið í refastofninum undanfarin ár[63] og því er mikilvægt að fylgjast með stofnbreytingum og finna skýringar á þeim.

Hagamúsin (mynd 8.12) er eina nagdýrið sem lifir í náttúru landsins óháð manninum. Í rannsókn á takmarkandi þáttum á lífslíkum og stofnstærð hagamúsa kom fram að vetrarhiti hafði afgerandi áhrif á lífslíkur[64]. Þannig réð vetrarhiti því hversu margar hagamýs lifðu til vors og gátu tekið þátt í tímgun. Því fleiri mýs sem tímgast í upphafi sumars, því stærri varð hauststofn hagamúsa. Íslenski hagamúsastofninn hefur því væntanlega notið góðs af hlýnandi veðurfari í kjölfar loftslagsbreytinga undanfarna áratugi.

Hreindýr sem fyrst voru flutt til landsins eftir miðja 18. öld eru stærst villtra spendýra á Íslandi en þau er einungis að finna á austanverðu landinu. Ekki er vitað hvort eða hvaða áhrif hlýnandi veðurfar hefur á stofnbreytingar hreindýra hérlendis en stærð stofnsins hefur sveiflast nokkuð á undanförnum áratugum. Náði stofninn hámarki um miðjan áttunda áratug sl. aldar en lágmarki um 10 árum síðar. Nú er íslenski hreindýrastofninn í sögulegu hámarki, eða yfir 7000 dýr[65,66].

8.3.2.3 Smádýr

Loftslagsbreytingar geta haft mikil áhrif á afkomu smádýra eins og annarra dýra. Fjölmargar tegundir smádýra berast til landsins, ýmist eftir náttúrulegum leiðum með vindum eða tilviljanakennt með vörum sem fluttar eru inn víða að og eftir ýmsum leiðum. Fæstar innfluttu tegundanna eiga hér lífsmöguleika en suðrænar tegundir drepast þegar kólnar í veðri á vetrum.

Undanfarin ár hafa mildari vetur gert mörgum tegundum kleift að lifa af yfir vetrartímann og setjast hér að[67]. Fleira kemur til en mildari vetur. Hlýnandi loftslag undanfarna áratugi hefur haft mikil áhrif á gróður og grósku sem eykur möguleika smádýra til landnáms. Náttúrulegur gróður hefur tekið við sér, bæði vegna hlýnunar og minni beitar, og hefur það haft áhrif á ýmsar gamalgrónar tegundir smádýra sem hafa fært út kvíar, þeim hefur fjölgað og þær breiðst enn frekar út.

Skógrækt með útlendum trjátegundum hefur aukist verulega og einnig útbreiðsla annarra framandi tegunda eins og lúpínu[68,69]. Með síauknum innflutningi varnings eykst fjöldi aðfluttra smádýra og möguleikar margra tegunda til landnáms aukast með hlýnandi loftslagi og aukinni gróðursæld sem m.a. byggist á innfluttum tegundum[70]. Einna þyngst vegur aukin garðrækt í þéttbýli og sumarhúsabyggðum og því samfara aukinn og oft illa ígrundaður innflutningur á gróðurvörum, s.s. pottaplöntum og græðlingum. Upphaf landnáms ýmissa tegunda má því rekja til garðræktar í þéttbýli. Fyrst um sinn eru margar tegundanna bundnar görðum sem gætu reynst stökkpallar út í náttúruna. Reyndar eru margar tegundir háðar innfluttum garðplöntum og komast hvergi lengra.

Fjölmörg dæmi mætti nefna um breytingar sem orðið hafa á smádýrafánunni og slíka þróun sem er í fullum gangi. Það einkennir landnema sem borist hafa

Mynd 8.13. Skógbursti, lirfa. (Ljósmynd: Erling Ólafsson.)

með vindum að landnám þeirra getur hafist nánast hvar sem er, ekki síst á landinu sunnan- eða austanverðu. Barrvefari (*Zeiraphaera griseana*) fannst fyrst í Hallormsstaðaskógi og Fljótshlíð. Það er vel mögulegt að hann hafi upphaflega borist hingað með vindum þó að innflutningur með trjáplöntum komi einnig til greina. Barrvefari breiddist út óðfluga og er nú eitt algengasta fiðrildið þar sem barrtré eru ræktuð en hann lifir eingöngu á barrnálum. Stráygla (*Apamea remissa*) nam land á Suðausturlandi og hefur dreifst hægt og sígandi vestur eftir Suðurlandi. Ýmsar tegundir skordýra eru hér reglubundnir flækingar með vindum en vetur hafa reynst þeim of harðir til að varanlegt landnám sé mögulegt. Þó eru grunsemdir um að sumar tegundir kunni að lifa af óvenjumilda vetur, til dæmis kálmölur (*Plutella xylostella*), skrautygla (*Phlogophora meticulosa*) og garðygla (*Agrotis ypsilon*).

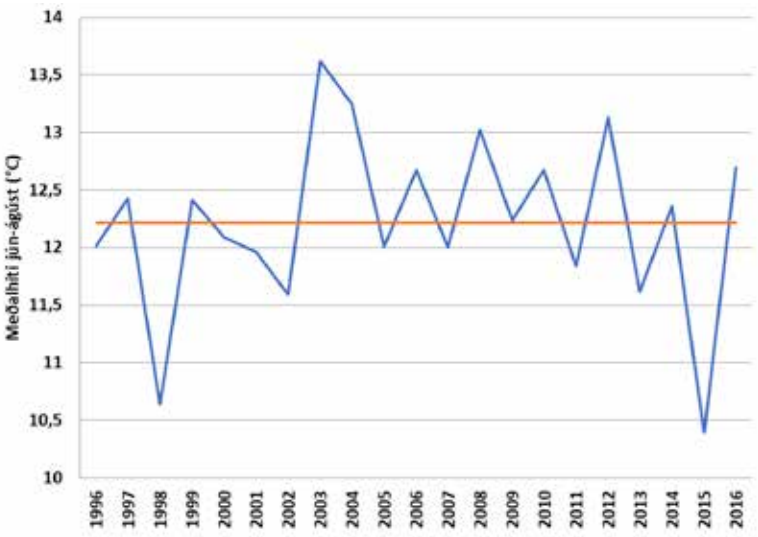
Upphaf landnáms smádýra sem borist hafa til landsins fyrir tilstilli manna er oftast á höfuðborgarsvæðinu og í nágrannabyggðum þess[67]. Margar tegundanna hafa enn sem komið er ekki náð að dreifast frá manngerðu umhverfi. Dæmi um slíkar tegundir eru spánarsnigill (*Arion lusitanicus*), pardussnigill (*Limax maximus*), rauðhumla (*Bombus hypnorum*), garðaklaufhali (*Forficula auricularia*) og rifsþéla (*Nematus ribesii*)[71]. Sumar hafa fikrað sig út í náttúruna, eins og asparglytta (*Phratora vitellinae*) sem skaðar lauf aspa og víðitegunda, jafnt ræktaðra sem villtra, og birkikemba (*Heringocrania unimaculella*) sem dreifist hratt út sem skaðvaldur í birkiskógum Suðurlands[72]. Dæmi eru um tegundir sem auka útbreiðslu sína hægt og bítandi og aðrar sem eru afar staðbundnar. Dumbygla (*Apamea crenata*) er tegund sem fannst fyrst á höfuðborgarsvæðinu en hefur náð að dreifast allt austur í Hornafjörð. Sniglanárakka[73] (*Phoshuga atrata*) fer fjölgandi með hverju ári staðbundið í Kollafirði[67].

Ýmsum gamalgrónum tegundum hefur farið fjölgandi. Sem dæmi má nefna tvær tegundir fiðrilda. Ertuygla (*Melanchra pisi*) var löngum frekar sjaldgæf sunnan til á landinu. Henni hefur fjölgað mikið á Suðurlandi og breiðst út norður eftir Vesturlandi. Staðbundið er hún orðin skaðvaldur á gróðri víða á útbreiðslusvæðinu[74]. Mynd 8.13 sýnir skógbursta (*Orgyia antiqua*) sem var var afar fágætur í Fljótshlíð og undir Eyjafjöllum en hefur nú breiðst um sveitir Suðurlands og orðið skaðvaldur á gróðri í sumarhúsabyggðum[75].

Í Evrópu hefur fjöldi skógarmítla (*Ixodes ricinus*) aukist og samhliða hlýnandi loftslagi hefur tegundin stækkað útbreiðslusvæði sitt til norðurs. Jafnframt eru skógarmítlar að finnast í meiri hæð yfir sjávarmáli[76,77].

Hér á landi hefur orðið vart við aukningu á skógarmítlum en hins vegar er óvíst hvort tegundin sé orðin landlæg þótt það þyki líklegt. Helsta leið skógarmítla til landsins er með farfuglum og fannst töluverður fjöldi á skógarþröstum (*Turdus iliacus*) við fuglamerkingar á Höfn í Hornafirði vorið 2017[78].

Með hlýnandi loftslagi og aukinni skógrækt má leiða líkur að því að skógarmítlum fari fjölgandi hér á landi. Skortur á hentugum blóðgjöfum getur þó staðið skógarmítlum fyrir þrifum. Fjölgun á kanínum í skóglendi gæti hugsanlega auðveldað mítlunum landnám.



Mynd 8.14 Meðalhiti júní – ágúst í Laxá í Aðaldal mældur með sírita við Laxamýri.

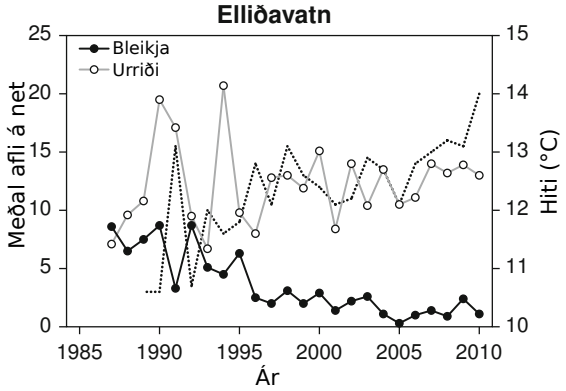
8.3.3 Vatnalíf

Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki í ferskvatni geta verið nokkuð flókin og mismunandi eftir gerð straum- og stöðuvatna og aðstæðum á hverjum stað, s.s. hæð yfir sjó, vatnsmagni, dýpi og skjóli fyrir veðri og vindum. Í ferskvatni á norðurslóð er almennt reiknað með að hlýnun leiði til aukningar í ákomu næringarefna og frumframleiðslu sem skilar sér áfram í hagstæðari lífsskilyrðum fyrir hryggleysingja, fiska og fugla upp að vissu marki[12,79,80]. Yfir sumartímann eru jafnan sterk tengsl á milli lofthita og vatnshita, auk þess sem orka kemur frá inngeislun sólar þegar hennar nýtur við. Yfir vetrartímann er vatnshiti lágur og á þeim tíma sem ís er á eða við vötn er hitastig nærri 0°C. Bráðnun snævar á hálendinu getur haft mikil kælingaráhrif á ár og læki. Aukin snjóalög geta því haft áhrif á vatnshita og rennsli fram eftir vori. Enn fremur má gera ráð fyrir að við frekari hlýnun styttist sá tími sem ís hylur vötn og í sumum tilfellum hætti vötn alfarið að leggja á veturna. Afleiðingar þess fyrir vistkerfi stöðuvatna geta verið margþætt, m.a. fer frumframleiðsla eftir ljósmagni og eykst eftir því sem sól hækkar á lofti. Frumframleiðsla gæti því hafist fyrr í vötnum sem ekki eru hulin ís að vori og þar með breytt klaktíma hryggleysingja. Flugtími ýmissa skordýrategunda fer m.a. eftir hitastigi. Þannig geta fleiri kynslóðir rykmýs náð að klekjast ár hvert samfara hækkandi hita, líkt og sýnt hefur verið fram á í tilraunum í Hengladölum á Hellisheiði[14]. Hlýnun vatns í lækjum og ám mun í heildina leiða til aukinnar frumframleiðni, aukins vaxtarhraða dýra og minni fjölbreytileika lífvera[16,17,19,20]. Í djúpum vötnum má búast við öflugri hitaskilum og lagskiptingu í vatnsbolnum að sumri til. Slíkt stuðlar að einangrun vatnslaga og kann að leiða til skorts á næringarefnum í ljóstillífunarlaginu með tilheyrandi áhrif á frumframleiðslu[12,81]. Þá má búast við að kulvísum tegundum fjölgi en kulsæknar tegundir lífvera láti undan síga og útbreiðsla þeirra dragist saman. Á meðal fiska sem virðast vera sérstaklega viðkvæmir fyrir hlýnuninni, einkum þó í grunnum vötnum, er bleikja (*Salvelinus alpinus*) og eru skýr dæmi um fækkun hennar hér á landi, sjá hér fyrir neðan[79,89].

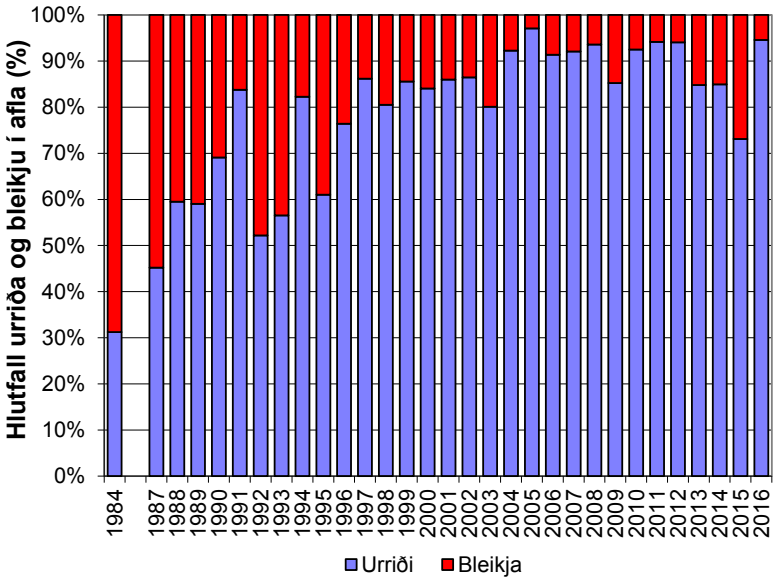
Hiti hefur bein áhrif á klak hrogna laxfiska og þurfa hrogn á bilinu 420–500 gráðudaga frá hrygningu til klaks[82,83]. Vöxtur laxfiska fer ekki af stað að ráði fyrr en vatnshiti nær 5–7°C. Sterk tengsl eru á milli vatnshita og stærðar vorgamalla seiða laxfiska að hausti[82]. Þau tengsl eru þó sterkust við hita vormánaða, þ.a. hlýtt haust bætir ekki upp fyrir kalt vor, enda styttist birtutími á haustin. Þegar horft er á tengsl hita og einstakra tegunda laxfiska er mikilvægt að þau ferli sem áhrif hafa séu þekkt svo hægt sé að gera sér betur grein fyrir afleiðingum hitabreytinga.

Mynd 8.14 sýnir vatnshita Laxár í Aðaldal við Laxamýri að sumarlagi frá 1996–2016 og merkja má nokkurn breytileika í meðalhita á tímabilinu. Hitinn var hæstur 2003 en lægstur árið 2015.

Bleikja (*Salvelinus alpinus*) er útbreidd umhverfis allt norðurheimskautssvæðið og er ein af þeim lykiltegundum sem fylgst er með til að segja fyrir um hvað gerist við hlýnandi loftslag á norðurslóðum[83]. Tegundin



Mynd 8.15 Netafli bleikju og urriða og meðalvatnshiti júní-september (punktalína) í Elliðavatni á árunum 1987–2010. Vatnið hefur hlýnað marktækt (R^2=0.54, P<0.001) og bleikju snarfækkað (R^2=0.71, P<0.001). (Heimild: sjá tilvísun 79.)

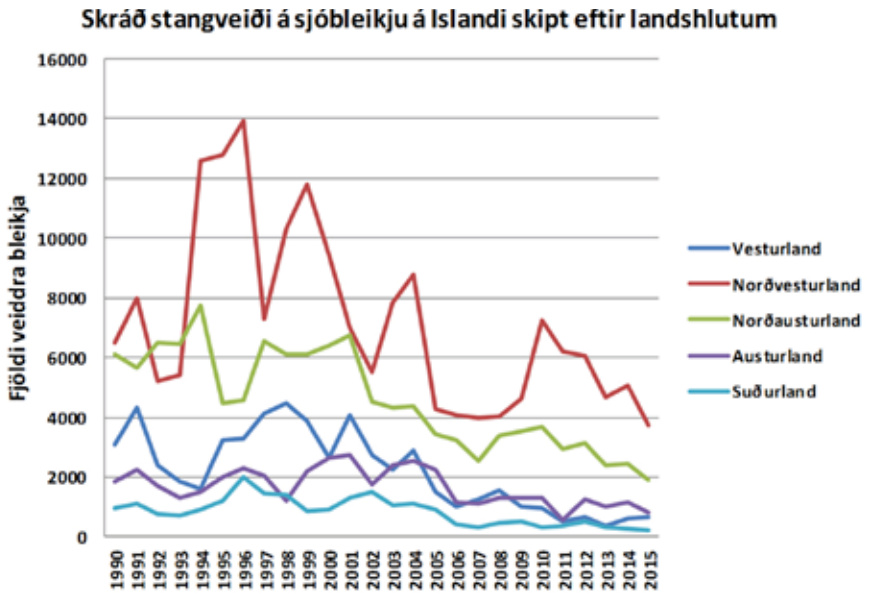


Mynd 8.16 Hlutfall urriða og bleikju í afla í rannsóknaveiðum í tvær netaraðir í Elliðavatni á tímabilinu 1987–2016, auk 1984. (Heimild: sjá tilvísun 89 uppfært fyrir þessa skýrslu til 2016. Friðþjófur Árnason, Hafrannsóknastofnun.)

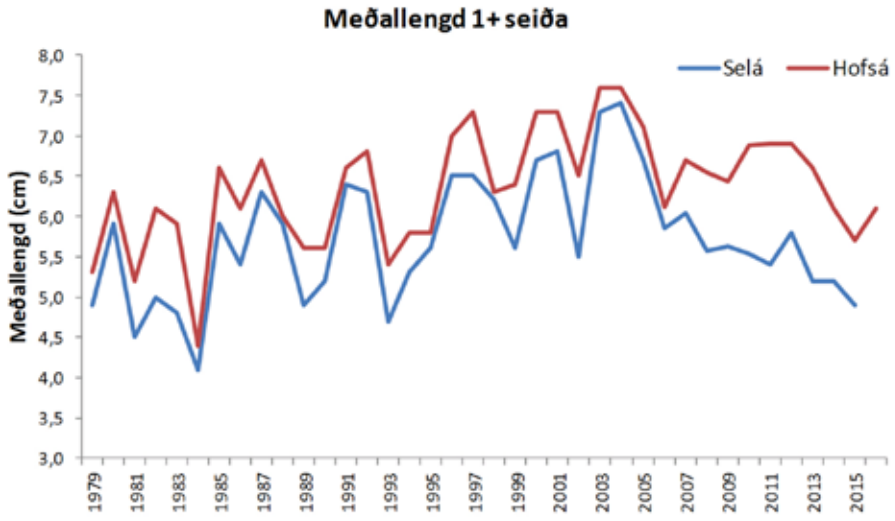
hefur mikla aðlögunarhæfni sem kemur fram í mismunandi svipfari og erfðafræðilegum einkennum bleikjustofna, jafnvel innan sama vatnakerfis, og eru bleikjugerðirnar fjórar í Þingvallavatni eitt skýrasta og best rannsakaða dæmið um þennan breytileika[84,85]. Lífssaga bleikjunnar er breytileg og getur hiti haft umtalsverð áhrif þar á, bæði hjá sjógöngustofnum og staðbundnum stofnum. Tegundin þolir þó almennt ekki að hiti fari yfir 20°C[86] en við hækkandi hita geta einnig aðrir umhverfisþættir breyst, s.s. fæða, samkeppni við aðrar tegundir, sníkjudýr og sjúkdómar. Við Norður-Atlantshaf eru syðri mörk útbreiðslu sjóbleikju við 64°N[87]. Í skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá 2008 kom fram að vísbendingar væru um að bleikja ætti undir högg að sækja í stöðuvötnum landsins vegna hækkandi vatnshita, einkum í mjög grunnum vötnum[88,89] s.s í Elliðavatni. Rannsóknir í Elliðavatni undanfarin 30 ár staðfesta þetta en þar hefur bleikjustofninn nánast hrunið meðan urriðastofninn hefur staðið í stað[12,89,79]. Á sama tíma hafði vatnið hlýnað umtalsvert, mest snemma vors og síðsumars, og farið vel yfir kjörhita bleikju til vaxtar og viðgangs (mynd 8.15), en urriði þolir hækkun á hita betur. Þessi þróun hefur haldið áfram í Elliðavatni þar sem hlutfall bleikju í netaveiði hefur haldist lágt (mynd 8.16). Vísbendingar um svipaðar breytingar má sjá hjá bleikju víðar á landinu þar sem hlutur tegundarinnar í veiði hefur farið dvínandi á síðari árum (mynd 8.17). Á sama tíma hefur sjóbirtingi fjölgað í ám, einkum á Norður- og Austurlandi[90].

Í skýrslu um rannsóknir á laxaseiðum frá 1979 til 2015 í Selá og Hofsá í Vopnafirði[91] kemur fram að vaxtarhraði laxaseiða, aldur gönguseiða og heildarlífþyngd laxaseiða hefur breyst umtalsvert á síðari árum. Einn af þeim þáttum í umhverfinu sem hugsanlega geta skýrt þessar breytingar er vatnshiti. Mælingar á vatnshita yfir sama tímabil sýndu að meðalhiti sumarmánaðanna (júní–ágúst) fór hækkandi til ársins 2003 en hefur síðan lækkað til 2015.

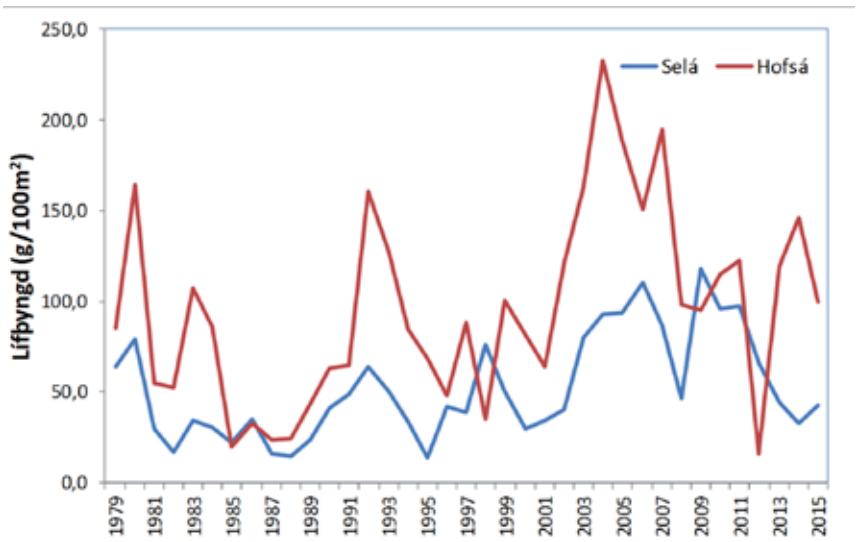
Mynd 8.18 sýnir að á tímabilinu fram til ársins 2003,



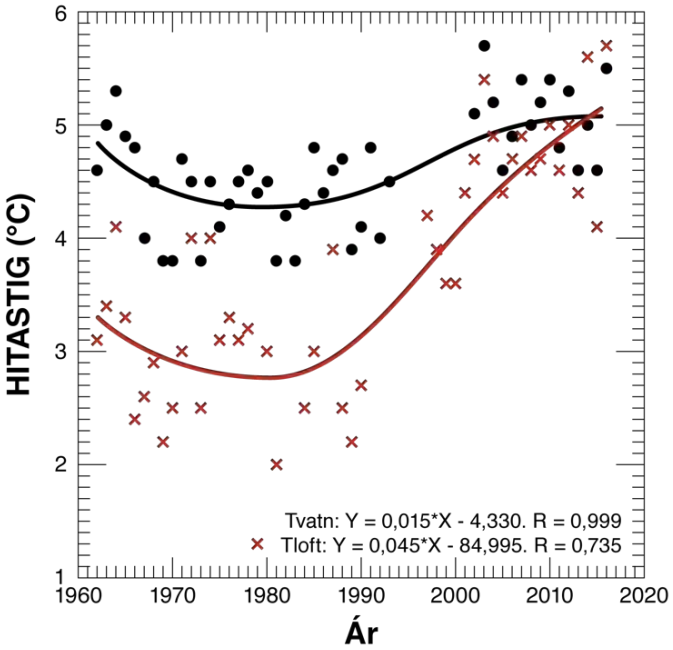
Mynd 8.17 Fjöldi stangveiddra bleikja í ám á Íslandi skipt eftir landshlutum. (Heimild: sjá tilvísun 90.)



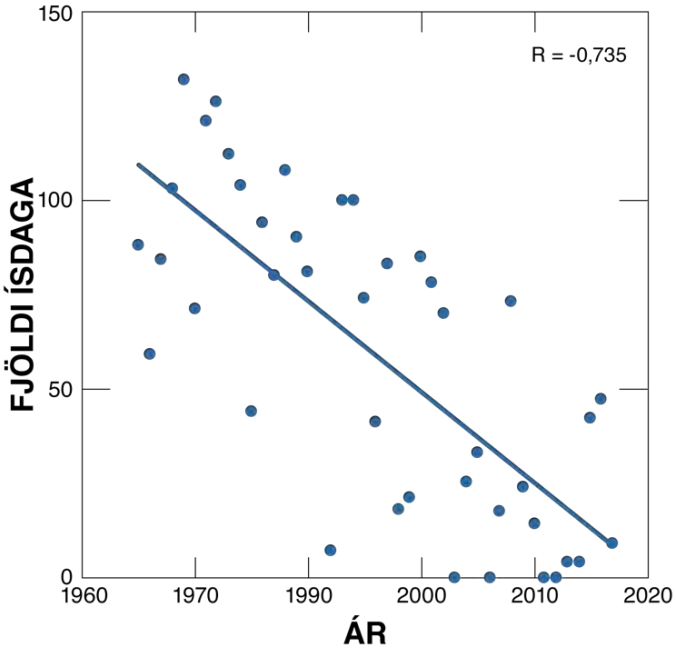
Mynd 8.18 Meðallengd ársgamalla laxaseiða í seiðamælingum í Selá og Hofsá. (Heimild: sjá tilvísun 91.)



Mynd 8.19 Lífþyngd laxaseiða í Selá og Hofsá, mæld sem vísitala í seiðamælingum í Selá og Hofsá. (Heimild: sjá tilvísun 91.)



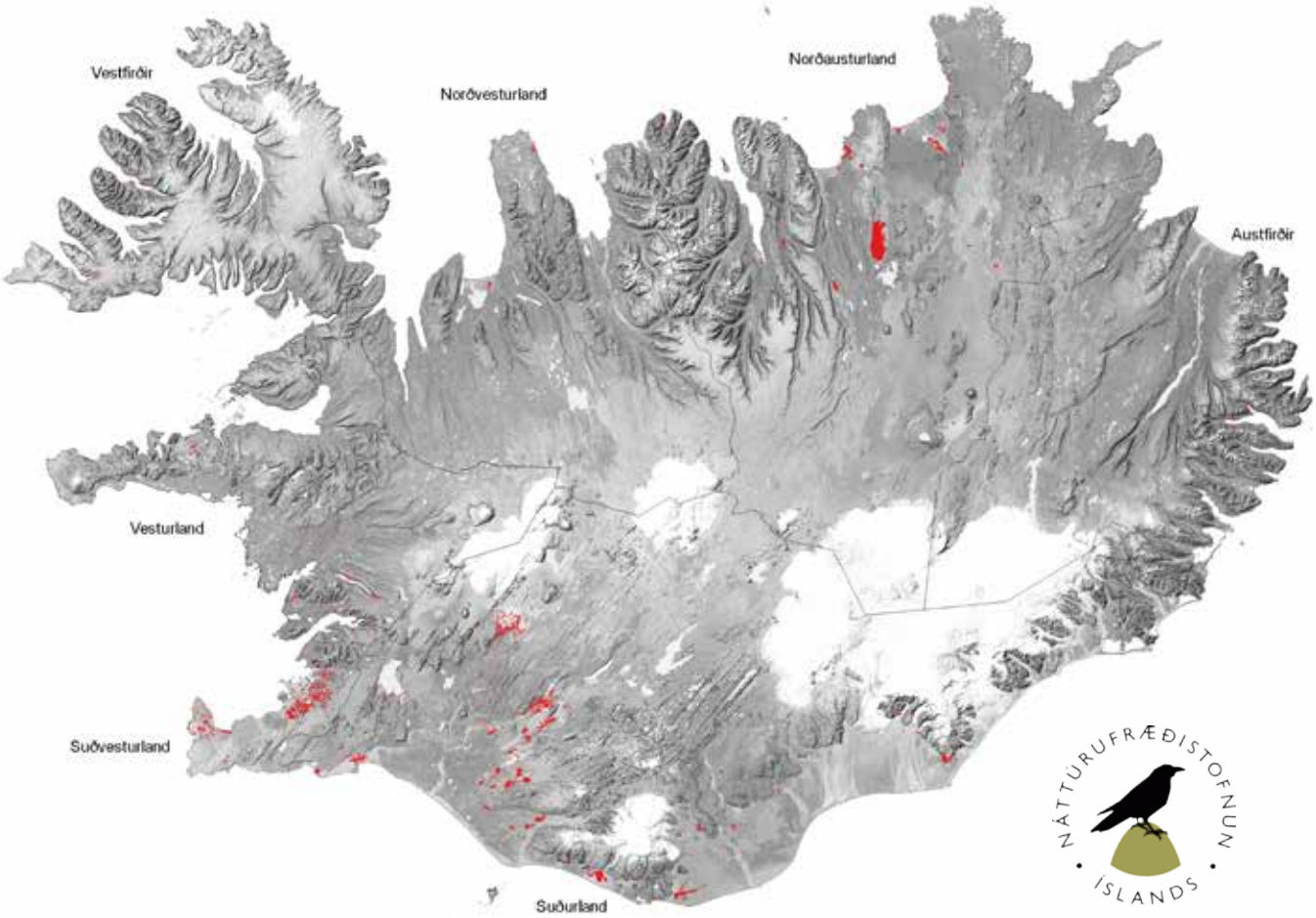
Mynd 8.20 Ársmeðalhiti Þingvallavatns (svartir punktar) og ársmeðallofthiti á vatnasviði Þingvallavatns (rauðir krossar) á tímabilinu 1962–2016. Einnig eru sýndir útjafnaðir ferlar og jöfnur línulegra aðhvarfsgreininga ásamt fylgnistuðlum. (Heimildir: sjá tilvísanir 93 og 94).



Mynd 8.21 Fjöldi daga með fastan ís á öllu Þingvallavatni veturna 1974–2017. Einnig er sýnd besta lína og fylgnistuðull. (Heimildir: sjá tilvísanir 93 og 94.)

þegar hiti hækkaði í ánum, jókst meðallengd ársgamalla laxaseiða en tók að minnka eftir það þegar kólnaði að nýju[91]. Mynd 8.19 sýnir sambærilegar niðurstöður fyrir lífþyngd. Við það að vöxtur eykst lækkar gönguseiðaaldur og lífsferill styttist en þegar kólnar dregur úr vexti og gönguseiðaaldur hækkar. Varðandi þær fisktegundir sem ganga til sjávar er líklegt að ástand sjávar, s.s. hiti, fæðuframboð, afrán og samkeppni við aðrar tegundir, geti haft marktæk áhrif á lífsafkomu þeirra. Á síðustu árum hafa komið fram miklar og tíðar breytingar í laxgengd á Íslandi, meiri en áður hafa sést á þeim rúmum 40 árum sem skráningar ná til[92]. Þessar breytingar koma m.a. fram í samsetningu stofna eftir sjávaraldri en laxi með eins árs sjávardvöl hefur fjölgað eftir 1980 en laxi með tveggja ára sjávardvöl hefur fækkað[92].

Rannsóknir í Þingvallavatni og á vatnasviðinu, sem byggjast á langtímaskráningu á vatns- og lofthita á tímabilinu 1962–2016, sýna að Þingvallavatn hefur hlýnað umtalsvert á undanförnum 40–50 árum og að



Mynd 8.22 Kortið sýnir útbreiðslu lúpínu 2016 (rautt). Heildarflatarmál lúpínu er áætlað að lágmarki 314 km². (Heimild: sjá tilvísun 101.)

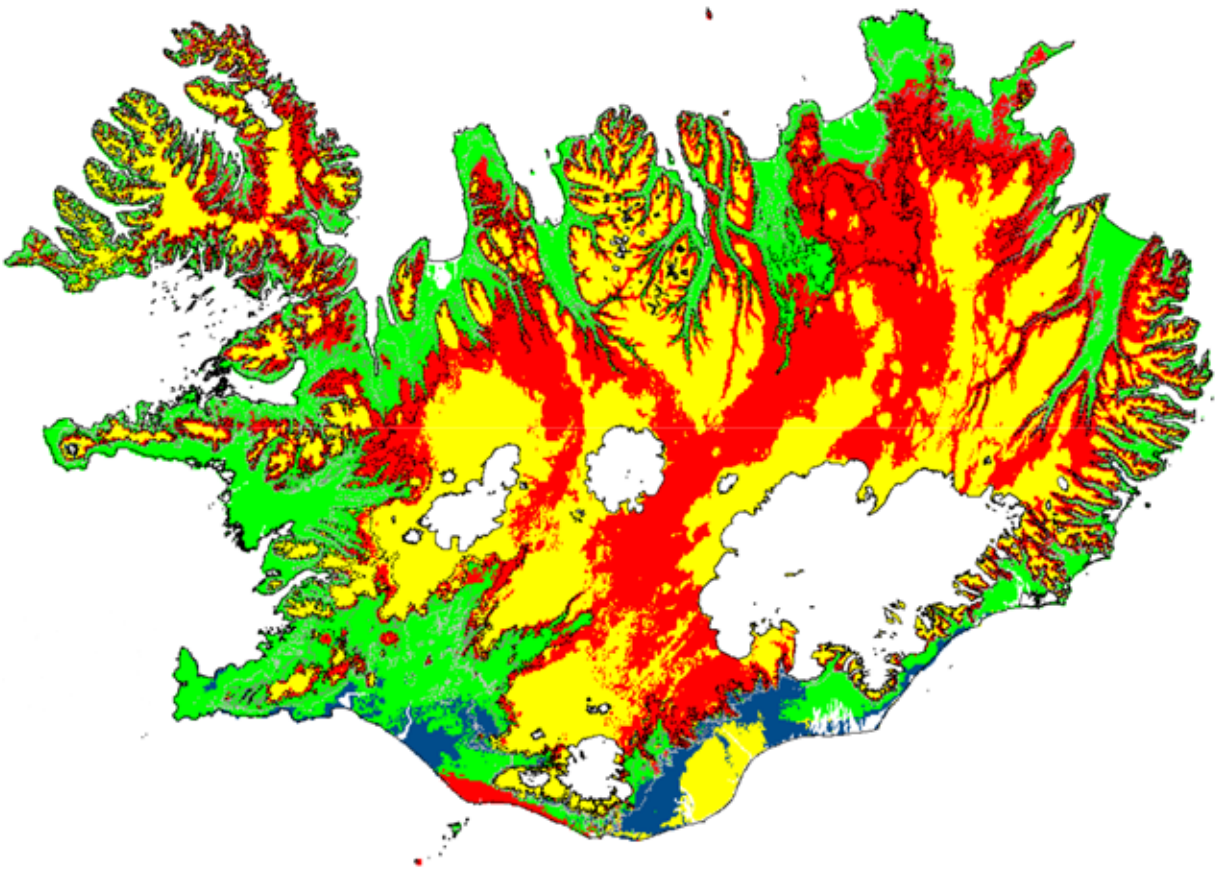
hlýnun vatnsins fylgir hækkandi lofthita á svæðinu (mynd 8.20). Árshitaferlarnir í vatninu og á vatnasviðinu falla jafnframt mjög vel að þróun ársmeðallofthita á Íslandi á umræddu tímabili. Ársmeðalhiti í vatninu hefur hækkað um nær 0.2°C á áratug, sem er á pari við hlýnun stórra og djúpra vatna á norðlægum slóðum og í Ölpunum. Vegna hlýnunarinnar leggur Þingvallavatn nú orðið bæði sjaldnar og seinna en áður, ís brotnar fyrr upp og íslausum árum hefur fjölgað mikið upp úr síðustu aldamótum (mynd 8.21).

Afleiðingar hlýnunar fyrir lífríki Þingvallavatns virðast þegar vera mælanlegar. Blaðgrænumælingar benda m.a. til að lífþyngd sviflægra þörunga í vatnsbolnum sé umtalsvert meiri nú en var fyrir um 40 árum. Þörungamagn í svifinu hin síðari ár hefur mælst tvö- til fjórfalt meira en var á árunum 1979 og 1981–1982. Munurinn er mestur á haustin en minnstur á sumrin. Þetta rímar vel við þróun lagskiptingar í vatnsbolnum og myndun hitaskila síðsumars á 15–25 m dýpi, sem virðast hafa bæði eflst í seinni tíð og vara lengur en fyrir 30–40 árum[93].

Um frekari afleiðingar hlýnunar á vistkerfi Þingvallavatns er erfitt að staðhæfa að svo komnu. Þetta stafar m.a. af því að sumar breytingarnar eru nýlegar og hafa varað í skamman tíma. Þetta á m.a. við um breytingar sem mælst hafa í ákomu næringarefna, en vísbendingar eru um aukinn styrk nítrats í írennslinu í norðanverðu vatninu á síðari árum[93,94,95]. Árið 2016 áttu sér einnig stað fordæmalausar breytingar í frumframleiðslumunstri og tegundasamsetningu svifþörunga í vatnsbol vatnsins sem óvíst er hvernig muni vinda fram[93,94,96].

8.3.4 Loftslagsbreytingar og framandi ágengar tegundir

Eins og hefur verið nefnt hér að framan eru miklar líkur á því að hlýnandi loftslag muni auðvelda ýmsum tegundum dýra og plantna að nema hér land. En hlýnun mun einnig geta haft veruleg áhrif á útbreiðslu framandi tegunda sem þegar eru fyrir í landinu. Mikil óvissa er um hver áhrifin verða og með hvaða hraða breytingar geta orðið. Margar tegundir munu líklega



Mynd 8.23 Rauðu svæðin eru spá um ný möguleg útbreiðslusvæði Alaskalúpínu fram til 2050. (Heimild: sjá tilvísun 99.)

aldrei verða ágengar né valda skaða þar sem þær eru bundnar við tiltekin búsvæði, s.s. eins og glókollur í barrskógum. Meiri óvissa er hins vegar um ýmsar plöntur eða trjátegundir, skordýr og önnur dýr. Til eru fjölmörg dæmi um tegundir sem geta orðið ágengar, s.s. eins og minkurinn hér á landi, og valdið ómældum skaða, bæði á lífríki, eignum og ýmiskonar ræktun í landbúnaði[97,98]. Niðurstöður rannsókna benda til að loftslagsbreytingar geti haft veruleg áhrif á útbreiðslu aðfluttra plantna á Íslandi[99].

Tegundir sem flokkaðar hafa verið sem ágengar munu líklega hafa sterka tilhneigingu til að leggja undir sig ný svæði við hlýnun loftslags. Spár sýna að svæði með hentugu loftslagi fyrir alaskalúpínu muni stækka mjög mikið til 2050 sem getur stuðlað að landnámi tegundarinnar á stórum svæðum miðhálendisins[99], sjá myndir 8.22 og 8.23. Á sama hátt er því spáð að svæði með hentug loftslagsskilyrði fyrir skógarkerfil muni vaxa verulega, þótt í minna mæli verði. Það mun leiða til þess, að hann leggur undir sig ný svæði, sem hann nær ekki til við núverandi aðstæður[99]. Á það skal bent að þetta á líka við lífverur sem valda sjúkdómum, s.s. sníkjudýr og örverur. Nýleg yfirlitsgrein sýndi hvernig tíðni landnáms nýrra sníkjudýra á trjám og runnum hefur sveiflast með breytingum á ársmeðalhita síðustu 100 árin hér á landi[100].

Ágengar tegundir eru ekki síður vandamál í ferskvatni og í sjó. Um margar ágengar framandi tegundir í ferskvatni og sjó gildir það sama og á landi að þær hafa víða reynst illviðráðanlegar í vistkerfum erlendis[98,102] þó enn hafi ekki orðið stórslys hér á landi. Nú þegar er vitað um nokkrar tegundir, s.s. nýja tegund flatfisks, flundru, sem hefur gert sig heimakomna í árósasvæðum hérlendis og veiddist fyrst í Ölfusárósi 1999[103]. Upp úr 1990 urðu veiðimenn og bændur vitni að mikilli og skjótri útbreiðslu kísilþörungsins vatnaflóka (*Didymosphenia geminata*) í ám í Borgarfirði og skömmu síðar fannst tegundin einnig í miklum magni í ám á Suðvesturlandi[104]. Ljóst þótti að tegund þessi, sem ekki hafði áður fundist með vissu hér á landi, breiddist hratt út í einstökum ám og um landið allt. Þörungurinn sjálfur situr á stilkum sem mynda þétta hnoðra á botni áa. Snöggar breytingar á útbreiðslu þessarar tegundar eru þekktar í Kanada, á Nýja Sjálandi og í nyrstu

fylkjum Bandaríkjanna[104]. Vatnaplantan kransarfi (*Egeria densa)* sem er algeng í fiskabúrum, hefur fundist villt í allstórri volgri tjörn í Opnunum í Ölfusi og myndað breiður á stóru svæði í tjörninni[105]. Plantan er upprunalega frá Suður-Ameríku og gæti orðið ágeng við vissar aðstæður[106] og ekki ólíklegt að hún geti t.d. þrifist í vötnum eins og Elliðavatni og Vífilsstaðavatni og víðar. Jafnframt er vitað um ræktun á karpafiskinum, *Cyprinus carpio,* í tilbúnum tjörnum hér á landi[107] en tegundin þolir vel vetrarkulda og er talin ágeng víða um heim og líklega aðeins spurning hvenær fiskar sleppa í náttúruleg vatnakerfi.

Aukin skaðsemi af völdum framandi ágengra tegunda getur aukist með hlýnandi loftslagi. Það er því afar mikilvægt að fyllstu varúðar sé gætt við innflutning, notkun og dreifingu á framandi lífverum. Þetta á við hvort sem um er að ræða hættu á að skaða náttúrulegt lífríki landsins eða t.d. ýmsa ræktun. Það má heldur ekki horfa framhjá því að mótvægisaðgerðir vegna loftslagsbreytinga verða að vera í samræmi við verndun líffræðilegrar fjölbreytni.

Aðeins hefur verið drepið hér á nokkrar helstu

Tilvísanir

1 CAVM Team. 2003. Circumpolar Arctic Vegetation Map, scale 1:7,500,000. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No. 1. U.S. Fish and Wildlife Service, Anchorage, Alaska. Sjá einnig Walker, D. A., M. K. Raynolds, F. J. A. Daniels, E. Einarsson, A. Elvebakk, W. A. Gould, A. E. Katenin, S. S. Kholod, C. J. Markon, E. S. Melnikov, N. G. Moskalenko, S. S. Talbot, B. A. Yurtsev & CAVM Team. 2005. The Circumpolar Arctic Vegetation Map. Journal of Vegetation Science 16. 267-282.

2 Sjá nánar grein 4.2.

3 Snorri Baldursson, 2014. Lífríki Íslands – vistkerfi lands og sjávar, Bókaútgáfan Opna og Forlagið.

4 Raynolds, M., Borgþór Magnússon, Sigmar Metúsalemsson & Sigurður Magnússon 2015. Warming, Sheep and Volcanoes: Land Cover Changes in Iceland Evident in Satellite NDVI Trends. Remote Sensing 7(8). 9492-9506.

5 Henry, G. H. R. & Molau, U. 1997. Tundra plants and climate change: the International Tundra Experiment (ITEX). Global Change Biology, 3. 1-9.

6 Jónsdóttir, I. S., Magnússon, B., Gudmundsson, J., Elmarsdóttir, Á. & Hjartarson, H., 2005. Variable sensitivity of plant communities in Iceland to experimental warming. Global Change Biology, 11. 553-563.

7 Jónsdóttir, I. S., 2015. Hlýnandi loftslag: Háskóli Íslands. www.hi.is/hlynandi_loftslag.

8 Elmendorf, S. C., Henry, G. H., Hollister, R. D., Bjork, R. G., Bjorkman, A. D., Callaghan, T. V., Collier, L. S., Cooper, E.J., Cornelissen, J. H., Day, T. A., Fosaa, A. M., Gould, W. A., Gretarsdottir, J., Harte, J., Hermanutz, L., Hik, D. S., Hofgaard, A., Jarrad, F., Jonsdottir, I. S., Keuper, F., Klanderud, K., Klein, J. A., Koh, S., Kudo, G., Lang, S. I., Loewen, V., May, J. L., Mercado, J., Michelsen, A., Molau, U., Myers-Smith, I. H., Oberbauer, S. F., Pieper, S., Post, E., Rixen, C., Robinson, C. H., Schmidt, N. M., Shaver, G. R., Stenstrom, A., Tolvanen, A., Totland, O., Troxler, T., Wahren, C. H., Webber, P. J., Welker, J. M. & Wookey, P. A., 2012. Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time. Ecological Letters, 15. 164-175.

9 Elmendorf, S. C., ofl. 2012. Plot-scale evidence of tundra vegetation change and links to recent summer warming. Nature Climate Change, 2. 453-457.

10 Elmendorf, S. C., Henry, G. H. R., Hollister, R. D., Fosaa, A. M., Gould, W. A., Hermanutz, L., Hofgaard, A., Jónsdóttir, I. I., Jorgenson, J. C., Lévesque, E., Magnusson, B., Molau, U., Myers-Smith, I. H., Oberbauer, S. F., Rixen, C., Tweedie, C. E. & Walker, M., 2014. Experiment, monitoring, and gradient methods used to infer climate change effects on plant communities yield consistent patterns. Proceedings of the National Academy of Sciences.

11 Heimasíða þar sem verkefninu er lýst er aðgengileg á: www.refresh.ucl.ac.uk/eurolimpacs, sjá einnig www.ni.is/greinar/19-oktober-2016-gisli-mar-gislason-ahrif-loftslagshlynunar-a-vistkerfi-straumvatna.

12 Jeppesen, E., Moss, B., Bennion, H., Carvalho, L., DeMeester, L., Feuchtmayr, H., Friberg, N., Gessner, M.O., Hefting, M., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Hilmar J. Malmquist, May, L., Meerhoff, M., Jón S. Ólafsson, Soons, M.B. & Verhoeven, J.T.A. 2010. Chapter 6. Interaction of Climate Change and Eutrophication. pp. 119-151. Í Climate Change Impacts on Freshwater Ecosystems (ritstj. M. Kernan, R. W. Battarbee & B. Moss), Wiley-Blackwell, Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK. doi: 10.1002/9781444327397.ch6.

13 Gudmundsdottir, R, Olafsson, J.S., Palsson, S., Gislason, G.M. & Moss, B. 2011. How will increased temperature and nutrient enrichment affect primary producers in sub-Arctic streams? Freshwater Biology, 56. 2045-2058.

14 Hannesdóttir, E.R. Gíslason, G.M. & Ólafsson J.S. 2012. Life cycles of Eukiefferiella claripennis (Lundbeck 1898) and Eukiefferiella minor (Edwards 1929) (Diptera: Chironomidae) in spring-fed streams of different temperatures with reference to climate change. Proceedings of the 18th International Symposium on Chironomidae. Fauna norvegica 31. 35-46.

15 Woodward, Guy, Christensen, John B., Olafsson, Jon S., Gislason, Gisli M., Hannesdóttir, Elísabet R. & Friberg, Nikolai. 2010. Sentinel systems on the razor's edge: effects of warming on Arctic stream ecosystems. Global Change Biology 16. 1979–1991.

16 Elísabet Ragna Hannesdóttir, Gísli Már Gíslason, Jón S. Ólafsson, Ólafur Patrick Ólafsson & Eoin J. O'Gorman 2013. Increased stream productivity with warming supports higher trophic levels. Advances in Ecological Research 48. 285-342.

17 Eoin J. O'Gorman, Ólafur P. Ólafsson, Benoit O. L. Demars, Nikolai Friberg, Guðni Guðbergsson, Elísabet R. Hannesdóttir, Michelle C. Jackson, Liselotte S. Johansson, Órla B. McLaughlin, Jón S. Ólafsson, Guy Woodward & Gísli M. Gíslason 2016. Temperature effects on fish production across a natural thermal gradient. Global Change Biology 22. 3206-3220. doi: 10.1111/gbc.13233.

18 Friberg, N. Christensen, J.B., Olafsson, J.S., Gislason G.M., Larsen, S. & Lauridsen, T.L. 2009. Relationships between structure and function in streams contrasting in temperature. Freshwater Biology 54. 2051-2068.

19 Demars, B. O. L., Russell Manson, J., ÓLafsson, J. S., Gíslason, G. M., Gudmundsdóttir, R., Woodward, G. U. Y., Reiss, J., Pichler, D. E., Rasmussen, J. J. & Friberg, N., 2011. Temperature and the metabolic balance of streams. Freshwater Biology, 56. 1106-1121.

20 Gudmundsdottir, R., Gislason, G. M., Palsson, S., Olafsson, J. S., Schomacker, A., Friberg, N., Woodward, G., Hannesdottir, E. R. & Moss, B., 2011. Effects of temperature regime on primary producers in Icelandic geothermal streams. Aquatic Botany, 95. 278-286.

21 Welter, J. R., Benstead, J. P., Cross, W. F., Hood, J. M., Huryn, A. D., Johnson, P. W. & Williamson, T. J., 2015. Does N_2 fixation amplify the temperature dependence of ecosystem metabolism? *Ecology,* 96. 603-610.

22 Snorrason, S.S., Malmquist, J.J., Ingólfsdóttir, H.B., Ingimundardóttir, Þ. & Ólafsson, J.S. 2011. Effects of geothermal effluents on macrobenthic communities in a pristine sub-arctic lake. Inland Waters 1. 146–157 (DOI: 10.5268/IW-1.3.363).

23 Bjarni D. Sigurdsson, Leblans, N. I. W., Dauwe, S., Elín Guðmundsdóttir, Gundersen, P., Gunnhildur E. Gunnarsdóttir o.fl. 2016. Geothermal ecosystems as natural climate change experiments: the ForHot research site in Iceland as a case study. Icelandic Agricultural Sciences, 29. 53-71.

24 O'Gorman, E., Benstead, J. P., Cross, W. F., Friberg, N., Hood, J. M., Johnson, P. W., Sigurdsson, B. D. & Woodward, G., 2014. Climate change and geothermal ecosystems: natural laboratories, sentinel systems, and future refugia. Global Change Biology, 20. 3291–3299.
25 De Boeck, H. J., Vicca, S., Roy, J., Nijs, I., Milcu, A., Kreyling, J., Jentsch, A., Chabbi, A., Campioli, M., Callaghan, T., Beierkuhnlein, C. & Beier, C., 2015. Global change experiments: challenges and opportunities. Bioscience, 65. 922-931.
26 Guðmundsdóttir, E., Óskarsson, Ú. & Elmarsdóttir, Á. 2014. Áhrif af hlýnun jarðvegs á gróðurfar í skóglendi og graslendi á Reykjum, Ölfusi. Rit Mógilsár, 31. 73-80.
27 Poeplau, Christopher, Kätterer, Thomas, Leblans, Niki I. W., & Sigurdsson, Bjarni D. 2017. Sensitivity of soil carbon fractions and their specific stabilisation mechanisms to extreme soil warming in a subarctic grassland. Global Change Biology, onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.13491/epdf.
28 Maljanen, M., Yli-Moijala, H., Biasi, C., Leblans, N. I. W., De Boeck, H. J., Bjarnadóttir, B. & Sigurdsson, B. D., 2016. The emissions of N2O and CH4 from natural soil temperature gradients in a volcanic area in southwest Iceland. Soil Biology and Biochemistry 109. 70-80. doi: 10.1016/j.soilbio.2017.01.021.
29 Sjá V2008, tilvísun 3 í kafla 3.
30 Cook, A. C., Tissue, D. T., Roberts, S. W. & Oechel, W. C., 1998. Effects of long-term elevated [CO^2] from natural CO2 springs on Nardus stricta: photosynthesis, biochemistry, growth and phenology. Plant, Cell and Environment, 21. 417-425.
31 Bjarni D. Sigurdsson, Halldor Thorgeirsson & Linder, S. 2001. Growth and dry-matter partitioning of young Populus trichocarpa in response to CO2 concentration and mineral nutrient availability. Tree Physiology 21. 941-950.
32 Robertson, A. 1989. Tré og vindur. Ársrit Skógræktarfélags Íslands, 1989, 33-44.
33 Hér er byggt á niðurstöðum rannsóknarverkefnisins Land Cover Change in Iceland Evident in Satellite NDVI Trends. Í fjarkönnun er meðalgrænkustuðull NDVI (Nomalized Difference Vegetation Index) mikið notaður mælikvarði á gróðurfar, sjá nánar Martha Raynolds, Borgþór Magnússon, Sigmar Metúsalemsson og Sigurður H. Magnússon 2015. Land cover changes in Iceland evident in sattelite NDVI trends. Remote Sens. 2015, 7, 9492-9506.
34 Sigurður H. Magnússon, Borgþór Magnússon, Erling Ólafsson, Guðmundur Guðjónsson, Guðmundur A. Guðmundsson, Hörður Kristinsson, Kristbjörn Egilsson, Kristinn H. Skarphéðinsson, Starri Heiðmarsson og Jón Gunnar Ottósson. 2009. Vistgerðir á miðhálendi Íslands. Flokkun, lýsing og verndargildi. Reykjavík: Náttúrufræðistofnun Íslands. Sjá einnig Jón Gunnar Ottósson, Anna Sveinsdóttir og María Harðardóttir, (ritstj) 2016. Vistgerðir á Íslandi. Fjölrit Náttúrufræðistofnunar nr. 54. 299s.
35 Sjá grein 4.4.1 í V2008 (tilvísun 3 í kafla 3).
36 Borgþór Magnússon, Björn H. Barkarson, Bjarni E. Guðleifsson, Bjarni P. Maronsson, Starri Heiðmarsson, Guðmundur A. Guðmundsson, Sigurður H. Magnússon og Sigþrúður Jónsdóttir. 2006. Vöktun á ástandi og líffræðilegri fjölbreytni úthaga 2005. Rit Fræðaþings landbúnaðarins 2006. 221-232.
37 Borgþór Magnússon, Bændablaðið 28. apríl 2016 bls. 14 (www.bbl.is/files/pdf/bbl-8.-tbl.-2016-web.pdf) og www.ni.is/greinar/30-mars-2016-borgthor-magnusson-voktun-a-grodri-og-astandi-beitilands.
38 Borgþór Magnússon og Járngerður Grétarsdóttir, Hrafnaþing N.Í., 30. mars 2016
39 www.ni.is/frettir/2016/08/hlynandi-loftslag-eykur-tegundafjolda-plantna-a-vatnajokli.
40 Náttúrufræðistofnun Íslands, óbirt gögn.
41 Bjarni D. Sigurðsson og Borgþór Magnússon. 2005. Skógarsnípa: nýr íslenskur varpfugl finnst í furuskógi í Skorradal. Skógræktarritið 2005 (1). 14-17.
42 Daníel Bergmann. 2008. Landnám glókolls. Skógræktarritið, 2008(2).
43 Einar Ó. Þorleifsson og Jóhann Óli Hilmarsson. 2002. Íslenskir skógarfuglar. Skógræktarritið 2002(1), 67-76.
44 Jón Einar Jónsson, Smári J. Lúðvíksson & Michael D. Kaller. 2017, The early birds and the rest: do first nesters represent the entire colony? Polar Biol 2017 40. 413–421 DOI 10.1007/s00300-016-1969-z.
45 Nicola Saino, Roberto Ambrosini, Diego Rubolini, Jost von Hardenberg, Antonello Provenzale, Kathrin Hüppop, Ommo Hüppop, Aleksi Lehikoinen, Esa Lehikoinen, Kalle Rainio, Maria Romano & Leonid Sokolov. 2010. Climate warming, ecological mismatch at arrival and population decline in migratory birds, Proc. R. Soc. B 2011 278 801-809.
46 Gunnarsson, T.G. & Tomasson, G. 2011. Flexible spring arrival of migratory birds at northern latitudes under rapid temperature changes. Bird Study 58. 1-12.
47 Sjá stutta lýsingu á Norður-Atlantshafssveiflunni í hliðargrein 4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar.
48 Gill, J.A., Alves, J.A., Sutherland, W.J., Appleton, G.F., Potts, P.M. & Gunnarsson, T.G. 2014. Why is timing of bird migration advancing when individuals are not? Proceedings of the Royal Society of London B. 281, 20132161.
49 Tómas Grétar Gunnarsson, Lilja Jóhannesdóttir, José A. Alves, Böðvar Þórisson & Jennifer A. Gill. 2017. Effects of spring temperature and volcanic eruptions on wader productivity. IBIS. 159(2) 467–471.
50 Jón Einar Jónsson, Þórður Örn Kristjánsson, Árni Ásgeirsson & Tómas G. Gunnarsson. 2015. Breytingar á fjölda æðarhreiðra á Íslandi. Náttúrufræðingurinn. Náttúrufræðingurinn 85. 141–152.
51 A Leihikoinen, M Kilpi og M. Öst. 2006. Winter climate affects subsequent breeding success of common eiders, Global Change Biology 12(7) 1355-1365, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01162.x.
52 Jonsson, J.E., Gill, J.A., Gardarsson, A., Petersen, A. & Gunnarsson T.G. 2009. Weather effects on breeding parameters in a sub-arctic, capital breeding resident: long-term data from Iceland. Climate Research 38. 237-248.

53 Jonsson, J.E., Gardarsson, A., Gill, J.A., Petursdottir, U.K., Petersen, A. & Gunnarsson T.G. 2013. Relationships between long-term demography and weather in a sub-arctic population of common eider. PLOS One. DOI: 10.1371/journal.pone.0067093.
54 Gudjonsson, H., Jonsson, J.E., Stefansson, H.W., Snaethorsson, A.O. & Gunnarsson, T.G. 2015. Annual and large-scale variation in breeding output of Greylag geese (*Anser anser*) in Iceland. Bird Study. DOI:10.1080/00063657.2015.1034655.
55 Vigfusdottir, F., Gunnarsson, T.G. & Gill, J.A. 2013. Annual and between-colony variation in productivity of Arctic Terns in West Iceland. Bird Study 60. 289-297.
56 Pálsson S, Hersteinsson P, Unnsteinsdóttir ER & Nielsen ÓK. 2016. Population limitation in a non-cyclic arctic fox population in a changing climate. Oecologia. 180(4) 1147-1157. doi: 10.1007/s00442-015-3536-7.
57 R. Ims & E. Fuglei 2009. Trophic Interaction Cycles in Tundra Ecosystems and the Impact of Climate Change. Bioscience, 55(4) 311-322.
58 Hér er einkum átt við yfirborðshringstreymi í Norðvestur-Atlantshafi, sjá nánar umfjöllun í grein 27.1 auk umfjöllunar um Norður-Atlantshafssveiflunar (NAO) sem stuttlega er minnst á í hliðargrein 4C Hafhringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar.
59 P. Hersteinsson, Y. Yom-Tov & Geffen E. 2009. Effect of Sub-Polar Gyre, North Atlantic Oscillation and ambient temperature on size and abundance in the Icelandic Arctic fox. Global Change Biology. 15. 1423-1433. doi: 10.1111/j.1365-2486.01765.x.
60 E. R. Unnsteinsdottir, P. Hersteinsson, S. Pálsson & Angerbjörn A. 2016. The fall and rise of the Icelandic Arctic fox (Vulpes lagopus): a 50year demographic study on a noncyclic Arctic fox population. Oecologia, 181(4) 1129-1138.
61 R. Magnusdottir, M von Schmalensee, RA. Stefansson, DW. Macdonald & Hersteinsson P 2014. A foe in woe: American mink (Neovison vison) diet changes during a population decrease. Mammalian Biology, 79. 58–63.
62 Rannveig Magnúsdóttir 2013, American mink Neovison vison in Iceland: Diet by sex, habitat, season and years in the light of changing environment and population size, Faculty of Life and Environmental Sciences, University of Iceland.
63 E. Unnsteinsdóttir 2014. Íslenski refastofninn á niðurleið. Fréttatilkynning frá Náttúrufræðistofnun Íslands, 22. október 2014. Vefslóð: www.ni.is/sites/ni.is/files/atoms/files/Stofnmat-a-refum_oktober-2014.pdf.
64 Unnsteinsdottir, E. R. & Hersteinsson, P. 2009. Surviving north of the natural range: the importance of density independence in determining population size. Journal of Zoology, 277(3), 232-240.
65 S. Þórisson og R. Þórarinsdóttir 2014. Vetrartalning hrendýra 22. - .30. mars 2014. Skýrsla sótt á vef Náttúrustofu Austurlands: www.na.is/images/stories/utgefid/2013-2014/na-140144_vetrartalning_hreindyra.pdf.
66 S. Þórisson 1993. Hreindýr. Í P. Hersteinsson og G. Sigbjarnarson (ritstj.) Villt íslensk spendýr. Hið Íslenska Náttúrufræðifélag, Landvernd. Reykjavík 351 bls.
67 Náttúrufræðistofnun Íslands, óbirt gögn.
68 Björn Traustason. 2012. Flatarmál skógræktar á Íslandi. Ársrit Skógræktar ríkisins, 2011, 8-10.
69 Náttúrufræðistofnun Íslands, 2016. Úbreiðsla alaskalúpínu á Íslandi. 2016. www.ni.is/frettir/2016/10/nytt-kort-af-utbreidslu-alaskalupinu-a-islandi.
70 Halldórsson, Gudmundur, Sigurdsson, Bjarni D., Hrafnkelsdóttir, Brynja, Oddsdóttir, Edda S., Eggertsson, Ólafur & Ólafsson, Erling 2013. New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review. Icelandic Agricultural Sciences, 26, 69-84.
71 Vefur Náttúrufræðistofnunar Íslands: www.ni.is/dyr/poddur.
72 Guðmundur Halldórsson. 2011. Ný meindýr á trjágróðri. Garðyrkjuritið, 91, 112-114.
73 Kreiling, A.-K., Matthías Alfreðsson & Erling Ólafsson 2015. Sniglanárakki (*Phosphuga atrata* (L.)) finnst á Íslandi (*Coleoptera; Silphidae*). Náttúrufræðingurinn 85. 24-27.
74 Hrafnkelsdóttir, Brynja, Oddsdóttir, Edda S., Sverrisson, Halldór & Halldórsson, Guðmundur. 2012. Varnir gegn ertuyglu. Ársrit Skógræktar ríkisins, 2011, 13-15.
75 Náttúrufræðistofnun Íslands, sjá nánar www.ni.is/biota/animalia/arthropoda/hexapoda/insecta/lepidoptera/erebidae/skogbursti-orgyia-antiqua
76 Gray JS, Dautel H, Estrada-Peña A, Kahl O & Lindgren E. 2009. Effects of Climate Change on Ticks and Tick-Borne Diseases in Europe. Interdisciplinary Perspectives on Infectious Diseases. 593232. doi:10.1155/2009/593232.
77 Medlock JM, Hansford KM, Bormane A, Derdakova M, Estrada-Peña A, George JC, Golovljova I, Jaenson TG, Jensen JK, Jensen PM, Kazimirova M, Oteo JA, Papa A, Pfister K, Plantard O, Randolph SE, Rizzoli A, Santos-Silva MM, Sprong H, Vial L, Hendrickx G, Zeller H & Van Bortel W, 2013. Driving forces for changes in geographical distribution of Ixodes ricinus ticks in Europe. Parasites & Vectors. 6. 1. doi.org/10.1186/1756-3305-6-1.
78 Náttúrufræðistofnun Íslands og Fuglaathugunarstöð Suðausturlands, óbirt gögn.
79 Jeppesen, E., T. Mehner, I.J. Winfield, K. Kangur, J. Sarvala, D. Gerdeaux, M. Rask, H.J. Malmquist, K. Holmgren, P. Volta, S. Romo, R. Eckmann, A. Sandström, S. Blanco, A. Kangur, H.R. Stabo, M. Tarvainen, A.-M. Ventelä, M. Søndergaard, T.L. Lauridsen & M. Meerhoff. 2012. Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. Hydrobiologia 694. 1–39.
80 Moss B., Kosten S., Meerhoff M., Battarbee R.W., Jeppesen E., Mazzeo N., Havens K., Lacerot G., Liu Z., De Meester L. o.fl. 2011. Allied attack: climate change and eutrophication. Inland Waters. 1. 101–105.
81 Dokulil, M.T. 2016. Climate impacts on ecohydrological processes in aquatic systems. Ecohydrology & Hydrobiology 16 2016 66–70. dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2015.08.001.

82 Jonsson, B & Jonsson, N. 2011. Ecology of Atlantic salmon and Brown trout. Habitat as a template for life histories. Springer, Heidelberg, 708 bls.
83 Barouday, E. & Elliott, J.M. 1994. The critical thermal limits for juvenile Arctic charr *Salvelinus alpinus*. Jounal of Fish Biology 45. 1041-1053.
84 Skúlason, S., Snorrason, S.S. & Jónsson, B. 1999. Sympatric morphs, populationas and speciation in freshwater fish with emphasis on arctic charr. Í Evolution of Biological Diversity (ritstj. A.E. Magurran & R.B. May), bls. 70Ð92. Oxford University Press, Oxford. Sjá einnig Snorrason, S.S. & Skulason, S. 2004. Adaptive speciation in northern freshwater fish. Í Adaptive Speciation (ritstj. U. Dieckman, M. Doebeli, JA.J. Metz & D. Tautz), bls 210–228. Cambridge University Press, Cambridge.
85 Klemetsen, A. 2010. The charr problem revisited: exceptional phenotypic plasticity promotes ecological speciation in postglacial lakes. Freshwater Review 3. 49–74.
86 Elliott, J.M. & Elliott J.A. 2010. Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effecs of climate change. Jounal of Fish Biology 77. 1793-1817.
87 Klemetsen, A., Amundsen, P.-A, Dempson, J.B., Jonsson, B., Jonsson, N., O'Connel & Mortensen, E. 2003. Atlantic salmon *Salmo salar* L., Brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. Ecology of Fresghwater Fish. 12. 1-59.
88 Þórólfur Antonsson & Guðni Guðbergsson. 2006. Áhrif loftslagsbreytinga á fiskistofna í ferskvatni. Rit Fræðaþings landbúnaðarins 2006. 95-101.
89 Malmquist, H.J., Th. Antonsson, H.R. Ingvarsson, F. Ingimarsson & F. Árnason 2009. Salmonid fish and warming of shallow lake Ellidavatn in SW-Iceland. Verh. Internat. Veriein. Limnol. 30. 1127-1132.
90 Guðni Guðbergsson 2015. Lax- og silungsveiðin 2015. Veiðimálastofnun, VMST/1606. 38 bls.
91 veidimal.is/files/Skra_0074775.pdf (Þórólfur Antonsson o.fl. 2016).
92 veidimal.is/Files/Skra_0075486.pdf (Guðni Guðbergsson 2016).
93 Hilmar J. Malmquist, Finnur Ingimarsson, Haraldur Rafn Ingvason, Stefán Már Stefánsson & Þóra Hrafnsdóttir 2018. Hlýnun Þingvallavatns og hitaferlar í vatninu. Náttúrufræðingurinn 88, 1–4.
94 Hilmar J. Malmquist, Finnur Ingimarsson, Haraldur Rafn Ingvason, Stefán Már Stefánsson & Þóra Hrafnsdóttir 2012. Vöktun á lífríki og vatnsgæðum Þingvallavatns. Yfirlit yfir fimm fyrstu vöktunarárin 2007–2011 og samanburður við eldri gögn. Náttúrufræðistofa Kópavogs. Fjölrit nr. 3–2012. 67 bls.
95 Gunnar Steinn Jónsson 2016. Þingvallavatn - ákoma og afrennsli. Skýrsla tekin saman fyrir umhverfis- og auðlindaráðuneytið. Umhverfis- og auðlindaráðuneytið. ISBN 978-9935-9143-2-3.
96 Haraldur R. Ingvason, Finnur Ingimarsson, Stefán Már Stefánsson, Þóra Hrafnsdóttir og Kristín Harðardóttir 2017. Vöktun á lífríki og vatnsgæðum Þingvallavatns. Gagnaskýrsla fyrir árið 2016 ásamt viðbótargögnum fyrir árið 2015. Verkþáttur nr. 2: Lífríki og efna- og eðlisþættir í vatnsbol. Náttúrufræðistofa Kópavogs. Fjölrit nr. 2-2017.
97 Dean R. Paini, Andy W. Sheppard, David C. Cook, Paul J. De Barro, Susan P. Worner & Matthew B. Thomas 2016. Global threat to agriculture from invasive species. PNAS 113(27) 7575–7579 www.pnas.org/content/113/27/7575.full.pdf.
98 Sjá umfjöllun á vefsvæðinu www.nobanis.org.
99 Pawel Wasowicz, Ewa Maria Przedpelska-Wasowicz & Hörður Kristinsson 2013. Alien vascular plants in Iceland: Diversity, spatial patterns, temporal trends, and the impact of climate change. Flora 208. 648–673.
100 Gudmundur Halldórsson, Bjarni D. Sigurdsson, Brynja Hrafnkelsdóttir, Edda S. Oddsdóttir, Ólafur Eggertsson & Erling Ólafsson 2013. New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review. Icelandic Agricultural Sciences 26. 69-84.
101 www.ni.is/frettir/2016/10/nytt-kort-af-utbreidslu-alaskalupinu-a-islandi.
102 www.caff.is/invasive-species.
103 Gunnar Jónsson, Jónbjörn Pálsson & Magnús Jóhannsson. 2001. Ný fiskitegund, flundra, Platichthys flesus (Linnaeus, 1758), veiðist á Íslandsmiðum. Náttúrufræðingurinn 70. 83-89; Gudmundur Ingi Gudbrandsson og Bjarni Jónsson, 2004. Landnám, útbreiðsla og búsvæðaval nýrrar tegundar við Íslandsstrendur, ósalúru Platichthys flesus. Úrdráttur í ráðstefnuriti afmælisráðstefnu Líffræðifélags Íslands og Líffræðistofnunar HÍ, Reykjavík 19.-20. nóvember 2004.
104 Ingi Rúnar Jónsson, Gunnar Steinn Jónsson, Jón S. Ólafsson, Sigurður Már Einarsson og Þórólfur Antonsson 2010. The colonization of the invasive diatom Didymosphenia geminata in Icelandic rivers. Verh. Internat. Verein. Limnol. 30(9) 1340–1352.
105 www.floraislands.is/egeriden.html.
106 Global Invasive Species Database 2017 Species profile: Egeria densa. www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=289.
107 www.bondi.is/files/baendabladid/12.tbl.-20.juni_2013_small.pdf (sjá bls 30).

9 Ræktað land

Samantekt

1. Áhrif hlýnandi veðurfars á búsmala og á garðyrkju hafa lítið verið rannsökuð, en nýlegar rannsóknir hafa metið áhrif á úthaga, jarðrækt, skógrækt og landgræðslu.
2. Rannsóknir sýna að vaxtartími grasa færist fram um 16 daga fyrir hverja 1°C hækkun á meðalhita jarðvegs og lofts á vormánuðum.
3. Meðalgrænkustuðull (e. NDVI) alls Íslands hækkaði um 80% milli 1982 og 2010 og aukin gróska í úthaga hefur væntanlega aukið beitarþol landsins á mörgum svæðum á síðustu áratugum.
4. Í tilraunum um allt land á árunum 1987–2014 var kornuppskera 134% meiri á hvern hektara ræktarlands í hlýjustu árunum miðað við þau köldustu.
5. Margar nýjar rannsóknir sýna að bæði náttúrulegir skógar og ræktaðir vaxa nú umtalsvert betur en fyrir 1990.
6. Birkiskógar og birkikjarr landsins hefur aukist að flatarmáli um 9% á landsvísu með sjálfsáningu frá 1989, en slík aukning í skógarþekju á sér nú stað á skóglausum svæðum hringinn í kringum norðurskautið.
7. Tíðni landnáms nýrra meindýra í trjárækt á landinu hefur aukist mjög mikið eftir að hlýna tók upp úr 1990, en skemmdirnar eru litlar á landsvísu miðað við vaxtaraukningu skóga á sama tíma.
8. Lenging vaxtartíma og hlýnandi sumur munu þýða að uppskera af hverri einingu ræktarlands mun væntanlega halda áfram að aukast í hefðbundnum landbúnaði, garðykju og skógrækt.
9. Vetrarhlýindi og breytileiki í hitafari að vori munu halda áfram að takmarka hér ræktun fjölærra eða vetrareinærra fóðurjurta og skógartrjáa sem koma úr landrænna loftslagi nágrannalandanna.
10. Sumareinærar tegundir, svo sem bygg, hafrar og einær nepja, einær repja og sumarhveiti, munu hasla sér völl í jarðrækt hér á næstu áratugum.
11. Vegna mikils innri breytileika í veðurfari landsins munu kalár og búsifjar í jarðrækt, skógrækt og garðyrkju halda áfram að eiga sér stað á næstu áratugum.
12. Auknir þurrkar yfir vaxtartímann í framtíðinni vegna meiri breytileika í úrkomu munu hugsanlega geta orðið meira vandamál í ræktun hér en verið hefur.
13. Þó að uppgræðslustarf verði almennt auðveldara í hlýnandi veðurfari þá þarf umtalsverð inngrip og/eða langan tíma til að endurheimta hnignuð vistkerfi landsins.

9.1 Inngangur

Engum sem byggir afkomu sína á ræktun jarðargróða eða sem er áhugamaður um slíka landnýtingu dylst að miklar breytingar hafa orðið á ræktunarskilyrðum á Íslandi á síðustu árum og áratugum. Af þeim hnattrænu umhverfisbreytingum sem ganga nú yfir jörðina, þá eru það einkum veðurfarsbreytingar og síhækkandi styrkur CO_2 í andrúmslofti sem gætu hafa haft mælanleg áhrif á vaxtarskilyrði hér á landi. Í síðustu skýrslu vísindanefndar (V2008) var fjallað sérstaklega um rannsóknir á beinum áhrifum hækkandi styrks CO_2 í andrúmslofti á lífríkið hérlendis[1,2], en höfundum er

Mynd 9.1 Hefðbundið búsetulandslag. Horft í átt að Eyjafjallajökli árið 2002. (Ljósmynd: Bjarni D. Sigurðsson.)

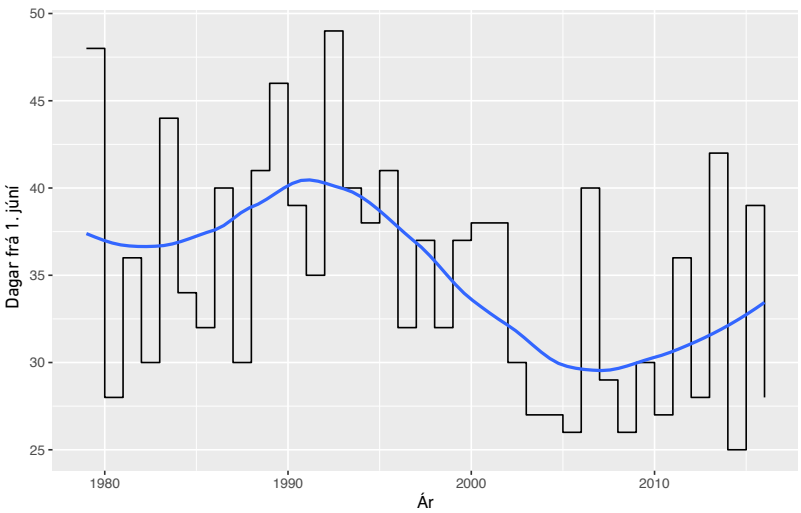
ekki kunnugt um að neinar nýjar rannsóknir hafi farið fram á því sviði hér frá útkomu síðustu skýrslu nefndarinnar[3] og því verður ekki fjallað frekar um þær. Innlendar rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á bæði ræktuð og náttúruleg landvistkerfi hafa verið mjög brotakenndar hingað til og því eru enn stór göt í þekkingu sem hamla getu til að gera traustar spár um áhrif á lífríkið í framtíðinni. Hér verður hins vegar reynt að taka saman niðurstöður helstu rannsókna sem liggja nú fyrir.

9.2 Landbúnaður

Hefðbundinn landbúnaður á Íslandi byggist nú aðallega á dýrahaldi, sumarbeit og ræktun vetrarfóðurs (mynd 9.1). Áhrif hlýnandi veðurfars á búsmala og dýrahald hérlendis hafa lítið sem ekkert verið rannsökuð[4], en áhrifin á jarðrækt hafa hins vegar talsvert verið skoðuð.

Rannsóknir sem fóru fram fyrir 1990 sýndu að uppskera í venjulegri túnrækt hérlendis jókst um 0.74 tonn þurrefnis fyrir hverja gráðu sem vor og vetrarhiti hækkaði þá[5]. Hlýnun sem færir upphaf sprettunnar fyrr fram á vorið (mynd 9.2) skiptir þarna mun meira máli en ef haustin lengjast, þar sem lenging vaxtartímans nýtist gróðrinum mun betur til ljóstillífunar og vaxtar á vorin þegar dagurinn er sem lengstur. Það sama gerist í úthaganum, hlýnun veldur því að vaxtartími grasa færist fram um 16 daga fyrir hverja 1°C hækkun á meðalhita jarðvegs og lofts á vormánuðum[6]. Hins vegar lengist vaxtartími graslendis ekki samsvarandi þó að það hlýni fram á haustið[6]. Hlýnun undanfarinna áratuga hefur örugglega átt sinn þátt í því að meðal-grænkustuðull (*e. NDVI*) alls Íslands hækkaði um 80% milli 1982 og 2010[7], þó að aðrir þættir, svo sem breytingar á beitarþunga, aukin skógrækt og landgræðsla og tíðni og stærð eldgosa hafi einnig haft þar áhrif. Þessar breytingar á grósku úthaga á Íslandi hafa væntanlega aukið meðalbeitarþol landsins á síðustu áratugum.

Hið hafræna veðurfar Íslands veldur því að það skiptast gjarnan á frost og þíðukaflar á vetrum á láglendi. Ef vetrarhitinn er samt sem áður nægilega lágur geta myndast svellalög á jafnsléttu sem geta valdið kalskemmdum á ræktarlandi[8]. Þetta var löngum sá umhverfisþáttur sem hafði einna mest áhrif á heyfeng bænda hérlendis. Hlýnandi veðurfar eftir síðustu aldamót minnkaði mjög þetta vandamál hérlendis, þar sem svell lágu að jafnaði ekki það lengi á túnum að það ylli teljandi skemmdum[8]. En breytilegra tíðarfar á árunum 2013–2015 vöktu aftur upp þennan draug og



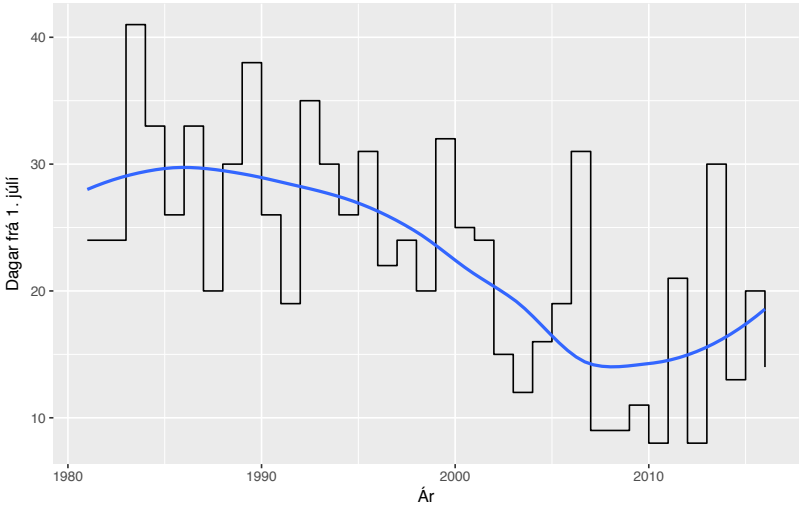
Mynd 9.2 Skriðtími (blómgunartími) vallarfoxgrass á tilraunastöð Landbúnaðarháskóla Íslands á Korpu í Reykjavík á árabilinu 1979–2016. Svarta línan sýnir einstök ár en blái ferillinn sýnir útjafnað meðaltal. Á lóðrétta ásnum eru sýndir dagar frá og með 1. júní. Dagur 35 = 5. júlí. (Gögn: Jónatan Hermannsson, Landbúnaðar háskóli Íslands.)

Mynd 9.3 Samanburðartilraun með mismunandi yrki af byggi (korni) á tilraunastöð Landbúnaðarháskóla Íslands á Korpu í Reykjavík (Ljósmynd: Guðni Þorvaldsson. 14. ágúst 2012.)

skemmdir á túnum bænda hafa orðið verulegar í sumum landshlutum með tilheyrandi kostnaði við endurrækt og fóðurkaup[9]. Þetta dæmi sýnir vel hvernig það er ekki meðalhiti sem skiptir alltaf mestu um ræktunaröryggi á fjölærum jurtum á Íslandi heldur fremur breytileiki veðurfars.

Þær breytingar í veðurfari sem spáð er að verði hér á þessari öld (sjá greinar 4.4.3–4.4.6), með lengingu vaxtartíma og hlýnandi sumrum munu þýða að uppskera af hverri einingu ræktarlands mun að jafnaði halda áfram að aukast í hefðbundnum landbúnaði. Spálíkan fyrir uppskeru vallarfoxgrass, sem er ein mikilvægasta grastegundin í fóðurrækt hérlendis, spáir t.d. 120% aukningu í uppskeru þess á árabilinu 2046–65 miðað við meðaltal áranna 1961–1990 í N-Noregi sem flokkast í dag sem sama ræktunarbelti og láglendi Íslands[10]. Sama líkan spáir 170% aukningu á uppskeru í lok aldarinnar[10]. Þó ber að hafa í huga að vegna mikils innri breytileika í veðurfari Íslands (sjá t.d. mynd 4.12) munu kalár samt geta orðið á næstu áratugum, eins og bændur hafa upplifað á síðustu árum. Jafnframt er hugsanlegt að nýir umhverfisþættir verði takmarkandi fyrir uppskeru túngrasa í veðurfari framtíðar og er þá fyrst að telja þurrka á vaxtartíma. En samkvæmt líklegum breytingum á árstíðasveiflu hita og úrkomu (sjá grein 4.4.6) virðist sem úrkoma muni síst aukast að vori og snemmsumars. Þetta getur hugsanlega haft neikvæð áhrif á uppskeru vallarfoxgrass og jarðrækt almennt í hlýrra loftslagi, einkum þegar ræktunin fer fram í sendnum jarðvegi og á þeim svæðum landsins þar sem ársúrkoma er minnst[11].

Ræktun annarra fóðurjurta en túngrasa hefur rutt sér rúms á síðustu þremur áratugum og hefur þar hlýnandi veðurfar skipt miklu máli, bæði lenging vaxtartímans



Mynd 9.4 Skriðtími byggyrkjanna Arve, Olsok, Filippa og Skeglu á tilraunastöð Landbúnaðarháskóla Íslands á Korpu í Reykjavík á árabilinu 1981–2016. Svarta línan sýnir einstök ár en blái ferillinn sýnir útjafnað meðaltal. Á Y-ás eru sýndir dagar frá og með 1. júlí. Dagur 35 = 4. ágúst. (Gögn: Jónatan Hermannsson, Landbúnaðar háskóli Íslands.)

og hækkandi sumarhiti[12]. Fyrsta er þar að telja kornræktina (byggrækt; mynd 9.3). Um 1200 gráðudaga (margfeldi meðalhita vaxtartíma og fjölda daga) þarf til að byggið nýtist til fóðurs, en fullum fræþroska nær það samt ekki fyrr en við 1300–1500 gráðudaga, eftir yrkjum[13]. Í síðustu skýrslu vísindanefndarinnar [3] kom fram að eldri rannsóknir bentu til að miðað við hitafar níunda og tíunda áratugarins hérlendis þá bætast um 0.97 tonn þurrefnis á hektara við kornuppskeruna fyrir hverja gráðu sem meðalhiti hækkar[13]. Í nýrri yfirlitsgrein[14] um bygg-ræktunartilraunir um allt land á árunum 1987–2014 er þetta staðfest. Þar kemur fram fram að meðaluppskera í korntilraunum hefur aukist línulega um 0.91 tonn þurrefnis á hektara með auknum meðalhita á vaxtartíma í Stykkishólmi, en hann sveiflaðist á milli 7.6 og 10.5 °C á þessu árabili. Spájafnan var vel marktæk og sýndi 134% aukningu í meðalkornuppskeru frá kaldasta til hlýjasta árs tímabilsins[14].

Umtalsverðar rannsóknir og þróunarvinna eru nú gerðar til að finna byggyrki sem betur eru aðlöguð að veðurfarsaðstæðum á Íslandi[15] og það, ásamt hlýnandi veðurfari eftir 1990 varð til þess að kornrækt á Íslandi jókst úr um 200 hekturum árið 1991 upp að jafnaði ríflega 4000 hektara árið 2008, eða um tuttugufalt[16].

Mynd 9.4 sýnir hvernig skrið (blómgun) fjögurra byggyrkja hefur færst fram á tilraunastöð Landbúnaðarháskóla Íslands á Korpu á árabilinu 1981–2016. Skriðið hefur að jafnaði færst fram um tvær vikur á þessu tímabili, en kaldari vetur og vor síðan 2012 hafa sýnilega strax haft áhrif á vaxtartímann.

Líkt og með túnræktina, mun kornuppskera og ræktunaröryggi almennt verða betra í framtíðinni ef veðurfarsspár ganga eftir. Þó gildir þar, eins og með túngrösin, að mikill árabreytileiki í veðurfari mun geta valdið þungum búsifjum í kornrækt hérlendis, a.m.k. fram yfir miðja öldina. Meiri breytileiki í úrkomu og auknir þurrkar yfir vaxtartímann í framtíðinni munu einnig geta orðið meira vandamál fyrir kornrækt, en þetta varð strax áberandi, t.d. í innsveitum á N- og NV-landi í hlýju árunum kringum 2010[17]. Þar hófu bændur að fjárfesta í vökvunarkerfum á kornakra sína til að auka ræktunaröryggi[11]. Þó ber að geta þess að slíkir vorþurrkar eru ekki nýtilkomið vandamál hérlendis, þeir hafa reglulega skotið upp kollinum og valdið bændum vandræðum á síðustu öld og öldum. Aðrir líffræðilegir þættir geta einnig orðið mikilvægir í breyttu veðurfari og auknu flatarmáli ræktarlands. Þannig hefur stóraukin ásókn gæsa og álfta í kornakra valdið bændum erfiðleikum, en ljóst er að fuglarnir hafa breytt atferli sínu og fæðuvenjum eftir að kornræktin jókst hér[18]. Þannig hófu t.d. gæsir og álftir að hafa vetursetu undir Eyjafjöllum á síðustu árum, en það er talið stafa af bæði hlýnandi veðurfari og að kornakrar bænda hafi tryggt þeim stöðugra fæðuframboð. Einnig er farið að bera meira á ýmsum sjúkdómum í kornræktinni sem eru vel þekktir úr hlýrra loftslagi í Skandinavíu, þannig að betri ræktunarskilyrðum getur einnig fylgt meiri kostnaður við ýmsar varnaraðgerðir[19]. Þetta eru dæmi um temprandi ferla sem oft einkenna svörun vistkerfa við umhverfisbreytingum, en sem sjaldan eru vel fyrir-sjáanlegir[20].

Ýmsar nýjar nytjategundir eru nú á mörkum þess að geta vaxið hérlendis. Vetrarhveiti hefur nú verið ræktað

Mynd 9.5 Of hlýir vetur geta valdið vandamálum í ræktun ýmissa vetrareinærra og fjölærra nytjaplantna. Miklar vetrar- og vorskemmdir á yrkjum fjölærs rýgresis urðu vorið 2006 í samanburðartilraun á Vågønes við Bodø í Noregi (67°N) af völdum sveppasýkingar sem er afleiðing vetrarhlýinda. Dökkgrænir reitir eru samanburðarreitir vaxnir hávingli. (Ljósmynd: Arild Larsen.)

í nokkurn tíma þar sem skilyrði eru hvað best til kornræktar hérlendis[21], en lítið vetrarþol þess gerir ræktun þess erfiða þegar brestur á með kaldari vetrum eins og voru hér 2014–2016. Veðurfar þarf því að hlýna talsvert áður en almennt verður hægt að rækta vetrarhveiti til þroska hér á landi (það þarf a.m.k. um 1600 gráðudaga til að ná sama þroska og bygg nær við um 1200 gráðudaga[13]). Einnig hafa bændur hafið ræktun á repju og nepju til fóður- og olíuframleiðslu[22], og jafnvel til framleiðslu íslenskrar matarolíu til manneldis[23]. Aðrar nytja- og fóðurjurtir, sem gætu haslað sér völl hér ef veðurfar heldur áfram að hlýna, eru til dæmis fjölært rýgresi, en ræktunarsvæði þess hefur verið að færast norðar í Skandinavíu[24]. Vandamálið við það er þó að það vex bæði lengi fram á haustið og hættir til að vakna of snemma úr vetrardvala að vori þar sem hafrænt loftslag er í Skandinavíu (mynd 9.5). Það þyrfti því væntanlega að vinna að kynbótum á þessari tegund eins og gert hefur verið í byggrækt á Íslandi[24], áður en fjölært rýgresi yrði mikilvægt hér nema á allra bestu ræktunarstöðum.

Vetrarhlýindi og breytileiki í veðurfari munu halda áfram að verða vandamál í loftslagi framtíðarinnar hér á landi og takmarka möguleikana að nýta hér fjölærar eða vetrareinærar fóður- og nytjajurtir sem ræktaðar eru í landrænna loftslagi nágrannalandanna. Því má búast við að það verði fremur sumareinærar tegundir, svo sem bygg, hafrar og einær nepja (þurfa >1400 gráðudaga), einær repja og sumarhveiti (þurfa >1600 gráðudaga) sem munu hasla sér völl hér á næstu áratugum ef veðurfar hlýnar í takt við sviðsmyndarreikninga (sjá grein 4.4.3). Þá yrðu einnig orðin skilyrði í lok aldarinnar fyrir sumareinæru tegundirnar sykurrófur (þarf >1800 gráðudaga) og fóðurmaís (þarf >2000 gráðudaga) á betri ræktunarsvæðum.

9.2.1 Garðyrkja

Augljósar breytingar hafa orðið í skilyrðum til garðræktar frá síðustu aldamótum en skortur er á vísindalegri úttekt á því sviði[25]. Þessar breytingar hafa einkum orðið hér á síðasta áratug eða eftir að það tók að hlýna verulega (sjá mynd 4.14).

Vorblómstrandi tegundir, svo sem ávaxtatré[26], ýmsir berjarunnar og lyngrósir, hafa notið góðs af lengingu

Mynd 9.6 Býflugnabændur að störfum að Reykjum í Ölfusi. (Ljósmynd: Bjarni D. Sigurðsson.)

vaxtartímans að vori, einkum á skjólbetri stöðum, en árabreytileiki í veðurfari hefur þó enn mikil áhrif á allar þessar tegundir. Samkvæmt yfirliti Guðríðar Helgadóttur[25] hafa ýmis meindýr og plöntusjúkdómar á garðagróðri einnig aukist við hlýnandi veðurfar. Einnig hefur hlýindunum fylgt meiri umhirðuþörf í skrúðgarðyrkju vegna þess að einært illgresi lifnar fyrr á vorin og vex lengur fram á haustið en áður og grasspretta er bæði meiri og stendur lengur en áður.

Tímasetning gróðursetningar fagmanna í garðyrkju hefur þannig breyst mikið. Áður var mest gróðursett að vori, en nú hefur gróðursetning færst að mestu aftur á haustið. Ástæðan er bæði að aukin þurrkatímabil snemmsumars hafa valdið vandamálum og einnig hin aukna illgresissamkeppni. Nú þarf einnig að endurnýja sumarblóm í skrautbeðum einu sinni til tvisvar yfir sumarið, vegna lengingar vaxtartímans, þar sem þau voru bara gróðursett einu sinni áður. Allt þetta hefur þýtt að vinnutímabil atvinnufólks í skrúðgarðyrkju á Íslandi hefur lengst í báða enda. Nú er vinnustöðvun í útivinnu einungis 1–3 mánuðir á veturna, í stað 3–4 mánaða áður. Þetta hefur styrkt rekstrargrunn fyrirtækja á þessu sviði.

Uppskerumagn og yrkjaval í matjurtaræktun utanhúss í atvinnuskyni hefur sveiflast mikið á síðustu áratugum hérlendis og ekki er hægt að fullyrða að breytingar á veðurfari hafi haft þar afgerandi áhrif, þó að eiginlegar rannsóknir skorti á því[25]. Ein ný matvælaframleiðslugrein hefur þó litið dagsins ljós eftir að það byrjaði að hlýna verulega, en það er býflugnaræktin (mynd 9.6). Býflugnarækt var reynd nokkrum sinnum hérlendis frá 1936, en búin lifðu aldrei af veturna[27]. Það tókst fyrst eftir innflutning býflugna 1998 og árið 2008 voru framleiðendur orðnir um 20 talsins, en eru nú komnir yfir 100. Hunangsframleiðslan er orðin töluverð og gengur vel í meðalárferði síðasta áratugar, en hún er samt viðkvæm fyrir köldum sumrum eins og t.d. árið 2015. Gera má ráð fyrir að bæði útiræktun matjurta og býflugnarækt eigi eftir að blómstra, en þó munu veðurfarssveiflur halda áfram að valda þessum greinum skráveifum a.m.k. fram yfir miðja öldina ef veðurfar hlýnar í takt við sviðsmyndarreikninga (sjá greinar 4.4.3–4.4.6). Ef hlýnunin veldur hins vegar nýjum líffræðilegum áhrifaþáttum, svo sem nýjum sjúkdómum, gæti það haft mikil og ófyrirséð áhrif á þennan geira[25].

9.3 Skógrækt og skóglendi

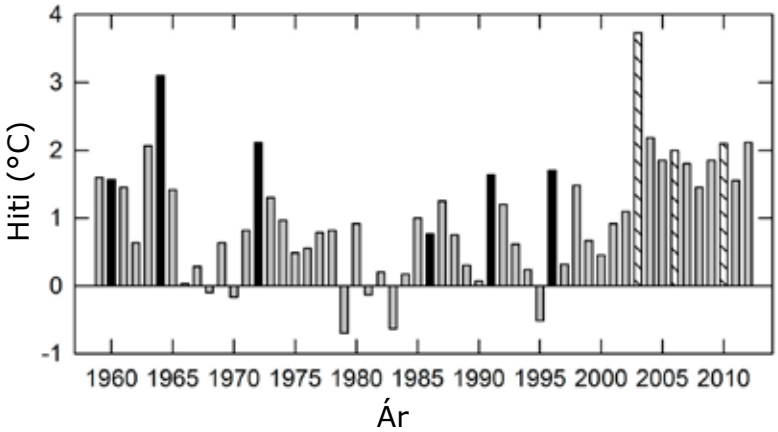
Bæði innlendar og innfluttar trjátegundir eru hér nálægt norðurmörkum útbreiðslu sinnar og svara því allar venjulega sterkt breytingum á hitafari[28] og lengingu vaxtartíma[29]. Á undanförnum árum, eftir að síðasta skýrsla vísindanefndar kom út, hafa komið fram margar nýjar vísbendingar um að náttúrulegir birkiskógar og kjarrlendi vaxi nú umtalsvert betur en fyrir 1990. Þar má nefna niðurstöður Christoph Wöll[30] sem í rannsóknum sínum á 11 stöðum á landinu fann að birkiskógar uxu nú um átta sinnum betur við 2 m trjáhæðarmörk en á sjöunda áratugnum og að skógarmörk birkis á Íslandi eru almennt að færast ofar. Íslenskur reyniviður er víða að verða meira áberandi í birkiskógum landsins (mynd 9.7) en vaxtarhraði hans hefur aukist mikið eftir að það hlýnaði, þó svo að aukin nýliðun stafi einnig af minni beitarþunga búfjár[31].

Nýlega var einnig sýnt fram á að birkiskógar landsins hafa aukið flatarmál sitt um 9% á landsvísu með sjálfsáningu frá 1989[32]. Flatarmálsaukning birkiskóganna er þó ekki jöfn í öllum landshlutum og í nýrri grein í Náttúrufræðingnum[33] fannst nær marktækt jákvætt samband milli flatarmálsaukningarinnar og hlýnunar sem hefur orðið í hverjum landshluta eftir 1990 (mynd 4.14). Samkvæmt sömu heimild[33] fannst einnig nær marktækt samband við breytingar á fjölda búfjár í sömu landshlutum eftir 1990. Líklegt er að hvort tveggja eigi sinn þátt í þessum breytingum hérlendis, en almennt er talið að beit búsmala ráði mestu um hraða nýliðunar birkiskóga víðast á landinu[34]. Áhugavert er þó að benda á að slík aukning á skógar- og kjarrþekju eftir 1990 er ekki einskorðuð við Ísland heldur kemur fram í gervihnattamælingum á svipuðum breiddargráðum allt í kringum norðurskautið[7]. Ólíklegt er að sveiflur í beitarþunga hafi haft afgerandi áhrif á öllu þessu svæði og það eitt og sér styður að breytingarnar hér séu einnig beintengdar hlýnuninni. Bætt vaxtarskilyrði hér nægja þó ekki birkinu ein og sér ef aðrir takmarkandi þættir koma í veg fyrir að sjálfsáning takist.

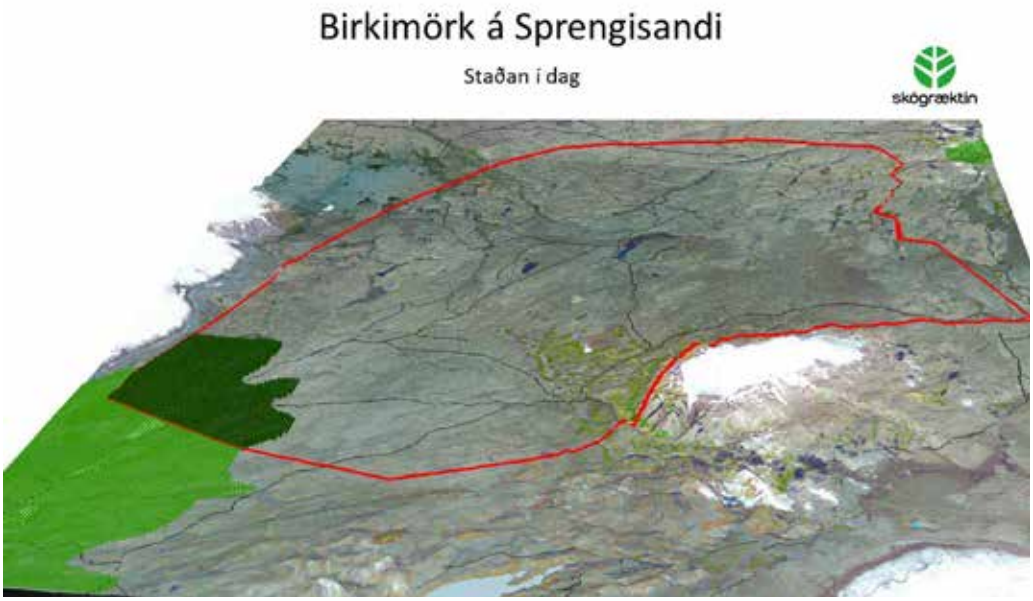
Hlýnunin eftir 1990 hefur almennt stórbætt ræktarskilyrði fyrir innfluttar trjátegundir eins og fjallað var um í síðustu skýrslu nefndarinnar[3]. Frekari rannsóknir á síðustu árum hafa staðfest þetta[35,36,37]. Aukinn vaxtarhraði ræktaðra skóga á sinn þátt í að kolefnisbinding þeirra hefur aukist mikið[35,38] og nýlega var sýnt fram á að hámarktæk kolefnisbinding verður einnig í jarðvegi skógræktarsvæða á þurrlendi hérlendis[38]. Það er einnig áhugavert að hraði kolefnisbindingar í jarðvegi minnkar á þeim árum sem veðurfar er hagstæðast til ofanjarðarvaxtar, en þá verður bindingin ofanjarðar því meiri[39].

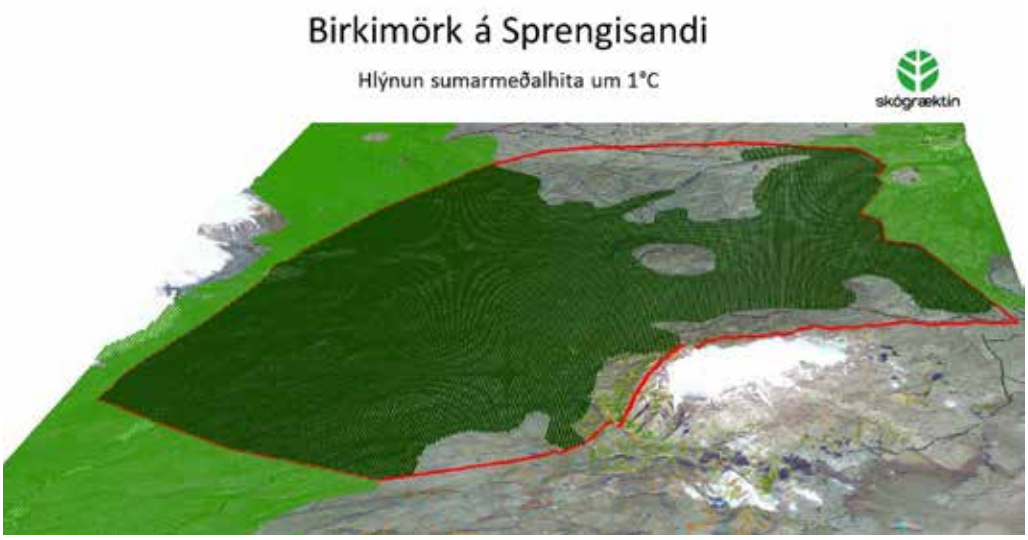
Mynd 9.7 Íslenskur reyniviður er að verða áberandi í birkiskógum landsins. Hér sést reyniviður vaxa upp úr birkiskógi í Norðdal í Trostansfirði. (Ljósmynd: Bjarni D. Sigurðsson.)

Þó hafa hlýnandi vetur í för með sér vandamál fyrir ákveðnar trjátegundir hérlendis, svo sem síberíulerki, vegna aukinnar hættu á að þær vakni ótímabært af vetrardvala. Þetta hefur meðal annars leitt til að hér hefur verið búið til nýtt yrki af lerki sem er komið í framleiðslu hérlendis og er betur aðlagað aðstæðum[40]. Ýmsir skaðvaldar sem leggjast á skóga og kjarrlendi hafa einnig orðið meira áberandi á undanförnum árum og jafnvel aukið skaðsemi með breytingum á lífsferli sínum, eins og t.d. sitkalús sem eftir árið 2000 hefur ítrekað myndað bæði vor og haustfaraldur (mynd 9.8). Nýlega kom út yfirlitsgrein[41] um þetta efni og byggðist hún m.a. á vöktun á skordýraskemmdum í skógum landsins allt frá árinu 1907 til dagsins í dag. Helstu niðurstöður voru að tíðni landnáms nýrra meindýra í trjárækt í landinu hefur aukist mjög mikið eftir að hlýna



Mynd 9.8 Myndin sýnir vetrarhita (°C) í Reykjavík. Svartar súlur sýna þau ár þegar haustfaraldur geisaði og súlur með skálínur sýna ár þegar vorfaraldur geisaði. (Mynd fengin frá heimild 41 með leyfi ritstjóra.)





Mynd 9.9 Núverandi loftslagsmörk birkis á Sprengisandi (rauð lína) miðað við árið 2008 og hvernig aukning meðalhita vaxtartímans(sumar hita) myndi breyta þeim. Dökkir og ljósgrænir litir sýna svæði þar sem birki getur vaxið. Greining og myndir: Björn Traustason, Rannsóknastöð Skógræktarinnar, Mógilsá.

Mynd 9.10 Aska úr eldgosinu í Eyjafjallajökli. (Ljósmynd: Bjarni D. Sigurðsson.)

tók upp úr 1990, en hún er samt sem áður svipuð núna og hún var á hlýju árunum fyrir 1960. Einnig fannst marktækt samband milli skemmda á birkiskógum á Austurlandi og meðalárshita, en í birkiskógum Norður -Skandinavíu hafa skordýrafaraldrar náð meiri útbreiðslu og verið tíðari eftir að hlýna tók verulega þar[42]. Það var samt niðurstaða höfunda yfirlitsgreinarinnar að þrátt fyrir að staðbundnar skemmdir á bæði náttúrulegum- og ræktuðum skógum hefðu aukist með hlýnandi veðurfari þá vegi jákvæð áhrif á vöxt skóga væntanlega mun þyngra á landsvísu lengi enn[41].

Hvað gerist þá ef veðurfar hlýnar í takt við sviðsmyndarreikninga? Vegna þess hversu nærri Ísland er norðurmörkum allra trjátegunda sem hér vaxa munu bæði náttúrulegir og ræktaðir skógar og kjarrlendi halda áfram að svara hlýnuninni jákvætt út öldina. Þar sem stór hluti Íslands er háslétta sem víða er í 500–700 m h.y.s. þá mun frekari hlýnun geta stækkað mögulegt útbreiðslusvæði birkiskóga og kjarrlendis umtalsvert þegar hún lyftir loftslagsmörkunum yfir þau hæðarmörk (mynd 9.9). Miðað við niðurstöður kafla 4 gæti þetta gerst á seinni hluta þessarar aldar[43], en þó ber að leggja áherslu á að loftslagsmörkin gefa bara mestu mögulegu útbreiðslu gróðurlendis. Ýmsir aðrir þættir, ekki síst beitarþungi búsmala, fjarlægð í næstu fræuppsprettu og næringarefni í jarðvegi, þurfa einnig að vera hagfelldir svo að slíkar gróðurfarsbreytingar verði. Einnig opnast þá fyrir ræktun nýrra suðlægari trjátegunda á láglendi, svo sem á hlyn, aski, eik, beyki og álmi, sem núna þrífast einungis á skjólgóðum svæðum.

9.4 Landgræðsla

Gervihnattamælingar á hámarks árlegum grænkustuðli (NDVI) landsins sýna að gróður hefur verið að styrkjast á landsvísu eftir 1993[7], sem þýðir að meira hefur gróið upp og gróður á grónu landi hefur þést meira en sem nemur árlegri gróðureyðingu. Þetta er mjög líklega viðsnúningur frá löngu tímabili nettógróðureyðingar hérlendis, en þar sem slíkar gervihnattamælingar hófust ekki fyrr en 1982 skortir traustar, magnbundnar upplýsingar um það. Þetta þýðir þó ekki að gróður- og jarðvegseyðing séu ekki enn mikið vandamál á ákveðnum stöðum hérlendis, þó að ástandið hafi batnað á landsvísu. Enn flokkast um þriðjungur landsins með umtalsverða eða mikla jarðvegseyðingu og því mikil þörf á uppgræðslu- og endurheimtaraðgerðum[44]. Þó að landgræðslustarf hafi orðið auðveldara með hlýnandi veðurfari á síðustu áratugum, getur þurft umtalsverð inngrip og/eða langan tíma til að endurheimta vistkerfi landsins þar sem þau hafa raskast[45]. Aukinn lofthiti í framtíðinni mun væntanlega auðvelda uppgræðslu landsins og gera kleift að nota til þeirra aðgerða fleiri plöntutegundir en nú eru notaðar[46]. Náttúruhamfarir, svo sem stór öskugos og jökulhlaup, munu þó eftir sem áður geta haft mikil áhrif á gróðurfar landsins (mynd 9.10), svo og sú landnýting sem stunduð er á viðkvæmum stöðum. Verkefnum á sviði landgræðslu mun því seint ljúka.

Tilvísanir

1 Cook, *A.* C., Tissue, D.T., Roberts, S.W. & Oechel, W.C. 1998. Effects of long-term elevated [CO_2] from natural CO_2 springs on *Nardus stricta*: photosynthesis, biochemistry, growth and phenology. Plant, Cell *and Environment 21. 417-425.*

2 Bjarni D. Sigurdsson, Halldor Thorgeirsson & Linder, S. 2001. Growth and dry-matter partitioning of young *Populus trichocarpa* in response to CO_2 concentration and mineral nutrient availability. Tree Physiology 21. 941-950.

3 Sjá V2008, tilvísun 3 í kafla 3.

4 Emma Eyþórsdóttir, dósent við Landbúnaðarháskóla Íslands, í erindi fyrir nefndina 25.02. 2016.

5 Hólmgeir Björnsson & Áslaug Helgadóttir 1988. The effects of temperature variations on agriculture in Iceland. Section 3: The effects on grass yield, and their implications for dairy farming. Bls. 445-474 í The Impact of Climatic Variations on Agriculture. Vol. 1 Assessments in Cool Temperature and Cold Regions (ritstj. Parry, M.L., Carter T.R. & Konijn, N.T.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

6 Leblans, Niki I.W. 2016. Natural gradients in temperature and nitrogen: Iceland represents a unique environment to clarify longterm global change effects on carbon dynamics. (Doktorsritgerð) Joint P.hD. thesis between Agricultural University of Iceland and University of Antwerp, Reykjavik, Iceland. 229 bls.

7 Raynolds, M., Borgþór Magnússon, Sigmar Metúsalemsson & Sigurður Magnússon 2015. Warming, Sheep and Volcanoes: Land Cover Changes in Iceland Evident in Satellite NDVI Trends. Remote Sensing 7(8). 9492-9506.

8 Bjarni E. Gudleifsson 2009. Ice encasement damage on grass crops and alpine plants in Iceland – Impacts of climate change. Bls. 163-172 í Plant Cold Hardiness: From the Laboratory to the Field (ritstj. Gusta, L., Wisniewski, M. & Tanino, K). CAB International, Wallingford, U.K.

9 Freyr Rögnvaldsson 2014. Mikið tjón vegna kals í Skagafirði. Bændablaðið, 19. júní 2014.

10 Persson, T. & Høglind, M. 2014 . Impact of climate change on harvest security and biomass yield of two timothy ley harvesting systems in Norway. Journal of Agricultural Science 152. 205-216.

11 Elvar Örn Birgisson 2014. Vökvun túna í mýri og mel. (BS ritgerð), Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri. 32 bls.

12 Bjarni E. Guðleifsson 2004. Áhrif væntanlegra loftslagsbreytinga á landbúnað á Íslandi. Rit Fræðaþings landbúnaðarins 2004, bls. 17-25.

13 Haraldur Ólafsson, Áslaug Helgadóttir, Aðalsteinn Sigurgeirsson, Jónatan Hermannsson & Ólafur Rögnvaldsson 2007. Líkleg þróun veðurfars á Íslandi með tilliti til ræktunar. Rit Fræðaþings landbúnaðarins 4, bls. 29-36.

14 Hrannar Smári Hilmarsson, Magnus Göransson, Lillemo, M., Þórdís Anna Kristjánsdóttir, Jónatan Hermannsson & Jón Hallsteinn Hallsson. 2017. An overview of barley breeding and variety trials in Iceland in the years 1987-2014. Icelandic Agricultural Sciences 30, 13-28.

15 Solberg, S. Ø., Diederichsen, A., Áslaug Helgadóttir, Sigríður Dalmannsdóttir, Djurhuus, R., Frederiksen & A, Yndgaard, F. 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 (ritstj. Bari, A., Damania, A. B., Mackay, M. & Dayanandan S.). CRC Press. Boca Raton, U.S.A. Bls. 13–2.

16 Sjávarútvegs- og landbúnaðarráðuneytið 2011. Tillögur starfshóps um eflingu kornræktar á Íslandi. Reykjavík. 16. bls.

17 Sjá t.d. umræðu í Mörg er búmanns raunin. (Einar Sveinbjörnsson 2012, esv.blog.is/blog/esv/entry/1245655)

18 Sigurlaug Jónína Ólöf Þorsteinsdóttir 2016. Tjón af völdum ágangs álfta og gæsa á ræktað land. B.S. ritgerð, Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri. 26 bls.

19 Þórarinn Leifsson 2015. Kornrækt og jarðvinnsla. Fræðsluhornið. Bændablaðið, 14. apríl 2015.

20 Chapin III, F. S., Matson, P.A. & Mooney, H.A. 2002. Principles of terrestrial ecosystem ecology. Springer. New York, Berlin, London.

21 Freyr Rögnvaldsson 2008. Kornrækt. Vel hægt að rækta hveiti. Morgunblaðið, 24 apríl 2008.

22 Þóroddur Sveinsson & Jónatan Hermannsson 2009. Ræktun repju og nepju til olíuframleiðslu og uppgræðslu. Rit LbhÍ 24. 30 bls.

23 Sjá t.d. umfjöllun í „Matarolía af ökrum íslenskra bænda“. Vísir.is. 25. maí 2012. (www.visir.is/matarolia-af-okrum-islenskra-baenda/article/2012120529255.)

24 Barua, SK., Berg, P., Bruvoll, A., Cederberg, C., Drinkwater, K.F., Eide, A., Emma Eythorsdottir, Sigurður Guðjónsson, Leo A. Gudmundsson, Gundersen, P., Hoel, A.H., Jarp, J., Jørgensen, R.B., Kantanen, J., Kettunen-Præbel, A., Løvendahl, P., Meuwissen, T., Olesen, J.E., Portin, A.R., Odd, A., Stiansen, J.E., Strandberg, E. & Aamaas, B. 2014. Climate change and primary industries: Impacts, adaptation and mitigation in the Nordic countries. Nordic Council of Ministers. TemaNord 2014:552. 199 bls.

25 Guðríður Helgadóttir, forstöðumaður Garðyrkjuskólans, í erindi fyrir nefndina 25.02. 2016.

26 Hraundís Guðmundsdóttir 2013. Ræktun ávaxtatrjáa á Íslandi. (B.S. ritgerð), Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri. 40 bls.

27 Sjá umfjöllun á vefsíðu býflugnaræktarfélagsins. www.byflugur.is

28 Gerður Guðmundsdóttir & Bjarni D. Sigurdsson 2005. Photosynthetic temperature response of mountain birch (*Betula pubescens* Ehrh.) in comparison with three other broadleaved tree species in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences 18. 43-51.

29 Bjarni D. Sigurdsson 2001. Environmental control of carbon uptake and growth in a *Populus trichocarpa* plantation in Iceland. Acta Univ. Agricult. Suec., Silvestria 174. 64 bls.

30 Wöll, C. 2008. Treeline of mountain birch (*Betula pubescens* Ehrh.) in Iceland and its relationship to temperature. (M.Sc. thesis), Technical University Dresden, Tharandt, Germany. 133 bls.

31 Sighvatur Jón Þórarinsson & Ólafur Eggertsson 2012. Vistfræði reyniviðar (*Sorbus aucuparia* L.) í Trostansfirði – aldur, vaxtarhraði og þéttleiki. Skógræktarritið 2012(1) 47–54.

32 Traustason, Björn, Snorrason, Arnór & Kjartansson, Bjarki Þór. 2015. Endurkortlagning náttúrulegra birkiskóga og birkikjarrs á Íslandi. Ársrit Skógræktar ríkisins, 2014, 14-15.
33 Arnór Snorrason, Björn Traustason, Bjarki Þór Kjartansson, Lárus Heiðarsson, Rúnar Ísleifsson & Ólafur Eggertsson 2016. Náttúrulegt birki á Íslandi - Ný úttekt á útbreiðslu þess og ástandi. Náttúrufræðingurinn 86(3-4). 97-111. Sambandið er $f = 40.5 \times T + 4.1$, þar sem f er flatarmálsaukning landshlutans í km^2, T er hlýnunin á skógarsvæðum í °C.
34 Friðþór Sófus Sigurmundsson, Höskuldur Þorbjarnarson, Guðrún Gísladóttir & Hreinn Óskarsson 2012. Breytingar á útbreiðslu og þéttleika birkiskóglendis á jörðum í nágrenni Heklu 1987–2012. Landabréfið, 26. 27-39.
35 Wöll, C, Birna Sigrún Hallsdóttir, Jón Guðmundsson, Arnór Snorrason, Jóhann Þórsson, Páll Valdimar Jónsson Kolka, Kristján Andrésson & Stefán Einarsson 2014. National Inventory Report 2014. Emissions of greenhouse gases in Iceland from 1990 to 2012. Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Umhverfisstofnun. Reykjavík.
36 Lárus Heiðarsson, Benjamín Örn Davíðsson & Arnór Snorrason 2015. Viðarmagnsspá fyrir bændaskógrækt á Fljótsdalshéraði. Við skógareigendur 9(1). 4-5.
37 Benjamín Örn Davíðsson & Lárus Heiðarsson 2013. Áætlun á núverandi og framtíðar viðarmagni lerkis (*Larix sukeczevii*) og stafafuru (*Pinus contorta*) á hluta starfssvæðis Norðurlandsskóga í Eyjafirði. Ársrit Skógræktar ríkisins *2012*. 22-24.
38 Bárcena, T.G., Kiær, L.P., Vesterdal, L., Helena Marta Stefánsdóttir, Gundersen, P. & Bjarni D. Sigurdsson 2014. Soil carbon stock change following afforestation in Northern Europe: a meta-analysis. Global Change Biology 20. 2393-2405.
39 Brynhildur Bjarnadóttir 2009. Carbon stocks and fluxes in a young Siberian larch (*Larix sibirica*) plantation in Iceland. (Ph.D. ritgerð). Meddelanden från Lunds Universitets Geografiska Institution. Avhandlingar 182, Lund University, Lund, Sweden. 62 bls.
40 Bergþóra Jónsdóttir 2015. Hrymur á Hrútsstöðum: Samanburðar- og framleiðslutilraun með nýtt íslenskt lerki. (B.S. ritgerð), Landbúnaðarháskóli Íslands, Hvanneyri. 62 bls.
41 Gudmundur Halldórsson, Bjarni D. Sigurdsson, Brynja Hrafnkelsdóttir, Edda S. Oddsdóttir, Ólafur Eggertsson & Erling Ólafsson 2013. New arthropod herbivores on trees and shrubs in Iceland and changes in pest dynamics: A review. Icelandic Agricultural Sciences 26. 69-84.
42 Jepsen, J.U., Kapari, L., Hagen, S.B., Schott, T., Vindstad, O.P.L., Nilssen, A.C. & Ims, R.A. 2011. Rapid northwards expansion of a forest insect pest attributed to spring phenology matching with sub-Arctic birch. Global Change Biology 17(6) 2071-2083.
43 Björn Traustason, Þorbergur Hjalti Jónsson & Bjarki Þór Kjartansson 2014. Geta tré vaxið á Sprengisandi? Ársrit Skógræktar ríkisins *2013*. 16-20.
44 Ólafur Arnalds 2015. The Soils of Iceland. Springer. Heidelberg, New York, London. 183 bls.
45 Ása L. Aradóttir & Guðmundur Halldórsson (ritstj.) 2011. Vistheimt á Íslandi. Landbúnaðarháskóli Íslands og Landgræðsla ríkisins. 172 bls.
46 Árni Bragason landgræðslustjóri ræðir við Bændablaðið um framtíð uppgræðslu í landinu: Aukinn lofthiti mun hafa gríðarleg áhrif á uppgræðslu landsins. Bændablaðið, 3. nóvember 2016.

10 Aðlögun í alþjóðlegu samhengi og framkvæmd

Samantekt

1. Ekki verður umflúið að aðlagast loftslagsbreytingum.
2. Innan alþjóðasamfélagsins er mikið fjallað um aðlögun og gerð er mælst til að aðilar að Parísarsamkomulaginu standi skil á áætlunum hvað varðar hana.
3. Í nágrannalöndum er lögð áhersla á að aðlögun skuli byggð á haldbærum rannsóknum og þekkingaröflun.
4. Í nágrannalöndum hafa verið unnar áætlanir um aðlögun að loftslagsbreytingum fyrir ólíka geira samfélagsins og þar mótuð stefna um viðbrögð við helstu ógnum sem loftslagsbreytingum fylgja.
5. Áhættustýring er algeng nálgun við stefnumótun og framkvæmd aðlögunar.
6. Algengt er að lögð sé áhersla á vistvænar lausnir.
7. Loftslagsbreytingar munu hafa áhrif á hversu vel gengur að uppfylla *Heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna um sjálfbæra þróun*.
8. Á Íslandi hefur ekki verið unnin heilstæð stefnumótun um aðlögun að loftslagsbreytingum, en einstaka fyrirtæki og sveitarfélög hafa mótað sér stefnu.
9. Oft eru veruleg samlegðaráhrif milli aðlögunar annars vegar og mótvægisaðgerða hins vegar.

Aðgerðir til að bregðast við loftslagsbreytingum felast annars vegar í *mótvægisaðgerðum* sem eiga að draga úr nettólosun gróðurhúsalofttegunda og hins vegar í *aðlögun* sem felur í sér viðbrögð við afleiðingum loftslagsbreytinga. Þar til nýlega var yfirleitt fjallað um mótvægisaðgerðir og aðlögun sem aðskilin viðbrögð við loftslagsbreytingum en í tveimur síðustu úttektarskýrslum IPCC um aðlögun[1] er lögð áhersla á að stefnumörkun og aðgerðir til að bregðast við loftslagsbreytingum séu settar fram heildstætt. Þetta þýðir m.a. að ekki sé ráðist í mótvægisaðgerðir sem dragi úr aðlögunarhæfni samfélaga og eins skuli forðast að aðlögun fylgi aukin losun gróðurhúsalofttegnda[2].

Í þessum kafla verður farið yfir hvernig fjallað er um aðlögun í þeim alþjóðasamningum sem Ísland er aðili að, og tekin dæmi um það hvernig tekist er á við aðlögun í nágrannalöndum okkar og hér á landi. Að lokum er stuttlega fjallað um samspil aðlögunar við aðra stefnumörkun.

10.1 Alþjóðlegt samhengi aðlögunar

Í Rammasamningi Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (UNFCCC) frá 1992 var strax lögð áhersla á aðlögun, þrátt fyrir að upphaflega hafi meiri áhersla verið lögð á mótvægisaðgerðir til að draga úr losun gróðurhúsaloftegunda[3]. Þessi áherslumunur tók að breytast þegar þriðja matsskýrsla milliríkjanefndar Sþ (IPCC) kom út árið 2001 en þar var lögð mikil áhersla á mikilvægi aðlögunar. Nú er mælst til að aðilar UNFCCC setji fram, innleiði og endurnýi aðgerðir til aðlögunar og vinni saman að aðlögun. Árið 2005 var fimm ára Nairobi-áætlunin um afleiðingar, tjónnæmi og aðlögun að loftslagsbreytingum samþykkt, en hún var sett fram til að aðstoða alla aðila samningsins, en þó sérstaklega minna þróuð lönd til að vinna að aðlögun[2]. Í Cancun-samningunum frá 2010 var settur fram hinn

svokallaði Cancun-rammi aðlögunar þar sem aðilar samningsins skuldbundu sig að leggja jafna áherslu á aðlögun og mótvægisaðgerðir[4]. Markmið Cancun-rammans var að auka áherslu á aðlögun til að auka viðnámsþrótt síður þróaðra ríkja gagnvart loftslagsbreytingum.

Aðlögun var gert nokkuð hátt undir höfði í *Parísarsamkomulaginu*[5] með það að markmiði að auka getu til aðlögunar, auka viðnámsþrótt og draga úr berskjöldun gagnvart afleiðingum loftslagsbreytinga. Til þess að ná þessu markmiði kallar samkomulagið meðal annars eftir að aðilar setji fram áætlanir um aðlögun og standi skil á þeim til skrifstofu UNFCCC. Áætlun skal byggja á mati á áhrifum loftslagsbreytinga og viðbragðsgetu. Í stefnumótun skal forgangsraða þeim aðgerðum sem grípa má til í tengslum við aðlögun og aukinn viðnámsþrótt gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga. Í skýrslu til skrifstofu samningsins skal gerð grein fyrir niðurstöðum, forgangsröðun aðgerða og nauðsyn á aðstoð sé hennar þörf.

Að auki er í samkomulaginu hvatt til að svæðisbundnar jafn sem alþjóðlegar fjármálastofnanir geri grein fyrir því hvernig þær hyggjast styðja við aðlögun og einnig eru þróuð lönd hvött til þess að auka það fjármagn sem ætlað er til aðlögunar í minna þróuðum löndum. Þá er aðlögun undir UNFCCC samhæfð af sérstakri nefnd[3].

Eins og áður sagði felur aðlögun í sér viðbrögð við afleiðingum loftslagsbreytinga. Þessi viðbrögð geta miðast við að draga úr skaðlegum áhrifum þeirra eða, sé þess kostur, í að nýta þau tækifæri sem breytingarnar hafa í för með sér. Aðlögun felur því í sér **stefnumótun og aðgerðir** sem auka hæfi samfélaga til að takast á við bæði neikvæð og jákvæð áhrif loftslagsbreytinga.

Milliríkjanefndin (IPCC) skilgreinir aðlögun á eftirfarandi hátt: *„Breytingar á náttúrulegum eða manngerðum kerfum sem andsvar við raunverulegum eða líklegum áhrifum loftslagsbreytinga, sem draga úr skaða eða nýta jákvæð tækifæri*[6]. Aðeins ítarlegri skilgreiningu má finna í UNFCCC: *"Aðlögun felur í sér breytingar á vistfræðilegum, félagslegum eða hagrænum kerfum sem andsvar við raunverulegum eða væntum áhrifum loftslagsbreytinga. Aðlögun felur í sér ferla, aðferðir og umgjörð sem draga úr skaða eða nýta* jákvæð tækifæri sem verða til vegna loftslagsbreytinga[4].

Aðlögun að loftslagsbreytingum getur verið af margs konar toga en IPCC skilgreinir sex mismunandi gerðir aðlögunar[6]:

- **Fyrirbyggjandi:** Aðlögun sem er skipulögð sem andsvar við væntanlegum áhrifum loftslagsbreytinga og er framkvæmd áður en áhrif þeirra koma í ljós. **Sjálfvirk:** Aðlögun sem á sér stað vegna vistfræðilegra breytinga í náttúrulegum kerfum eða vegna breytinga á markaðs- eða velferðarkerfum sem ekki eru skipulögð eða meðvituð. Einnig kölluð ósjálfráð aðlögun.
- **Skipulögð:** Aðlögun sem byggist á ákvörðunum sem helgast af vitneskju um yfirstandandi breytingar og hefur það að markmiði að endurheimta fyrra ástand, viðhalda núverandi ástandi eða ná fram einhverju tilteknu ástandi.
- **Viðbragðs:** Aðlögun sem á sér stað eftir að áhrif loftslagsbreytinga eru ljós og hafa komið fram.
- **Opinber:** Aðlögun sem á sér stað á vegum hins opinbera. Vanalega beint að sameiginlegum gæðum.
- **Aðlögun í einkageira:** Aðlögun sem á sér stað á vegum einkaaðila. Vanalega beint að gæðum sem aðeins snerta einkaaðila.

Í umfjöllun um aðgerðir síðar í kaflanum er aðallega lögð áhersla á fyrirbyggjandi/skipulagða sem og viðbragðsaðlögun sem framkvæmd er af hinu opinbera eða einkaaðilum. Ekki verður fjallað um sjálfvirka aðlögun.

UNFCCC[2,6] nefnir fimm þætti sem skipta má fyrirbyggjandi og skipulögðum aðgerðum í: (i) athugun; (ii) mat á áhrifum loftslagsbreytinga og tjónnæmi; (iii) stefnumótun og skipulag aðgerða; (iv) innleiðingu; og loks (v) vöktun og mat á árangri aðgerða.

Evrópska umhverfisstofnunin skiptir aðgerðum sem falla undir aðlögun í þrjá meginflokka: gráar, grænar og mildar lausnir[2]:

- **Gráar lausnir** felast í tæknilegum og verkfræðilegum úrræðum svo sem að byggja upp varnargarða eða stíflur. Slíkar lausnir geta verið nauðsynlegar þar sem öðrum aðgerðum verður ekki komið við.

- **Grænar lausnir** miða að því að styrkja náttúruleg ferli og styðja við þjónustu vistkerfa, svo sem að auka fjölbreytni nytjaplantna, styðja líffræðilega fjölbreytni og styrkja náttúrulegar varnir, svo sem

votlendi og flæðiengi. Einnig að styrkja græna innviði, sem og auka kolefnisbindingu.

- **Mildar lausnir** miða að því að hafa áhrif á hegðun með því að breyta lögum, reglugerðum og ákvörðunum í skipulagi. Einnig er þar átt við fyrirkomulag tryggingarmála, gerð hættumats og vöktun á umhverfinu.

Grænum og mildum lausnum fylgir yfirleitt ekki mikil áhætta þar sem aðgerðirnar sem gripið er til nýtast hvort sem áhrif loftslagsbreytinga verða veruleg eða lítil[2]. Vegna þessa er oft lögð áhersla á slíkar lausnir og möguleika þess að innleiða þær áður en til grárra lausna kemur.

10.2 Stefnumótun og framkvæmd aðlögunar í nágrannalöndum

Til að tryggja heildstæð viðbrögð við loftslagsbreytingum er mikilvægt að stefnumótun eigi sér stað og þá í samhengi við stefnumótun sem varðar samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda til að tryggja að samlegðaráhrif aðgerða séu sem mest. Hafa ber þó í huga að aðlögun að loftslagsbreytingum er ekki aðeins tengd samdrætti í losun gróðurhúsalofttegunda, heldur einnig öðrum málefnum eða geirum, svo sem landbúnaði eða orkuframleiðslu[7,8]. Stefnumótun og aðgerðaáætlanir hafa verið settar fram fyrir flest Evrópulönd, og einnig sértækari áætlanir innan margra svæða og borga í Evrópu. Í því sem hér fylgir verður stuttlega gerð grein fyrir stefnumótun Evrópusambandsins, Noregs, Finnlands, Kaupmannahafnar og Björgvinjar, auk þess sem farið er yfir stöðuna á Íslandi.

10.2.1 Evrópusambandið

Evrópusambandið samþykkti stefnu um aðlögun að loftslagsbreytingum í apríl 2013. *Hvítbók* um aðlögun að loftslagsbreytingum var sett fram árið 2009 þar sem tekið var upp stigaskipt áætlun um aðlögun innan sambandsins. Á fyrsta tímabili, frá 2009–2012, var ráðist í fjórar meginaðgerðir[7,9]:

1. Að byggja upp trausta þekkingu á loftslagsbreytingum og afleiðingum þeirra innan sambandsins. Áhersla var lögð á að meta tjónnæmi mismunandi landa og geira, og einnig að meta kostnað og ávinning mismunandi aðgerða.
2. Að samþætta aðlögun við lykilstefnusvið sambandsins. Áhersla var lögð á að meta hvernig fella mætti aðlögun inn í stefnumótun helstu geira sambandsins sem og ávinning eða kostnað þess að aðlagast ekki. Sérstök áhersla var lögð á heilbrigðs- og félagsmál, landbúnað, líffræðilegan fjölbreytileika, vatn, haf- og strandsvæði, framleiðslukerfi og innviði.
3. Að nýta sambland mismunandi gerða stjórntækja við aðlögun að loftslagsbreytingum og að tryggja skilvirka notkun trygginga og aðra þjónustu fjármálastofnana.
4. Að auka alþjóðlegt samstarf í aðlögun, bæði milli sambandsríkjanna sem og alþjóðlega.

Næsta tímabil hófst árið 2013, en í apríl það ár var stefna um aðlögun ESB að loftslagsbreytingum staðfest. Í stefnunni[10] eru þrjú aðalmarkmið:

- **Að hvetja til aðgerða aðildarríkja**. ESB hvetur öll aðildarríki sín til þess að setja fram heildstæða stefnu í aðlögun. Að auki fjármagnar ESB aukna aðlögunargetu sem og innleiðingu aðgerða. Aðlögun borga fær sérstaka athygli.
- **Að loftslagsverja[11] ESB.** Sérstök áhersla er lögð á þá geira innan ESB sem næmastir eru fyrir loftslagsbreytingum og hafa mest tjónnæmi, svo sem landbúnaður, fiskveiðar og innviðir, auk þess er hvatt til skilvirkrar notkunar trygginga gegn náttúrulegum og manngerðum hamförum.
- **Að stuðla að upplýstri ákvarðanatöku.** Áhersla er lögð á að fylla í þekkingareyður og að styrkja samevrópskan vettvang upplýsinga um aðlögun að loftslagsbreytingum sem kallast Climate-ADAPT[12].

Stefnunni fylgir átta liða aðgerðaáætlun með nokkrum undirliðum[10]:

1. Að hvetja aðildarríkin til að móta stefnu og aðgerðaáætlanir.
   a. Að gefa leiðbeiningar í stefnumótun.
   b. Að hanna skorkort aðlögunarhæfni.
   c. Að skylda sambandsríki til aðlögunar ef árangur er ekki nægjanlegur árið 2017.

2. Að fjármagna aukna aðlögunargetu og innleiðingu aðgerða.
3. Að fella aðlögun að ramma Sáttmála borgarstjóra[13].
4. Að fylla í þekkingareyður.
   a. Sérstök áhersla verður lögð á rannsóknir tengdar aðlögun innan Horizon 2020 rannsóknaráætlunar Evrópusambandsins.
   b. ESB mun hvetja til greininga á tjónnæmi fyrir sambandið í heild sinni.
5. Að þróa áfram Climate-ADAPT sem helstu veitu uppýsinga um aðlögun í Evrópu.
   a. Sérstök áhersla verður lögð á kostnaðar- og ábatagreiningu á mismunandi aðgerðum og stjórntækjum til aðlögunar.
6. Að loftslagsverja landbúnaðarstefnu, samheldnistefnu og sjávarútvegsstefnu ESB.
7. Að tryggja að innviðir standist loftslagsbreytingar.
   a. Staðlaráð Evrópu mun tryggja að staðlar taki aðlögun nægilega vel til greina í orku-, samgöngu- og byggingageira og í skyldum geirum.
   b. Að verktakar sem vinna að innviðaverkefnum loftslagstryggi verkefni sem hafa mikið tjónnæmi.
   c. Að auka notkun grænna lausna.
8. Að hvetja til skilvirkrar notkunar trygginga og annarrar þjónustu fjármálastofnana.
   a. Setja fram grænbók um hamfaratryggingar[14].
   b. Að bæta notkun trygginga gegn náttúruhamförum sem og að nota stjórntæki innan fjármálageirans til að hvetja til áhættustjórnunar og langtíma stefnumótunar.

Árið 2016 hófst endurskoðun á aðlögunarstefnu ESB þar sem metið verður hvort stefnan hafi skilað tilskildum árangri[10]. Matið fylgir stöðluðum matskvarða ESB og metur m.a. notagildi, áhrif, skilvirkni og virðisauka ESB af stefnunni og ætlað er að því ljúki árið 2018. Flest aðildarríki ESB hafa þegar samþykkt innlenda aðlögunarstefnu og mörg hafa sett fram eða eru við það að innleiða aðgerðaáætlun á sviði aðlögunar. Stefna og aðgerðir hafa einnig litið dagsins ljós í mörgum borgum og milliríkjasvæðum í Evrópu, þar á meðal á Eystrasalts-, Karpatafjalla- og Alpasvæði.

10.2.2 Norðurlönd

Flestar Norðurlandaþjóðir hafa lagt áherslu á aðlögun að loftslagsbreytingum og allar Norðurlandaþjóðirnar, fyrir utan Ísland og Færeyjar, hafa sett fram áætlanir um aðlögun að loftslagsbreytingum[15]. Hér að neðan eru tekin fjögur dæmi um aðlögun innan Norðurlandanna frá tveimur þjóðríkjum (Noregi og Finnlandi), auk tveggja borga (Kaupmannahöfn og Björgvin).

Noregur

Í Noregi voru helstu markmið aðlögunar sett fram árið 2008. Skilgreind markmið voru að draga úr tjónnæmi Noregs og að styrkja aðlögunarhæfni landsins. Markmiðum átti að ná með því að: i) meta tjónnæmi Noregs og fella loftslagsmálin inn í skipulagsferla ii) byggja og þróa þekkingargrunn iii) samhæfa aðlögunaraðgerðir, efla almenningsvitund og getu til aðlögunar. Í kjölfarið var ráðist í margvíslegar aðgerðir, m.a. var ráðist í fyrstu heildrænu greininguna á áhrifum loftslagsbreytinga í Noregi sem gefin var út árið 2010. Auk þess var sett á laggirnar verkefnið *Borgir framtíðar* sem var samstarfsverkefni norsku ríkisstjórnarinnar og 13 stærstu borga Noregs til að minnka losun gróðurhúsalofttegunda og stuðla samhliða að aðlögun að loftslagsbreytingum[15].

Hvítbók um aðlögun að loftslagsbreytingum var gefin út í Noregi árið 2013[16]. Sama ár samþykkti Norska þingið hvítbókina sem formlega aðlögunarstefnu Noregs. Ráðuneyti umhverfis og loftslags var ábyrgt fyrir að samhæfa aðgerðir til aðlögunar, en allar ríkisstofnanir, jafnt sem borgir og sveitarfélög, voru ábyrg fyrir innleiðingu stefnunnar. Lögð var áhersla á að aðlögun yrði að byggja á bestu fáanlegri þekkingu og því fékk þekkingaröflun veigamikinn sess. Í hvítbókinni voru skilgreind fimm lykilatriði fyrir aðlögun:

1. Þekkingaröflun. Áhersla var lögð á vöktun á áhrifum loftslagsbreytinga, framtíðarsýn og rannsóknir. Ábyrgð viðkomandi stofnana á vöktun, greiningum og framtíðarsýn var skilgreind og ákveðið var að halda áfram með átaksverkefni norska rannsóknarráðsins um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra.
2. Minnkun á tjónnæmi og viðbrögð við náttúruhamförum. Áhersla var lögð á almannavarnir og neyðarviðbrögð, m.a. vegna flóðahættu, þ.m.t. yfirborðsvatn og ofanflóð, hækkun sjávarborðs og tryggingar vegna náttúruhamfara.
3. Sveitastjórnastigið og viðnámsþróttur við áhrifum loftslagsbreytinga. Sveitarfélögum var gert skylt að taka aðlögun til greina í skipulagsferlum og

stefnumörkun og aðgerðum sem tengjast orku, samgöngum og samdrætti í losun gróðurhúsalofttegunda.

4. Aðlögun í þeim geirum samfélagsins sem loftslagsbreytingar hafa mikil áhrif á hafa mikið tjónnæmi og/eða stofna til fjárfestinga með langan líftíma. Hér er um að ræða landbúnað og skógrækt, fiskveiðar og fiskeldi, sem og margvíslega umhverfis- og auðlindastjórnun, svo sem verndun líffræðilegs fjölbreytileika sem og skóga, votlendis, ferskvatnsauðlinda og strandsvæða. Þar að auki var lögð áhersla á heilbrigðismál, byggingar og innviði, svo sem til samgangna, orkuframleiðslu og orkuflutninga.
5. Aðlögun á norðurslóðum, með sérstakri áherslu á aðlögun á Svalbarða og mikilvægi samvinnu þeirra landa sem liggja að heimskautasvæðinu.

Finnland

Strax um aldamótin 2000 voru Finnar farnir að velta fyrir sér mikilvægi aðlögunar að loftslagsbreytingum og árið 2001 hófst undirbúningur fyrir fyrstu stefnumótun aðlögunar og áætlun um viðbrögð við loftslagsbreytingum[7]. Stefnumótunin var birt árið 2005[15] og var markmið hennar að gera Finnum mögulegt að stjórna þeirri áhættu sem fylgdi loftslagsbreytingum og að auka aðlögunarhæfni Finnlands. Í stefnunni var lögð áhersla á að meta tjónnæmi og aðlögunargetu viðeigandi geira, auk þeirra tækifæra sem fælust í loftslagsbreytingum. Einnig voru settar fram aðgerðir til aðlögunar, t.d. í landbúnaði og matvælaframleiðslu, skógrækt, fiskveiðum, hreindýrarækt, iðnaði, orku, vatnsauðlindastjórnun og samgöngum. Aðlögunarákvæðum var bætt inn í landnotkunar- og byggingarlöggjöf auk löggjafar um skipulag í samstarfi við sveitarfélög[7].

Áætlunin hefur verið uppfærð nokkrum sinnum og var það síðast gert árið 2014 í stefnumörkun til ársins 2022[17]. Stefnt er að því að ná eftirfarandi þremur markmiðum fyrir árið 2022:

1. Aðlögun hefur verið tekin til greina og samhæfð skipulagi og aðgerðum í geirum finnsks samfélags.
2. Hagsmunaaðilar hafa aðgang að nauðsynlegum greiningum tengdum loftslagsbreytingum og stjórnun og stjórnkerfum tengdum þeim.
3. Rannsóknir og þróun, menntun, miðlun og þjálfun hafa aukið aðlögunarhæfni í samfélaginu, lausnir hafa verið þróaðar og meðvitund almennings um aðlögun hefur aukist.

Auk þessara þriggja markmiða var lögð áhersla á eftirfarandi aðgerðir:

1. Greining á viðnámshæfni á landsvísu.
2. Greining á áhrifum loftslagsbreytinga á smærri kvarða.
3. Opinberar stofnanir geri áætlanir um framkvæmd aðlögunar.
4. Áhersla verði lögð á aðlögun í alþjóðlegri samvinnu.
5. Aðlögun verði samhæfð stefnumörkun Evrópusambandsins og einnig lögð áhersla á aðlögun í annarri alþjóðlegri samvinnu.
6. Bæta áhættugreiningar og styrkja áhættustjórnun.
7. Þróun stjórntækja fyrir fjárhagslega áhættustjórnun.
8. Styrkja vísindarannsóknir tengdar aðlögun.
9. Þróun aukinna tækifæra í tengslum við aðlögun.
10. Þróun stjórntækja fyrir svæðisbundnar aðgerðir til aðlögunar.
11. Þróun námsefnis um aðlögun.

Aðlögun hefir einnig verið tekin til greina í loftslags- og orkustefnu landsins og í loftslagsstefnu Finnlands frá árinu 2015 er tekið fram að samþykkja skuli aðgerðaáætlun til aðlögunar á 10 ára fresti. Margvíslegar greiningar hafa verið gerðar til að styrkja aðgerðir á mismunandi stjórnvaldsstigum og vefgáttir stofnaðar í þeim tilgangi.[18] Heildstæð greining á tjónnæmi atvinnugeira samfélagsins hefur þó ekki farið fram en sérstök áhersla hefur verið lögð á að meta tjónnæmi tengt vatni, orku, skógum, líffræðilegum fjölbreytileika, sjávarauðlindum, landbúnaði, samgöngum, heilsu og skipulagi borga. Árið 2017 var hrundið af stað verkefni þar sem meta á tjónnæmi og áhættu landsins í heild sinni.

Kaupmannahöfn

Kaupmannahöfn hefur verið í fararbroddi borga sem sett hafa fram heildstæða stefnumótun og aðgerðaáætlun til að bregðast við loftslagsbreytingum. Borgin setti fram árið 2009 drög að aðgerðaáætlun þar sem áhersla var lögð á: i) þróun aðferða til að bregðast við ákafri úrkomu, ii) notkun grænna lausna til að verjast flóðahættu, iii) óbeina kælingu bygginga, iv) varnir gegn sjávarflóðahættu og v) undirbúning heildstæðrar stefnumótunar og aðgerðaáætlunar í aðlögun[7,15]. Slík

stefnumótun, auk aðgerðaáætlunar, var síðan sett fram árið 2012[19]. Þar er reynt að tryggja að heildstæð sýn ráði þróun borgarinnar, að aðlögun sé byggð á bestu fáanlegum greiningum og að ráðist sé í réttar fjárfestingar í borginni sem samlagist grænum áherslum og lausnum í skipulagi borgarinnar.

Við forgangsröðun aðgerða setti Kaupmannahöfn fram verkferli sem skiptist í 5 hluta (mynd 10.1).

Helstu ógnir og afleiðingar þeirra sem tekið er á í stefnunni eru: aukin úrkomuákefð og illviðratíðni, hækkun sjávarborðs, hlýnun, áhrif á grunnvatn og óbein áhrif lofslagsbreytinga á loftmengun og líffræðilega fjölbreytni. Skylt er að fella niðurstöður greininga á forgangsröðum inn í allt skipulag borgarinnar, allt frá deiliskipulagi til neyðaráætlana.

Við val og forgangsröðun aðgerða er tjónnæmi þátta skipt niður í þrjú áhættu- og kostnaðarstig (tafla 10.1) og er borginni skylt að bregðast umsvifalaust við miklu tjónnæmi og áhættu með aðgerðum til aðlögunar.

Tjón / Líkur	Lítið	Miðlungs	Mikið
Litlar	Áhætta er þolanleg	Áhætta er þolanleg	Nokkur áhætta
Miðlungs	Áhætta er þolanleg	Nokkur áhætta	Viðbrögð nauðsynleg
Miklar	Nokkur áhætta	Viðbrögð nauðsynleg	Viðbrögð nauðsynleg

Tafla 10.1 Flokkun atburða eftir því hversu líklegir þeir eru og hversu mikið tjón getur hlotist af þeim.

Fyrir hvern þátt þar sem ástæða þykir til að bregðast við eru aðgerðir til aðlögunar skilgreindar og þeim skipt niður á þrjú stig þar sem forgangur er ætíð gefinn aðgerðum á fyrsta stigi.

Fyrsta stig á við aðgerðir sem koma í veg fyrir atburði sem gætu valdið skaða. Sem dæmi má nefna byggingu síkja, að byggja hærra yfir sjávarmáli og staðbundin stjórnun fráveitu. Ef hægt er að innleiða lausnir af þessu tagi er ekki ráðist í lausnir sem falla á annað eða þriðja stig.

Annað stig á við aðgerðir sem framkvæmdar eru til að minnka skaða af atburðum. Sem dæmi má nefna þróun viðvörunarkerfa fyrir aftakaúrkomu, hönnun vatnsheldra kjallara og uppbygging svæða þar sem hægt er að að geyma rigningarvatn.

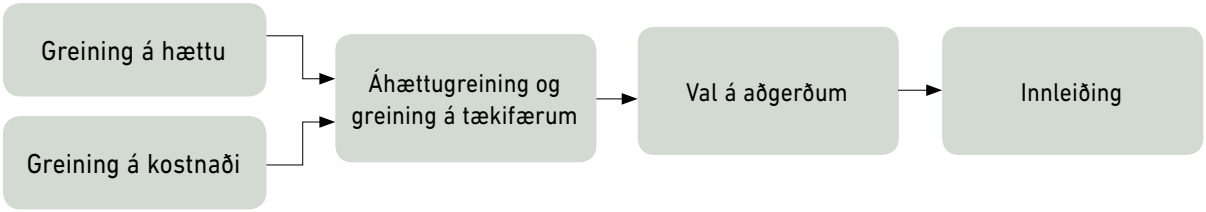
Þriðja stigið á við aðgerðir sem ætlað er að auðvelda hreinsun eftir atburði og eru þær í minnstum forgangi. Dæmi um slíkar aðgerðir eru t.d. dælikerfi.

Aðgerðum er einnig skipt upp eftir stærð, allt frá svæðum til einstakra bygginga. Lögð er áhersla á sveigjanlegar lausnir og lausnir sem skapa störf og auka lífsgæði. Aðgerðaáætlunin er uppfærð á 4 ára fresti.

Björgvin

Björgvin er ein þeirra borga sem tóku þátt í verkefninu *Borgir framtíðar* í Noregi. Aðgerðaráætlun Björgvinjar í loftslagsmálum frá 2010 tók til aðlögunar auk samdráttar í losun gróðurhúsalofttegunda[20]. Í aðgerðaráætluninni var lögð áhersla á að líklega myndi veðurtengd áhætta aukast, m.a. vegna aukinnar illviðratíðni og hættu á aftakaúrkomu, vegna hærra yfirborðs og aukins hita sjávar. Björgvin hefur nú þegar kortlagt áhættu og tjónnæmi innan sveitarfélagsins vegna skriðufalla, vatnsflóða og áhrifa þeirra, óveðra og úrkomu, og tengt greininguna við landnotkun í sveitarfélaginu.

Árið 2016 var síðan ný áætlun í loftslags- og orkumálum samþykkt[21]. Hvað aðlögun varðaði var markmiðið að marka Björgvin sess sem forystuborgar í grænum lausnum, sjálfbærri þróun og aðlögun að loftslagsbreytingum. Aðlögunarhæfni skyldi aukin með það að markmiði að borgin yrði eins vel í stakk búin og



Mynd 10.1 Verkferli til að forgangsraða aðgerðum í Kaupmannahöfn.

mögulegt væri að lágmarka neikvæð áhrif loftslagsbreytinga. Fjórar aðgerðir styðja þetta markmið:

1. Þekkingaröflun um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra.
2. Notkun þekkingar til að leiða til breytinga og undirbúa samfélagið undir væntanleg áhrif.
3. Tryggja að aðlögun sé tekin til greina í skipulagi og þróun borgarinnar.
4. Taka aðlögun til greina í greiningum borgarinnar á áhættu og tjónnæmi, sem og í öðrum aðgerðaáætlunum.

10.3 Staða aðlögunar á Íslandi

Formleg stefnumótun í aðlögun að loftslagsbreytingum á Íslandi hefur verið takmörkuð[15], en stjórnvöld hafa hingað til ekki sett fram heildstæða stefnumörkun í aðlögun. Þess í stað hefur megináhersla verið lögð á stefnumörkun og aðgerðir í að draga úr nettóútstreymi gróðurhúsalofttegunda[22]. Í stefnumörkun í loftlagsmálum frá 2007, er þó minnst á aðlögun þar sem segir: „Undirbúin verður aðlögun að loftslagsbreytingum jafnhliða því sem leitað verður leiða til að draga úr hraða þeirra og styrkleika"[22]. Í kjölfarið var sett á laggirnar vísindanefnd sem benda átti meðal annars á tækifæri til aðlögunar. Einnig voru nefnd tvö atriði tengd aðlögun. Í fyrsta lagi skyldi hafa líklega hækkun á sjávarborði sérstaklega í huga við hönnun á byggð og mannvirkjum við ströndina. Tekið var fram að gera þyrfti mat á líkum á sjávarflóðum að teknu tilliti til líklegrar hækkunar á sjávarborði. Í öðru lagi skyldi skoða vel bæði tækifæri og ógnir samfara líklegri aukningu á skipaumferð og flutningi á vörum, olíu og gasi á norðurslóðum[22].

Í aðgerðaáætlun í loftslagsmálum frá 2010[23] var ekki minnst á aðlögun og ekki heldur í markmiðum Íslands í tengslum við Parísarsamkomulagið[24]. Í aðdraganda Parísarfundarins 2015, var samþykkt *Sóknaráætlun í loftslagsmálum*[25], og þar á ný er minnst á aðlögun í samhengi styrkingar innviða. Þar eru tvö verkefni tengd aðlögun lögð til:

- **Vísindaskýrsla um afleiðingar loftslagsbreytinga**: Vísindaleg úttekt á afleiðingum loftslagsbreytinga á náttúru, efnahag og samfélag á Íslandi.
- **Aðlögun að loftslagsbreytingum**: Sett verður á fót verkefni, stýrt af Veðurstofu Íslands, um hvernig íslenskt samfélag getur brugðist við áhrifum loftslagsbreytinga hér á landi.

Reykjavíkurborg hefur m.a. sinnt aðlögun með þátttöku sinni í Sáttmála borgarstjóra[13]. Samkomulagið felur í sér að um 100 evrópskar borgir taka höndum saman um að vera leiðandi í aðgerðum gegn loftslagsbreytingum og deila því sem vel er gert. Í september 2015 skipaði borgarstjóri vinnuhóp um stefnumörkun í loftslagsmálum. Markmið vinnuhópsins var að móta framtíðarsýn í málaflokknum hjá Reykjavikurborg, þar með talin aðlögun að loftslagsbreytingum[26]. Í niðurstöðum starfshópsins var lögð áhersla á mikilvægi þess að stefnumörkun næði samhliða yfir mótvægisaðgerðir og aðlögun að loftslagsbreytingum. Hvað aðlögun varðaði lagði starfshópurinn til sem meginmarkmið: „Reykjavíkurborg muni aðlagast loftslagsbreytingum með megináherslu á grænar, vistvænar lausnir og með þátttöku og samstarfi borgaranna. Tæknilegar lausnir eru til staðar sem gripið verður til þar sem nauðsynlegt er"[26].

Einnig var lagt til að aðlögun yrði samþættuð aðgerðum til að draga úr náttúruvá. Bæði hvað þennan þátt varðar og áherslu á vistvænar aðgerðir er samhljómur með þessari tillögu og þeirri stefnu sem fylgt er í Kaupmannahöfn. Í loftslagsstefnu Reykjavíkurborgar, sem samþykkt var 2016, var þessarar tillögu ekki getið beinum orðum en þar voru settar fram aðgerðir til aðlögunar[27]. Aðgerðirnar eru:

1. Kortleggja skal helstu áhættuþætti, þar með talin flóðasvæði, setja inn í skipulag og gera áætlun um nauðsynlegar mótvægisaðgerðir.
2. Innleiða skal blágrænar ofanvatnslausnir og gera ráð fyrir grænum lausnum við flóðavarnir auk tæknilegra lausna.

Sem dæmi um viðbrögð hjá fyrirtækjum og stofnunum hafa Landsvirkjun og Vegagerðin greint aðlögunarþörf. Landsvirkjun með greiningum og spám um aukna bráðnun jökla og viðeigandi fjárfestingum til að nýta sér aukið vatnsmagn (sjá nánar 11.2). Vegagerðin hefur lagt áherslu á (sjá nánar 11.3):

1. að vegir þurfi að standast rysjóttara veðurfar þar sem frost-þíðu breytingar eru örari,

2. að taka þarf til greina hækkun sjávarborðs þegar vegir eru hannaðir sem og við viðhald og endurbyggingu hafna,
3. að tækifæri séu mögulega að opnast vegna siglinga um Norðurskautið[28].

Í skýrslu Almannavarnadeildar Ríkislögreglustjóra frá 2011 segir að auka þurfi viðbúnað vegna loftslagbreytinga vegna ófyrirséðra afleiðinga þeirra á veðurfar, vatnsbúskap, sjávarstöðu, vistkerfi og heilsufar landsmanna og efla þurfi vöktun og rannsóknir á ýmsum þáttum náttúrufars í samhengi loftslagsbreytinga[29]. Eins og rakið er hér að ofan, hefur stefnumótun hvað aðlögun varðar átt sér stað, bæði á vegum ríkisins og sveitarfélaga, en þrátt fyrir þessa viðleitni vantar þó enn heildarsýn á málaflokkinn og landsstefnu um aðlögun.

10.4 Aðlögun og önnur stefnumörkun

10.4.1 Samspil aðlögunar og mótvægisaðgerða til að draga úr nettólosun

Aðgerðir til að bregðast við loftslagsbreytingum felast annars vegar í mótvægisaðgerðum sem eiga að draga úr nettólosun gróðurhúsalofttegunda og hins vegar í aðlögun sem felur í sér viðbrögð við afleiðingum lofts–lagsbreytinga. Þar til nýlega var yfirleitt fjallað um mótvægisaðgerðir og aðlögun sem aðskilin viðbrögð við loftslagsbreytingum. Nú er lögð áhersla á að samræma aðlögun og mótvægisaðgerðir og t.d. er í tveimur síðustu skýrslum IPCC lögð áhersla á að öll stefnumörkun og aðgerðir vegna loftslagsbreytinga séu settar fram og metnar heildstætt. Það er, að áhrif aðgerða séu metin heildstætt til að tryggja að ráðist sé í mótvægisaðgerðir sem ekki dragi úr aðlögunarhæfni samfélaga og öfugt.

Bæði sjálfvirk aðlögun sem og skipulögð/fyrirbyggjandi aðlögun geta haft jákvæð eða neikvæð áhrif á mótvægisaðgerðir. Sjálfvirk aðlögun, t.d. aukinn vöxtur gróðurs vegna hærri hita, eykur bindingu kolefnis og hjálpar því til við að draga úr nettólosun gróðurhúslofttegunda. Á sama hátt getur skipulögð/fyrirbyggjandi aðlögun, sem miðast við að nýta grænar lausnir t.d. við flóðavarnir, stuðlað að kolefnisbindingu. Aðgerðir sem leiða til bindingar kolefnis geta því í sumum tilfellum flokkast bæði undir mótvægisaðgerðir sem og aðlögun.

Ekki hefur verið ráðist í heildstæða greiningu á sambandi mótvægisaðgerða og aðlögunar á Íslandi og því hefur heildstæð stefnumörkun ekki átt sér stað. Mögulegar mótvægisaðgerðir hafa þó verið greindar ítarlega.

Nýlega (2017) kom út skýrsla frá Hagfræðistofnun Háskóla Íslands[30] um möguleika Íslands til samdráttar í útstreymi gróðurhúsalofttegunda til ársins 2030. Heildarútstreymi gróðurhúsalofttegunda var 3638 þúsund tonn CO_2-ígilda árið 1990. Skýrslan sýndi að útstreymi gróðurhúsalofttegunda hafði aukist um 26% til ársins 2014, ef binding með landgræðslu og skógrækt var ekki talin með. Samkvæmt skýrslunni má búast við að útstreymi gróðurhúsalofttegunda frá landinu muni aukast um 53%–99% til ársins 2030, miðað við losunina 1990, nema gripið verði til aukinna mótvægisaðgerða.

Mótvægisaðgerðir geta falist í minnkun losunar frá ólíkum geirum íslensks samfélags (orkuframleiðslu, iðnaði og efnanotkun, samgöngum, sjávarútvegi, landbúnaði og úrgangsumhirðu). Í áðurnefndri skýrslu eru settar fram sviðsmyndir um mögulegan samdrátt í útstreymi og sýnir ein sviðsmyndanna mögulegan samdrátt í útstreymi frá öllum þessum geirum um 1.716 þúsund tonna CO_2-jafngilda árið 2030. Losunarspáin 2030 breytist þá í 6% til 52% aukningu útblásturs miðað við 1990, miðað við mismunandi forsendur efnahagsþróunar og án mögulegrar kolefnisbindingar. Þetta er nokkuð langt frá markmiðum ESB innan Parísarsamkomulagsins. Innan þess hafa ríki ESB skuldbundið sig til að draga úr losun allt að 40% til 2030 miðað við 1990, en gert er ráð fyrir að Ísland verði ásamt Noregi með ESB í þeim skuldbindingum[31].

Mótvægisaðgerðir geta einnig falist í bindingu gróðurhúsalofttegunda með skógrækt, landgræðslu, stýrðri bindingu í jarðhitakerfum og endurheimt votlendis, en árleg kolefnisbinding skógræktar og landgræðslu, á svæðum ræktuðum frá og með 1990, nam um 422 þúsundum tonna CO_2 árið 2014[30] en endurheimt votlendis hefur ekki verið talin fram sem mótvægisaðgerð hingað til í losunarbókhaldi Íslands[31] enda bara örfá svæði verið endurheimt hingað til og stýrð binding með niðurdælingu CO_2-vökva er enn á tilraunastigi[32].

Miðað við að umfang nýrra verkefna í landgræðslu og skógrækt haldist svipað og það hefur verið síðan 2011 og vegna aukins vaxtarhraða eldri skóga þá má áætla að kolefnisbindingin verði um 744 þúsund tonn CO_2 árið 2030. Það gæti mögulega breytt nettóútstreymi Íslands í 18% minnkun árið 2030 miðað við árið 1990,

ef jafnframt væri farið í allar fyrrgreindar tæknilegar lausnir til að minnka losun.

Í áðurnefndri skýrslu Hagfræðistofnunar er bent á að verði tæknilausnum til samdráttar beitt af fullum þunga og umfang skógræktar- og landgræðsluaðgerða strax tvöfaldað, myndu áhrifin ein og sér verða til þess að áætlaður nettóútblástur um 2030 yrði um 23% minni en hann var 1990, miðað við grunntilvik í þróun útblásturs. Fjórföldun bindiaðgerða myndi geta ein og sér skilað 33% minnkun í nettóútblæstri. Það færi langt með að mæta mögulegum skuldbindingum Íslands samkvæmt Parísarsamkomulaginu fram til 2030. Átak í endurheimt votlendis til viðbótar bindingu með landgræðslu og skógrækt gæti einnig dregið umtalsvert úr nettóútstreymi.

Landþörf til skógræktar, miðað við tvöföldun aðgerða, væri um 22 km^2 á ári og samsvarandi fyrir landgræðslu væru 82 km^2, eða samtals um 0,1% landsins á hverju ári. Samanlagt yrði þörfin til ársins 2030 þá um 1.3% af flatarmáli landsins og um 2.6% landsins miðað við fjórföldun aðgerða. Flatarmál framræsts votlendis sem talið er í lítilli notkun og mögulega mætti endurheimta er talið um 900 km^2 eða um 0.9% af flatarmáli landsins.

Þegar hagkvæmni mótvægisaðgerða er áætluð til skamms tíma, eins og til dæmis yfir rúman áratug, fram til 2030, þá er mikilvægt að hafa í huga að vissar aðgerðir, eins og skógrækt og landgræðsla, eru þess eðlis að árleg bindigeta vistkerfanna er að aukast jafnt og þétt yfir tímabil sem hleypur á árum til nokkurra áratuga. Endurheimt framræsts votlendis dregur hins vegar strax úr losun CO_2 (ef mýramórinn er enn til staðar) þegar vatnsstaðan hækkar, og það eykur hagkvæmni þeirrar aðferðar mikið þegar útreikningar eru gerðir til skamms tíma. Loftslagsáhrifin af endurheimt votlendis eru minnkun á losun, en ekki ætti að tala um kolefnisbindingu í því sambandi. Mýrar á Norðurlöndum eru ekki að jafnaði með jákvæðan loftslagsjöfnuð í CO_2-ígildum[33], þ.e. þegar tillit er tekið til allra gróðurhúsalofttegundanna, þrátt fyrir að þær séu óraskaðar. Hvort það er þeirra eðlilega ástand eða þetta stafi af umhverfisbreytingum á síðustu áratugum er ekki með fullu vitað. Minnkunin á nettólosun gróðurhúsalofttegunda eftir endurheimt er hins vegar veruleg eins og mælingar sýna bæði hérlendis og erlendis[33] og ýtrustu möguleikar á að nota þá leið sem mótvægisaðgerð því umtalsverðir þegar stærðargráða losunar frá framræstum votlendum er skoðuð á landsvísu (sjá umfjöllun í hliðargrein 3B Kolefnisjöfnuður Íslands).

Að lokum er þó mikilvægt að hafa í huga að enn er óljóst hvernig endanlegt regluverk um losunarbókhald mun verða útfært samkvæmt Parísarsamkomulaginu og ekki er búið að ganga frá samningum við Evrópusambandið um hlutdeild Íslands í sameiginlegu markmiði. Ekki er víst að ríkjum muni leyfast að nýta þar alla þá bindingu sem þau gætu sýnt fram á að hafi orðið og enn fremur er ekki víst að minnkun á losun með breytingum á landnýtingu (t.d. endurheimt votlendis) og kolefnisbinding með skógrækt og landgræðslu eða niðurdælingu verði þar undir sama hatti.

Til að stjórnvöld tryggi að hámarks samlegðaráhrif náist milli aðgerða til aðlögunar og mótvægisaðgerða er mikilvægt að ráðleggingum IPCC sé fylgt og ráðist sé í heildstæða stefnumörkun.

10.4.2 Samspil aðlögunar og Heimsmarkmiða um sjálfbæra þróun

Heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna (Sþ) um sjálfbæra þróun voru samþykkt árið 2015 og gilda þau frá árinu 2016 (sjá mynd 13.3). Heimsmarkmiðin 17, sem samanstanda af 169 undirmarkmiðum með tilheyrandi mælikvörðum sem nota á til að mæla stöðuna á hverjum tíma, koma í stað Þúsaldarmarkmiðanna þar sem áhersla var lögð á þætti sem varða minna þróuð ríki, svo sem að útrýma hungri. Heimsmarkmið Sþ eru mun víðtækari og beinast að öllum ríkjum heims. Áhersla er lögð á efnahags-, umhverfis- og félagslegar stoðir sjálfbærrar þróunar og útgangspunkturinn er að markmiðin nái til allra og skilji engan eftir.

Loftslagsbreytingar vinna gegn sjálfbærni og leggja miklar byrðar á komandi kynslóðir. Því eru aðgerðir sem draga úr loftslagsbreytingum og vinna gegn neikvæðum áhrifum þeirra stuðningur við sjónarmið um sjálfbærni. Loftslagsbreytingar og aðlögun að þeim snerta því Heimsmarkmið Sþ á tvenna vegu. Í fyrsta lagi fjallar eitt markmiðanna, markmið 13, um viðbrögð við loftslagsbreytingum. Í markmiðinu og undirmarkmiðum þess er leitast við að styðja við Parísarsamkomulagið og fjallað jafnt um samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda og aðlögun.

Markmið 13 er að grípa til bráðra aðgerða gegn loftslagsbreytingum og áhrifum þeirra[34].

Undirmarkmið eru:

- Viðnámsþol og aðlögunargeta vegna loftslagstengdrar hættu og náttúruhamfara verði efld í öllum löndum.
- Ráðstafanir vegna loftslagsbreytinga verði felldar inn í landsbundnar áætlanir, stefnumál og skipulag.
- Menntun verði bætt, reynt verði að stuðla að vitundarvakningu og efla getu manna og stofnanna til að draga úr, aðlagast og vara við loftslagsbreytingum og áhrifum þeirra.
- Komið verði til framkvæmda þeirri skuldbindingu iðnríkja, sem eru aðilar að UNFCCC, að árið 2020 verði heildarframlög þeirra til þróunarlanda, til að takast á við aðlögun að loftslagsbreytingum 100 milljarðar bandaríkjadala. Að draga úr áhættu og auka gagnsæi við að koma *Græna loftslagssjóðnum* til framkvæmda og í fullan rekstur með því að fjármagna hann eins fljótt og auðið er.
- Stuðlað verði að fyrirkomulagi sem eflir getu til skilvirkrar skipulagningar og stjórnunar í tengslum við loftslagsbreytingar í þeim löndum sem eru skemmst á veg komin í þróun og þróunarríkjum sem eru lítil eyríki, meðal annars með því að leggja áherslu á konur, ungt fólk, nærsamfélög og jaðarsamfélög.

Loftslagsmál tengjast einnig heimsmarkmiðunum óbeint þar sem loftslagsbreytingar draga úr möguleikum á að ná hinum markmiðunum 16. Til dæmis hafa loftslagsbreytingar neikvæð áhrif á möguleika þess að útrýma fátækt, hungri og tryggja heilbrigði. Viðbrögð við loftslagsbreytingum, svo sem við breytingu orkukerfa til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, geta haft jákvæð áhrif á þessa málaflokka, sem og aðra eins og jafnræði kynjanna og aðgengi að menntun[35]. Í ljósi þessa sýna rannsóknir að ríkisstjórnir víðsvegar um heim gera sér grein fyrir því að ekki verður hægt að ná heimsmarkmiðunum, án þess að leysa loftslagsvandann.

Unnið er að úttekt á stöðu Íslands gagnvart heimsmarkmiðunum 17 og undirmarkmiðunum 169. Að því loknu munu stjórnvöld forgangsraða og hefja innleiðingu.

Mynd 10.2 Heimsmarkmið um sjálfbæra þróun

10.5 Samantekt

Aðlögun að loftslagsbreytingum verður ekki umflúin, en sé brugðist við í tæka tíð má draga úr, og stundum koma í veg fyrir það tjón þær geta haft í för með sér. Mikið hefur verið fjallað um aðlögun innan alþjóðasamfélagsins og Ísland er aðili að Parísarsamkomulaginu þar sem mælst er til að aðilar standi skil á áætlunum varðandi aðlögun. Ísland hefur þó ekki sett fram heildstæða stefnu í aðlögun.

Í þeim nágrannalöndum þar sem stefnumótun er hvað lengst komin er lögð áhersla á að aðlögun þurfi að byggja á haldbærum rannsóknum, bæði hvað varðar afleiðingar loftslagsbreytinga og viðbrögð við þeim, sem og upplýsta ákvarðanatöku. Áhættustýring er algeng nálgun við stefnumótun og framkvæmd aðlögunar, enda felast sumar afleiðingar loftslagsbreytinga í aukinni náttúruvá[36].

Algengt er að lögð sé áhersla á vistvænar lausnir til aðlögunar, t.d. blágrænar lausnir vegna aukinnar úrkomu. Einnig er bent á að mikilvægt sé að samhæfa aðlögun og mótvægisaðgerðir til að draga úr losun, til að tryggja hámarks samlegðaráhrif. Dæmi um slíkar aðgerðir er binding kolefnis með aukinni gróðurþekju sem einnig væri nýtt til flóðavarna.

Mikilvægt er að stjórnvöld meti aðlögun í samhengi við mótvægisaðgerðir til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda svo að stefnumörkun í málaflokknum sé heildstæð.

Heimsmarkmið Sameinuðu þjóðanna um sjálfbæra þróun tengjast loftslagsbreytingum beint og óbeint, en álag vegna loftslagsbreytinga gerir þjóðum erfiðara fyrir að ná þessum markmiðum. Við stefnumótun í þessum málaflokki þarf því að taka tillit til áhrifa loftslagsbreytinga.

Tilvísanir

1 IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA, 1132 bls.
Sjá einnig IPCC 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 bls.

2 Birna Björk Árnadóttir 2015. Hvernig má bregðast við loftslagsbreytingum með skipulagsgerð? Meistararitgerð í Umhverfis- og auðlindafræði, Háskóli Íslands.

3 Eins og kom fram í kafla 3 er Rammasamningur Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar skammstafaður UNFCCC. Nánar má lesa um framkvæmd og samninga um aðlögun á vefsvæði UNFCCC unfccc.int/focus/adaptation/items/6999.php.

4 Cancun Adaptation Framwork, sjá vefsvæði UNFCCC unfccc.int/adaptation/items/5852.php.

5 Sjá umfjöllun í grein 3.10, en texta samkomulagsins má finna á vefsvæði UNFCCC unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.

6 Sjá Viðauka B við IPCC, 2001. Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken & K. S. White (ritstj.). www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg2/index.php?idp=689.

7 Margrét Helga Guðmundsdóttir 2012. Beðið eftir óveðri, MA ritgerð í Umhverfis- og auðlindafræði, Háskóli Íslands.

8 Keskitalo, C. (ritstj) 2010. Developing Adaptation Policy and Practice in Europe: Multi- level Governance of Climate Change. Dordrecht: Springer.

9 Innan stjórnkerfis Evrópusambandsins eru hvítbækur stefnumótandi skjöl (sjá athugasemd 14). Hvítbók um aðlögun (White paper - Adapting to climate change: towards a European framework for action) er aðgengileg á vefsvæðinu eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52009DC0147.

10 European Commission 2013. EU Strategy on adaptation to climate change, European Commission, ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/eu_strategy_en.pdf. Sjá einnig ágrip á vefsvæðinu ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/what_en

11 Að loftslagsverja (e. „climate-proofing“) miðar að því að verja innviði, geira og þjóðir fyrir neikvæðum afleiðingum loftslagsbreytinga.

12 Sjá nánar um Climate-ADAPT á vef Umhverfisstofnunar Evrópu, climate-adapt.eea.europa.eu.

13 Sáttmáli borgarstjóra (e. Coventant of Mayors) er átak borga til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og bregðast við afleiðingum loftslagsbreytinga, sjá nánar á vefsvæðinu www.covenantofmayors.eu.

14 Innan stjórnkerfis ESB, og margra Evrópulanda er *grænbók* umræðuskjal sem greinir stefnu og kosti máls gjarnan sem hluta af stefnumótunarferli. Í kjölfarið er oft gefin út *hvítbó*k, með ítarlegri stefnumótun.

15 Goodsite, M.E., M. Davis, R.J.T. Klein, B. Davídsdóttir, R. Atlason S. Juhola, M. Landauer, B.O. Linnér, T. Neset, E. Glaas & G. Eskeland 2013. White Paper: Climate Change Adaptation in the Nordic Countries. Nordic Climate, Mitigation, Adaptation and Economic Policies Network (N-CMAEP), Norden Top-level Research Initiative, Oslo, Norway.
Klein, R. & Juhola, S. 2014. A framework for Nordic actor-oriented climate adaptation research. Environmental Science and Policy, 40, 101-115. doi:10.1016/j.envsci.2014.01.011. Sjá einnig heimild 2.

16 Norwegian Ministry of climate and environment 2013. Climate adaptation in Norway, Report to the Storting: www.regjeringen.no/contentassets/e5e7872303544ae38bdbdc82aa0446d8/en-gb/pdfs/stm201220130033000engpdfs.pdf.

17 Ministry of Agriculture and Forestry 2014. Finland´s National Climate Change Adaptation Plan 2022, Government resolution 20 November 2014. Sjá: mmm.fi/en/nature-and-climate/climate-change-adaptation.

18 Sjá t.d. www.ilmasto-opas.fi og www.climateguide.fi.

19 Í umfjöllun um Kaupmannahöfn er aðallega byggt á City of Copenhagen 2012, Copenhagen Climate Adaptation Plan, Copenhagen.

20 Sjá vefsvæði European climate adaptation platform: Norway (climate-adapt.eea.europa.eu).

21 Green strategy; climate and energy action plan for Bergen, sjá European climate adaptation platform: Norway.

22 Umhverfisráðuneytið 2007. Stefnumótun í loftslagsmálum. Sjá: www.umhverfisraduneyti.is/media/PDF_skrar/Stefnumorkun_i_loftslagsmalum.pdf; Umhverfisráðuneytið. 2010. Aðgerðaáætlun í loftslagsmálum. Sjá: www.umhverfisraduneyti.is/media/PDF_skrar/Adgerdaaaetlun-i-loftslagsmalum.pdf; Umhverfis- og auðlindaráðuneytið. 2013. Aðgerðir í loftslagsmálum. Skýrsla samstarfshóps til umhverfis- og auðlindaráðherra. Samstarfshópur um aðgerðaáætlun í loftslagsmálum. Sjá: www.umhverfisraduneyti.is/media/PDF_skrar/Skyrsla-2013-adgerdaaaetlun-loftslagsmal.pdf; Umhverfisráðuneytið, 2015, Verkefni í sóknaráætlun í loftslagsmálum. Sjá: www.stjornarradid.is/media/umhverfisraduneyti-media/media/pdf_skrar/soknaraaetlun---vidauki.pdf.

23 Aðgerðaáætlun í loftslagsmálum. Sjá: www.umhverfisraduneyti.is/media/PDF_skrar/Adgerdaaaetlun-i-loftslagsmalum.pdf

24 Markmið Íslands innan Parísarsamkomulagsins má finna á vefsvæði UNFCCC www4.unfccc.int/ndcregistry/PublishedDocuments/Iceland%20First/INDC-ICELAND.pdf.

25 Umhverfisráðuneytið 2015. Verkefni í sóknaráætlun í loftslagsmálum. Sjá: www.stjornarradid.is/media/umhverfisraduneyti-media/media/pdf_skrar/soknaraaetlun---vidauki.pdf.

26 Reykjavíkurborg 2015. Skýrsla starfshóps um aðlögun að loftslagsbreytingum, Reykjavíkurborg.

27 Reykjavíkurborg 2016. Loftslagsstefna Reykjavíkurborgar, Reykjavíkurborg.

28 Ásdís Jónsdóttir 2012. Adapting to climate change in Iceland CoastAdapt report: Institute for Sustainability Studies University of Iceland. Sjá: www.academia.edu/2563924/Adapting_to_Climate_Change_in_Iceland._CoastAdapt_Report.

29 Ríkislögreglustjóri, Almannavarnadeild 2011. Áhættuskoðun Almannavarna 2011 – helstu niðurstöður. Sjá: www.almannavarnir.is/upload/files/Inngangur%20+%20Áhættuskoðun%20og%20umdæmin.pdf.

30 Hagfræðistofnun Háskóla Íslands 2017. Ísland og loftslagsmál (Skýrsla nr. C17:01).

31 Umhverfis og auðlindaráðuneytið 2015. Ísland tilkynnir landsmarkmið í loftslagsmálum til 2030. Sjá www.stjornarradid.is/efst-a-baugi/frettir/stok-frett/2015/06/30/Island-tilkynnir-landsmarkmid-i-loftslagsmalum-til-2030.

32 Juerg M. Matter, Martin Stute, Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir, Eric H. Oelkers, Sigurdur R. Gislason, Edda S. Aradottir, Bergur Sigfusson, Ingvi Gunnarsson, Holmfridur Sigurdardottir, Einar Gunnlaugsson, Gudni Axelsson, Helgi A. Alfredsson, Domenik Wolff-Boenisch, Kiflom Mesfin, Diana Fernandez de la Reguera Taya, Jennifer Hall, Knud Dideriksen & Wallace S. Broecker 2016. Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. Science 352, 1312-1314.

33 Maljanen, M., Bjarni D. Sigurdsson, Jón Guðmundsson, Hlynur Óskarsson, Huttunen, J. T. & Martikainen, P.J. 2010. Land-use and greenhouse gas balances of peatlands in the Nordic countries – present knowledge and gaps. Biogesciences 7. 2711-2738.

34 Sjá texta á www.un.is/heimsmarkmidin/verndun-jardarinnar/.

35 www.wri.org/blog/2017/07/tackling-climate-change-part-many-countries-sustainable-development-plans.

36 Nánar er rætt um áhættustýringu og náttúruvá í kafla 12.1.7.

11 Áhrif loftslagsbreytinga á innviði, atvinnuvegi og samfélag

Samantekt

1. Líklegt er að loftslagsbreytingar muni hafa áhrif á fráveitu- og ofanvatnskerfi. Laga þarf þessi kerfi að breytingunum, en brýn þörf er á rannsóknum sem leggja má til grundvallar stefnumótun.
2. Loftslagsbreytingar kunna að hafa áhrif á eftirspurn, framboð og gæði vatns, en gera þarf umfangsmiklar rannsóknir og tryggja bætt eftirlit á þessu sviði.
3. Aukist ákefð úrkomu veldur það meira álagi á fráveitukerfi og taka þarf tillit til þessa við hönnun þeirra.
4. Skoða þarf áhrif sjávarstöðubreytinga á frárennsli og bæta mælanet úrkomu í þéttbýli.
5. Líklegt er að rennsli í einstaka virkjuðum jökulám aukist um 27–84% fram að miðbiki aldarinnar.
6. Rannsóknir benda til að á tímabilinu 2010–2050 muni nýtanlegt vatnsafl aukast um 20%, en núverandi orkukerfi ræður einungis við um 38% þeirrar aukningar.
7. Aðlögunar er þörf í orkugeiranum til að mæta aukningu á nýtanlegu vatnsafli.
8. Greiningu á áhrifum loftslagsbreytinga á flutningsnet raforku vantar.
9. Rannsóknir benda til að hækkun á lofthita geti minnkað eftirspurn eftir heitu vatni um rúmlega 5% fyrir hverja gráðu.
10. Líklegt er að loftslagsbreytingar hafi áhrif á uppbyggingu og viðhald vegakerfisins, og á þjónustuþörf, t.d. verði minni þörf á snjómokstri en aukin þörf á hálkuvörnum.
11. Líklegt er að siglingar á norðurslóðum aukist en óvissa er um bæði áhættu og ávinning fyrir Ísland.
12. Hlýnun hefur haft umtalsverð áhrif á jarðargróður og líklegt er að framleiðsla ýmissa fóður- og fæðujurta aukist með hlýnandi loftslagi.
13. Verði breytingar í umhverfisaðstæðum hægfara er líklegt að íslenskur sjávarútvegur ráði við þær, en aðlögunar er þörf. Áhrif súrnunar á lífríki hafsins munu þó líklega koma fyrr fram á íslensku hafsvæði en annars staðar.
14. Líklegt er að nýtanlegar auðlindir sjávar muni betur geta staðið af sér og aðlagast áhrifum loftslagsbreytinga ef unnt verður að halda áhrifum álagsþátta tengdum fiskveiðum, raski á búsvæðum og mengun í lágmarki.
15. Bæði súrnun og hlýnun sjávar geta haft áhrif á fiskeldi.
16. Til skemmri tíma er líklegt að áhrif loftslagsbreytinga á ferðaþjónustu á norðurslóðum verði jákvæð, en frekari rannsókna er þörf.
17. Tryggingar eru mikilvægur þáttur í að stýra áhættu tengdri loftslagsbreytingum og náttúruvá.
18. Viðlagatrygging Íslands veitir tryggingarvernd gagnvart áhættuþáttum sem loftslagsbreytingar kunna að hafa áhrif á, s.s. ofanflóð, vatnsflóð og kjarrelda.
19. Samfélagsleg áhrif loftslagsbreytinga og viðbragða við þeim kunna að verða umtalsverð, bæði vegna kostnaðar við aðlögun og mótvægisaðgerðir, auk alþjóðlegra skuldbindinga. Þörf er þó á frekari rannsóknum.

Áhrif loftslagsbreytinga á innviði eru af margvíslegum toga og fara áhrifin eftir staðsetningu, tjónnæmi og aðlögunarhæfni. Í sumum tilvikum geta áhrifin verið jákvæð, svo sem í orkuframleiðslu sem tengist jökulám, eða neikvæð, eins og t.d. áhrif sjávarstöðuhækkunar á fráveitukerfi.

Í þessum kafla er fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á innviði og atvinnuvegi. Fjallað er um frumatvinnuvegi (sjávarútveg og landbúnað) auk ferðamennsku og trygginga- og fjármálastarfsemi. Loks er fjallað stuttlega um önnur samfélagsleg áhrif.

Þeir innviðir sem hér er fjallað um tengjast vatnsbúskap með áherslu á fráveitu og ofanvatnskerfi, samgöngum og orkuframleiðslu, -flutningi og -eftirspurn.

11.1 Vatn og veitur

Áhrif loftslagsbreytinga á vatnstengda innviði skiptast í áhrif á vatnsveitur, áhrif á fráveitu- og ofanvatnskerfi, auk áhrifa á eftirspurn eftir vatni.

Á Íslandi hafa fáar rannsóknir verið gerðar á áhrifum loftslagsbreytinga á innviði vatnsbúskapar, svo sem á fráveitu og ofanvatnskerfi[1,2] og vantar því frekari rannsóknir á þeim tengslum. Líklegt má telja að úrkomubreytingar á öldinni muni hafa áhrif á forða og gæði vatnsbóla[3] og ef landbúnaður og ræktun eykst leiði það til aukinnar notkunar á köldu vatni. Mögulegt er að þetta hafi áhrif á vatnsbúskap ákveðinna veitusvæða en rannsóknir vantar til að staðfesta slíkt[4]. Áður hefur verið minnst á áhrif loftslagsbreytinga á afrennsli jökulá í kafla 5 en þau hafa verulegar afleiðingar fyrir vatnsauðlindina.

Þekkt er erlendis að í auknum hita og þurrki er notkun á vatni hvað mest, m.a. vegna vökvunar gróðurs. Stundum er því reynt að draga úr eftirspurn og þeim tilmælum beint til almennings að draga úr vökvun garða. Ef þurrkar verða algengari hér á landi[5] er hugsanlegt að eftirspurn eftir vatni gæti aukist á sama tíma og staða vatnsbóla verði erfiðari, en frekari rannsókna er þó þörf.

Nokkur þekking er á áhrifum veðurs á vatnsgæði og gæði neysluvatns á Íslandi hafa verið rannsökuð ítarlega[6], en frekari rannsóknir á hugsanlegum áhrifum loftslagsbreytinga á gæði neysluvatns vantar[7].

11.2 Fráveita og ofanvatnskerfi

Samkvæmt lögum um uppbyggingu og rekstur fráveitna telst til fráveitu „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"[8] (mynd 11.1).

Meginhlutverk fráveitukerfa er að flytja fráveituvatn, bæði skólp og ofanvatn, frá uppsprettu að viðtaka. Með viðtaka er átt við það svæði sem fráveituvatn er leitt til. Á Íslandi eru í notkun tvennskonar fráveitukerfi; einföld og tvöföld. Í flestum eldri byggðum á Íslandi eru einföld kerfi í notkun, og það var ekki fyrr en í lok 7. áratugarins sem lagning tvöfaldra kerfa varð algengari. Í einföldum kerfum rennur skólp og ofanvatn í sömu lögnunum, en í tvöföldum kerfum er skólp og ofanvatn aðskilið. Einföld kerfi hafa þann galla að við mikla úrkomu getur skólpblandað regnvatn flætt upp í kerfið, þau auka álag á skólphreinsistöðvar og skólpblandað regnvatn getur borist óhreinsað í viðtaka um yfirföll. Líkur eru á að það flæði upp í kerfið ef yfirföll eru virk/opin vegna mikillar úrkomu og sjávarstaða er há á sama tíma[1].

Ýmsir þættir hafa áhrif á virkni fráveitukerfa, svo sem sjávarföll og hæð sjávarborðs (ef sjórinn er viðtaki getur flóðahæð skilað sér inn í kerfin), landhalli og grunnvatnsstaða. Dæmi um þætti þar sem loftslagsbreytingar geta haft áhrif á fráveitukerfi eru aukin úrkoma og úrkomuákefð, hækkandi grunnvatns- og sjávarstaða og fjölgun hlákudaga. Þessir þættir geta haft áhrif hver um sig eða í samverkan við aðra þætti. Dæmi um þetta síðarnefnda er hækkun sjávarstöðu og áhrif á grunnvatn. Hækkuð sjávarstaða minnkar hæðarmun (fallhæð) í lagnakerfum og því hægist á rennsli. Það leiðir til þess að flutningsgeta kerfanna minnkar sem aftur getur leitt til flóða upp úr kerfinu. Hækkuð sjávarstaða getur einnig leitt til hærri grunnvatnsstöðu sem þýðir að meira grunnvatn rennur inn í kerfið[1]. Aukin úrkomuákefð eykur síðan á vandann[2]. Lítið er til af birtum rannsóknum um þetta efni, en hér verður fjallað um tvær rannsóknir, en í báðum voru skoðuð áhrif loftslagsbreytinga á fráveitukerfi á tilteknum svæðum í Reykjavík. Í annarri

rannsókninni var sjávarstaða á eiðinu milli Reykjavíkur og Seltjarnarness athuguð, í hinni voru áhrif úrkomu í miðborginni skoðuð í samhengi við þéttingu byggðar á svæðinu.

Í fyrri rannsókninni voru skoðuð áhrif hækkunar sjávarborðs á fráveitukerfi[1]. Niðurstöður hermireikninga bentu til þess að regnskúr með 10 ára endurkomutíma gæti þegar valdið flóðum í kerfinu, en sjávarstaða þyrfti einungis að hækka um 0.2 m til þess að minni regnskúr með 5 ára endurkomutíma færi að valda flóðum. Við enn hærri sjávarstöðu, eða hækkun um 0.35 metra getur 4 ára regnskúr farið að valda flóðum og við 0.7 metra hækkun getur 3 ára regnskúr valdið flóðum. Eins og fram kom í grein 5.3 lætur nærri að sjávarstaða í Reykjavík hækki um 2 mm á ári og hækkunin kann að verða hraðari verði hnattræn hækkun sjávarstöðu mikil (tafla 5.8). Niðurstaða þessarar rannsóknar var að fráveitukerfi Reykjavíkurborgar munu verða fyrir neikvæðum áhrifum vegna hækkunar sjávar og aukinnar úrkomuákefðar.

Í síðari rannsókninni voru metin áhrif aukinnar flóðahættu og tíðni skúra fyrir fráveitukerfi miðbæjar Reykjavíkur[2]. Hönnun fráveitukerfa byggist á úrkomuskúrum af tiltekinni ákefð og endurkomutíma (sk. hönnunarskúrum). Niðurstöður straumfræðilegrar hermunar gaf til kynna að flæða myndi upp úr 6% af brunnum í hönnunarskúr með 5 ára endurkomutíma. Ef loftslagsbreytingar yllu því að ákafi rigningar myndi aukast um 20% myndi brunnum sem flæða í 5 ára skúr fjölga um 70% og rúmmál yfirborðsvatns aukast um 80%. Ef jafnframt var gert ráð fyrir þéttingu byggðar og 20% aukningu á afrennslisstuðli, þá gæti rúmmál flóða þrefaldast. Þessar niðurstöður staðfesta veikleika í gömlum fráveitukerfum með sameiginlegar regn- og skólplagnir.

Ofangreindar rannsóknir benda til þess að fráveita í a.m.k hluta Reykjavíkur sé ekki í stakk búin til að mæta hækkunum á sjávarborði eða aukinni úrkomuákefð og því er nokkur aðlögunarþörf í þessum kerfum. Þessar tvær rannsóknir byggðust þó á upplýsingum sem að sumu leyti eru úreltar[9] og eru því ófullnægjandi grunnur til að byggja stefnumótun á. Þetta rennir frekari stoðum undir fyrri ábendingar um að veruleg þörf sé á frekari rannsóknum á áhrifum loftslagsbreytinga á frárennsli.

11.1.2 Aðlögun – aðgerðir

Í fráveituhandbók Samorku[10] eru leiðbeiningar um hönnunarforsendur fráveitna. Ekki er sérstaklega fjallað um sjávarstöðuhækkun eða úrkomuákefð í leiðbeiningunum. Með hliðsjón af ofanskráðu er þó líklegt að ráðast þurfi í aðlögun á eldri fráveitukerfum. Aðgerðir til aðlögunar geta falist í[11,12]:

1. Breyttum hönnunarforsendum þar sem „loftslagsbreytingastuðull" er notaður við ákvörðun á stærð lagna[11].
2. Aðskilnaði við sjóinn (dæling, einstreymis- og lokubúnaður, rekstraröryggi).
3. Auknum afköstum kerfa (sverari lagnir, geymslur, ofanvatnslausnir, tvöföldun hitaveitukerfa).
4. Uppbyggingu svæða sem geta tekið við umframvatni[12].

Hafa ber í huga að endurbygging hefðbundinna lagnakerfa neðanjarðar veldur raski og óþægindum, ásamt því að vera kostnaðarsöm. Þjóðir heimsins hafa því verið að leita í æ ríkara mæli til blágrænna regnvatnslausna, sem byggjast á því að aftengja regnvatnslagnir frá skólplögnum og veita vatninu í náttúrulega farvegi ofanjarðar[13].

Blágrænar regnvatnslausnir eru m.a. grænþök, tjarnir, regnbeð og svelgir, sem hægja á rennsli og miðla vatni á yfirborði með ísigi í jarðveg og upptöku plantna. Auk vatnsmiðlunar stuðla blágrænar ofanvatnslausnir að líffræðilegum fjölbreytileika og geta bætt svæði til afþreyingar og heilsuiðkunar innan borgarmarka. Þær hafa því ýmsa kosti í borgarumhverfi.

Byggðaþróun og þétting byggðar hefur einnig áhrif á kröfur til frárennslis. Í grein 12.1.3 er rætt um sjávarflóð og skipulagsmál og tiltekin eru ýmis atriði sem standa þarf vel að. Má þar nefna skýr ákvæði um lágmarksgólfkóta á lágsvæðum og trygga eftirfylgni með þeim. Einnig sýnir reynslan að flætt getur í bílakjallara við truflanir í fráveitukerfi[14] og mikilvægt að hönnun þeirra taki tillit til þess. Á áhættusvæðum ætti að forðast að setja spennistöðvar, viðkvæm kerfi og geymslur sem tryggja eiga örugga varðveislu verðmæta í kjallara.

Eins og kom fram hér að framan vantar frekari rannsóknir sem leggja má til grundvallar aðgerðum til aðlögunar að loftslagsbreytingum. Skortur er á nauðsynlegum upplýsingum til að meta hvernig breyta þarf hönnunarforsendum fráveitu og ofanvatnskerfa. Meðal annars þarf frekari rannsóknir á aftakaúrkomu og áhrifum loftslagsbreytinga á hana, bæta þarf mælinet

Mynd 11.1 Dælustöð við ströndina í Reykjavík. Ljóst er að loftslagsbreytingar geta haft veruleg áhrif á frárennsli, en rannsókna er þörf til að meta aðlögunarþörf og leggja til grundvallar stefnumótun. (Mynd eign Veitna ohf. Birt með leyfi eigenda.)

úrkomu á þéttbýlisstöðum, betur þarf að skoða áhrif sjávarstöðubreytinga á frárennsli, huga þarf að uppfærslu hönnunarstuðla, bæði hvað varðar aftakaúrkomu og afrennsli. Loks skiptir máli að ábyrgð ólíkra aðila (veitna, sveitarfélaga og ríkis) sé vel skilgreind[15].

11.2 Orka

Áhrif loftslagsbreytinga á orkukerfið skiptast í framleiðslu, flutning og eftirspurn. Tafla 11.1 sýnir helstu þætti sem gætu skipt máli á Íslandi[16].

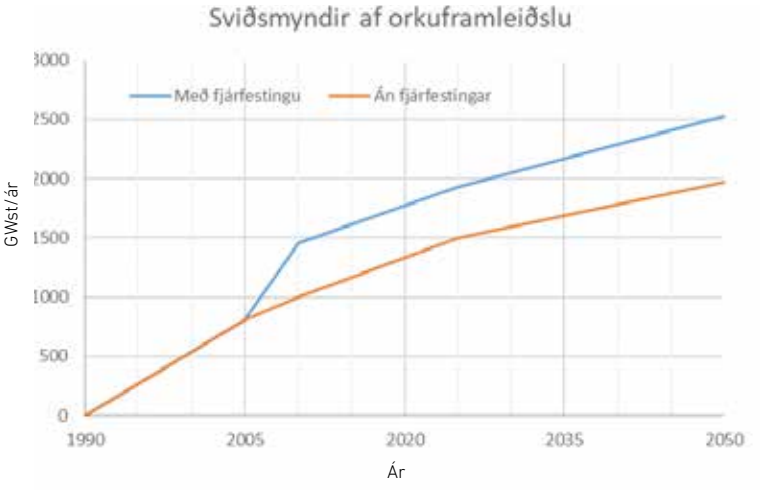
Vægi þessara þátta er mismikið og eins eru sum áhrif nokkuð vel þekkt (t.d. samspil bráðnunar jökla og vinnanlegrar vatnsorku) en önnur mun óvissari (t.d. áhrif hlýnunar á rafmagnstruflanir vegna slydduísingar). Þessi atriði verða rædd betur í næstu greinum.

11.2.1 Framleiðsla

Í skýrslu vísindanefndar frá árinu 2008 var fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á vatnsorkuframleiðslu hérlendis, sem byggist að langmestu leyti á virkjun jökulvatns. Raktar voru niðurstöður líkanreikninga til könnunar á áhrifum loftslagsbreytinga á afkomu jökla og þar með á afrennsli. Sviðsmyndir sem notaðar voru

Hluti orkukerfis	Innviðir	Loftslagsbreytingar	Áhrif
Framleiðsla	Vatnsaflsvirkjun	Aukning á rennsli vegna bráðnunar jökla	Aukin framleiðslugeta til skamms eða meðallangs tíma
		Minnkun á rennsli eftir miðja öldina þegar jöklar hafa minnkað	Minnkuð framleiðslugeta til langs tíma
		Minnkað rennsli vegna þurrka	Minni framleiðslugeta
	Vindorkuver	Aukin hvassviðratíðni	Truflun á framleiðslu
Flutningur	Raflínur	Aukin ísing, seltuálag, vindálag	Auknar líkur á flutningstruflunum
		Aukin úrkoma, hærri hiti	Auknar líkur á flutningstruflunum
Eftirspurn	Hitaveitur Virkjanir	Aukinn sumarhiti	Minni eftirspurn eftir orku til húshitunar Aukin eftirspurn eftir orku til loftkælingar

Tafla 11.1 Áhrif loftslagsbreytinga á þætti orkukerfa.



Mynd 11.2 Aukning orkuframleiðslu (GWst/ár) vatnsaflsvirkjana Landsvirkjunar 1990–2050, skv. sögulegri þróun 1990–2010 og sviðsmynd 2010–2050. Myndin var gerð árið 2012 og sýnir að orkuframleiðsla hefur aukist um 1000 GWst/ári fram til þess árs af völdum aukins rennslis og án þess að ráðist hafi verið í stækkun virkjana. Núverandi kerfi gæti annað viðbótaraukningu upp á um 800 GWst/ár (0.8TWst/ár) fram til 2050 en með nýrri fjárfestingu (þ.e. stækkun núverandi virkjana) bætast um 500 GWst/ári við.

í reikningunum leiddu til þeirrar niðurstöðu að rúmmál jökla miðhálendisins myndi rýrna verulega á þessari öld[17]. Afrennsli mun aukast að sama skapi en þeirrar aukningar gætir þó fyrst og fremst fram til 2050 því um miðbik aldarinnar munu jöklarnir hafa rýrnað mikið að flatarmáli og hörfað ofar í landið þar sem lofthiti er lægri. Líklegt er að fyrir lok aldarinnar fari aftur að draga úr rennsli. Í þessum rannsóknum kom einnig fram að aukið afrennsli og breyting á árstíðasveiflu þess mun leiða til verulegrar aukningar í nýtanlegri vatnsorku, en einnig þurfi að líta til breytinga á flóðaháttum og aðstæðum á virkjunarsvæðum í hlýnandi loftslagi, sem kann að kalla á sérstakar aðgerðir og nýjar hönnunarforsendur.

Eins og fram kemur í grein 5.1 hér að framan hafa rannsóknir síðan 2008 staðfest þessar niðurstöður í aðalatriðum. Á vegum norræna rannsóknaverkefnisins *Climate and Energy Systems (CES)*[18] var einnig kannað hvernig nýta mætti viðbótarvatnsafl sem leiðir af aukningu rennslis á komandi áratugum. Eldri spár um framtíðarrennsli til miðlunarlóna byggðust eingöngu á mældu rennsli fortíðar en á síðustu árum hefur verið tekin upp ný stefna sem tekur tillit til hlýnunar loftslags og þeirrar aukningar í rennsli jökuláa sem þegar hefur mælst[19].

Í CES-verkefninu og íslenska systurverkefninu *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á orkukerfi og samfélag (LOKS)* voru veðurgögn frá Íslandi greind og reiknaðist leitni hlýnunar 0.75°C/öld á tímabilinu 1950–1975 en 1.55°C/öld á tímabilinu 1975–2000. Samkvæmt sviðsmyndum var hlýnunin frá 2000 síðan áætluð 2.35°C/öld og gert var ráð fyrir að úrkoma ykist um 5%/öld. Sögulegum veðurgögnum var varpað til framtíðar skv. þessum leitnitölum og rennslisspár reiknaðar skv. leiðréttum veðurgögnum, sem taka tillit til líklegrar hlýnunar. Árstíðasveifla hita og úrkomu í hinum leiðréttu veðurgögnum var einnig fengin úr líkanreikningum á vegum CES- og LOKS-verkefnanna.

Í rennslisspánum kom fram 27–84% aukning rennslis fram til 2050 í einstökum virkjuðum jökulám. Greinileg breyting verður einnig á árstíðasveiflu rennslis í hlýnandi loftslagi, vorflóð vegna leysinga á hálendinu verða fyrr á árinu og rennslishámark síðsumars vegna jöklaleysingar fer vaxandi. Þá fer minniháttar vetrarflóðum fjölgandi.

Niðurstöður benda til að á tímabilinu 2010–2050 muni nýtanlegt vatnsafl aukast um 20%, en núverandi orkukerfi ræður einungis við um 38% þeirrar aukningar[19]. Við þessu má bregðast með því að auka afl virkjana og stækka miðlunarrými (mynd 11.2). Nú þegar er unnið að 100 MW stækkun Búrfellsvirkjunar og við hönnunina er byggt á rennslisspám fram til 2025 (mynd 11.3). Við hönnun er gert ráð fyrir að síðar verði hægt að stækka virkjunina um 40 MW til viðbótar, skv. spám um rennslisaukningu fram til miðrar aldarinnar. Þá hefur notkun á rennslisröðum sem taka tillit til hitabreytinga verið innleidd í hönnunarferli nýrra virkjana[20]. Ekki er talið nauðsynlegt að breyta hönnunarviðmiðum með tilliti til flóðahættu þar sem ekki hafa komið vísbendingar um að tíðni eða stærð sjaldgæfra aftakaflóða muni breytast til verri vegar vegna loftslagsbreytinga. Þess má geta að við hönnun vatnsaflsvirkjana í jökulám er tekið mið af mögulegum jökulhlaupum vegna eldgosa undir jökli.

Ekki er búist við merkjanlegum áhrifum loftslagsbreytinga á framleiðslu rafmagns frá jarðvarma en þó

Mynd 11.3 Búrfell og Búrfellsvirkjanir. (Mynd eign Landvirkjunar, birt með leyfi.)

kunna nýtingarmöguleikar á jarðhita að breytast við hop jökla.

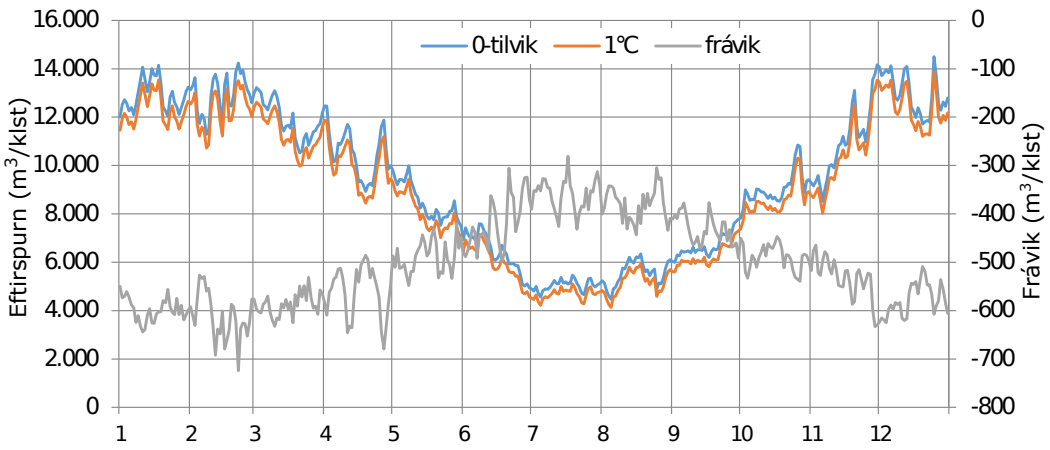
Á heimsvísu eru áhrif loftslagsbreytinga á orkugeirann veruleg og hafa í för með sér nýjar áskoranir og verkefni. Orkuskipti frá jarðefnaeldsneyti er án efa stærsta verkefnið, en jafnvel fyrir orkuframleiðslu með endurnýjanlegum orkugjöfum, eins og tíðkast hér á landi, er þörf á aðlögun vegna loftslagsbreytinga[21]. Dæmi um þetta er aðlögun orkuframleiðslu á Íslandi að breytingum í afrennsli vegna aukinnar jöklabráðnunar[22].

11.2.2 Flutningsnet raforku

Meginflutningslínur raforku á Íslandi eru í eigu Landsnets og spannar það net um 3300 km, en auk þess eru svæðisbundnar dreifiveitur[23]. Loftslagsbreytingar gætu hugsanlega aukið áhættu fyrir flutningskerfi raforku, en litlar skipulegar rannsóknir hafa farið fram á þessu hér á landi. Í norskri rannsókn[24] á áhrifum loftslagsbreytinga á orkuflutningsnetið voru helstu áhættuþættir taldir vera ísing, seltuálag, vindálag, snjóþyngsli, snjóflóð og skriðuföll. Niðurstöður úr norsku rannsókninni voru að líkur á ísingu myndu minnka við ströndina en aukast eitthvað inn til landsins. Hlýrri vetur myndu draga úr snjóþunga og hættu á snjóflóðum. Aukin úrkoma gæti hins vegar þýtt auknar líkur á skriðuföllum. Mikil óvissa væri um þróun vindálags.

Við uppbyggingu raforkuflutningskerfisins á Íslandi þarf að taka tillit til flestra þessara áhættuþátta, og að auki jarðvár (jarðskjálfta og hraunrennslis). Leiðir fyrir línur eru m.a. valdar með það til hliðsjónar að lágmarka þá áhættu sem kann að stafa af jarðvá, ofanflóðum, vindi og ísingu og snjóþyngslum[25]. Loftslagsbreytingar eru líklegar til þess að hafa áhrif á suma þessara þátta. Eins og fram kemur í 12.1.4 eru ekki líkur á því að það dragi úr snjóflóðahættu í bráð, en hins vegar gæti hætta á skriðuföllum tengdum bráðnandi sífrera aukist. Óvíst er hvort þetta hefur áhrif á flutningsnetið, því yfirleitt er forðast að hafa línur á hættusvæðum.

Á Íslandi eru mörg dæmi um skaða á raflínum þegar slydduísing hleðst á línur samfara ofankomu og miklum vindi. Rétt eins og í Noregi er óvíst hvort vindálag aukist en þó að hlýnun kunni að fjölga rigningardögum á kostnað snjókomudaga, er ólíklegt að það hafi úrslitaáhrif á álag vegna slydduísingar á línur. Önnur tegund ísingar er svokölluð skýjaísing sem á sér stað þegar undirkældir vatnsdropar setjast á mannvirki. Slíkt er fágætt neðan 300 m yfir sjávarmáli og hlýnun gæti hækkað þau mörk. Erfitt er að meta mögulegar



Mynd 11.4 Eftirspurn vatns miðað við 1°C hlýnun. Tölur á láréttá ásnum eru númer mánaðar.

breytingar á öðrum veðurþáttum sem valdið geta tjóni á raforkunetinu, s.s. eldingum og seltuálagi.

Hvað raforkuflutningsnetið varðar á mikilvæg áhættustýring sér stað þegar línum er valinn staður. Könnun í líkingu við þá norsku sem minnst var á hér að framan þyrfti þó að gera fyrir Ísland. Á grundvelli slíkrar könnunar væri betur hægt að taka tillit til mögulegra áhrifa loftslagsbreytinga á áhættuþætti við staðarval.

Óbein áhrif loftslagsbreytinga á raforkuflutningsnetið, eru m.a. þau að aðgerðir til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, t.d. með rafvæðingu samgangna, geta haft áhrif á þær kröfur sem gerðar eru til netsins[23].

11.2.3 Eftirspurn

Áhrif loftslagsbreytinga á orkueftirspurn er mjög tengd orkunotkun í byggingum. Þar er annars vegar átt við rafmagnsnotkun og hins vegar eftirspurn eftir orku til húshitunar. Ekki er talið að loftslagsbreytingar hafi teljanleg áhrif á eftirspurn orku í iðnaði, en búist er við óbeinum áhrifum á orkunotkun í samgöngum vegna orkuskipta, svo sem rafvæðingar bílaflotans og rafvæðingar hafna.

Samantekt fjölmargra rannsókna á áhrifum loftslagsbreytinga á eftirspurn eftir orku í byggingum sýnir að búast má við að þörf á orku til húshitunar muni minnka, en eftirspurn eftir rafmagni gæti aukist vegna aukinnar notkunar kælitækja[26]. Á Íslandi verður þó að teljast ólíklegt að orkuþörf skapist vegna loftkælingar innandyra.

Rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á eftirspurn hitaveitu á Íslandi sýna að áhrifin eru líkleg að verða nokkuð mikil þar sem eftirspurn er hita- og veðurháð. Rannsóknir á vegum Orkuveitu Reykjavíkur[4], þar sem spálíkani var beitt til að meta áhrif 1°C hækkunar á eftirspurn eftir heitu vatni, sýndu að eftirspurn gæti minnkað um 5.3% (mynd 11.4).

Áhrif loftslagsbreytinga á eftirspurn eftir rafmagni á Íslandi eru mun óvissari enda hafa fáar rannsóknir verið birtar um það efni. Vegna áherslu stjórnvalda á rafvæðingu samgangna er líklegt að eftirspurn muni aukast. Í rannsókn frá 2010, þar sem skoðuð var áætluð orku- og aflþörf tiltekins fjölda rafbíla, var lagt mat á getu rafdreifikerfisins til að þjóna breyttu álagi[27]. Niðurstöður sýndu að 50 þúsund rafbílar þyrftu ríflega 11.2 GWst á ári af raforku, sem er um 10% af öllu forgangsorkumagni hjá Orku náttúrunnar. Dreift yfir 20 ára tímabil samsvarar þetta um 0.5% orkuaukningu árlega. Miklu máli skiptir þó hvenær sólarhringsins hleðsluálagið fellur til og hvernig það samlagast öðru álagi. Hverfi höfuðborgarsvæðisins hafa ólíka getu til þess að ráða við aukið álag og niðurstöður bentu til þess að hönnunarforsendur gætu þurft endurskoðunar við, ef til stórfelldrar rafbílavæðingar kæmi.

Með gjaldskrárívilnun, þar sem notendum byðist ódýrari orka á lágannatímum, yrðu áhrifin á heildarálag gjörólík. Með svokallaðri snjallmælavæðingu er hægt að stýra verði í samræmi við álag. Samkvæmt útekt Veitna ohf. um raforkuþörf til ársins 2040, miðað við 11.5 þúsund rafbíla, mun kerfið þola fjölgun rafbíla, ef það er álagsstýrt og styrkt í samræmi við þróun eftirspurnar[28].

Í úttekt sem unnin var fyrir Landsnet um möguleika

á orkuskiptum á Íslandi[29] voru einnig skoðaðar sviðsmyndir um rafvæðingu alls bílaflotans, einkabíla, leigubíla og hópferðabíla, í heildina um hálf milljón ökutækja. Niðurstaðan var að rafvæðing allra samgangna gæti aukið orkunotkun árið 2030 um rúmlega 2700 GWst með 743 MW hámarksaflþörf. Tegundir hleðslustöðva, snjallmælavæðing o.þ.h. dró verulega úr hámarksaflþörf. Umfang rafbílavæðingar í þessum sviðsmyndum er mjög mismunandi og orkuþörfin því ólík. Í þessu samhengi kann að skipta máli hvaða stefnu stjórnvöld taka varðandi ívilnanir, skattlagningu og uppbyggingu innviða.

Í fyrrgreindri skoðun á orkuskiptum voru einnig skoðuð áhrif þess að ljúka rafvæðingu fiskimjölsverksmiðja og þess að auka notkun raforku í ýmsum iðnaði á kostnað jarðefnaeldsneytis[29]. Orkuþörf fiskimjölsverksmiðja var áætluð um 61 GWst og iðnaðar um 50 GWst. Hvað iðnaðinn varðaði var ekki ljóst hversu langt væri hægt að ganga í því að draga úr notkun jarðefnaeldsneytis.

Einnig voru skoðuð áhrif frekari landtenginga skipa, en orkuþörf skipa sem gætu skipt frá jarðefnaeldsneyti yfir í rafmagn með bættum landtengingum var metin 59 GWst og aflþörf um 17 MW. Samkvæmt niðurstöðum könnunar sem gerð var fyrir Faxaflóahafnir mætti allt að sjöfalda raforkusölu hafnanna og draga á sama tíma úr mengun og losun gróðurhúsalofttegunda. Verulegar umbætur þyrfti á flutningskerfi raforku til þess að sinna þessari orkusölu[30].

Loks er mögulegt að aðilar sem háðir eru kælingu á búnaði, s.s. gagnaver, leiti í frekara mæli á enn norðlægari slóðir til að minnka kælingaþörf og fá þannig hagkvæmari rekstur[31]. Hvaða áhrif þetta hefur á eftirspurn raforku á Íslandi ræðst þó af ýmsum þáttum sem ekki eru veðurtengdir, s.s. tækniþróun og endurbótum á flutningskerfum raforku í samkeppnislöndum.

Ofangreindar niðurstöður sýna að orkuskipti munu líklega hafa í för með sér aukna eftirspurn eftir raforku á næstu árum og áratugum. Þó að mestu muni um rafbílavæðingu, getur eftirspurn einnig aukist af öðrum sökum. Mikilvægt er að hafa í huga að orkuskiptum fylgir samdráttur í losun gróðurhúsaloftegunda og í sumum tilvikum mun minni mengun. Sem dæmi má nefna að ef öll skip sem að Faxaflóahöfnunum koma væru tengd við raforkunet myndi það leiða til samdráttar losunar um 17.5 kílótonn af CO_2 ígildum árlega og myndi einnig draga úr losun mengandi efna (SO_X og NO_X) og svifryks[30].

Loftslagsbreytingar og viðbrögð við þeim geta einnig dregið úr eftirspurn orku. Minni eftirspurn eftir heitu vatni til húshitunar gæti þó dregið úr raforkuþörf þar sem minna vatni er dælt í hitaveitu[4]. Einnig gæti þróun til sparneytnari raftækja haft áhrif til samdráttar í eftirspurn. Á veitusvæði Veitna hefur meðalnotkun heimilis farið úr 4900 kWh/ári árið 2009 niður í rúmlega 4200 kWh/ári árið 2016, einkum vegna breytinga í orkunotkun lýsingar og raftækja. Tilskipun ESB um bætta orkunýtni[32] hefur einnig haft áhrif á meginlandi Evrópu og í tengslum við Parísarsamkomulagið hafa verið sett fram metnaðarfull markmið í þessu sambandi[33].

11.3 Samgöngur

Samgöngur skiptast í vegasamgöngur, siglingar og flugsamgöngur og eru helstu innviðir samgangna vegakerfi, hafnir og flugvellir. Tafla 11.2 er byggð á væntanlegum áhrifum loftslagsbreytinga á samgöngugeirann í Evrópu[34]. Gera þarf þann fyrirvara að birtingarmyndir loftslagsbreytinga kunna að vera aðrar á Íslandi en á meginlandi Evrópu, auk þess sem aðstæður í samgöngum eru ólíkar. Þannig er óvíst hvort tíðni illviðra breytist á Íslandi, en óveður kunna hins vegar að breytast á siglingaleiðum til Íslands (sjá nánar umfjöllun í 12.1.1). Eins er hafís ekki lengur veruleg ógn fyrir strandsiglingar við Ísland, en samdráttur í hafís á öldinni kann að skapa möguleika á siglingum á norðurheimskautssvæðinu (sjá umfjöllun í grein 11.3.2). Í fyrri skýrslu vísindanefndar var bent á að borgarísjökum á siglingaleið nærri landinu kynni að fjölga sem kann að skapa hættu, sérstaklega ef skipaumferð eykst. Ekki er sérstaklega fjallað um flugsamgöngur í þessari samantekt.

11.3.1 Vegasamgöngur

Í skýrslu Vegagerðarinnar og Vegsýnar frá 2010 er mögulegum áhrifum loftslagsbreytinga á vegasamgöngur og vegagerð skipt í fimm flokka. Flokkarnir eru: áhrif á vetrarþjónustu, uppbygging vega og slitlaga, ræsi og brýr, vegir og mannvirki við strendur og aðrir þættir[35]. Eftirfarandi umfjöllun er byggð á þeirri skýrslu nema annað sé tekið fram.

Hvað varðar vetrarþjónustu falla veðuráhrif í tvo

Gerð samgangna	Innviðir	Loftslagsbreytingar	Áhrif á innviði
Vegasamgöngur	Vegir	Hlýrri sumur	Bráðnun slitlags Skemmri líftími slitlags, malbiks og brúa Aukin hætta á gróðureldum
		Aukin ofankoma og flóð	Skemmdir á vegum Flóð á vegum Flóð í ræsakerfum Skriðuföll 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	Hærri sjávarstaða	Skemmdir vegna flóða Rof á strandsvæðum Lokanir vega
	Fjallvegir	Minna frost í jörðu	Minni stöðugleiki undirlags Skriðuföll, m.a. vegna þiðnandi sífrera
Flugsamgöngur	Flugvellir	Hlýrri sumur	Aukin þörf á kælingu á jörð Skemmri líftími flugbrauta
		Aukin ofankoma og flóð	Flóðahætta Skemmdir á ræsum og brúm
		Aukin tíðni óveðra	Vindskemmdir á flugbrautum, aðreinum og byggingum
		Hærri sjávarstaða	Flóð á flugbrautum
		Almenn áhrif	Lokun flugvalla Hærri viðhaldskostnaður
Siglingar	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 hafa áhrif á skip og siglingar
		Ólík hlýnun lofts og sjávar	Breytingar á þokutíðni
		Færri dagar undir frostmarki	Minni vandamál vegna ísingar
		Minni hafís	Nýjar siglingaleiðir Lengra siglingatímabil
	Hafnir	Aukin illviðratíðni	Skemmdir á höfnum, brimvarnar- og skjólgörðum
		Hærri sjávarstaða	Flóð á hafnarsvæðum og skemmdir vegna flóða Rof á tengibrautum
		Lægri sjávarstaða	Dýpi innsiglingar og við kanta verður of lítið
		Aukin ofankoma, flóð/ skriðuföll	Flóðahætta
		Nýjar siglingaleiðir	Þörf fyrir stækkun/endurnýjun hafna fyrir stærri skip
		Almenn áhrif	Truflun á flutningskerfum Aukinn viðhalds- og viðgerðarkostnaður

Tafla 11.2 Yfirlit um áhrif loftslagsbreytinga á innviði samgangna í Evrópu.

flokka; snjómokstur og hálkuvarnir. Með hækkandi meðalhita má búast við því að úrkoma falli í auknum mæli sem slydda og rigning, ekki síst á láglendi. Þrátt fyrir að það hafi í för með sér minni þörf á snjómokstri getur það aukið þörf fyrir hálkuvarnir. Hálka verður til við ákveðnar veðuraðstæður sem annars vegar eru tengdar stöðugu hitastigi undir frostmarki, en hins vegar þegar veghiti fellur undir frostmark. Ef hitasveiflur um frostmark (svokallaðar *frostþíðusveiflur*) verða tíðari og meiri getur það aukið þörfina á hálkuvörnum.

Veðurfar hefur áhrif á burðarþol vega og endingu slitlaga. Skemmdir geta orðið vegna beinna áhrifa vatns þegar vatn kemst inn í burðarlög vega. Áhrifin verða mest við mikinn umferðarþunga. Frostþíðusveiflur hafa áhrif á niðurbrot steinefna í vegum og eru slit og skemmdir á burðarlögum vega vegna þungaumferðar mestar á vorin þegar efstu lög vega þiðna, sem og í umhleypingum. Veldur þetta broti í slitlagi og holumyndun. Líklegt er því að aukin úrkoma og hitasveiflur muni hraða niðurbroti vega, og þá sérstaklega samfara þungaumferð.

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 lagt til flóða í asahláku) og dreypni (sem er háð gróðurfari og því hvort jörð er frosin eða þiðin). Breytingar á úrkomuákefð, tegund úrkomu og hitasveiflum geta því haft áhrif á ræsi og brýr. Slíkt þarf þó að meta í hverju tilviki og greiningar hingað til hafa ekki gefið tilefni til þess að endurskoða hönnunarforsendur.

Breytingar á meðalrennsli eða ársúrkomu geta haft áhrif á grunnvatnsstöðu sem hefur áhrif aftur á burðarþol vega. Breytingar á vatnafari, svo sem vegna jöklabreytinga, geta einnig haft áhrif á innviði. Dæmi um þetta er hvarf Skeiðarár yfir í farveg Gígjukvíslar en fleiri dæmi eru til[36].

Vegir og önnur vegamannvirki við strendur geta orðið fyrir áhrifum vegna hækkunar sjávarborðs og aukinnar tíðni óveðra sem leiða til aukinnar tíðni flóða og strandrofs. Þessir áhættuþættir eru helst til staðar fyrir strandvegi og vegfyllingar í sjó.

Meðal annarra þátta má nefna aurskriður og grjóthrun, sem iðulega eru tengd miklu úrkomuveðri og valda hættu fyrir vegfarendur og truflun á vegasamgöngum. Því gætu loftslagsbreytingar fjölgað slíkum atburðum. Grjóthrun tengist einnig frostþíðuverkun í bergi,- og geta loftslagsbreytingar því haft áhrif á tíðni grjóthruns á vegakerfinu. Í þessu samhengi má benda á vaxandi hættu á skriðuföllum vegna þiðnandi sífrera sem rædd er í grein 12.1.4.

11.3.1.1 Aðlögun í vegasamgöngum

Í nágrannalöndunum hefur mikil rannsókna- og þróunarvinna átt sér stað um aðlögun í vegasamgöngum. Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar hefur stuðlað að því að fylgst hefur með þeirri vinnu, og að gert hefur verið yfirlit um líkleg áhrif loftslagsbreytinga á íslenska vegakerfið. Árið 2012 var lögð fram tillaga að stefnumörkun fyrir Vegagerðina um aðlögun að loftslagsbreytingum[37]. Í skýrslunni kemur fram að aðlögun að loftslagsbreytingum getur einkum verið með tvennu móti; annars vegar með aðgerðum til þess að koma í veg fyrir óæskilega atburði eða tjón, og hins vegar með aðgerðum til þess að draga úr afleiðingum óæskilegra atburða. Kostnaður vegna aðgerða eða aðgerðaleysis ræður för, en jafnframt er mikilvægt að taka tillit til hönnunarlíftíma mannvirkja og hraða loftslagsbreytinga. Þá er bent á það að styrkja þarf þekkingargrunn um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra, t.d. með auknum og samhæfðum skráningum á áhrifum veðurs á vegakerfi og umferð.

Lagt var til að Vegagerðin skrái í gagnagrunn skemmdir og frávik í rekstri vegakerfisins vegna veðurtengdra atburða, s.s. úrkomu og flóða, sjógangs og skriðufalla. Tilgangur slíks gagnagrunns er að unnt verði að viðhafa tölulega áhættugreiningu á áhrifum loftslagsbreytinga og þörf fyrir aðlögun eftir því sem tíminn líður. Almennt er hönnunarlíftími vegamannvirkja stuttur í ljósi hægfara loftslagsbreytinga. Ekki eru komnar fram vísbendingar um merkjanleg áhrif í nánustu framtíð, sem talið er að bregðast þurfi við á þessum tímapunkti, og því voru í áðurnefndri skýrslu ekki lagðar fram tillögur til aðgerða umfram það sem fram hefur komið um nauðsyn á uppbyggingu og viðhaldi þekkingar, skráninga og mælinga.

Bent er á að með reglulegu viðhaldi mannvirkja megi oft taka mið af loftslagsbreytingum án umtalsverðs kostnaðarauka, en vert er að árétta að með dýrari mannvirkjum sem ætlaður er langur líftími (s.s. brýr og jarðgöng) eykst óvissa um umfang og áhrif loftslagsbreytinga á líftíma mannvirkjanna.

Helstu atriði tillögu til stefnumótunar miðuðu að því að Vegagerðin tryggði að uppbygging og rekstur

vegakerfisins tæki mið af áhrifum loftslagsbreytinga með því að:

1. Stuðla að aukinni þekkingu starfsmanna á áhrifum veðurs og veðurtengdra þátta á vegakerfið, ásamt þekkingu á loftslagsbreytingum.
2. Sinna vöktun og skráningu á áhrifum veðurtengdra atburða á vegakerfið og rekstur þess.
3. Viðhafa áhættustýringu vegna veðurtengdra atburða sem miðast við að koma í veg fyrir óæskilega atburði eða að draga úr neikvæðum afleiðingum þeirra.
4. Sjá til þess að hugsanlegar uppfærslur á hönnunarforsendum og rekstrarþáttum sem loftslagsbreytingar kunna að leiða til skili sér í staðla og leiðbeiningar.
5. Taka þátt í og stuðla að samvinnu meðal annarra hagsmunaaðila um loftslagsbreytingar.

11.3.2 Siglingar

Hvað loftslagsbreytingar varðar eru tveir helstu áhættuþættirnir fyrir hafnarmannvirki aukin illviðratíðni og hækkun sjávarstöðu. Að því gefnu að þessir þættir breytist hægt má sinna þeim sem hluta af eðlilegu viðhaldi hafnarmannvirkja. Landris er þó einnig talið hafa áhrif og þá sérstaklega í Hornafirði. Vegna bráðnunar jökla (sjá kafla 5.1) er búist við töluverðu landrisi og mun það hafa áhrif á sjávarfallastrauma um Hornafjarðarós. Því getur þurft að bregðast við til að viðhalda dýpi í innsiglingunni til Hornafjarðarhafnar. Fjallað er um sjóvarnir í grein 12.1.3.6 en helstu verkefni, m.a. uppbygging sjóvarna, eru tiltekin í sjóvarnaáætlun. Uppbygging og lagfæringar á höfnum eru tekin fyrir í hafnaáætlun sem er eins og sjóvarnaáætlun hluti af samgönguáætlun.

Í umfjöllun um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á siglingar hefur verið mikið fjallað um væntanlega aukningu siglinga á norðurslóðum. Skiptast slíkar siglingar í tvo flokka, annars vegar siglingar innan norðurslóða *(inter-Arctic)* og hins vegar siglingar yfir íshafið *(trans-Arctic)*[38] milli Norður-Atlantshafs og Kyrrahafs. Vænt-ingar eru um að hvort tveggja geti aukist í kjölfar loftslagsbreytinga, annars vegar vegna aukinnar vinnslu auðlinda á norðurslóðum, svo sem olíu, og hins vegar vegna möguleika á styttri flutningsleiðum á sjó, þá aðallega fyrir vöruflutninga þar sem ávinningurinn er mikill vegna sparnaðar á eldsneyti þó að óvíst sé með tímasparnað[38]. Hvort tveggja myndi þó knýja á um umtalsverðar fjárfestingar í innviðum hafna fyrir sérhæfð og stór skip. Að auki er búist við að skemmtiferðaskip ferðist í auknum mæli á norðurslóðir.

Þrjár nýjar siglingaleiðir eru helst í umræðunni, norðvesturleiðin sem liggur að mestu við strendur Kanada; miðleiðin yfir norðurskautið (transpolar route) sem er líklegust að gagnast Íslandi mest[38] og norðausturleiðin sem liggur við strendur Rússlands. Nú þegar er norðausturleiðin opin fyrir siglingar síðsumars og hafa verið reistir innviðir í Rússlandi vegna þessa. Haustið 2013 fór sérhannað vöruflutningaskip norðvesturleiðina, en sú leið telst þó enn lokuð og væntanlega munu ár eða áratugir líða uns leiðin yfir norðurskautið (miðleiðin) opnast fyrir almennar siglingar[39].

Þrátt fyrir að spár geri ráð fyrir því að hafís hverfi að sumarlagi að mestu leyti á Norður- Íshafi á þessari öld[40] er óvíst hversu mikil áhrif auknar siglingar á norðurslóðum muni hafa á Íslandi, þá sérstaklega vegna þess að óvíst er hvort flutningsaðilar sjái sér hag í viðkomu á Íslandi. Einnig eru ýmsir aðrir óvissu- og áhættuþættir varðandi siglingar á norðurslóðum[38]. Þættir þessir tengjast meðal annars:

1. Öryggismálum.
2. Skilyrðum til siglinga svo sem vegna lausra ísjaka og myrkurs.
3. Kostnaði þar sem sérútbúin skip, sem hafa verið hönnuð til flutninga á hafísslóðum, eru dýrari en hefðbundin skip, bæði í smíði, rekstri og tryggingum.
4. Umhverfsmálum þar sem náttúra norðurslóða er afar viðkvæm fyrir öllu áreiti. Meðal áhyggjuefna eru mengun frá útblæstri, losun skaðlegra efna í sjóinn, losun sorps og skólps, mengunarslys af völdum olíu eða annarra hættulegra efna, tilfærsla lífvera sem eiga uppruna á öðrum svæðum og truflun vegna hávaða og árekstra.

Vegna þessa hefur Alþjóðasiglingamálastofnunin unnið á undanförnum árum að gerð sértækra reglna um smíði, búnað, siglingar og rekstur skipa á heimskautasvæðum[41]. Reglurnar, sem nýlega hafa verið samþykktar, gilda um kaupskip sem eru í alþjóðlegum siglingum og taka þær bæði til öryggis- og umhverfisþátta[42].

Einnig getur ýmislegt annað torveldað siglingar á norðurslóðum. Til dæmis krefjast rússnesk yfirvöld þess að fulltrúar þeirra fari um borð í öll skip sem sigla

Mynd 11.5 Ræktun spergilkáls á Flúðum. Líklegt er að jarðrækt og framleiðsla ýmissa fóður- og fæðuplantna muni halda áfram að aukast hérlendis. (Mynd í eigu Sölufélags garðyrkjumanna. Birt með leyfi eiganda.)

í lögsögu landsins og taki við stjórn þeirra á meðan. Þeir ákveða einnig hvort ísbrjótar séu kallaðir til aðstoðar[42].

Vegna allra þessara þátta er óvissa um bæði ávinning og áhættu fyrir Ísland vegna aukinna siglinga um norðurslóðir. Mikilvægt er þó fyrir Íslendinga að fylgjast vel með þróun siglinga á norðurslóðum og stuðla að því að þeim sé stýrt skynsamlega, með m.a. öryggi og lágmörkun umhverfisáhrifa í huga.

11.4 Frumatvinnuvegir

11.4.1 Landbúnaður og skógrækt

Eins og fram kom í kafla 9 hafa áhrif hlýnunar eftir 1990 verið umtalsverð á alla ræktun jarðargróðurs á Íslandi. Þessum veðurfarsbreytingum hafa þó einnig fylgt ákveðin neikvæð áhrif, svo sem aukið álag af sníkjudýrum á gróður og aukin þurrkvandamál við ákveðnar aðstæður. Í kafla 12.1.5 er fjallað um gróðureldа, en hættan á þeim eykst í takt við þurrka og aukinn gróður. Með frekari hlýnun mun ræktunaröryggi nytjategunda sem eru hér á norðurmörkum sínum aukast enn, og nýjar tegundir verða teknar til ræktunar í landbúnaði, garðyrkju og skógrækt. Hafa ber í huga að ef nýjar tegundir eru viðkvæmari fyrir sveiflum í veðurfari en þær sem fyrir eru getur tjónnæmi aukist. Eftir sem áður má telja líklegt að jarðrækt og framleiðsla ýmissa fóður- og fæðuplantna (mynd 11.5) muni halda áfram að aukast hérlendis, en þó mun sauðfjárrækt, mjólkurframleiðsla og hrossarækt væntanlega halda stöðu sinni lengi enn sem hinn hefðbundni landbúnaður. Ekkert bendir til þess að dýrahald muni verða fyrir neikvæðum áhrifum við þá hlýnun sem spáð er (sjá nánar í kafla 9.2).

Eins og fram kom í umfjöllun um áhrif séðra loftslagsbreytinga hérlendis á framleiðslu grænmetis til manneldis á síðustu áratugum eru það oft aðrir þættir en ræktunaraðstæður sem virðast ráða bæði afkomu og sveiflum í garðyrkjuframleiðslu (sjá nánar í kafla 9.2). Það sama á væntanlega við um rekstrarafkomu í öðrum frumatvinnuvegum, svo sem í landbúnaði og skógrækt. Þó að betri ræktunarskilyrði gefi vissulega forsendur fyrir fjölbreyttari landbúnaði og skógrækt þá ráða aðrir þættir; svo sem gengissveiflur, heimsmarkaðsverð á skógar- og landbúnaðarafurðum, stjórnvaldsákvarðanir um ytri umgjörð frumatvinnugreinanna, og ekki síst vilji bændanna sjálfra til nýsköpunar, vöruþróunar og markaðssetningar, sennilega meiru um hvernig þróunin verður til framtíðar. Það er því afar erfitt að spá fyrir hvaða áhrif væntanleg hlýnun mun hafa á þessar atvinnugreinar.

Meira þarf af þverfaglegum rannsóknum og greiningum sem tengja saman spár um loftslagsbreytingar og líkleg áhrif á þessa frumatvinnuvegi hérlendis, en slík vinna hefur verið mjög takmörkuð hingað til, m.a. miðað við hvað hefur verið gert í nágrannalöndum[43, 44, 45].

Það eru talsverðir möguleikar til aukinna mót-

Mynd 11.6 Á síðustu árum hefur verið mikill vöxtur í sjókvíaeldi. Myndin sýnir sjókvíar á Dýrafirði fyrir utan Þingeyri. (Ljósmynd: Sigurður Pétursson.)

vægisaðgerða gegn loftslagsbreytingum innan landbúnaðargeirans á Íslandi. Um 13% af nettólosun gróðurhúsalofttegunda frá Íslandi eru frá landbúnaði og skyldum greinum, fyrir utan losun frá framræstu votlendi, en losunin hefur minnkað lítillega frá 1990[46]. Af ýmsum ástæðum gætu landbúnaður, skógrækt, landgræðsla og endurheimt votlendis verið mun mikilvægari í að minnka nettólosun gróðurhúsalofttegunda hér á landi en mögulegt er í öðrum ríkjum Evrópu[47].

11.4.2 Fiskveiðar og fiskeldi

Fjallað er um sjávarútveg í köflum 2.5–2.7 og 4.7.2 í síðustu skýrslu vísindanefndar[48]. Þar er rakið samband þorskveiða og hlýinda fyrir miðbik síðustu aldar, en þorskgöngur frá Grænlandi juku þá stærð veiðistofnsins við Íslandsstrendur. Einnig var fjallað um áhrif kuldakasts á síðari hluta aldarinnar á síldveiðar og áhrif hlýnunar sjávar upp úr aldamótum á loðnugöngur. Loks var fjallað um hagrænar rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á fiskveiðar. Niðurstaða þeirrar umfjöllunar var sú að langtímaáhrif loftslagsbreytinga yrðu líklega ekki mikil, þótt samdráttur í fiskgengd gæti haft veruleg neikvæð áhrif á þjóðarbúið til skamms tíma litið.

Þrátt fyrir mörg dæmi um áhrif loftslagsbreytinga á útbreiðslu og framleiðni einstakra fiskistofna er, vegna flókins samspils í vistkerfinu, mjög erfitt að meta eða spá fyrir um almenn eða samanlögð áhrif loftslagsbreytinga í þjóðhagslegu samhengi. Takmarkaðar rannsóknir hafa verið gerðar á því hvernig veðurfar og veðurfarsbreytingar kunna að hafa áhrif á líf og afkomu þeirra sem tengjast fiskveiðum og fiskvinnslu á Íslandi, sem og á þjóðarbúskapinn í heild. Í Arctic Climate Impact Assessment[49] frá 2005 er fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á sjávarútveg og fiskeldi. Niðurstöður skýrslunnar benda til þess að hækkun á hita sjávar er líkleg til að hafa að jafnaði jákvæð áhrif á sjávarútveg á norðlægum slóðum. Sérstaklega er tekið fram að jákvæð áhrif á þorsk og uppsjávarfiska séu líkleg. Aðrar rannsóknir styðja þessa niðurstöðu[50], sem og umfjöllun í kafla 7. Séu þær breytingar sem orðið hafa í útbreiðslu fiskistofna á undanförnum árum teknar sem vísbendingar um það sem kann að verða á næstu árum má vissulega búast við auknum aðflutningi suðlægra fisktegunda inn á norðlæg, og þar með talin íslensk, hafsvæði. Makríllinn sem gengið hefur á Íslandsmið í miklum mæli undanfarin ár og verið mikil búbót – en útflutningsverðmæti makríls árið 2016 voru tæpir 10 milljarðar – er hins vegar viss undantekning enda ekki vitað um sambærilega göngustofna á nálægum hafsvæðum sem hingað gætu leitað. Hvað nýjar eða viðbótartegundir varðar er líklegt að í flestum tilfellum verði um að ræða stofna sem þola aðeins takmarkaða veiði. Miðað við núverandi fullnýtingu sjávarfangs ætti hins vegar ekki að gera lítið úr þeim möguleikum sem

kunna að felast í stofnum sem nú eru lítið sem ekkert veiddir. Eins og áður sagði hafa einungis fáar rannsóknir verið gerðar á þjóðhagslegum áhrifum á Ísland vegna hlýnunar sjávar, og hafa þær sýnt að þau verði fremur lítil, en þó jákvæð[51]. Þessar rannsóknir taka þó einungis til áhrifa vegna hlýnunar sjávar, en ekki súrnunar.

Í kafla 6 var fjallað um súrnun hafsins. Þar kom fram að kalkmyndandi lífverur eru taldar einkar viðkvæmar fyrir áhrifum súrnunar og lækkandi kalkmyndunarstigs. Í lífríki hafsins við Ísland eru fjölmargar kalkmyndandi tegundir. Sumar þeirra, t.d. hörpudiskur og kræklingur, eru nýttar sem matvæli og kalkþörungar eru teknir af hafsbotni til kalkframleiðslu. Margar aðrar tegundir eru hluti af fjölbreytilegu lífríki og hafa mismikla þýðingu í fæðuvef hafsins. Vegna eiginleika sjávar og lágs sjávarhita er kalkmettunarstig í hafinu við Ísland og í Norðurhöfum almennt náttúrulega lágt. Vegna aðstæðna í hafinu við Ísland er súrnun sjávar miklu örari þar en að jafnaði í heimshöfunum. Því er líklegt að sjórinn hér við land hafi súrnað meira eftir iðnvæðingu heldur en heimshöfin að jafnaði. Við þessar aðstæður er lítið svigrúm áður en súrnun leiðir til undirmettunar kalks. Líklegt er að neikvæð áhrif súrnunar á lífríki og vistkerfi sjávar komi fyrr fram á íslenskum hafsvæðum en að jafnaði í heimshöfunum. Það er erfitt að spá hver verði áhrif súrnunar hér við land. Þau geta birst óvænt eins og gerðist í ostruræktun við Kyrrahafsstrendur N-Ameríku. Áhrifin geta komið fram, án athygli, hjá tegundum í lífríkinu sem ekki eru nýttar. Í kafla 6 kemur því fram að áhrif súrnunar gætu haft neikvæð þjóðhagsleg áhrif, gagnstætt við áhrif hlýnunar.

Telja má líklegt að nýtanlegar auðlindir sjávar muni betur geta staðið af sér og aðlagast áhrifum loftslagsbreytinga ef unnt verður að halda áhrifum eða álagi frá þáttum eins og fiskveiðum, raski á búsvæðum og mengun í lágmarki[52].

Fiskveiðar, sem tekist hefur að stjórna þannig að þær séu sjálfbærar, eru til langs tíma litið án vafa betur undir það búnar að bregðast við eða standast áraun vegna loftslagsbreytinga en þær sem það á ekki við. Mikilvægt er því að veiðar á Íslandsmiðum verði ekki meiri en framleiðsla fiskistofna leyfir og að þær verði stundaðar með sjálfbær og ábyrg langtímanýtingarsjónarmið í huga. Í fyrri skýrslu vísindanefndar var þannig bent á að við óbreytt ástand væri tækifæri til þess að stækka þorskstofninn og auka afrakstur af honum. Skynsamleg stjórnun veiða gæti því skipt meira máli varðandi efnahagsleg og samfélagsleg áhrif en breytingar umverfisþátta vegna loftslagsbreytinga.

Reynslan sýnir að íslenskur sjávarútvegur er fremur kvikur og getur brugðist skjótt við þegar á reynir. Því má leiða að því líkur að hann ætti, alla vega á næstu áratugum, að geta brugðist við hægfara breytingum eins og þeim sem verða munu á lífríkinu samfara loftslagsbreytingum. Hvað hins vegar kann að verða í langri framtíð samfara áframhaldandi loftslagsbreytingum er á þessu stigi ekki unnt að segja fyrir um.

Fiskeldi er vaxandi atvinnugrein á Íslandi og voru útflutningsverðmæti þess tæpir 10 milljarðar króna árið 2016. Lax og silungur eru um 95% af útflutningstekjum greinarinnar. Á síðustu árum hefur verið mikill vöxtur í sjóvkíaeldi á laxi og ársframleiðslan jókst úr 3000 tonnum í 8400 tonn á árunum 2014 til 2016. Útgefin leyfi voru um 20 þúsund tonn snemma árs 2014 og eru nú um 40 þúsund tonn. Sótt hefur verið um frekari aukningu á eldi og haustið 2017 biðu umhverfismats umsóknir um samanlagt tugþúsunda tonna eldi[53]. Í umhverfismati er yfirleitt fjallað ítarlega um aðstæður í umhverfi, s.s. sjávarhita og hafstrauma[54]. Hins vegar eru áhrif loftslagsbreytinga á aðstæður til eldis ekki skoðaðar sérstaklega.

Áhrif loftslagsbreytinga á fiskeldi eru bein og óbein. Bein áhrif verða vegna hitabreytinga, súrnunar sjávar og breytinga á tíðni og styrk ofsaveðra og geta áhrifin bæði verið neikvæð (t.d. súrnun) og jákvæð. Breytingar á sjávarhita í átt til kjörhitastigs eldistegunda (t.d. laxfiska), gætu leitt til lítils háttar framleiðniaukningar, meðal annars við Ísland[55, 56, 57]. Hins vegar gæti súrnun sjávar unnið á móti þessum jákvæðu áhrifum hlýnunar. Óbein áhrif verða vegna breytinga á mörkuðum[57]. Óbein markaðstengd áhrif af loftslagsbreytingum á fiskeldi koma bæði fram í afurðaverði og í áhrifum á þær tegundir sem algengar eru sem fóður í fiskeldi en möguleg áhrif þessa á íslenskan iðnað eru óljós.

Ljóst er að frekari rannsókna er þörf á mögulegum efnahags- og samfélagslegum áhrifum loftslagsbreytinga á bæði sjávarútveg og fiskeldi.

Mynd 11.7 Íshellirinn í Langjökli. (Mynd eign Into the Glacier ehf. Birt með leyfi eigenda.)

11.5 Aðrir atvinnuvegir

11.5.1 Ferðaþjónusta

Fjölmargar rannsóknir hafa verið gerðar á áhrifum loftslagsbreytinga á ferðamennsku, allt frá rannsóknum á breytingum á eftirspurn ferðamanna til breytinga á mögulegu framboði afþreyingar og ferðamannastaða sem og samspili þarna á milli[58].

Rannsóknir á eftirspurn sýna að loftslag og veður hefur mikil áhrif á val ferðamanna á áfangastöðum. Sýnt hefur verið fram á að ferðamenn eru í auknum mæli að sækja á staði sem líklega hverfa vegna loftslagsbreytinga, svo sem jökla eða staði sem líklegt er að sökkvi í sjó[59]. Staðir sem byggjast á aðdráttarafli jökla eru sérstaklega viðkvæmir[60]. Veðurskilyrði til ferðamennsku hafa einnig áhrif þar sem aukinn lofthiti annars vegar getur haft jákvæð áhrif á eftirspurn[61] eftir útsýnisferðum á norðlægum slóðum, svo sem í Alaska[62], en neikvæð áhrif á eftirspurn og skilyrði til m.a. skíðaiðkunar. Rannsóknir sýna einnig að loftslag og veður skiptir meira máli fyrir ferðamenn af suðlægum slóðum en aðra, og að straumur ferðamanna er líklegur að aukast til norðlægra og kaldari áfangastaða[63]. Ennfremur er líklegt að breytingar á útbreiðslu dýrategunda vegna loftslagsbreytinga muni hafa áhrif á ferðaþjónustu[64].

Rannsóknir sem mikilvægar eru fyrir Ísland snúast að einhverju leyti um breytingar á möguleikum til jöklaferða og jöklatengdri afþreyingu sem og skíðaiðkunar og áhrifum þessara þátta á straum ferðamanna, innlendra sem erlendra[65] . Hafa ber þó í huga að loftslagsbreytingar og hop jökla hefur þó ekki aðeins áhrif á framboð af jöklaferðum til framtíðar, heldur einnig áhrif á aðgengi sem og öryggi ferðamanna í náinni framtíð[66,67]. Nú þegar höfum við séð áhrif loftslagsbreytinga á ferðamannastaði á Íslandi, svo sem á ásókn á skíðasvæðin sem eitt sinn voru í Kerlingarfjöllum og í Hveradölum.

Rannsóknir á efnahagslegum og samfélagslegum afleiðingum vegna áhrifa loftslagsbreytinga á ferðamennsku benda þó í heildina til jákvæðra efnahagslegra áhrifa í kaldari löndum a.m.k. til skamms tíma[68], en fáar slíkar rannsóknir er að finna sérstaklega fyrir Ísland[69]. Þó má færa rök fyrir því að þar sem jöklar eru eitt þeirra náttúrufyrirbrigða sem líkleg eru að hverfa vegna loftslagsbreytinga sé líklegt að ásókn í jöklaferðir muni aukast, en hver langtíma áhrifin geta orðið er óljóst. Jöklaferðir og jöklatengd afþreying er mikilvæg fyrir Ísland í efnahagslegu tilliti, þá sérstaklega fyrir ákveðin sveitarfélög en áætlað er að nálægt 600 þúsund manns hafi heimsótt Vatnajökulsþjóðgarð árið 2015[70] og 45 þúsund manns hafi heimsótt ísgöngin í Langjökli árið 2016 (mynd 11.7). Ljóst er því að frekari rannsókna er þörf.

11.5.2 Trygginga- og fjármálastarfsemi

Loftslagsbreytingar hafa þegar áhrif á rekstur vátryggingafélaga í formi tjóna af völdum storma, fellibylja, flóða, skógarelda, hitabylgna o.fl.[71], því auknar tjónagreiðslur koma fram í tjónatölum vátryggingafélaga og endurtryggjenda[72]. Afleiðingar loftslagsbreytinga fyrir vátryggingafélög eru í formi eigna- og/eða manntjóna, en einungis hluti tjónanna fæst bættur af vátryggingafélögum[71, 73].

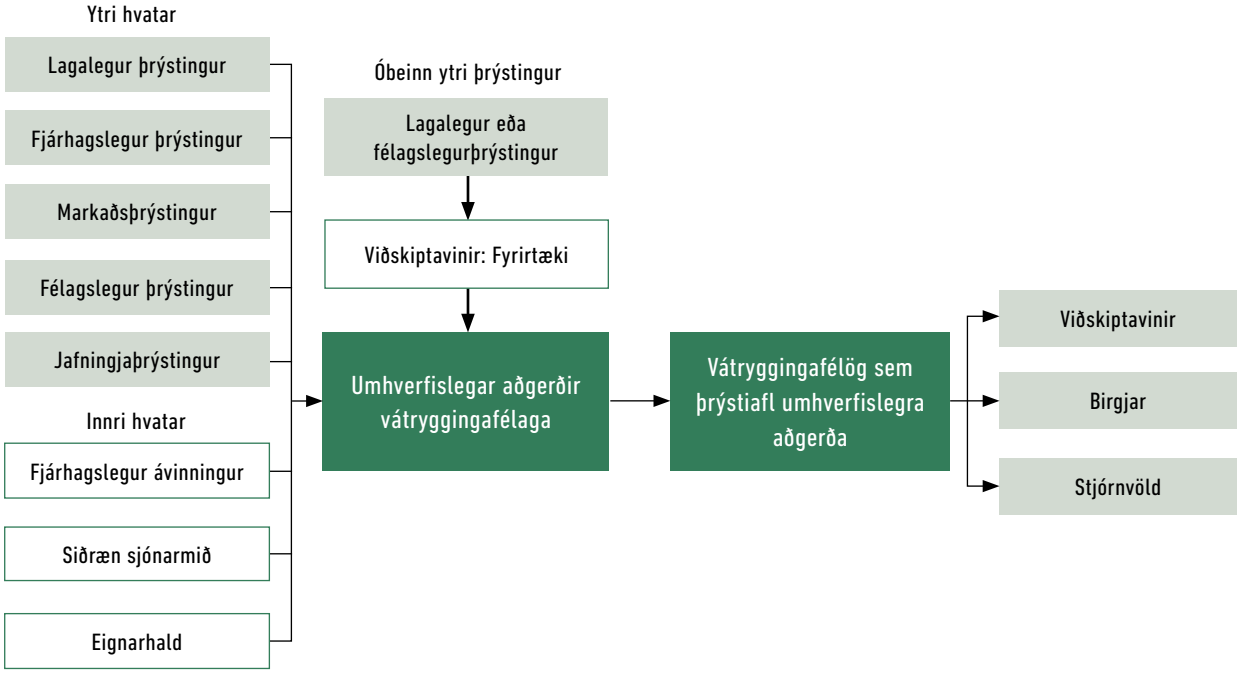
Milliríkjanefnd Sþ (IPCC) er meðal þeirra sem fjallað hafa um efnahagslegt tjón og tjón vátryggingafélaga í skýrslum sínum[74]. Milliríkjanefndin gerir ráð fyrir aukinni tíðni og alvarleika tjóna af völdum loftslagsbreytinga víða um heim[75]. Á sama tíma eru endurtrygginga- og vátryggingafélög talin gegna lykilhlutverki í að draga úr útblæstri gróðurhúsalofttegunda og því að stuðla að aðlögun að loftslagsbreytingum[76]. Í 8. grein Parísarsamkomulagsins er t.d. komið inn á mikilvægi þess að draga úr og meta tjón og skemmdir vegna loftslagsbreytinga og notkun vátryggingatengdra lausna í því skyni[77].

Í hvítbók Evrópusambandsins um aðlögun að loftslagsbreytingum kemur fram að nota megi vátryggingar og aðrar tegundir fjármálaþjónustu sem lið í að ná fram markmiðum um aðlögun, en einnig er tilgreint að í einhverjum tilvikum þurfi að koma til vátryggingalausnir studdar af stjórnvöldum eða að samevrópsk vátryggingalausn sé þróuð[78]. Spurningar um fáanleika (availability) og nægjanleika (adequacy) hamfaratrygginga í Evrópu og hvort þörf sé á úrbótum á markaði fyrir hamfaratryggingar eru meðal umræðuefna í grænbók Evrópusambandsins um náttúruhamfarir og hamfarir af mannavöldum[79].

Vátryggingafélög finna fyrir vaxandi þrýstingi um að þau axli ábyrgð á sviði loftslagsmála. Þrýstingurinn endurspeglast í skýrslum sem gefnar eru út af endurtryggjendum og vátryggingafélögum, vátryggingasamtökum, hugveitum um vátryggingamál o.fl., sem og skipulagningu og þátttöku vátryggingafélaga í ráðstefnum og hringborðsumræðum um loftslagsmál innan og utan vátryggingageirans. Sem dæmi má nefna sameiginlega hringborðsumræðu Efnahags- og framfara stofnunarinnar (OECD) og Genfarsamtakanna í tenglsum við COP21 í París í desember 2015, skýrslur Genfarsamtakanna o.fl.[80].

Hvötum sem þrýsta á vátryggingafélög í umhverfis- og loftslagstengdar aðgerðir má skipta upp í (1) ytri hvata, (2) innri hvata og (3) óbeinan þrýsting[81] (mynd 11.8). Lög, reglugerðir, alþjóðlegir sáttmálar, alþjóðlegir staðlar og leiðbeiningar falla undir ytri hvata. Hér má nefna lagalega kröfu Evrópusambandsins um ófjárhagslega upplýsingagjöf (non-financial reporting) sem meðal annars tekur til umhverfismála. Gerð er krafa um að skráð félög, sem og vátryggingafélög og bankar, gefi út slíkt efni[82]. Þessi krafa er einnig komin inn í hérlenda löggjöf, þ.e. lög um breytingu á lögum um ársreikninga, nr. 3/2006, með síðari breytingum[83]. Fjárhagslegur þrýstingur kemur frá endurtryggingafélögum til skaðatryggingafélaga, til að mynda í kjölfar kostnaðarsamra veðurtjóna[81]. Þá finna vátryggingafélög fyrir þrýstingi um nýjar lausnir, t.d. frá viðskiptavinum eða keppinautum. Sem dæmi um félagslegan þrýsting má nefna þrýsting frá umhverfisverndarsamtökum, fjölmiðlum, dómstólum eða samfélaginu. Einnig hefur komið fram jafningjaþrýstingur, þ.e. þegar fjármála- og vátryggingasamtök taka sig saman um áherslur á sviði loftslagsmála, en það setur þrýsting á félög innan viðkomandi geira um að þau vinni að lausnum sem komi atvinnugreininni í heild sinni og/eða viðskiptavinum til góða.

Varðandi innri hvata (mynd 11.8) þá geta áherslur á aðlögun að loftslagsbreytingum leitt til minni tjónakostnaðar hjá vátryggingafélögum og eru þar af leiðandi dæmi um fjárhagslegan ávinning. Siðræn sjónarmið koma einnig fram en þau fela í sér að vátryggingafélögum sé rétt og skylt að leggja lóð sín á vogarskálarnar til að draga úr neikvæðum afleiðingum loftslagsbreytinga. Eignarhald vátryggingafélaga er einnig talið skipta máli þegar kemur að hlutverki félaganna í að takast á við loftslagsbreytingar, þ.e. að gagnkvæm félög (mutual enterprises) geti leyft sér að horfa lengra fram í tímann hvað ábyrgð og lausnir varðar en félög með takmarkaða ábyrgð (limited liability companies) sem eru undir þrýstingi um að sýna jákvæða útkomu í ársfjórðungsuppgjörum[81]. Óbeinn ytri þrýstingur (mynd 11.8) hefur komið fram varðandi smærri vátryggingafélög, en það þýðir að þau grípa ekki til aðgerða nema fram komi lagaleg krafa á viðskiptavini, þ.e. fyrirtæki, um að þau grípi til aðgerða á sviði umhverfismála en það leiðir síðan til þess að vátryggingafélög bjóði lausnir á því sviði.[81] Óbeinn þrýstingur frá viðskiptavinum getur einnig komið til vegna tjóna sem viðskiptavinir eru ábyrgir fyrir eða tjóna sem hafa áhrif á rekstarskilyrði tryggðra fyrirtækja[84].



Mynd 11.8 Hvatar að umhverfislegum aðgerðum vátryggingafélaga og vátryggingafélög sem þrýstiafl um umhverfislegar aðgerðir. Myndin byggist á líkönum úr heimild 81.

Einnig er vert að benda á mikilvægi vátryggingafélaga sem þrýstiafls um umhverfislegar aðgerðir annarra aðila, nánar tiltekið viðskiptavina, birgja og samstarfsaðila og stjórnvalda (mynd 11.8). Ákvæði í skilmálum geta gert það að verkum að viðskiptavinir fá ekki bætur eða fái skertar bætur sé um síendurtekin tjón að ræða. Gera má kröfur til birgja eða samstarfsaðila á sviði tjóna um að þeir bjóði loftslagsvænar lausnir. Dæmi eru um það frá Svíþjóð að vátryggingafélag hafi bætt viðskiptavinum tjón vegna vatnsflóða, en endurkrafið stjórnvöld um hluta tjónakostnaðar þar sem stjórnvöld hafi ekki sinnt eðlilegri uppbyggingu eða viðhaldi innviða, t.d. á holræsakerfi[81].

Norræn fjármála- og vátryggingasamtök hafa fjallað um loftslagsmál, t.d. á ráðstefnum, í rannsóknum, með þróun lausna, í skýrslum og í sameiginlegri yfirlýsingu um loftslagsmál sem gefin var út árið 2009[85,86]. Í yfirlýsingunni kom fram að megináherslur norræna vátryggingageirans á sviði loftslagsmála verði á:

- Nýjar vörur bæði hjá líf- og skaðatryggingarfélögum
- Samþættingu loftslagssjónarmiða við fjárfestingastefnur
- Tjón og forvarnir taki mið af loftslagssjónarmiðum
- Loftslagsáhrif eigin rekstrar verði minnkuð og
- Að kerfisbundið verði fylgst með aðgerðum vátryggingageirans á þessu sviði.

Þess ber að geta að Samtök fjármálafyrirtækja á Íslandi (SFF) voru ekki aðili að loftslagsyfirlýsingu systursamtakanna á Norðurlöndum. Aftur á móti eru Sjóvá-Almennar tryggingar hf. (Sjóvá), Tryggingamiðstöðin hf. (TM), Vátryggingafélag Íslands hf. (VÍS) og Vörður tryggingar hf. (Vörður) aðilar að yfirlýsingu Reykjavíkur og Festu, miðstöðvar um samfélagsábyrgð fyrirtækja, um að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og að mæla árangur í loftslagsmálum[87].

Meðal lausna sem kostuð hefur verið af Norrænum vátryggingafélögum er VisAdapt™ en það er veflausn sem gerir einstaklingum kleift að meta hvernig loftslagsáhætta getur haft áhrif á heimili þeirra[88].

Hlutverk vátryggingafélaga í aðlögun að loftslagsbreytingum má í grófum dráttum skipta upp í þrjá flokka[89,90]:

1. **Kjarnastarfsemi:** Geta vátryggingafélaga til samtrygginga; áhættudreifing í gegnum alþjóðlegan vátryggingamarkað; framboð á nýjum vátryggingalausnum; forvarnaraðgerðir; geta til að auka vitund viðskiptavina og annarra haghafa á loftslagsáhættu;

áhrif til breytinga á hegðun vátryggingataka, t.d. með hærri iðgjöldum eða með undanþáguákvæðum eða skilyrtum ákvæðum í vátryggingaskilmálum; endurbyggingar í kjölfar tjóna með það að markmiði að fyrirbyggja framtíðartjón o.fl.

2. **Fjárfestingar:** Fjárfestingar í forvarnarverkefnum og viðvörunakerfum til þess að koma í veg fyrir tjón.
3. **Þekking:** Miðlun þekkingar á áhættugreiningu og áhættustjórnun; greining og miðlun upplýsinga um tjónatíðni, tegundir tjóna og eigna í áhættu; samstarf við stjórnvöld um skipulagsmál og endurbætur á byggingarreglugerðum o.fl.

Viðlagatrygging Íslands, opinberir sjóðir og einkarekin vátryggingafélög veita vátryggingavernd sem tengist verðurfarstjónum. Fjallað verður um þá þætti í næstu tveimur köflum, þ.e. um vernd veitta af opinberum aðilum annars vegar og vernd veitta af einkareknum vátryggingafélögum hins vegar.

11.5.2.1 Viðlagatrygging Íslands, opinberir sjóðir og loftslagsmál

Viðlagatrygging Íslands (VTÍ) starfar samkvæmt lögum nr. 55/1992 með áorðnum breytingum og reglugerð nr. 642/2017. VTÍ veitir vátryggingavernd vegna náttúruhamfara. Til loftslagstengdrar áhættu sem vátryggt er gegn, má nefna skriðuföll, snjóflóð og vatnsflóð, en einnig eru bætt tjón vegna eldgosa og jarðskjálfta.

VTÍ bætir ekki tjón vegna foks, en almennu vátryggingafélögin bjóða hins vegar slíkar vátryggingar.

Skylt er að vátryggja allar húseignir á Íslandi og er vátryggingarfjárhæðin sú sama og brunabótamat sem gefið er út af Þjóðskrá. Einnig er skylt að vátryggja innbú og lausafé hjá VTÍ, sé það brunatryggt hjá vátryggingafélagi. Brunatrygging innbúa og lausafjár er valkvæð og er vátryggingarfjárhæð VTÍ sú sama og vátryggingarfjárhæð vegna brunatryggingarinnar hjá viðkomandi vátryggingarfélagi. Auk þess er skylt að vátryggja hitaveitur, vatnsveitur, skolpveitur, raforkuvirki, hafnir og síma- og fjarskiptamannvirki, sem eru í meirihlutaeign ríkis eða sveitarfélags. Loks er skylt að vátryggja skíðalyftur og brýr sem eru lengri en 50 m. Vátryggingarfjárhæð þessara mannvirkja er sú sama og áætlað enduröflunarverð þeirra.

Vátryggðir bera eigin áhættu í hverju tjóni sem nemur 5% af bótafjárhæð, þó er lágmarksfjárhæð vegna innbús og lausafjár 20 þúsund krónur, 85 þúsund krónur vegna húseigna og 850 þúsund krónur vegna mannvirkja. Ársiðgjöld eru 0.25‰ af lausafé og húseignum og 0.20‰ af mannvirkjum[91]. Í lögum um VTÍ segir að þegar hús eða annað mannvirki sem skemmist er reist á stað sem almennt var vitað fyrir fram að var hættulegur með tilliti til náttúruhamfara, t.d. ef mannvirki á sama stað hefur oftar en einu sinni orðið fyrir sams konar tjóni, er heimilt að lækka bætur eða synja alveg bótakröfu. Sama á við um lausafé sem geymt er í húsi eða öðru mannvirki við þær aðstæður sem hér greinir [91,92]. Ofangreind ákvæði koma þó ekki alfarið í veg fyrir að Viðlagatrygging geti talist ábyrg fyrir tjónabótum þrátt fyrir að mistök hafi orðið við hönnun eða ákvörðun um staðsetningu mannvirkja.

Stjórn VTÍ hefur heimild til að veita styrki til forvarna, rannsókna og til fræðslu og þjálfunar björgunarliða. Heildarfjárveiting á ársgrundvelli til styrkja má ekki vera meiri en sem nemur 5% af bókfærðum iðgjöldum fyrra árs[93].

Ríkissjóður Íslands rekur ofanflóðasjóð, sbr. lög nr. 49/1997 um varnir gegn snjóflóðum og skriðuföllum, en um er að ræða forvarnarsjóð. Ofanflóðanefnd, sem skipuð er af ráðherra, ráðstafar fé úr sjóðnum. Það fer meðal annars í að kosta gerð hættumats, til kaupa og uppsetningar á tækjum og búnaði sem aflað er til rannsókna og eftirlits með ofanflóðahættu, undirbúning og framkvæmdir við varnarvirki, sem og kostnað við viðhald þeirra. Einnig greiðir ofanflóðasjóður kostnað við kaup eða eignarnám á húseignum, lóðum eða öðrum fasteignum og af kostnaði við flutning húseigna sem eru á hættusvæðum. Þá eru dæmi þess að ofanflóðasjóður hafi greitt hlutatjón vegna vatnavaxta, t.d. bætur á vegi og drenlögn[94].

Bjargráðasjóður er bótasjóður sem rekinn er samkvæmt lögum nr. 49/2009. Sjóðurinn er sjálfstæð stofnun í eigu Bændasamtaka Íslands og ríksins og er eignahlutur hvors aðila 50%. Bjargráðasjóði er skipt upp í tvær deildir, almenna deild (A-deild) og búnaðardeild. Almenna deildin veitir fjárhagsaðstoð til einstaklinga og félaga sem hafa orðið fyrir meiri háttar tjóni af völdum náttúruhamfara, s.s. tjóna á gjaldskyldum fasteignum, girðingum, túnum og rafmagnslínum sem tengist landbúnaði, á heyi sem notað er við landbúnaðarframleiðslu, vegna uppskerubrests af völdum

óvenjulegs kals, kulda, óþurrka eða þurrka. Af náttúrutengdum tjónum bætir Búnaðardeildin meiri háttar tjón sem einstaklingar eða félög verða fyrir vegna óvenjulegs veðurfars, þar með talið tjón á búfé og afurðum búfjár sem og uppskerutjón[95].

Ríkistjórn Íslands samþykkti árið 2016, í kjölfar tillagna um fyrirkomulag bóta til tjónþola í kjölfar náttúruhamfara, að stofna sérstakan hamfarasjóð sem sinna á forvörnum og samhæfingu verkefna sem tengjast náttúruvá, greiða kostnað opinberra aðila á þessu sviði, og greiða bætur[96]. Með stofnun sjóðsins eiga A-deild Bjargráðasjóðs og Ofanflóðasjóður að sameinast[97]. Af stofnun sjóðsins hefur enn ekki orðið.

11.5.2.2 Einkarekin vátryggingafélög og loftslagsmál

Einkarekin skaðatryggingafélög bæta einnig tjón vegna veðurs hafi viðskiptavinir keypt sér vernd sem innifelur slíka áhættu. Tafla 11.3 sýnir þau veðurtjón sem gætu orðið bótaskyld úr ýmsum eignatryggingum.

Sé horft til reynslu erlendis frá gæti einnig reynt á bótaskyldu úr rekstarstöðvunar- og ábyrgðartryggingum sem og slysatryggingum, auk þess að líftryggingafélög gætu þurft að greiða út dánarbætur[98].

Áhætta vegna flóða er ekki tryggð af skaðatryggingafélögum. Því gætu einstaklingar setið óbættir hjá garði sé um endurtekin tjón að ræða, þar sem slík áhætta er einnig undanskilin þeirri vernd sem VTÍ veitir.

11.5.2.3 Vátryggingafélög og aðlögun að loftslagsbreytingum

Lítið er til af fyrirliggjandi upplýsingum um aðlögun VTÍ, opinberra sjóða og einkarekinna vátryggingafélaga að loftslagsbreytingum sé tekið tillit til þeirra þriggja flokka sem nefndir voru að framan, þ.e. kjarnastarfsemi, fjárfestinga og þekkingar. Hér verður gerð grein fyrir þeim upplýsingum sem þegar liggja fyrir.

11.5.2.4 Viðlagatrygging Íslands, opinberir sjóðir og aðlögun

Kjarnastarfsemi VTÍ felur í sér að veita vernd og bæta tjón sem vátryggðir verða fyrir. Þó ekki sé minnst á hugtökin aðlögun eða loftslagsbreytingar á heimasíðu VTÍ í tengslum við þá vernd sem veitt er þá gegna sjóðasöfnun, samtrygging gegn skriðuföllum, snjóflóðum og vatnsflóðum, áhættudreifing og endurtryggingasamningar mikilvægu hlutverki hvað aðlögun varðar. Á milli 20 og 30 endurtryggjendur eru aðilar að endurtryggingasamningum VTÍ, en endurtrygginga-

	Vátryggingavernd		
Vátryggingategundir	Stormur	Skýfall og asahláka	Snjóþungi
Heimilistryggingar	Já	Já	Nei
Fasteigna- og húseignatrygging einstaklinga	Já	Já	Já
Húseigendatryggingar rekstraraðila	Já	Nei	Já
Sumarhúsatryggingar	Já	Já	Já
Lögboðnar brunatryggingar	Já*	Nei	Nei
Brunatrygging atvinnurekstrar (innbú)	Já	Nei	Nei
Kaskó- og húftryggingar ökutækja og vinnuvéla	Já	Nei	Nei
Húftryggingar skipa	Já	Nei	Nei
* Hægt er að kaupa viðbótarvernd gegn stormum, t.d. fyrir önnur hús á bændabýlum sem ekki falla undir húseigendatryggingar.			

Tafla 11.3 Vátryggingategundir og vátryggingavernd sem veitt er af íslenskum skaðatryggingafélögum. Byggt á upplýsingum frá Sjóvá. Sjá einnig tilvísun 98.

samningar eru endurnýjaðir árlega. Þá er VTÍ með samninga við verkfræðistofur og aðra aðila um framkvæmd tjónamats[99]. Meðal fjárfestinga sem VTÍ hefur ráðist í og myndi gagnast hvað aðlögun varðar er heildstæð viðbragðsáætlun við náttúruhamförum sem unnin var á árunum 2012–2014, en hún var unnin með þátttöku starfsmanna VTÍ, Almannavarnadeildar Ríkislögreglustjóra, matsmanna sem unnið hafa fyrir VTÍ, starfsmanna Veðurstofu Íslands, fræðimanna frá Háskóla Íslands og starfsmanna frá einkareknum vátryggingafélögum. Um er að ræða aðferð þar sem sviðsmyndir eru notaðar til að meta umfang og áhrif mögulegra atburða á VTÍ[100]. VTÍ er með vottað gæðastjórnunarkerfi samkvæmt ISO 9001 gæðastjórnunarstaðlinum, en auk þess að innleiða gæðastjórnunarkerfi þá hefur áhættugreining og áhættustýring verið efld. Með samtengingu við fasteignaskrá er hægt að kalla fram nákvæmar upplýsingar um byggingar á tilteknum svæðum, hvort heldur er íbúðar- eða atvinnuhúsnæði. Meðal upplýsinga sem kalla má fram eru upplýsingar um stærðir eigna, byggingarár, byggingarefni, GPS-hnit eigna, brunabótamat og fasteignamat en þessar upplýsingar auðvelda VTÍ að meta tjónnæmi eigna og áætla tjónakostnað[98].

Aukið samráð og miðlun þekkingar milli skipulagsyfirvalda og VTÍ væri mikilvægt með tilliti til aðlögunar að loftslagsbreytinum, þ.e. að tekið sé mið af vátryggingaáhættu VTÍ við gerð skipulagsáætlana[98].

11.5.2.5 Einkarekin vátryggingafélög og aðlögun

Niðurstöður rannsókna á áhrifum loftslagsbreytinga á íslensk vátryggingafélög hafa ekki verið gerðar opinberar svo að kunnugt sé. Leit að hugtökunum loftslagsbreytingar eða aðlögun á vefsíðum Sjóvá, TM, VÍS og Varðar skilar engum árangri sem er vísbending um takmarkaða áherslu á þessa þætti. Þó hefur komið fram í viðtalsrannsókn sem fram fór árið 2010 að áhrif loftslagsbreytinga á rekstur vátryggingafélaganna eru ekki talin mikil samanborið við önnur tjón, eins og vatnstjón, og þar af leiðandi hefur slíkri áhættu ekki verið mikill gaumur gefinn[101].

Vert er að benda á fjárfestingar í ýmsum forvarnarverkefnum og viðvörunakerfum sem vátryggingafélög hafa komið að, s.s. að senda út viðvaranir til viðskiptavina í fjölmiðlum um frágang á lausamunum sé von á stormum, kortlagningu á vindasömum svæðum við þjóðvegi landsins og viðvaranir vegna storma sem sendar eru til atvinnubílstjóra og ökutækja með tengivagna[101].

Ekki liggja fyrir upplýsingar um það hvort og þá hvernig greining á tjónaþróun, og þá ekki einvörðungu bótaskyldum tjónum, sé nýtt eða hvort slíkum upplýsingum sé miðlað til skipulagsyfirvalda, eða til að gera bragarbót á reglugerðum sem lúta að hönnun mannvirkja.

11.5.2.6 Samantekt um tryggingastarfsemi og aðlögun

Af framangreindu má ráða að kjarnastarfsemi VTÍ virðist ágætlega í stakk búin að styðja við aðlögun að loftslagsbreytingum, þrátt fyrir að aðlögun sé ekki tilgreind sérstaklega í þeim gögnum sem til skoðunar voru. Á þetta við um kjarnastarfsemi VTÍ, fjárfestingar og þekkingu.

Aðgengi að gögnum frá einkareknum vátryggingafélögum er takmarkaðra að öðru leyti en því að vitað er að einstaklingar og fyrirtæki geta keypt sér á frjálsum markaði tryggingavernd gegn tilteknum veðurfarsatburðum með kaupum á samsettum eignatryggingum. Viðskiptavinum stendur ekki til boða að kaupa vernd gegn flóðaáhættu hjá einkareknum vátryggingafélögum. Meðal þess sem vátryggingafélögin gera til að lágmarka tjón er að veita viðskiptavinum upplýsingar um mögulega áhættu á eignatjónum í tilviki storma og úrkomu og þannig reyna að stuðla að hegðun sem dregur úr áhættu viðskiptavina sem og vátryggingafélaga. Ekki er vitað hvort og þá með hvaða hætti tjónaupplýsingar eru nýttar til að draga úr áhættu af veðurtjónum með endurbótum á reglugerðum sem lúta að hönnun mannvirkja. Aukið gagnsæi á þessu sviði og samnýting upplýsinga gæti gagnast þegar kemur að aðlögun að loftslagsbreytingum, sem og miðlun upplýsinga varðandi áhættugreiningu og áhættustjórnun.

Áhætta tengd flóðum, sér í lagi síendurteknum flóðum, er áhætta sem ekki fæst bætt af VTÍ eða einkareknum vátryggingafélögum enda falla slík tjón ekki undir þau viðmið sem vátryggingafélög starfa eftir, þ.e. að tjón séu skyndileg, ófyrirséð og gerist án vilja. Í þessum tilvikum færist krafan yfir á eigendur eigna um að þeir geri ráðstafanir til að staðsetja eignir ekki þar sem þær verða fyrir reglubundnum flóðum eða að settar séu upp varnir til þess að verja þær fyrir slíkum tjónum[102]. Hér gæti samstarf VTÍ, einkarekinna vátryggingafélaga og skipulagsyfirvalda gagnast fyrir aðlögun að loftslagsbreytingum, því vegna stærðarmunar

þá eru sveitarfélög misvel í stakk búin til þess að samþætta áherslur um aðlögun í skipulagsáætlunum[103].

11.6 Önnur samfélagstengd mál

Í fyrri skýrslum vísindanefndar var fjallað stuttlega um önnur samfélagsleg áhrif loftslagsbreytinga[104]. Bent var á að loftslagsbreytingar kynnu að hafa ýmsan kostnað í för með sér, bæði til að standa straum af aðlögun og bæta það tjón sem loftslagsbreytingar kunna að valda. Einnig væri líklegt að alþjóðasamfélagið myndi gera meiri kröfur til iðnríkja um fjármögnun aðgerða til að stemma stigu við loftslagsbreytingum eða aðlagast þeim. Árið 2010 stofnuðu Sameinuðu þjóðirnar Græna loftslagssjóðinn[105] sem meðal annars er ætlað að aðstoða þróunarlönd við að bregðast við loftslagsbreytingum. Íslenska ríkið hefur greitt til sjóðsins[106]. Þá mun kostnaður fylgja því að uppfylla þær skuldbindingar sem Íslendingar hafa tekið á sig um samdrátt á losun gróðurhúsalofttegunda[107], eða því að kaupa losunarheimildir náist samdrátturinn ekki. Mótvægisaðgerðir og alþjóðamál eru rædd frekar í kafla 10.4.

Einnig var í fyrri skýrslum bent á að einn fylgifiskur loftslagsbreytinga yrði búferlaflutningar frá þeim svæðum sem verða fyrir mestu tjóni til svæða sem standa betur. Tekið var fram að Ísland og önnur norðlæg lönd væru í síðari hópnum. Í greinum 3.6 og 3.9 var rætt um skaðleg áhrif loftslagsbreytinga á samfélög sem hafa takmarkaða aðlögunargetu, eru háð loftslagstengdum gæðum, en eru skammt á veg komin í þróun. Fram kom að orsakasamhengið er sjaldnast einfalt og oftast sé áraun tengd loftslagsbreytingum einn margra þátta sem valdi álagi á berskjölduð þjóðfélög. Flóttamannastofnun Sameinuðu þjóðanna hefur bent á að fjöldi fólks flýr vegna umhverfisbreytinga, s.s. flóða, þurrka og annarra náttúruhamfara. Hluta af þessum umhverfisbreytingum má líklega rekja til loftslagsbreytinga. Síðan 2008 hafi rúmlega 26 milljón manns þurft að flytja búferlum árlega vegna náttúruhamfara, fjöldinn hafi aukist á síðustu árum og verði ekki gripið til aðgerða muni aukningin halda áfram[108].

Tilvísanir

1 Grétar Mar Hreggviðsson 2010. Áhrif hækkunar sjávar á fráveitukerfi, BSc ritgerð, Háskólinn í Reykjavík.

2 Ásta Ósk Hlöðversdóttir, Brynjólfur Björnsson, Hrund Ólöf Andradottir, Jónas Elíasson og Philippe Crochet 2015, Impacts of climate change on combined sewer systems in Reykjavik, Water science and technology 71(10) 1471-1477. doi: 10.2166/wst.2015.119. Sjá einnig umfjöllun í kafla 12.1.

3 B. Kløve, H. M. L. Kvitsand, T. Pitkänen, M. J. Gunnarsdottir, S. Gaut, S. M. Gardarsson, P. M. Rossi, I. Miettinen. 2017. Overview of groundwater sources and water-supply systems, and associated microbial pollution, in Finland, Norway and Iceland, Hydrogeology Journal 25(4): pp 1033–1044; M. J. Gunnarsdottir, K. M. Persson, H. O. Andradottir, S. M. Gardarsson, 2017, Status of small water supplies in the Nordic countries: Characteristics, water quality and challenges, International Journal of Hygiene and Environmental Health, 220 (8) 1309-1317.

4 Edda S. P. Aradóttir, glærukynning apríl 2016.

5 Sjá umfjöllun um aukna úrkomu samfara hugsanlegri fækkun úrkomudaga í grein 4.5.1.

6 Sjá t.d. María J. Gunnarsdóttir, Hrund Andradóttir og Sigurður M. Garðarsson. 2008. Sjúkdómsvaldandi örverur í grunnvatni. Árbók VFÍ/TFÍ 2008, bls. 241-250; Maria J. Gunnarsdottir, Sigurdur M. Gardarsson, Jamie Bartram, 2015, Developing a national framework for safe drinking water – Case study from Iceland, In International Journal of Hygiene and Environmental Health, 218, 196-202; Maria J. Gunnarsdottir, Sigurdur M. Gardarsson, Gunnar St. Jonsson, Jamie Bartram. 2016. Chemical quality and regulatory compliance of drinking water in Iceland, International Journal of Hygiene and Environmental Health, 219, 8,724-733; B. Kløve, H. M. L. Kvitsand, T. Pitkänen, M. J. Gunnarsdottir, S. Gaut, S. M. Gardarsson, P. M. Rossi, I. Miettinen. 2017. Overview of groundwater sources and water-supply systems, and associated microbial pollution, in Finland, Norway and Iceland, Hydrogeology Journal 25(4): pp 1033–1044; M. J. Gunnarsdottir, K. M. Persson, H. O. Andradottir, S. M. Gardarsson, 2017, Status of small water supplies in the Nordic countries: Characteristics, water quality and challenges, International Journal of Hygiene and Environmental Health, 220 (8): 1309-1317.

7 B. Kløve, H. M. L. Kvitsand, T. Pitkänen, M. J. Gunnarsdottir, S. Gaut, S. M. Gardarsson, P. M. Rossi, I. Miettinen. 2017. Overview of groundwater sources and water-supply systems, and associated microbial pollution, in Finland, Norway and Iceland, Hydrogeology Journal 25(4): pp 1033–1044.

8 Lög um uppbyggingu og rekstur fráveitna, 2009. Nr 9, Lagasafn. Íslensk lög 20. janúar 2017. Útgáfa 146a.

9 Sérstaklega er hér átt við landupplýsingar. Fjóla Jóhannesdóttir og Íris Þórarinsdóttir, Um loftslagsbreytingar og áhrif á fráveitu – hugleiðingar til Vísindanefndar. Minnisblað 20. September 2017. Sjá einnig umfjöllun í grein 12.1.7.

10 Sjá Brynjólfur Björnsson, Snorri Sigurjónsson og Ásta Ósk Hlöðversdóttir, 2010, Hönnun og hönnunarforsendur fráveitulagna Fráveituhandbókar Samorku 2. Kafli (www.samorka.is/utgafa-og-midlun/utgefid-efni/handbaekur).

11 Sjá tilvísun 4 og umfjöllun um úrkomutengd flóð í kafla 12.1.1.

12 Reynir Sævarsson, glærukynning apríl 2016.

13 Eyrún Pétursdóttir 2016 Lykilþættir í innleiðingu blágrænna ofanvatnslausna á Íslandi, MS ritgerð í Umhverfisverkfræði, Háskóli Íslands.

14 Sjá t.d. „Vatnið náði tveggja metra dýpt“ (mbl, 12. Mars 2007, www.mbl.is/greinasafn/grein/1134234).

15 Byggt á upplýsingum í minnisblaði í heimild 9. Sjá einnig umfjöllun í grein 12.1.7.

16 Byggt á: European commission 2013 Adapting infrastructure to climate change, Commission staff working document.

17 Skýrsla vísindanefndar 2008. grein 4.7.6. Sjá nánar tilvitnun 3 í kafla 3.

18 Þorsteinn Þorsteinsson og Halldór Björnsson (ritstj.) 2011. Climate Change and Energy Systems – Impacts, Risks and Adaptation in the Nordic and Baltic Countries. Norðurlandaráð, Kaupmannahöfn. TemaNord 2011:502.

19 Óli Grétar Blöndal Sveinsson, Úlfar Linnet & Elías B. Elíasson 2011. Hydropower in Iceland. Impacts and Adaptation in a Future Climate. Sjá kafla 10 í heimild 18.

20 Óli Grétar Blöndal Sveinsson 2015. Energy in Iceland: Adaptation to Climate Change DNC Policy Brief DNC2015/04.

21 Braun, M. & Fournier, E. 2016. Adaptation Case Studies in the Energy Sector – Overcoming Barriers to Adaptation, Report presented to Climate Change Impacts and Adaptation Division, Natural Resources Canada, 114 p.

22 Sjá Fine-tuning observations to better manage and design hydroelectric assets, - kafli 2 í heimildinni hér að ofan.

23 Landsnet, ársskýrsla 2015.

24 Harold Mc Innes, Bruun G, Colleuille H, Dobler A , Haakenstad H, Hisdal H, Jaedicke C, Welgaard Ø 2015. Klimaendringenes betydning for Statnett sine overføringsanlegg METreport 27-2015 ISSN 2387-4201.

25 Sjá t.d. grein 4.13 um áhættu- og öryggismál í Ólafur Árnason 2009 Suðvesturlínur. Styrking raforkuflutningskerfisins á Suðvesturlandi – Frummatsskýrsla. Efla hf.

26 Fazeli R., J. Hallgrímsson J. og Davidsdóttir, B. 2016. Residential energy demand for space heating in the Nordic countries: Accounting for interfuel substitution, Renewable and Sustainable Energy Reviews 57:1210-1226.

27 Guðleifur Kristmundsson og Valgerður Einarsdóttir 2010. Innleiðing rafbíla: vannýtt straumgeta í rafdreifikerfi Orkuveitu Reykjavíkur, Árbók VFÍ/TFÍ 2010. bls 253-260.

28 Fjalarr Gíslason, Fagstjóri rafmagns, Veitur Ohf. Glærukynning.

29 VSO Ráðgjöf. 2016. Möguleg orkuskipti á Íslandi. Samantekt á aflþörf og sparnaði í losun CO_2. Kerfisáætlun 2016-2025 Landsnet-16062.

30 Darri Eyþórsson 2016. Forkönnun á aukinni notkun endurnýjanlegra orkugjafa við Faxaflóahafnir. Faxaflóahafnir (www.faxafloahafnir.is/wp-content/uploads/Forkonnun-Orkumal-i-hofnum-loka.pdf). Sjá einnig Gísli Gíslason, Minnisblað varðandi útblástur skipa og landtengingar skipa. Faxaflóahafnir 27. apríl 2016.
31 Sjá t.d. www.stjornarradid.is/raduneyti/atvinnuvega-og-nyskopunarraduneytid/fyrri-radherrar/stok-raeda-fyrrum-radherra/2012/02/21/Formleg-opnun-Verne-gagnavers/.
32 Sjá ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive.
33 Sjá europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-3986_en.htm.
34 Aðlagað frá töflu 6.2 í European commission 2013. Adapting infrastructure to climate change, Commission staff working document.
35 Skúli Þórðarsson 2010. Loftslagsbreytingar og vegagerð: veðurfarsaðlögun í starfsemi Vegagerðarinnar, Vegsýn og Vegagerðin.
36 Sjá heimild 35 og umfjöllun í grein 5.1.3.
37 Skúli Þórðarsson 2012. Loftslagsbreytingar og vegagerð: Tillögur um aðgerðir til aðlögunar, Vegagerðin og Vegsýn.
38 Kjartan Elíasson 2014. Mapping Evaluation of the Future Arctic, Implications for Iceland, Thesis submitted in partial fulfillment of a Magister Scientiarum degree in Environmental Engineering, University of Iceland.
39 Hagsmunir Íslands á norðurslóðum - Tækifæri og viðsjár Drög. Ráðherranefnd um málefni Norðurslóða 2015.
40 Sjá hliðargrein 4B Hafís á norðurslóðum.
41 Þessar reglur eru á ensku kallaðar Polar Code, sjá www.imo.org.
42 Hagsmunir Íslands á norðurslóðum - Tækifæri og viðsjár Drög. Ráðherranefnd um málefni norðurslóða 2015.
43 Barua, SK. o.fl. 2014. Climate change and primary industries: Impacts, adaptation and mitigation in the Nordic countries. TemaNord, 2014:552, 199. doi:10.6027/tn2014-552.
44 Solberg, S. Ø. o.fl. 2016. Plant genetic resources and climate change. Stakeholder perspectives from the Nordic and Arctic regions. In A. Bari, A. B. Damania, M. Mackay & S. Dayanandan (Ritstj.), Applied Mathematics and Omics to Assess Crop Genetic Resources for Climate Change Adaptive Traits (bls. 13-24). Boca Raton, U.S.A.: CRC Press.
45 Weslien, Jan, Finér, Leena, Jónsson, Jón. Á., Koivusalo, Harry, Laurén, Ari, Ranius, Thomas & Sigurdsson, Bjarni D. 2009. Effects of increased forest productivity and warmer climates on carbon sequestration, run-off water quality and accumulation of dead wood in a boreal landscape: A modelling study. Scandinavian Journal of Forest Research, 24, 333-347.
46 Hellsing, Vanda Úlfrún Liv, o.fl. 2017. National Inventory Report. Emissions of Greenhouse Gases in Iceland from 1990 to 2015. Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Umhverfisstofnun.
47 Sjá nánar grein 10.4.
48 Sjá V2008, bls 45–53 og 103–104.
49 ACIA 2005. Arctic Climate Impact Assessment, Cambridge University Press, Cambridge.
50 Sjá t.d. Cheung, W. W., Lam, V. W., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R. E. G., Zeller, D. & Pauly, D. 2010. Large-scale redistribution of maximum fisheries catch potential in the global ocean under climate change. Global Change Biology 16(1), 24-35; Barange, M., Merino, G., Blanchard, J. L., Scholtens, J., Harle, J., Allison, E. H., Allen, J.L., Holt, J. & Jennings, S. 2014. Impacts of climate change on marine ecosystem production in societies dependent on fisheries. Nature Climate Change 4(3), 211.
51 Arnason, R. 2003. Global warming and North Atlantic fisheries: attempting to assess the economic impact. A paper presented at the FAME workshop on Climate Changes with Focus on Natural Resources: The Biological Dimensions and the Economic Consequences, Centre for Fisheries and Aquaculture Management and Economics, University of Southern Denmark; Arnason, R. 2007. Climate change and fisheries: Assessing the economic impact in Iceland and Greenland. Natural Resource Modeling 20, 163-197; Agnarsson, S. & Arnason, R. 2006. The role of the fishing industry in the Icelandic economy, in Advances in Fisheries Economics: Festschrift in Honour of Professor Gordon R. Munro (eds T. Bjørndal, D. Gordon, R. Arnason & U.R. Sumaila). Wiley-Blackwell, bls. 239-256.
52 McGoodwin, J. R. 2007. Effects of climatic variability on three fishing economies in high-latitude regions: Implications for fisheries policies. Marine Policy 31(1), 40-55; Allison, E.H., Perry, A.L., Badjeck, M.C., Adger, W.N., Brown, K., Conway, D., Halls, A.S., Pilling, G.M., Reynolds, J.D., Andrew, N.L. & Dulvy, N.K. 2009. Vulnerability of National Economies to the Impacts of Climate Change on Fisheries. Fish and Fisheries 10, 173-196.
53 Leó Alexander Guðmundsson, Ragnhildur Þ. Magnúsdóttir, Jóhannes Guðbrandsson og Sigurður Már Einarsson, 2017, Erfðablöndun eldislaxa af norskum uppruna við Íslenska laxastofna. Haf- og Vatnarannsóknir Reykjavík. HV 2017 - 031.
54 Sjá t.d. Fiskeldi Austfjarða, Frummatsskýrsla vegna eldis á allt að 21000 tonnum af laxi í Berufirði og Fáskrúðsfirði. www.skipulag.is/skipulagsstofnun/mal-i-kynningu/safn/allt-ad-21000-tonna-framleidsla-a-laxi-i-berufirdi-og-faskrudsfirdi.
55 Klinger, D. H., S. Levin & J. Watson. 2017. The Growth of Finfish in Global Open-Ocean Aquaculture under Climate Change. Proceedings of the Royal Society B. 284.
56 Klinger, D. H., S. Levin & J. Watson. 2017. The Growth of Finfish in Global Open-Ocean Aquaculture under Climate Change. Proceedings of the Royal Society B. 284.
57 Food and Agricultural Organization 2016. Climate change implications for fisheries and aquaculture, FAO fisheries and agriculture circular.
58 IPCC, 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A:Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA, 1132 bls.

59 Harvey L., J. Dawson, E.J. Stewart, P. Maher & M. Lueck. 2010. Last-chance tourism: the boom, doom, and gloom of visiting vanishing destinations, Current Issues in Tourism 13(5) doi.org/10.1080/13683500903406367.
60 Wang, S., Y. He & X. Song, 2010. Impacts of climate warming on Alpine glacier tourism and adaptive measures: a case study of Baishui Glacier No. 1 in Yulong Snow Mountain, Southwestern China. Journal of Earth Science, 21(2), 166-178.
61 Amelung, B., S. Nicholls & D. Viner, 2007. Implications of global climate change for tourism flows and seasonality. Journal of Travel Research, 45(3), 285-296.
62 Yu, G., Z. Schwartz & J.E. Walsh, 2009a. A weather-resolving index for assessing the impact of climate change on tourism related climate resources. Climatic Change, 95(3-4), 551-573. Og einnig Yu, G., S. Zvi & J.E. Walsh, 2009b. Effects of climate change on the seasonality of weather for tourism in Alaska. Arctic, 62(4), 443-457.
63 Gössling, S. & C.M. Hall, 2006. Uncertainties in predicting tourist flows under scenarios of climate change. Climatic Change, 79(3-4), 163-173.
64 Harvey L., J. Dawson, E.J. Stewart, P. Maher & M. Lueck. 2010. Last-chance tourism: the boom, doom, and gloom of visiting vanishing destinations, Current Issues in Tourism 13(5) doi.org/10.1080/13683500903406367.
65 Hoffmann, V.H., D.C. Sprengel, A. Ziegler, M. Kolb & B. Abegg, 2009. Determinants of corporate adaptation to climate change in winter tourism: an econometric analysis. Global Environmental Change, 19(2), 256-264.
66 Welling H. & Þ Árnason 2016. External and internal challenges of glaciertourism development in Iceland, í Richins, H., Hull, J. S. (ritstj.) Mountain tourism: experiences, communities, environments and sustainable futures CAB International.
67 Welling, J 2013, Tourism, landscapes and climate change in Iceland, Icelandic Tourism Research Center, Akureyri.
68 Berrittella, M., A. Bigano, R. Roson, and R.S.J. Tol, 2006. A general equilibrium analysis of climate change impacts on tourism. Tourism Management, 27(5), 913-924.
69 Minna þarf þó á í þessu samhengi að aukning ferðamanna leiðir til aukins álags á umhverfi og náttúru sem og leiðir til aukningar í losun gróðurhúsalofttegunda.
70 Rögnvaldur Guðmundsson 2016. Vatnajökulsþjóðgarður: ferðamenn 2005 – 2015, Rannsóknir og Ráðgjöf Ferðaþjónustunnar.
71 Munich Re NatCatSERVICE. 2015. Natural loss events worldwide 2015. Geographical overview.
72 www.munichre.com/en/media-relations/publications/press-releases/2017/2017-01-04-press-release/index.html.
73 Sjá www.bankofengland.co.uk/pra/Documents/supervision/activities/pradefra0915.pdf.
74 Sjá www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch1s1-3-8-4.htm.
75 Sjá www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf.
76 Sjá www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/ar5_wgII_spm_en.pdf.
77 Sjá unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/application/pdf/paris_agreement_english_.pdf.
78 European Commission 2009 Adapting to Climate Change: Towards a European Framework for Action, White Paper, Brussels: Commission of the European Communities.
79 European Commission 2013b Green Paper on the Insurance of Natural and Man-Made Disasters, COM2013 213 Final, Strasbourg: European Commission.
80 Genfarsamtökin (the Geneva Association) er alþjóðleg hugveita stærstu vátryggingafélaga í heimi, sjá upplýsingar um hringborðið á www.genevaassociation.org/events/2016/joint-oecdgeneva-association-roundtable-2015.
81 Lára Jóhannsdóttir 2015. Drives of proactive environmental actions of small, medium and large Nordic non-life insurance companies – and insurers as a driving force of actions. Journal of Cleaner Production. doi:10.1016/j.jclepro.2015.06.055.
82 ec.europa.eu/finance/company-reporting/non-financial_reporting/index_en.htm.
83 Lög um breytingu á lögum um ársreikninga, nr. 3/2006, með síðari breytingum (einföldun og innleiðing ársreikningatilskipunar 2013/34/ESB), 66. gr. d liður.
84 Johannsdottir, L., Wallace, J. & Jones, A. 2012. The Primary Insurance Industry's Role in Managing Climate Change Risks and Opportunities. In J. A. F. Stoner & C. Wankel (ritstj.), Managing Climate Change Business Risks and Consequences: Leadership for Global Sustainability. New York: Palgrave Macmillan.
85 Sjá yfirlýsingu norrænna fjármála- og vátryggingarsamtaka á vef samtaka norskra fjármálafyrirtækja www.finansnorge.no/contentassets/ef49858d59814e17925de8e7b0574fb5/fellesuttalelsen/pan-nordic-statement-on-climate-change.pdf.
86 Danish Insurance Association, Finance Norway, Federation of Finnish Financial Services & Insurance Sweden. 2013. Weather related damage in the Nordic countries – from an insurance perspective.
87 Yfirlýsingu Reykjavíkur og Festu má finna á reykjavik.is/loftslagsmal-reykjavikuryfirlysing.
88 VisAdapt má finna á vefsvæðinu www.climres.no.
89 Lára Jóhannsdóttir, Brynhildur Davíðsdóttir, Michael E. Goodsite og Snjólfur Ólafsson 2014. What is the potential and demonstrated role of non-life insurers in fulfilling climate commitments? A case study of Nordic insurers. Environmental Science & Policy 38: 87-106. DOI: 10.1016/j.envsci.2013.10.011.
90 Lára Jóhannsdóttir, Brynhildur Davíðsdóttir, Michael E. Goodsite og Snjólfur Ólafsson 2014. Insurers role in enhancing development and utilization of environmentally sound technologies: A case study of Nordic insurers. Journal of Cleaner Production 65: 526-538. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.09.043.
91 Sjá www.vidlagatrygging.is/um-vidlagatryggingu-islands.
92 Johannsdottir, L., Wallace, J. & Jones, A. 2012. The Primary Insurance Industry's Role in Managing Climate Change Risks and

Opportunities. In J. A. F. Stoner & C. Wankel (ritstj.), Managing Climate Change Business Risks and Consequences: Leadership for Global Sustainability. New York: Palgrave Macmillan.

93 Sjá www.vidlagatrygging.is/um-vidlagatryggingu-islands.

94 Sjá www.ruv.is/frett/ofanflodasjodur-baetir-tjon-a-siglufirdi.

95 Sjá www.althingi.is/altext/stjt/2009.049.html.

96 Sjá www.forsaetisraduneyti.is/media/Skyrslur/2012-tillogur-bota-v-hamfara.pdf.

97 Sjá www.forsaetisraduneyti.is/frettir/rikisstjornin-akvedur-stofnun-hamfarasjods.

98 Johannsdottir, L., Wallace, J. & Jones, A. 2012. The Primary Insurance Industry's Role in Managing Climate Change Risks and Opportunities. In J. A. F. Stoner & C. Wankel (ritstj.), Managing Climate Change Business Risks and Consequences: Leadership for Global Sustainability. New York: Palgrave Macmillan. Tafla bls. 44.

99 Sjá upplýsingar um VTÍ á vefsvæðinu www.vidlagatrygging.is/um-vidlagatryggingu-islands.

100 Sjá www.vidlagatrygging.is/tjon/vidbragdsaaetlun.

101 Johannsdottir, Lara. 2012. Nordic non-life insurer's interest in, and response to, environmental issues. Ph.D. thesis (562 bls.). Reykjavík: Viðskiptafræðideild, Háskóla Íslands.

102 Johannsdottir, L. 2016. Climate change and Iceland's risk-sharing system for natural disasters. The Geneva Papers on Risk and Insurance – Issues and Practice. 10.1057/s41288-016-0002-7.

103 Lára Jóhannsdóttir, Brynhildur Davídsdóttir og Snjólfur Ólafsson. 2014. Umhverfisleg sjálfbærni Íslands: Staðan og aðkoma stjórnvalda. Stjórnmál og stjórnsýsla, 10(2), 445-471.

104 Sjá kafla 4 í V2008 og kafla 4 í skýrslu vísindanefndar árið 2001.

105 Sjá www.greenclimate.fund.

106 Sjá www.stjornarradid.is/efst-a-baugi/frettir/stok-frett/2015/11/12/Radherra-tilkynnir-um-framlog-i-Graena-loftslagssjodinn-nbsp/.

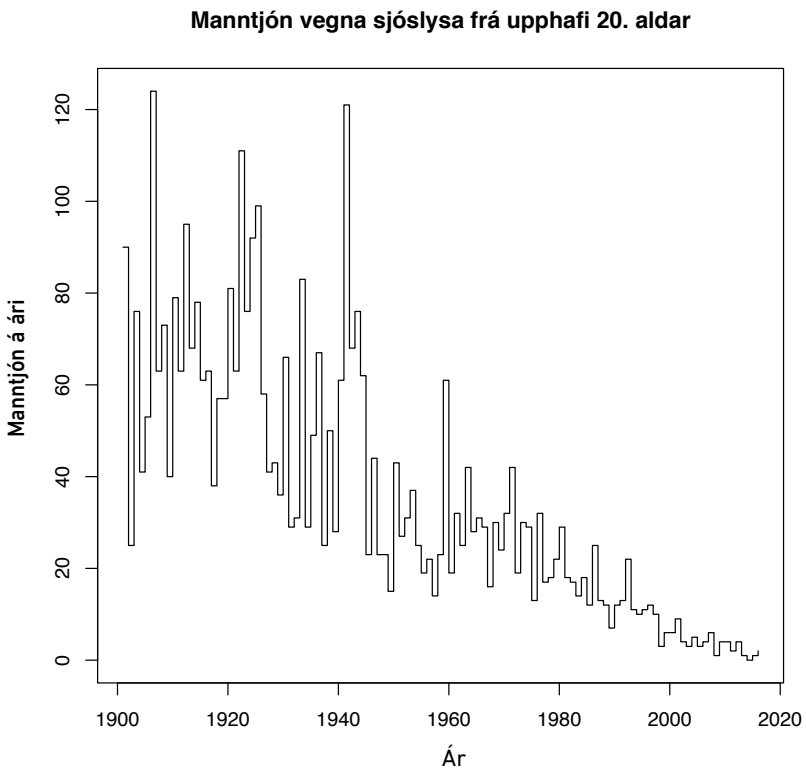
107 Hagfræðistofnun Háskóla Íslands. 2017. Ísland og loftslagsmál (Skýrsla nr. C17:01).

108 UNHCR, the environment and climate change (www.unhcr.org/uk/540854f49).

12 Náttúruvá og heilbrigðismál

Samantekt

1. Fjöldi hvassviðra er mjög breytilegur og sýnir verulegar sveiflur milli áratuga. Óljóst er hvort markverðar breytingar verði á tíðni þeirra á öldinni.
2. Úrkomuákefð er mjög breytileg milli ára og aukning síðustu áratuga er vart marktæk. Líklegt er þó að úrkomuákefð aukist á öldinni. Athuga þarf hvort ástæða sé til að uppfæra hönnunarstaðla fyrir fráveitumannvirki til að mæta aukinni ákefð úrkomu í framtíðinni.
3. Brýn þörf er á frekari rannsóknum á áhrifum loftslagsbreytinga á rigningaflóð í þéttbýli, efla þarf athugananet og bæta gögn um landupplýsingar.
4. Líklegt er að rigninga- og leysingaflóð muni taka breytingum við hlýnandi veðurfar.
5. Breytingar á jöklum þýða að tíðni og umfang jökulhlaupa breytist.
6. Skoða þarf betur flóðahættu tengda litlum uppistöðulónum, sérstaklega með tilliti til aukningar á úrkomuákefð.
7. Skipuleg áhættustýring, með formlegu áhættumati, viðbragðsáætlunum og aðgerðum til þess að draga úr tjóni, er vænlegasta leiðin til þess að mæta breytingum áhættu vegna flóða.
8. Með hækkandi sjávarstöðu verða sjávarflóð algengari
9. Rannsóknir hafa varpað nýju ljósi á Básendaflóðið, versta skráða flóð Íslandssögunnar. Nú er talið að í Kvosinni í Reykjavík hafi flóðið verið um 5.2 m en það er sambærilegt við nýlegt mat á 100 ára flóði í Reykjavík[1]. Flóðið var mun hærra annars staðar á Faxaflóasvæðinu þar sem gætti ölduáhlaðanda.
10. Mikilvægt er að beitt sé skipulegri áhættustýringu vegna sjávarflóða og að tekið sé tillit til aukinnar flóðahættu við skipulag á lágsvæðum.
11. Ekki er til samræmdur gagnagrunnur um sjávarflóð.
12. Mikilvægt er að í lögum verði komið í veg fyrir að mistök á lægra stjórnsýslustigi skapi skaðabótábyrgð á hærra stjórnsýslustigi.
13. Ekki er líklegt að hlýnandi veðurfar hafi úrslitaáhrif á snjóflóðahættu hér á landi á næstu áratugum.
14. Sífreri í háfjöllum hefur verið á undanhaldi við loftslag síðustu ára og gætu efstu hlíðar tímabundið orðið óstöðugar. Þörf er á átaki í að kortleggja sífrerasvæði í fjallendi til þess að hægt sé að kanna hvort skriðuhætta í byggð aukist með hlýnandi veðurfari.
15. Líkur á því að gróðureldar valdi verulegu tjóni munu aukast á öldinni.
16. Sérstaklega þarf að huga að áhættu í sumarbústaðabyggðum.
17. Þynning jökla mun leiða til meiri kvikuframleiðslu undir Íslandi. Eðlilegt er að sú umframáhætta sem af þessu kann að stafa sé meðhöndluð sem hluti af heildaráhættumati vegna eldgosa á Íslandi.
18. Eðlilegast er að viðbrögð við aukinni áhættu vegna náttúruhamfara verði skipulögð í tengslum við áhættustýringu á núverandi vá og aðgerðir til að mæta henni efldar.
19. Líklegt er að aukið magn frjókorna og myglugróa geti haft neikvæð áhrif á heilsufar. Einnig má búast við að smitleiðir breytist, m.a. vegna breytinga á tegundasamsetningu skordýra.



Mynd 12.1 Fjöldi látinna í sjóslysum og í ám og vötnum á landi á hverju ári 1901–2016.

20. Miðað við núverandi styrk heilbrigðiskerfisins bendir ekkert til annars en að það myndi ráða við álag tengt loftslagsbreytingum, en viðbrögð við heilsufarsáhrifum loftslagsbreytinga kunna að fela í sér tækifæri í bættri lýðheilsu í framtíðinni.

12.1 Náttúruvá

Fjallað var um náttúruvá í kafla 4.6 í síðustu skýrslu vísindanefndar (V2008) en einnig um sjávarflóð í kafla 4.5 og áhættustýringu vegna náttúruvár í hliðargrein 4A. Sérstaklega voru rædd snjóflóð, rigninga- og leysingaflóð, jökulhlaup, sjávarflóð, skógareldar og eldgos.

Bent var á að ekki eru forsendur til þess að ætla að hlýnandi veðurfar hafi úrslitaáhrif á snjóflóðahættu hér á landi á næstu áratugum. Rigninga- og leysingaflóð munu líklega taka breytingum, vorflóð koma fyrr og gætu orðið sneggri. Samfara rýrnun jökla má einnig gera ráð fyrir breytingum á jökulhlaupum og hlaup úr ýmsum jaðarlónum geta breyst í náinni framtíð, rétt eins og þau hafa gert á undanförnum áratugum.

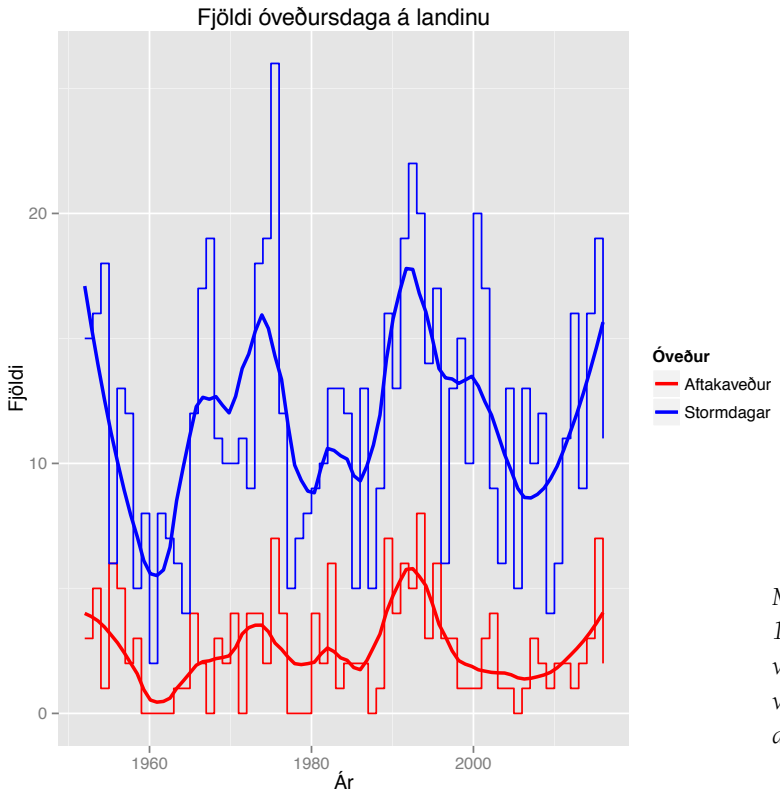
Þegar hugsanleg framtíðarþróun áhættu sem tengd er náttúrufari er metin er mikilvægt að hafa í huga að breytingar á slíkri áhættu eru ætíð tvíþættar. Annar þátturinn er hin náttúrufarslega hætta, hún getur vaxið, minnkað eða staðið í stað, en hinn felst í breytingum á tjónnæmi þess sem hættan beinist að (sjá skilgreiningar í kafla 4A í V2008). Tjónnæmi getur breyst óháð vánni og þó að breytingar á vá séu oft ill- eða óviðráðanlegar og ófyrirséðar má með skipulegum vinnubrögðum draga úr tjónnæmi, sé váin og umfangsróf hennar í tíma og rúmi þekkt.

Í þessari grein verður fjallað nánar um nokkra fyrrgreindra áhættuþátta. Fyrst verður rætt um þætti sem eru beintengdir veðurálagi, s.s. hvassviðri og rigningaflóð, þá verður fjallað um flóð í ám, sjávarflóð, ofanflóð, skógarelda og loks eldgos.

Mikilvægt er að hafa í huga að áhætta vegna þessara þátta er nú þegar umtalsverð og er eðlilegt að viðbrögð við aukinni áhættu vegna loftslagsbreytinga verði skipulögð í tengslum við áhættustýringu á núverandi vá. Áhættustýring miðar að því að lágmarka tjón af völdum náttúruhamfara, bæði við núverandi aðstæður og einnig ef áhættan breytist með breytingum á veðurfari.

12.1.1 Náttúruvá tengd aftakaveðri

Þanþol íslensks þjóðfélags gagnvart aftakaveðri er mun meira nú en fyrrum. Á tímum landbúnaðarþjóðfélags og útróðrarhátta voru það einkum illviðri - á landi og á sjó, frosthörkur (sérstaklega á auða jörð), fannkomur,



Mynd 12.2 Fjöldi óveðursdaga á Íslandi frá 1949. Til að dagur teljist stormdagur þarf vindhraði að fara yfir 20 m/s á a.m.k. 25% veðurstöðva, ef hlutfallið fer yfir 45% telst það aftakaveður.

hafískomur, vorharðindi, vor- og sumarþurrkar, auk þrálátra rigninga að sumri og hausti, sem líkleg voru til þess að valda efnahagsþrengingum hér á landi.

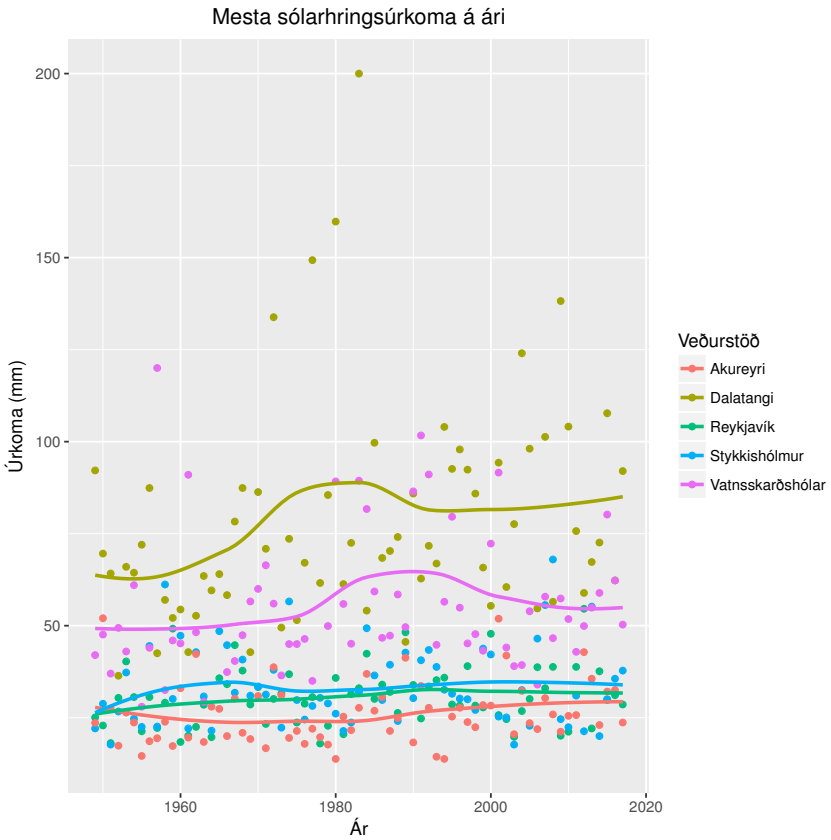
Þó að sum þessara atriða geti enn verið truflandi þættir í íslensku umhverfi valda þeir ekki sama tjóni og áður var. Atvinnuhættir hafa stórlega breyst og nýjar atvinnugreinar og viðfangsefni hafa komið til sögunnar. Meira öryggis er gætt í atvinnugreinum þar sem slys voru áður algeng og skipulegar aðgerðir til að draga úr hættu og skaða hafa skilað miklum árangri. Dæmi um þetta má sjá á mynd 12.1 sem sýnir árlegt manntjón á íslenskum skipum, auk fjölda látinna í ám og vötnum á landi frá upphafi síðustu aldar[2]. Á fyrri hluta aldarinnar fórust um 60 manns að meðaltali árlega á sjó og sum árin töpuðust meira en 100 mannslíf. Upp úr miðbiki aldarinnar fækkaði dauðsföllum á sjó verulega og í lok aldarinnar voru þau fágæt. Mikilvægt er að hafa í huga að hin náttúrufarslega hætta breyttist ekki mikið á öldinni heldur sýnir myndin hversu miklum árangri er hægt að ná með því að draga úr áhættu. Í þessu tilviki skiptu miklu öflugri floti, betri veðurspá og ýmsar aðgerðir til að bæta öryggi sjómanna.

Þegar hugað er að þanþoli íslensks þjóðfélags gagnvart aftakaveðri skiptir einnig máli að atvinnuhættir hafa stórlega breyst og nýjar atvinnugreinar og viðfangsefni hafa komið til sögunnar. Almennt efnahagslegt þol hefur stóraukist en samt er tjónnæmi enn umtalsvert, sérstaklega ef litið er á afkomu einstakra atvinnugreina, fyrirtækja og einstaklinga.

Í áhættuskoðun Almannavarnadeildar Ríkislögreglustjóra[3] kom fram að í öllum lögregluumdæmum hefur reglulega þurft að takast á við aftakaveður, ófærð, illviðri og hret og í tveimur af hverjum þremur umdæmum var talin þörf á frekari úrlausnum og aðgerðum vegna ofsaveðurs.

Foktjón er tiltölulega algengt á Íslandi en hér er hvassviðrasamara en í nágrannalöndum. Fjöldi óveðursdaga á Íslandi sveiflast verulega milli ára og áratuga. Mynd 12.2 sýnir talningu á stormdögum (þ.e. 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 sýnir að það eru áratugalangar sveiflur á fjölda illviðradaga en ekki er nein augljós langtímahneigð í röðinni.

Hvassviðri á Íslandi eru yfirleitt samfara lægðum sem ganga framhjá landinu eða yfir það. Ekki er ljóst hvernig gangur lægða mun breytast með hlýnandi veðurfari. Í heildina er líklegt að brautir lægða færist nær pólsvæðum en á þessu eru þó svæðisbundin frávik. Á Norður-Atlantshafi er þannig ekki ljóst að breytingar á lægðagangi verði marktækar við Ísland á komandi öld[4]. Eins og fram kemur í kafla 4.5.1 sýna niðurkvarðanir



Mynd 12.3 Mesta sólarhringsúrkoma hvers árs á fimm veðurstöðvum frá 1949 til 2016. Punktarnir sýna niðurstöður frá mismunandi veðurstöðvum, línurnar eru útjafnaður ferill fyrir hverja stöð.

svæðisbundinna loftslagslíkana ekki miklar breytingar á vindhraðadreifingu, lítillega dregur úr tíðni þess að vindhraði í Reykjavík verði fjögur vindstig eða meira. Áreiðanleiki reikninga á breytingum í óveðratíðni er hins vegar ekki mikill og því er ekki að svo stöddu hægt að gera ráð fyrir að tíðni óveðra minnki.

Breytingar í úrkomu eru ræddar í kafla 4 og langtímasveiflur úrkomu á síðustu 100 árum raktar. Einnig er fjallað um líklega aukningu úrkomu á öldinni. Fyrir rigningaflóð skiptir einnig máli hvort úrkomuákefð aukist. Mynd 12.3 sýnir hámarksúrkomu hvers árs á fimm veðurstöðvum fyrir árabilið 1949 til 2016. Þótt hámarksúrkoman aukist á öllum stöðvum um 10–30% á tímabilinu er leitnin ekki tölfræðilega marktæk, enda verulegar sveiflur í mælirröðunum.

Athugun á mögulegri aukningu á 10 mínútna úrkomuákefð í Reykjavík frá 1950 til 2010 leiddi ekki í ljós miklar breytingar, þó að marktækrar aukningar í ákefð yrði vart í ágúst en marktækrar minnkunar í nóvember. Ný greining á úrkomumælingum bendir þó til þess að hönnunarforsendur um 10 mínútna úrkomuákefð þyrfti að hækka um 16%[5].

Eins og fjallað er um í kafla 4 gefa niðurstöður loftslagslíkana vísbendingar um aukningu í úrkomuákefð hér á landi til loka aldarinnar. Álíka þróun mun líklega verða í nágrannalöndum, en niðurstöður líkanreikninga benda til þess að úrkomuákefð aukist þar og gæti sólarhringsúrkoma með 20 ára endurkomutíma aukist um 2.5–5% fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Þeirrar aukningar kynni einnig að gæta hér á landi[6].

Í nágrannalöndum verður vart við aukna úrkomuákefð og farið er að gera ráð fyrir ákafari regnskúrum við hönnun fráveitumannvirkja. Hér á landi hafa hönnunarstaðlar ekki verið uppfærðir til að mæta mögulegri aukningu úrkomuákefðar. Greining á fráveitukerfi í miðbæ Reykjavíkur leiddi í ljós að 5 ára flóð veldur þegar verulegu álagi á kerfið og ekki þyrfti mikla aukningu til þess að auka flóðahættu verulega[5].

Þó að vísbendingar um aukningu á úrkomuákefð geti ekki talist eindregnar benda rannsóknir þó frekar til aukningar. Í ljósi reynslu nágrannalandanna og niðurstaðna reiknilíkana er mikilvægt að skoða hvort þörf sé á að breyta hönnunarstöðlum fráveitumannvirkja vegna meiri úrkomuákefðar.

Eins og rætt er í grein 11.1 um veitumál eru ýmsar leiðir til þess að bregðast við flóðahættu. Auk hönnunar-

stuðla vegna úrkomuákefðar þarf einnig að huga að afrennsli, en fráveitukerfi eru m.a. háð því hversu mikið af yfirborði er fast (sjá t.d. umfjöllun um blágrænar lausnir). Einnig er vert að ítreka að upplýsingum um úrkomuákefð á þéttbýlisstöðum er ábótavant, hæðarlíkön landupplýsingakerfa eru ófullnægjandi og almennt er lítið um rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á flóðahættu í þéttbýli.

12.1.2 Flóð í ám

Í V2008 er í köflum 4.2 og 4.6 fjallað um breytingar á rigninga- og leysingaflóðum sem og jökulhlaupum. Að vetri til er leysing algengari á hálendi í um 400 m hæð vestanlands og vetrarflóð því algengari þar en annars staðar á hálendinu. Á hálendari svæðum eru vorflóð algengari. Á þessu kann að verða breyting með hlýnandi veðurfari, þannig að á svæðum þar sem áður gætti helst vorflóða verði vetrarflóð algengari. Tíðni jökulhlaupa breytist líklega samfara því sem jöklar þynnast og hopa. Jökulhlaup verða af völdum eldgosa undir jöklum, úr jökulstífluðum lónum við jökuljaðra og undir jöklum. Mörg dæmi eru um breytingar á flóðum úr jaðarlónum í kjölfar jöklabreytinga og því líklegt að slík hlaup breytist í framtíðinni. Sem dæmi um nýja áhættu af þessu tagi má benda á að berghrun í jaðarlón gæti valdið flóðum, sjá nánar grein 12.1.4.

Í áhættuskoðun Almannavarna er fjallað um áhættu vegna jökulhlaupa. Þar kemur fram að áhættan liggi víða og kanna þurfi mörg svæði betur. Á Vesturlandi er möguleg hætta talin á jökulhlaupum frá Langjökli og Snæfellsjökli en slíkt hefur þó lítið verið kannað. Í Skagafirði þyrfti að kanna áhættu vegna flóða frá Hofsjökli í Austari-Jökulsá og Hofsá; á Norðausturlandi þarf að gera viðbragðsáætlun vegna jökulhlaupa í Skjálfandafljóti og Jökulsá á Fjöllum; og á Austurlandi þarf að kanna hættu á hlaupum í ám norðan Vatnajökuls. Á Suðausturlandi hefur fjöldi jökulhlaupa orðið í gegnum tíðina og þarf að gera viðbragðsáætlanir vegna eldgosa í Vatnajökli, m.a. í Grímsvötnum og Öræfajökli. Á Suðurlandi þarf einnig að skoða hættu vegna hlaupa frá Eyjafjallajökli og Mýrdalsjökli, en stór hlaup hafa fylgt eldgosum frá þessum jöklum. Loks má minnast á að í kjölfar umbrota í Bárðarbungu var árið 2014 unnið mat á áhrifum flóða vegna eldgosa þar[7]. Verulegt samfélagslegt tjón gæti orðið vegna slíkra hlaupa, sérstaklega af flóði á Tungnár- og Þjórsársvæðinu. Nánar er fjallað um flóð vegna eldgosa í grein 12.1.6.

Áköf flóð hafa einnig orðið hér á landi úr uppistöðulónum smávirkjana. Sem dæmi má nefna flóð í Gerðubergslæk í Eyjahreppi í janúar árið 1992, í Elliðaám í desember 1998, í Burstabrekkuá í Ólafsfirði í september árið 2004, í Sandá í Laugardal í júní árið 2005, í Djúpadalsvirkjun í Eyjafirði í desember 2006 og Gönguskarðsárvirkjun í Skagafirði í apríl árið 2007[8]. Í sumum þessara flóða varð verulegt tjón og mátti litlu muna að manntjón yrði. Ekki voru orsakir í öllum tilvikum veðurtengdar, en sum flóðin þó tengd aftakaúrkomu. Almennt eru upplýsingar um hönnun lítilla uppistöðulóna af skornum skammti en ljóst er að aukist úrkomuákefð eykst einnig álag á stíflu- og veitumannvirki. Ástæða er til að skoða nánar áhættu sem þessu tengist.

Í kjölfar mikilla úrkomu- og leysingaflóða sem ollu tjóni í desember árið 2006 var ráðist í verkefni sem miðaði að því að kortleggja flóðin, leggja mat á hæð þeirra og byggja upp gagnabanka um söguleg flóð. Hluti af þessu verkefni var að söguleg flóð í Hvítá í Árnessýslu og í Ölfusá voru greind[9]. Á síðustu árum hefur verið unnið að skráningu flóða á vatnasviðum Eyjafjarðarár, Héraðsvatna, Hvítár í Borgarfirði, Lagarfljóts og Skjálfandafljóts[10]. Fyrir þessi vatnasvæði voru greindar orsakir 190 flóða og mátti rekja tæpan helming þeirra til leysingar og ríflega fimmtung til samblands leysingar og úrkomu. Helmingur flóðanna voru vetrarflóð sem áttu sér stað frá desember til marsmánaðar, oft með tjóni á samgöngumannvirkjum. Flóð voru tíðust upp úr miðri 20. öld, eða frá 1950 til 1970, en með árunum hefur dregið úr tíðni flóða sem valdið hafa skaða á samgöngumannvirkjum. Þetta stafar líklega af því að mannvirki eru nú traustari en fyrr, því gögn benda ekki til þess að dregið hafi úr flóðum.

Ofangreindar rannsóknir fylgja aðferðafræði sem algeng er við mat á áhættu vegna náttúruvár. Lagt er mat á tjónmættið, í þessu tilviki hvert umfang flóða geti verið, síðan er lagt mat á það tjón sem flóðin geta valdið. Viðbragðsáætlanir, byggðar á viðmiðum um ásættanlega áhættu, eru gerðar til að bregðast við flóðum, og í sumum tilvikum eru lagðar til aðgerðir sem miða að því að draga úr tjóni vegna flóða. Formleg áhættustýring af þessu tagi er vænlegasta leiðin til þess að draga úr því tjóni og álagi

sem flóð geta valdið og einnig til að mæta hugsanlegri breytingu á flóðahættu á komandi öld.

12.1.3 Sjávarflóð

Sjávarflóð eru algeng við Íslandsstrendur og á síðustu öld voru að jafnaði sex markverð flóð á áratug[11]. Í nýlegri rannsókn þar sem farið var yfir skráningar um flóð sem finna má í gögnum Veðurstofu Íslands[12] kemur fram að sjávarflóð eru algengari á Suður- og Vesturlandi en Norður- og Austurlandi og algengari að vetri en sumri. Í kafla 5.3 voru raktar sviðsmyndir um sjávarstöðuhækkun við Íslandsstrendur næstu áratugi. Að suðausturströnd landsins frátalinni er líklegast að sjávarstaða muni hækka og því verður að teljast líklegt að sjávarflóð á sumum strandsvæðum verði algengari og skeinuhættari en verið hefur.

Í áhættuskoðun Almannavarna[3] kemur fram að hætta sé á sjávarflóðum í flestum lögregluumdæmum og eru nefndir rúmlega 30 staðir í því sambandi. Í skýrslu Siglingastofnunar um sjóvarnir frá árinu 2011 eru talin upp 66 sjóvarnarverkefni sem ráðast þurfi í, auk 65 annarra verkefna sem þarfnast nánari skoðunar[13].

12.1.3.1 Endurkomutími flóða í Reykjavík

Í kafla 4.5 í V2008 er fjallað um endurkomutíma sjávarflóða og sýnd tafla með endurkomutíma flóða í Reykjavík miðað við sjávarstöðuhækkun á bilinu 38 til 59 cm. Tekið er fram að bæta megi 20–40 cm við tölurnar ef landsig í Reykjavík helst óbreytt. Hæð flóðs með 100 ára endurkomutíma var metin 5.16 m og tölum um sjávarstöðubreytingar bætt við þá tölu til að meta líklegt 100 ára flóð árið 2100. Nánar er fjallað um merkingu endurkomutíma aftakaatburða í hliðargrein 12A[14]. Besta mæliröð um sjávarstöðubreytingar er frá Reykjavík en þar hafa mælingar verið gerðar frá 1956. Eins og rakið var í kafla 5.3 hefur sjávarstaða á þessu tímabili hækkað að jafnaði um 2.0 [1.4–2.6] mm á ári. Greining á tímabilinu 1996 til 2013 bendir til þess að á þessum tíma hafi hækkunin verði hraðari, eða 2.8 [2.5–3.1] mm á ári[15].

Á síðustu áratugum hafa nokkrar aðferðir verið reyndar til þess að leggja mat á endurkomutíma sjávarflóða í Reykjavík[16] (mynd 12.4) og ber niðurstöðum vel saman (tafla 12.1).

Rannsókn	100 ára flóðhæð (m)
Jónas Elíasson og Sveinn Valdimarsson (1993, uppfært)	5.14
Samlíkur (2017)	5.15 [5.09–5.22]
Vísindanefnd (2008)	5.16

Tafla 12.1 Niðurstöður nokkurra rannsókna á endurkomutíma 100 ára flóðs í Reykjavík. Til samanburðar er meðalsjávarstaða í Reykjavík um 2.2 m, meðalstórstraumsflóð um 4 m og mesta flóð hvers árs að jafnaði tæpir 4.8 m.

12.1.3.2. Helstu flóð á suðvesturhluta landsins

Hæsta sjávarstaða sem mælst hefur í Reykjavíkurhöfn var 5.09 m mánudaginn 10. febrúar 1997 kl 8:10 að morgni, en aðstæður voru þó ekki slíkar að sjór gengi á land[17]. Hæstu flóð verða þegar saman fara háflæði, lágur loftþrýstingur og vindáhlaðandi. Við þetta getur lagst ölduáhlaðandi sem ræðst af hæð öldunnar á rúmsjó og öldustefnu, auk staðbundinna þátta svo sem sjávardýpis og legu strandar. Í flóðinu þann 10. febrúar 1997 var lítill öldugangur í Reykjavíkurhöfn[18].

Í Reykjavík hafa orðið flóð þó að sjávarstaða í höfninni mælist ekki mjög há. Þannig varð tjón á göngustígum við Ánanaust og Eiðisgranda í óveðri á Þorláksmessu 2003, þótt sjávarhæð í Reykjavíkurhöfn mældist ekki nema 4.42 m. Í þessu óveðri var vindur af suðvestan og verulegur öldugangur við Ánanaust og Eiðisgranda[19]. Enginn einn áhrifaþáttur var þó afgerandi heldur var samsetning þeirra óheppileg[20].

Mesta sjávarflóð sem vitað er um á Íslandi varð 8. til 9. janúar 1799 og tók af kaupstaðinn Básenda á vestanverðum Reykjanesskaga. Í V2008 er þessum atburði stuttlega lýst og bent á að þótt tölur um flóðhæð á Básenda séu nokkuð á reiki sé áætluð flóðhæð langt yfir þeim tölum sem finna megi í töflu V2008 um flóðhæð og endurkomutíma í Reykjavík.

Nýleg rannsókn á Básendaflóðinu hefur bætt mjög við þekkingu á líklegum orsökum þessa flóðs[21]. Þar kemur fram að metin flóðhæð við Básenda sé afar ólíkleg út frá veðurþáttum einum, heldur sé líklegast að ölduáhlaðandi hafi verið ráðandi. Niðurstaðan er sú að líklegt sé að flóðhæðin hafi verið 6.3–6.5 m við Básenda, en í Reykjavík var flóðhæð um metra lægri en þar var ölduáhlaðandi mun minni. Í Kvosinni í Reykjavík var

sjávarstaða metin um 5.2 m, en sjávarstaða var hærri við Lambastaði, eða 5.4 m. Þar gekk sjór yfir eiðið svo að Seltjarnarnes varð eyja.

Básendaflóðið er ekki eina flóðið sem hermt er að hafi gengið yfir eiðið á Seltjarnarnesi, því heimildir eru fyrir því að haustið 1936 hafi í flóði verið hægt að róa báti frá Eiði á Seltjarnarnesi til Skerjafjarðar[22]. Loks er áhugavert að mat á hæð Básendaflóðsins í Kvosinni í Reykjavík er ekki fjarri þeim tölum sem sjá má í töflu 12.1. Því er líklegt að innan nokkurra áratuga verði 100 ára sjávarflóð í Reykjavík hærra en hæð Básendaflóðsins.

12.1.3.3 Hækkun sjávarborðs og skipulag strandsvæða

Nokkrir áratugir eru síðan farið var að fjalla um hækkun sjávarborðs við skipulag strandsvæða. Á 9. áratug síðustu aldar var farið að huga að sjó- og flóðavörnum og í kjölfar aftakaflóðs á sunnan- og vestanverðu landinu þann 9. janúar 1990 voru unnar tillögur á vegum Skipulags ríkisins í samvinnu við Vita- og hafnamálastofnun og Viðlagatryggingar. Tillögurnar miðuðust við að draga úr hættu á tjóni af völdum sjávarflóða og var m.a. tekið tillit til hugsanlegrar hækkunar sjávarborðs af völdum loftslagsbreytinga. Þær voru gefnar út í tveimur áföngum, 1992 og 1995[23] og var lagt til að ný byggð væri í a.m.k. 30–50 m fjarlægð frá ströndu, og einnig voru gerðar tillögur um lágmarksgólfhæð (gólfkóta). Í tillögunum var gert ráð fyrir að á höfuðborgarsvæðinu yrði gólfkóti á lágsvæðum hækkaður til að mæta hækkun sjávarborðs, landsigi og öldugangi. Vegagerðin vinnur nú að endurskoðun viðmiðunarreglna fyrir lágsvæði[24].

Í þingsályktunartillögu um landsskipulagsstefnu[25] frá 2016 er kveðið á um að tekið skuli tillit til áhrifa loftslagsbreytinga, þ.m.t. sjávarflóða í skipulagsvinnu sveitarfélaga. Einnig eru ákvæði um að skilgreina skuli strandlínu „við þéttbýli og önnur byggð svæði þar sem hætta stafar af sjávarflóðum og vegna breytinga á sjávarborði í kjölfar loftslagsbreytinga“.

Samkvæmt lögum um sjóvarnir nr. 28/1997 vinnur Vegagerðin að sjóvarnaáætlun þar sem óskir sveitarfélaga eða landeigenda um varnir gegn sjávarrofi og sjávarflóði eru metnar og lagt mat á nauðsyn áætlaðra framkvæmda, hagrænt gildi þeirra og þeim raðað í forgangsröð eftir mikilvægi. Þessi vinna er stöðugt í gangi og er grundvöllur fyrir sjóvarnaáætlun sem er hluti samgönguáætlunar. Yfirleitt eru framkvæmdir við um 10 til 15 sjóvarnaverkefni á hverju ári en með þeim er dregið úr tjónnæmi.

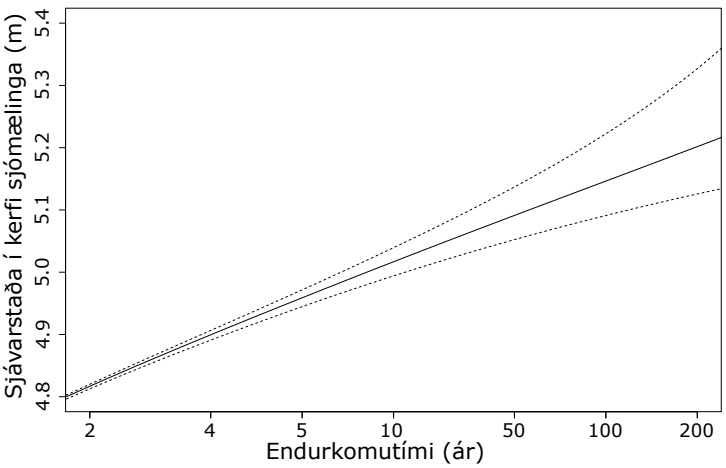
Í skipulagsgögnum sveitarfélaga má víða finna umfjöllun um hættu á sjávarflóðum og aukna áhættu vegna áhrifa loftslagsbreytinga[26], en hér verður athyglinni beint sérstaklega að höfuðborgarsvæðinu þar sem nokkrar rannsóknir hafa farið fram á áhrifum flóða og skipulagsmálum þeim tengdum.

12.1.3.4 Áhrif stórflóðs á höfuðborgarsvæðinu

Í nýlegri rannsókn voru áhrif 5.8 m flóðs könnuð fyrir lágsvæði á höfuðborgarsvæðinu[27]. Sjávarborð á höfuðborgarsvæðinu þyrfti að hækka um rúma 0.6 m til þess að 100 ára flóðið næði 5.8 m en það gæti gerst síðla á þessari öld eða á fyrri hluta þeirrar næstu. Flóðahætta reyndist á öllum landfyllingum við ströndina. Auk þess reyndist hætta á flóðum nærri bæjarmörkum við vestanverða strandlengju Reykjavíkur og Seltjarnarness, við Eiðisgranda og í Kvosinni í Reykjavík. Þá er flóðahætta mjög víða á Álftanesi og einnig á svæði þar sem gert er ráð fyrir íbúðabyggð í Elliðaárvogi og undir Ártúnshöfða.

Þó að greinst hafi flóðahætta á öllum landfyllingum við ströndina frá Hafnarfirði inn að Bryggjuhverfi, eru líkur á að þar flæði ekki þær sömu allsstaðar. Fæstar þessara landfyllinga eru fyrir opnu hafi sem dregur úr líkum á að flóð nái 5.8 m. Þannig er t.d. minni hætta á vindáhlaðanda og öldugangi í Sjálandshverfi í Garðabæ en er á landfyllingu við Granda og Örfirisey. En, eins og fram kom í grein 5.3.6, skiptir hér máli til hversu langs tíma er litið. Með stöðugri sjávarstöðuhækkun mun að lokum skapast flóðahætta á öllum lágsvæðum.

Þá ber að hafa í huga að á hafnarsvæðum eru nokkrir möguleikar á að aðlagast hækkun sjávarborðs með því að endurnýja hafnargólf og byggingar. Sama gildir um akbrautir sem liggja með sjónum, en í rótgrónum hverfum er erfiðara um vik og þörf á öðrum vörnum. Í Kvosinni hafa þegar verið gerðar rannsóknir á því hvort verja megi svæðið fyrir verstu flóðum árið 2100[28]. Niðurstaðan var sú að hagkvæmast væri að hækka hafnarbakkana við Austurbakkann, Miðbakkann og Vesturbugt við uppbyggingu á þessum svæðum. Slíkt gæti tryggt bæði Kvosinni og nýjum byggingum við höfnina vörn gegn flóðum. Í sömu rannsókn var einnig skoðað hvort hægt væri að verja landfyllinguna við Örfirisey, en þar var niðurstaðan að varnir væru of



Mynd 12.4 Hæð sjávarflóða í Reykjavík fyrir 2 – 200 ára endurkomutíma. Punktalínur sýna mörk 95% óvissubils (sjá nánar heimild 15).

dýrar og heppilegra að við nýtingu svæðisins væri einfaldlega miðað við að flóð væru möguleg. Þessi rannsókn var gerð áður en nýtt mat á hæð Básendaflóðsins í Kvosinni kom fram og niðurstöður byggðar á flóði sem var um 1 m of hátt í lok 21. aldar og mat á kostnaði við fyrirhugaðar varnir því líklega of hátt[28]. Ásýnd þessa svæðis hefur á síðustu árum breyst frá því að vera athafnasvæði sjávarútvegs yfir í ýmiskonar verslun og þjónustu.

Hvað langtímaþróun á höfuðborgarsvæðinu varðar virðist ljóst að með hækkandi sjávarstöðu mun tíðni flóða á lágsvæðum aukast. Kostnaðarsamt getur verið að verjast slíkum flóðum og því mikilvægt að farið sé með gát ef skipuleggja á byggð á lágsvæðum.

12.1.3.5 Sjávarflóð og skipulag á höfuðborgarsvæðinu

Í fyrrgreindri rannsókn á flóðahættu á höfuðborgarsvæðinu[18] var kannað sérstaklega hvort farið hefði verið eftir tillögunum frá 1992 og 1995. Í nokkrum tilvikum komu fram misbrestir í eftirfylgd leiðbeininga, og virtist framkvæmdin mismunandi milli sveitarfélaga, og jafnvel milli hverfa innan sama sveitarfélags. Þannig voru dæmi um hús byggð nær ströndinni en gert var ráð fyrir, lágmarksgólfkóti var ekki alltaf tiltekinn í skilmálum deiliskipulags og í sumum tilvikum virðist skilgreining lágmarksgólfkóta jafnvel hafa verið sett í hendur framkvæmdaaðila. Á höfuðborgarsvæðinu má finna mörg dæmi um vönduð vinnubrögð þar sem reynt er að taka tillit til hækkunar sjávar við skipulagsvinnu, en ekki verður litið framhjá þeim tilvikum sem eftirfylgd tillagnanna hefur ekki heppnast sem skyldi.

Loks kom fram að ekki er til samræmdur gagnagrunnur um tjón af völdum sjávarflóða. Mikilvægt er að slík skráning verið samræmd til þess að stuðla að upplýstri ákvarðanatöku.

Reynsla erlendis frá sýnir að við aftakaflóð fara stundum saman áköf rigning og há sjávarstaða. Í grein 11.1 er fjallað um fráveitur og bent á að mikilvægt sé að tekið sé tillit til þessa við hönnun og skipulag á lágsvæðum og forðast að staðsetja viðkvæma innviði eða geymslur sem trygga eigi örugga varðveislu verðmæta í kjöllurum á lágsvæðum.

12.1.3.6 Áhættustýring vegna sjávarflóða

Sjávarflóð eru frekar algeng við Íslandsstrendur og með hækkandi sjávarstöðu er líklegt að víða um land verði þau tíðari en verið hefur sem mun auka þörf á sjóvörnum. Við skipulag á lágsvæðum er mjög mikilvægt að tekið sé tillit til þess að sjávarstaða mun hækka á næstu öldum. Í skýrslu V2008 var bent á mikilvægi þess að tryggt væri að við skipulag á lágsvæðum væri miðað við besta mat á líklegri hækkun. Í þingsályktun um landsskipulagsstefnu frá 2016 eru ákvæði um að taka skuli tillit til hækkunar sjávarborðs vegna loftslagsbreytinga.

Eins og fram kom hér að framan ráðast aftakaflóð af óheppilegri samsetningu sjávarfalla, veðurtengdu álagi og ölduálagi. Í grein 5.3 er fjallað um líklegar breytingar á sjávarstöðu, byggt á gögnum úr skýrslu vinnuhóps 1 hjá milliríkjanefnd Sþ (IPCC). Í þeirri skýrslu er einnig fjallað um breytingar á hvassviðratíðni og ölduálagi. Eins og fram kom í grein 12.1.1, hér að framan eru ekki vísbendingar um marktæka aukningu hvassviðra og einnig kemur fram í skýrslunni að ekki verði heldur vart við marktæka aukningu á ölduálagi. Niðurstöðum

líkana ber þó ekki vel saman og því telur milliríkjanefndin niðurstöður hvað þetta varðar ótraustar[29]. Mikilvægt er að hafa í huga að ekkert bendir heldur til þess að það dragi úr þessum þáttum og því ekki ástæða til þess ætla að náttúruleg hætta á flóðum minnki á svæðum þar sem afstæð sjávarstöðubreyting er lítil.

Mynd 12.4 sýnir endurkomutíma flóða í Reykjavík. Á myndinni má sjá að minna en 0.1 m munar á flóði með 20 ára endurkomutíma og flóði með 50 ára endurkomutíma, m.ö.o. tiltölulega lítil hækkun sjávarborðs gerir flóð sem áður höfðu 2% árslíkur mun algengari. Álíka reikningar, sem taka tillit til sjávarfalla, vind- og ölduáhlaðanda, benda til þess að við Íslandsstrendur þurfi einungis um 0.07 – 0.1 m hækkun sjávarborðs til þess að tvöfalda líkur á flóði sem áður hafði 50 ára endurkomutíma[30]. Gera má ráð fyrir að sama gildi um aðra endurkomutíma, þannig að flóð sem áður hafði 20 ára endurkomutíma hendi að meðaltali á 5 ára fresti eftir tiltölulega litla hækkun sjávarborðs.

Til að glíma við aukna flóðahættu er í skýrslu milliríkjanefndar lagt til að beitt sé skipulegri áhættustjórnun og eru nokkrar leiðir ræddar[31]. Bent er á að óvissa um hækkun sjávarstöðu geti skapað vandkvæði fyrir hefðbundna kostnaðargreiningu en í staðinn má beita aðferðum þar sem margar sviðsmyndir eru skoðaðar, og áhersla lögð á aðgerðir sem henta í mörgum þeirra. Einnig sé hægt að fást við óvissu um framtíðarþróun með því að vega mögulegar aðgerðir eftir því hversu sveigjanlegar þær eru. Þannig er reynt að forðast eftir megni aðgerðir sem gera illt verra ef sjávarborð hækkar mikið og nefnd dæmi um útfærslur á slíkum stefnum[32].

Sveigjanleg aðferðafræði af þessu tagi hefur verið viðhöfð á Íslandi um árabil í sjóvarnaráætlun sem er hluti samgönguáætlunar[33]. Í samvinnu við sveitarfélög er þörf á sjóvarnarverkefnum greind og framkvæmdum forgangsraðað með tilliti til þess hvaða varnir gegn sjávarflóðum og sjávarrofi séu mest aðkallandi. Þessi listi er uppfærður reglulega með tilliti til strandrofs, landhæðarbreytinga, sjávarborðsbreytinga og bygginga sjóvarna. Eftir byggingu sjóvarna fellur strandsvæði niður á listanum og að sama skapi getur rof fært strandsvæði ofar á listann.

Við hönnun sjóvarnargarða eru mannvirki hönnuð til að geta staðist ölduálag með um 100 ára endurkomutíma þar sem miðað er við spá um sjávarborðshækkun u.þ.b. 20 ár fram í tímann. Talið er hagkvæmara að miða við sjávarborðshækkun til 20 ára í stað lengri tíma, sjóvarnir þurfa viðhald og því er hagkvæmara að styrkja þær eftir því sem fram líður og forsendur breytast.

Í skýrslu milliríkjanefndar[31] er bent á að aðferðir til áhættustjórnunar þurfi að vera breytilegar og taka mið af landnotkun. Augljóst sé að annað gildi fyrir mannvirki sem þarfnist viðhalds og uppbyggingar á nokkurra áratuga fresti, en fyrir skipulag íbúðabyggðar eða aðra landnoktun sem flokka megi sem ósveigjanlega. Í slíkum tilvikum geti verið viðeigandi að nýta landsvæðið ekki undir byggingar, heldur gera ráð fyrir því að landið muni flæða. Dæmi um slíka stefnu eru ákvæði um að ný byggð sé í tiltekinni fjarlægð frá ströndu eða aðrar takmarkanir um byggð á lágsvæðum.

Hér að framan var fjallað um tillögur frá 10. áratug síðustu aldar varðandi skipulag á lágsvæðum og fram kom að á höfuðborgarsvæðinu hefði í einhverjum tilvikum verið misbrestur á að þeim tillögum væri fylgt.

12.1.4 Ofanflóð

Í kafla 4.6 í síðustu skýrslu vísindanefndar (V2008) er rakið að þrátt fyrir hlýnandi vetur er ólíklegt að dragi úr tíðni snjóflóða. Þótt hlýnun kunni að valda fækkun snjóflóða utan köldustu vetrarmánaða verður snjóflóðahætta áfram viðvarandi yfir háveturinn. Í þessu sambandi má taka fram að í gögnum Veðurstofu Íslands bendir ekkert til þess að dregið hafi úr tíðni snjóflóða, en á hlýjum vetrum eru þó vot snjóflóð og krapaflóð algengari en í köldum árum.

Við hop og þynningu skriðjökla geta skapast aðstæður þar sem fjallshlíðar umhverfis þá verða óstöðugar og hætta á skriðuföllum getur aukist. Nýlegt dæmi um slík skriðuföll er berghrun sem féll á ofanverðan Morsárjökul í mars 2007[34] og skriða sem féll á Steinsholtsjökul árið 2012. Sú öra þróun sem hefur átt sér stað undanfarna áratugi í myndun jökullóna við hopandi jökuljaðra hefur einnig aukið hættu á að skriðuföll geti fallið í þessi jaðarlón. Slíkt gerðist árið 1967 þegar stórt bergflóð féll á Steinsholtsjökul og í jaðarlón hans 15. janúar 1967 og olli stórri flóðbylgju[35].

Í kafla 4.2.3 í V2008 er stuttlega fjallað um sífrera í háfjöllum og bent á að bráðnun hans geti gert efstu hlíðar óstöðugar tímabundið. Útbreiðsla sífrera á Íslandi er illa þekkt, sérstaklega í fjallendi, en útreikningar sem

Mynd 12.5 Skriðan í Móafellshyrnu í Fljótum. (Ljósmynd Þorsteinn Sæmundsson, 20. september 2012.)

byggðust á veðurgögnum og fjórum rannsóknarborholum[36] benda til þess að í yfir 800–900 m hæð sé sífreri útbreiddur og í heildina þeki sífreri um 8% af landinu, eða um 8000 km^2. Í fjallshlíðum sem snúa til norðurs getur sífreri myndast mun neðar í fjallinu. Á síðustu árum hafa fallið a.m.k. þrjár skriður með blöndu af ís og lausefnum, árið 2011 í Torfufelli í Eyjafirði, árið 2012 í Móafellshyrnu í Fljótum (mynd 12.5) og 2014 í Árnesfjalli á Ströndum[37]. Öll þessi jarðhlaup koma úr bröttum hlíðum sem snúa móti NV til NA á svæðum sem eru nægilega köld til þess að sífrera gæti. Í Torfufelli og Móafellshyrnu var upptakasvæðið í 750 til 870 m hæð, en í Árnesfjalli var það í 350 m hæð. Þótt ekki sé hægt að fullyrða að þiðnandi sífreri sé orsakavaldur að þessum skriðum eru þær eftir sem áður óyggjandi dæmi um ísblönduð skriðuföll með upptök á sífrerasvæðum. Þó að erfitt sé að spá fyrir um líkur á skriðuföllum hefur jarðskrið í fjalllendi verið rannsakað með bylgjuvíxlmælingu frá gervihnöttum og þegar er hafið slíkt eftirlit á Seyðisfirði[38]. Brýn þörf er á kortlagningu sífrerasvæða í fjalllendi en slík kortlagning er nauðsynlegur undanfari frekara áhættumats.

12.1.5 Gróðureldar

Í kafla 4.6 V2008 er bent á að með meiri framleiðni gróðurs, aukinni útbreiðslu skóga og minnkandi beit aukist hætta á sinu- og skógareldum. Minnkandi snjóhula, auk breytinga á úrkomu að vori og sumri, hafa einnig áhrif á hættuna.

Mestu gróðureldar sem vitað er um á Íslandi urðu dagana 30. mars til 1. apríl árið 2006. Þeir náðu yfir 73 km^2 landsvæði[39]. Frá árunum 2006 til 2013 urðu 10 gróðureldar sem voru stærri en 1 hektari, fimm þeirra voru stærri en 10 hektarar og tveir stærri en 100 hektarar. Gróðureldar á Íslandi eru algengastir síðla vetrar og fram á vor, oftast vegna íkveikju, en síðustu ár hefur einnig orðið vart elda að sumarlagi[40]. Í áhættuskoðun Almannavarna kemur fram að hætta sé á skógar-, kjarr-, gróður- og sinueldum víða og mikill gróður nærri þéttbýli og sumarhúsabyggð kalli á aukinn viðbúnað. Þegar hefur verið unnin viðbragðsáætlun vegna gróðurelda í Skorradal[41] og unnið er að viðbragðsáætlunum fyrir fleiri svæði.

Í sumarhúsabyggðum er oft öflug trjárækt og fyrirsjáanlegt er að líkur á tjóni vegna gróður- og skógarelda muni aukast með augljósri hættu á mann- og eignatjóni.

12.1.6 Eldgos

Í kafla 4.6 í V2008 er fjallað um rýrnun jökla og aukna kvikuframleiðslu neðarlega í jarðskorpunni vegna farglosunar. Ef þessi kvika næði yfirborði gæti það aukið tíðni eldgosa, eða valdið umfangsmeiri gosum. Mat á því hversu mikið kvikuframleiðsla hefur aukist vegna þeirrar rýrnunar jökla sem þegar hefur átt sér stað nær frá 0.014 km^3 á ári[42] upp í 0.21–0.23 km^3 á ári[43]. Erfitt er að meta hversu mikið af þessari kviku nær yfirborði og hversu langan tíma það kann að taka. Ef gert er ráð fyrir að 25% af kvikunni skili sér til yfirborðs samsvarar það einu Eyjafjallajökulsgosi á 7 ára fresti. Þó

að þetta auki líkur á stærri og/eða tíðari gosum, er mikilvægt að hafa í huga að það getur tekið kviku áratugi eða árhundruð að berast til yfirborðs.

Eldgos hafa margþætta vá í för með sér[44], s.s. hraunrennsli og flóðahættu nærri eldstöðinni, auk gasmengunar og gjóskufalls á stærra svæði. Í áhættuskoðun Almannavarna kemur fram að afleiðingar eldgosa á samfélagið séu mjög víðtækar og að mörg lögregluumdæmi telji þörf á nánari skoðun vegna þeirra. Á undanförnum árum hefur verið unnið að heildaráhættumati vegna eldgosa á Íslandi[45]. Hættumat af þessu tagi er víðfeðmt og kemur inn á marga þætti, allt frá rannsóknum á eðli og hegðun eldvirkra svæða til fyrirbyggjandi aðgerða og viðbragðsáætlana um hvernig skuli bregðast við náttúruvá af völdum eldgosa. Á vegum verkefnisins hefur þegar verið lokið greiningum á flóðahættu tengdum eldgosum í Kötlu og Öræfajökli[46], auk mats á áfallaþoli vistkerfa í nágrenni Heklu með tilliti til öskufalls[47]. Eðlilegt er að áhætta vegna hugsanlegrar aukningar á eldgosum sem tengist þynningu jökla sé meðhöndluð sem hluti af slíku mati.

12.1.7 Áhættustýring og náttúruvá

Náttúruhamfarir af ýmsum toga hafa valdið íslensku þjóðinni búsifjum síðan land byggðist, en með skipulegri áhættustýringu er hægt að draga úr tjóni og álagi vegna þeirra. Í þessari grein hefur verið fjallað um áhrif loftslagsbreytinga á nokkrar tegundir náttúruvár. Fyrir hverja þeirra hefur verið rætt um aðgerðir til að stýra áhættu, þ.m.t. að breyta hönnunarstöðlum vegna veðurtengdrar áhættu, gera hættumat vegna flóðahættu í ám og við ströndina, greina ofanflóðahættu vegna þiðnandi sífrera, gera aðgerðaáætlanir vegna hættu á gróðureldum og greina áhættu vegna eldgosa. Þótt einstök verkefni kunni að vera ólík er aðferðafræðin við hættumat og áhættustýringu það ekki.

Áhætta er margþætt hugtak sem í hættumati tvinnar saman líkur á hættulegum atburði og afleiðingum hans. Í hverju tilviki vísar áhætta til ákveðinna samfélagshagsmuna sem hættumatið byggist á. Fyrir hverja tegund náttúruhamfara þarf því að greina hættuna og einnig samfélagslega hagsmuni, ákveða hverjir þeirra eru mikilvægastir og eðlilegast að horfa til við áhættumat. Síðan þarf að ákveða viðmiðunarmörk fyrir ásættanlega eða viðunandi áhættu og grípa til aðgerða í samræmi við það.

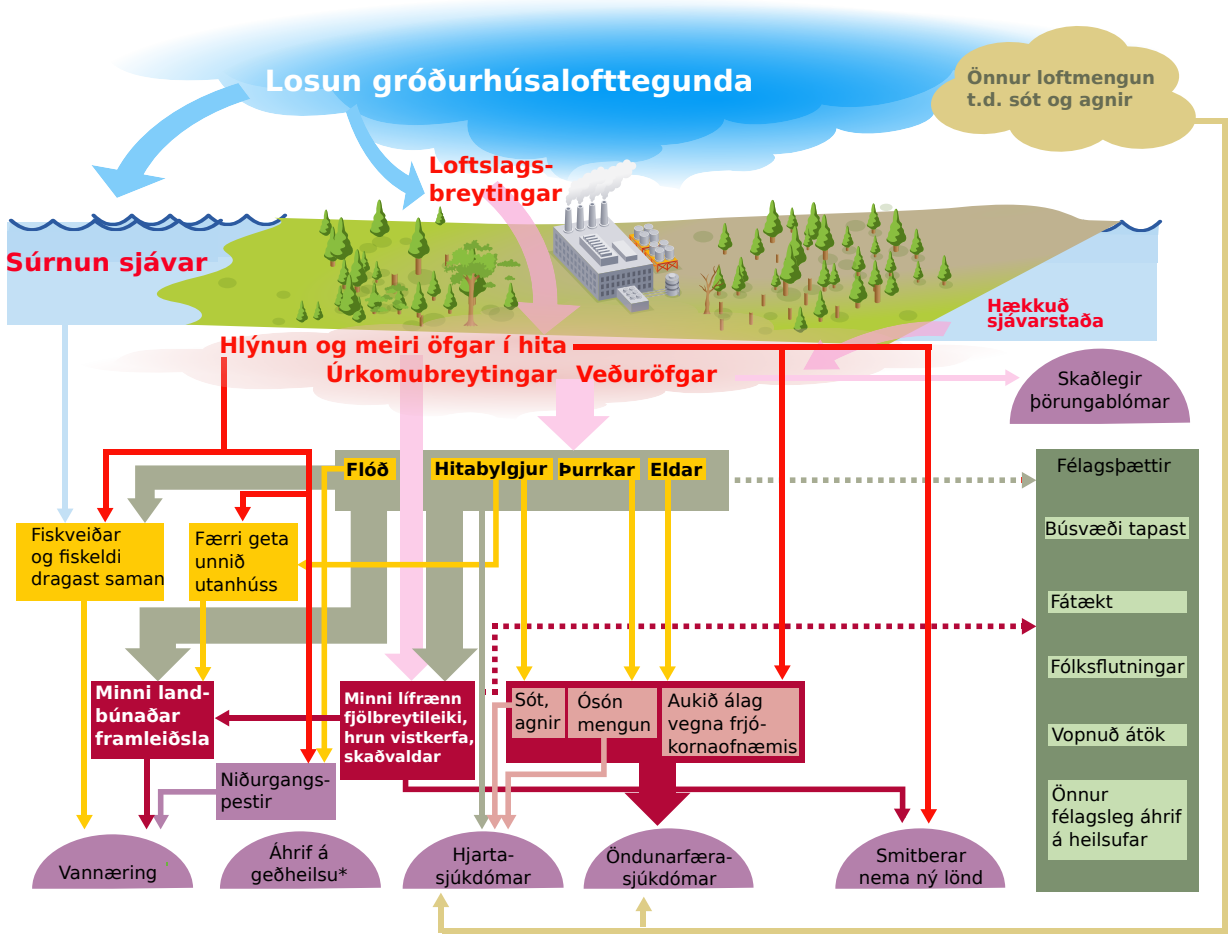
Loftslagsbreytingar kunna að auka líkur á sumum náttúrhamförum, sérstaklega hvað varðar árflóð, sjávarflóð, ofanflóð, skógarelda og eldgos. Í þessum þáttum hefur þegar verið hugað að áhættumati og

12A Um endurkomutíma náttúrhamfara

Margir aftakaatburðir eru þess eðlis að hægt er að leggja mat á líkindi þeirra, jafnvel þó ekki sé hægt að spá fyrir um hvenær þeir gerist. Með réttum gögnum má reikna tíðnidreifingu aftakaatburða og meta líkur þess að þeir verði á tilteknu tímabili. Þegar slíkir útreikningar eru settir fram er gjarnan talað um 10, 50 eða 100 ára atburði - og líkindum lýst með fullyrðingum eins og „100 ára flóð í Reykjavík er 5 m“. Þetta orðalag kann að valda ruglingi því það má túlka sem svo að ef sjávarstaða nái 5 m hljóti að líða 100 ár þangað það gerist næst. Þetta er ekki rétt túlkun, heldur er einungis átt við að líkur þess að flóð verði 5 m eða meira á hverju ári séu 1/100 (eða 1%). Vissulega er það svo að fyrir 1% árslíkur líða að jafnaði 100 ár milli atburða, en fyrir sérhvert 100 ára tímabil getur hent að atburðurinn gerist ekki, gerist einu sinni, tvisvar eða oftar. Tafla 12.2 sýnir líkindi þess að 100 ára atburður gerist a.m.k. einu sinni, tvisvar o.s.frv. á 100 ára tímabili. Svipuð líkindi fást fyrir 50 ára tímabil og „50 ára atburð“ (sem hefur 2% árslíkur) og einnig 10 ára tímabil og „10 ára atburð“ (sem hefur 10% árslíkur).

N	Líkur
1	63%
2	26%
3	8%
4	2%

Tafla 12.2 Líkindi þess að aftakaatburður með 1% líkur gerist a.m.k. N sinnum á 100 ára tímabili. Líkur þess að aftakaatburður gerist aldrei á tímabilinu eru 37% (eða 100–63). Svipaðar tölur fást ef reiknaðar eru líkur fyrir atburð með 2% árslíkur og 50 ára tímabil, eða 10% árslíkur og 10 ára tímabil.



*Mynd 12.6 Áhrif loftslagsbreytinga á heilsu. *Áhrif á geðheilsu eru afleiðing flókinnar samverkunar margra þátta á myndinni. (Aðlagað frá heimild 49.)*

stýringu, í mismunandi mæli þó eftir tegund náttúruhamfara. Þó að staða áhættustýringar sé ekki sú sama fyrir allar tegundir náttúruvár er eðlilegast að viðbrögð við aukinni áhættu vegna loftslagsbreytinga verði skipulögð í tengslum við áhættustýringu á núverandi vá og aðgerðir til að mæta henni efldar.

Tryggingar eru mikilvæg leið til að stýra áhættu og á Íslandi veitir VTÍ tryggingavernd gegn náttúruhamförum eins og rakið er í grein 11.5.2.1. Þrátt fyrir þær takmarkanir sem eru á bótaskyldu Viðlagatryggingar má finna dæmi um að greiða hafi þurft tjón sem að hluta mátti rekja til þess að mannvirki hafi verið vanhönnuð eða illa staðsett. Í ljósi þessa er mikilvægt að ábyrgð ólíkra stjórnsýslustiga, byggingaraðila og eigenda, sé skýr. Annars er hætta á að mistök á lægra stjórnsýslustigi valdi skaðabótaábyrgð á hærra stjórnsýslustigi, t.d. þannig að VTÍ þurfi að greiða fyrir tjón af völdum flóða vegna vanhannaðra eða illa staðsettra mannvirkja.

12.2 Heilbrigðismál

Möguleg áhrif loftslagsbreytinga á heilsufar þjóðarinnar voru rædd nokkuð í fyrri skýrslu og stendur sú umfjöllun enn fyrir sínu[48]. Samkvæmt nýrri greiningu má skipta heilsutengdum áhrifum loftslagsbreytinga í sex flokka: smitsjúkdóma, öndunarfærasjúkdóma, vannæringu, hjartasjúkdóma, áhrif á geðheilsu vegna samverkandi áhrifa annarra þátta og áhrif vegna hættulegs þörungablóma (mynd 12.6)[49]. Álag vegna þessara flokka er mismunandi fyrir ólíka samfélagshópa og milli svæða.

Líklegt er að heilsutengd áhrif loftslagsbreytinga á Íslandi muni tengjast smitleiðum vegna breytinga á tegundasamsetningu skordýra, aukinnar tíðni öndunarfærasjúkdóma vegna breytinga á gróðurfari og vaxandi magns frjókorna og myglugróa. Rannsóknir frá Norður-Ameríku norðan 44. breiddarbaugs sýna til dæmis að frjókornatímabil hefur lengst frá 13 í 27 daga[50] og

rannsóknir frá Sviss sýna aukningu í magni birkifrjókorna á árunum 1969–2006[51]. Eins og fjallað var um í kafla 9.3 mun skóglendi hér á landi aukast og því líklegt að birkifrjó aukist einnig. Fylgni hefur einnig verið staðfest á milli aukinnar tíðni myglu og loftslagsbreytinga vegna hærra rakastigs, og búist er við að tíðni myglu innandyra á köldum svæðum geti aukist um 5–10%[52].

Loftslagsbreytingar geta aukið fólksflutninga til landsins frá fátækari heimshlutum og leitt til aukinnar tíðni sjúkdóma hérlendis. Ólíklegt er að önnur áhrif, svo sem áhrif hitabylgna á hjartasjúkdóma, áhrif á vannæringu vegna uppskerubrests eða flóða verði umtalsverð hér á landi. Mögulegt er jafnvel að fækkun kaldra daga muni hafa jákvæð heilsutengd áhrif.

Í fyrri skýrslu vísindanefndar kom fram að miðað við núverandi þrótt heilbrigðiskerfisins benti ekkert til annars en að það myndi ráða við álag tengt loftslagsbreytingum. Nýleg rannsókn sýndi að viðeigandi viðbrögð við áhrifum loftslagsbreytinga á heilsu fælu í sér mikil tækifæri í bættri lýðheilsu til framtíðar[49]. Ástæða þykir því til að fylgjast vel með og bregðast við með viðeigandi hætti.

Tilvísanir

1 Allar sjávarstöðutölur hér eru í hnitakerfi Sjómælinga og 5 m flóð er því flóð sem nær 5 m hæð í því hnitakerfi.
2 Fjöldi látinna í sjóslysum er ráðandi í tölum á myndinni. Heimildir: Hagskinna, Hagstofan, 1997; Slysavarnafélagið Landsbjörg, 2001–2013; Rannsóknarnefnd samgönguslysa, 2013–2016.
3 Guðrún Jóhannesdóttir (ritstj). Áhættuskoðun almannavarna 2011. Ríkislögreglustjórinn almannavarnadeild. Reykjavík.
4 Sjá mynd 12.20 Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fichefet, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver & M. Wehner, 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility, auk umfjöllunar í kafla 14.6 í Christensen, J.H., K. Krishna Kumar, E. Aldrian, S.-I. An, I.F.A. Cavalcanti, M. de Castro, W. Dong, P. Goswami, A. Hall, J.K. Kanyanga, A. Kitoh, J. Kossin, N.-C. Lau, J. Renwick, D.B. Stephenson, S.-P. Xie & T. Zhou, 2013. Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. Báðir þessir kaflar eru í fimmtu matsskýrslu Milliríkjanefndar Sþ, sjá athugasemd 2 í kafla 3. Taka má fram að milliríkjanefndin notar orðalagið „low confidence“ um áreiðanleika reikninga á breytingum á lægðabrauta á Norður-Atlantshafi (sjá kafla 12.4.4.3).
5 Ásta Ósk Hlöðversdóttir 2010. Impacts of Climate Change on Wastewater Systems in Reykjavík, 2010. MSc. Thesis Faculty of Civil and Environmental Engineering and Natural Sciences, University of Iceland, Reykjavik. Sjá einnig umfjöllun í grein 11.1 um þessa rannsókn.
6 Sjá mynd 12.27 í skýrslu vinnuhóps I hjá IPCC 2013, sjá heimild 4.
7 Ríkislögreglustjóri og Viðlagatrygging 2014. Greining á áhrifum flóða í kjölfar eldgosa í Bárðarbungu. Mikilvæg úrlausnarefni.
8 Sjá nánar á tímarit.is.
9 Emmanuel Pagneux, Guðrún Gísladóttir & Árni Snorrason 2010. Inundation extent as a key parameter for assessing the magnitude and return period of flooding events in southern Iceland. Hydrological Sciences Journal, 55, 704-716.
10 Emmanuel Pagneux ofl. 2017. Flóð á vatnasviðum Eyjafjarðarár, Héraðsvatna, Hvítár í Borgarfirði, Lagarfljóts og Skjálfandafljóts: I. Yfirlit yfir orsakir, stærð og afleiðingar sögulegra atburða. Veðurstofa Íslands VI-2017-007.
11 Talan 6 flóð á áratug er byggð á samantekt Páls Imslands og Þorleifs Einarssonar frá 1991: Sjávarflóð á Eyrarbakka og Stokkseyri - um tíðni þeirra og orsakir og rannsóknir á strandjarðfræði hérlendis Reykjavík, Raunvísindastofnun Háskóla Íslands. RH-01-09, – en þar eru tiltekin 54 markverð sjávarflóð við Íslandsstrendur á fyrstu 90 árum síðustu aldar. Í skýrslunni Sjávarflóð á Íslandi (sjá 12) eru tiltekin 147 flóð á síðustu öld, en þar eru einnig minni flóð á skrá. Þessar tölur eru líklega vanmat á raunverulegri flóðatíðni því flóð sem ekki valda tjóni eru ólíkleg til að rata í skrár. Flóð sem valda verulegu tjóni eru mun færri og talningar sem þessar háðar því hvernig markverð sjávarflóð eru skilgreind.
12 Sjá skýrslu Guðrúnar E. Jóhannsdóttur 2017. Sjávarflóð á Íslandi Veðurstofa Íslands VI-20017-008.
13 Yfirlitsskýrsla um sjóvarnir árið 2011, Siglingastofnun, sjá einnig umfjöllun í grein 12.1.3.3. Í svari umhverfisráðherra vegna fyrirspurnar Lilju Rafneyjar Magnúsdóttur um sjávarflóð og sjávarrof (146. löggjafarþing , þingskjal 754–442) kemur fram að þau umdæmi sem hafi óskað eftir nánara mati í áhættuskoðun Almannavarna „séu undir við gerð sjóvarnaáætlunar þar sem sveitarstjórnir koma á framfæri óskum sínum um sjóvarnir“.
14 Sjá hliðargrein 12A Um endurkomutíma náttúrhamfara.
15 Matthías Ásgeirsson, Tandri Gauksson og Halldór Björnsson 2017. Öfgagreining á flóðhæðum í Reykjavík og Patreksfirði: Prófun á þröskuldsaðferð og samlíkum. Veðurstofa Íslands, VI 2017-003.
16 Sjá nánar Jónas Elíasson og Sveinn Valdimarsson 1993. Flóðhæðir í Reykjavíkurhöfn. Reykjavík, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands, í heimild 15 og í V2008. Fyrir Jónas og Svein hefur verið tekið tillit til sjávaryfirborðshækkunar með því að bæta 6 cm við niðurstöðurnar. Í heimild 15 voru notaðar þrjár ólíkar aðferðir, hér er notuð niðurstaða samlíkindareikninga sem er sú aðferð sem höfundar mæla með. Tölur eru í hæðakerfi Sjómælinga, en sjávarstöðutölur í því kerfi eru 1.82 m hærri en tölur í hæðakerfi Reykjavíkurborgar.
17 Að morgni hins 10. febrúar 1997 var háflæði eftir að loftþrýstingur hafði fallið frá 990 hPa niður í tæplega 955 hPa á sólarhring. Þó að allhvasst hafi verið aðfaranótt mánudags dró úr vindi síðla nætur og því ólíklegt að vindáhlaðandi hafi verið ráðandi. Loftvægi stóð lægst um hádegi, um 945 hPa, en þá hafði fallið frá og sjávarstaða var tæplega 2.5 m. Þótt sjávarstaðan hafi verið mjög há um morguninn gekk sjór ekki á land.
18 Sjá greinargerðina Hækkuð sjávarstaða á höfuðborgarsvæðinu. Áhrif og aðgerðir 2016. VSÓ ráðgjöf, Reykjavík.
19 Einar Helgason og Hlíf Ísaksdóttir 2007. Ánanaust – Eiðsgrandi Sjóvarnir Almenna Verkfræðistofan.
20 Sigurður Sigurðarson, 2004, Álagsforsendur sjóvarna við Ánanaust, Eiðsgranda og norður- og vesturhluta lands við gömlu höfnina. Siglingastofnun.
21 Gísli Viggósson, Jónas Elíasson og Sigurður Sigurðarson 2016. Ákvörðun á flóðhæð í Básendaflóði. Áfangaskýrsla til rannsóknasjóðs Vegagerðarinnar.
22 Í greinargerð Þorbergs Þorbergssonar 1980. Verkamannabústaðir við Eiðisgranda í Reykjavík. Sjávarhæð og grundun húsa – er vitnað í Meyvant Sigurðsson sem segir: „Hjá Ísaki á Bjargi stóðu kýr í hækla af vatni inni í fjósi. Sjávarhæð var slík, að róandi var frá Eiði til Skerjafjarðar og mýrin öll á kafi“. Meyvant segir þetta hafa verið í óveðrinu þegar franska rannsóknarskipið Pourquoi Pas? sökk, þ.e. aðfaranótt 16. september 1936. Sú dagsetning er þó líklega misminni því þrátt fyrir ítarlegar lýsingar á afleiðingum óveðursins í dagblöðum þessa tíma er ekki minnst á flóð við Seltjarnarnes, en hins vegar segir í Alþýðublaðinu þ. 30 október sama ár frá flóðum þ. 29. og er haft eftir ábúanda í Nesi (Kristínu Ólafsdóttur) að hún hafi aldrei áður séð slík flóð. Í þeirri grein kemur fram að víða hafi flætt yfir veginn suður á Nes. Ólíklegt er að Seltjarnarnes hafi verið umflotið tvívegis sama haustið.

23 Sjá Fjarhitun 1992. Skipulags- og byggingarreglur á lágsvæðum þar sem hætta er á flóðum. Reykjavík: Skipulag ríkisins. og einnig Fjarhitun hf. 1995. Lágsvæði, 2. áfangi Skipulags- og byggingarráðstafanir og sjóvarnir. Reykjavík: Skipulag ríkisins.

24 Sjá verkefnið Lágsvæði, viðmiðunarreglur fyrir landhæð sem styrkt var af Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar 2016. Sjá nánar Þórir Ingason. 2017. Ársskýrsla 2017. Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar, maí 2017.

25 Þingsályktun um landsskipulagsstefnu 2015–2026, samþykkt á Alþingi 16.03.2016 www.althingi.is/altext/145/s/1027.html

26 Sjá t.d. VSÓ Ráðgjöf, 2013, Umhverfisskýrsla C-1 fyrir Aðalskipulag Reykjavíkur; Ísafjarðarbær, 2015, Deiliskipulag Suðurtangi hafnar og iðnaðarsvæði og Bjarki Jóhannesson, 2017, Aðalskipulag Akureyrar 2018 – 2030 – drög til kynningar.

27 Sjá skýrslu VSÓ 2016; heimild 18). Flóðhæðin hér er í hnitakerfi Sjómælinga, en 5.8 m í því kerfi eru 4 m í kerfi Reykjavíkurborgar. Í rannsókninni sem vitnað er til er hnitakerfi Reykjavíkur notað og því talað um 4 m flóð. Sjávarborð á höfuðborgarsvæðinu þyrfti að hækka um rúma 0.6 m til þess að 100 ára flóðið næði 5.8 m en það gæti gerst síðla á þessari öld eða á fyrri hluta þeirrar næstu.

28 Sjá Anna Heiður Eydísardóttir 2015. Flóðavarnir fyrir Kvosina. Verkfræðistofan Efla, Reykjavík. Benda má á að hönnunarflóðið í þessari skýrslu miðaðist við eldra mat á hæð Básendaflóðs í Reykjavík, að viðbættum 1.4–2.0 m vegna sjávarstöðuhækkunar frá lokum 18. aldar til loka 21. aldar. Síðan skýrslan kom út hefur mat á hæð Básendaflóðs í Kvosinni lækkað eins og rakið er í grein 12.1.3.2. Ef nýtt mat er notað lækkar hönnunarflóðið um nálega 1 m sem bæði dregur úr tjóni og nauðsynlegum sjóvörnum. Þó að þessari flóðahæð verði að lokum náð, því sjávaryfirborðshækkun mun halda áfram öldum saman, er eftir sem áður mikilvægt að þessi rannsókn verði endurtekin fyrir lægra hönnunarflóð árið 2100.

29 Sjá umfjöllun í kafla 13.7.3 í AR5WG1 (sjá tilvitnun 2 í kafla 3) Milliríkjanefndin notar orðalagið „low confidence“ um áreiðanleika reikninga á svæðisbundnum breytingum á öldufari og breytinga á lægðabrautum á Norður-Atlantshafi (sjá kafla 12.4.4.3. í AR5WG1).

30 Vitousek Sean, Barnard Patrick L., Fletcher Charles H., Frazer Neil, Erikson Li, & Storlazzi Curt D. Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. Scientific Reports, 7(1):1399, 2017.

31 Wong, P.P., I.J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K.L. McInnes, Y. Saito & A. Sallenger 2014. Coastal systems and low-lying areas. Í Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., 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, and L.L.White (ritstj.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA, bls. 361-409.

32 Í heimild 31 er rætt um áhættustýringu strandflóða í Bretlandi (Thames Estuary Plan 2100), Hollandi (Delta Program) og sjóvarnarstefnu New York borgar.

33 Sjá umfjöllun um heimild 13 og grein 12.1.3.3. Umsjón þessa verkefnis er nú á forræði Vegagerðarinnar.

34 Þorsteinn Sæmundsson, Ivar Sigurðsson, Halldór G. Pétursson, Helgi Páll Jónsson, Armelle Decaulne, Matthew J. Roberts & Esther Hlíðar Jensen, 2011, Bergflóðið sem féll á Morsárjökull 20. mars 2007 – hverjar hafa afleiðingar þess orðið? Náttúrufræðingurinn 81 (3–4) 131-141.

35 Guðmundur Kjartansson 1968. Steinsholtshlaupið 15. janúar 1967. Náttúrufræðingurinn, 42(4) 120-169.

36 Etzelmüller, B., Farbrot, H., Guðmundsson, Á., Humlum, O., Tveito, O. E. & Björnsson, H. 2007, The regional distribution of mountain permafrost in Iceland. Permafrost Periglac. Process., 18: 185–199.

37 Sjá nánar Sæmundsson, Þ, C Morino, JK Helgason, SJ Conway & HG Pétursson. 2018. The triggering factors of the Móafellshyrna debris slide in northern Iceland: intense precipitation, earthquake activity and thawing of mountain permafrost. Science of The Total Environment, 621,1163-1175, doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.111. Einnig: Sæmundsson, Þ., Helgason, J.K. and Pétursson, H.P. 2014b: Decline of mountain permafrost and the occurrence of recent large debris slides in Iceland. European Geosciences Union, General Assembly 2014, Vienna, Austria, 27 April – 02 May 2014.

38 Sigurjón Jónsson. 2009. Slope creep in East Iceland observed by satellite radar interferometry, Jökull, 59, 89-102. Eftirlit með grjótjökli í Strandartindi fyrir ofan athafnasvæði á Seyðisfirði er nýlega hafið (Tómas Jóhannesson, persónul. uppl.) sjá m.a. umfjöllun í „Boða eftirlit með sífrera í Strandartindi", Vísir, 18. Febrúar 2018 (http://www.visir.is/g/2018180219022).

39 Þröstur Þorsteinsson, Borgþór Magnússon og Guðmundur Guðmundsson 2008. Sinueldarnir miklu á Mýrum 2006. Náttúrufræðingurinn 76 (3–4), 109–119.

40 Þröstur Þorsteinsson. 2014. Árstíðabreytingar í tíðni gróðurelda á Íslandi. Náttúrufræðingurinn 84 (1–2), 19 – 26.

41 Ríkislögreglustjórinn ofl., 2013, Viðbragðsáætlun vegna gróðurelda í Skorradal. Almannavarnadeild Rikislögreglustjóra.

42 Pagli, C. & F. Sigmundsson. 2008. Will present day glacier retreat increase volcanic activity? Stress induced by recent glacier retreat and its effect on magmatism at the Vatnajökull ice cap, Iceland, Geophys. Res. Lett., 35, L09304, doi:10.1029/2008GL033510.

43 Schmidt, P., B. Lund, C. Hieronymus, J. Maclennan, T. Árnadóttir & C. Pagli 2013. Effects of present-day deglaciation in Iceland on mantle melt production rates, J. Geophys. Res. Solid Earth, 118, 3366-3379, doi:10.1002/jgrb.50273.

44 Sjá yfirlit í Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason 2013. Náttúruvá á Íslandi, Eldgos og jarðskjálftar. Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan.

45 Hættumat vegna eldgosa er unnið innan verkefnisins GOSVÁ en að því standa Veðurstofa Íslands Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra, Jarðvísindastofnun Háskólans, Landgræðsla ríkisins og Vegagerðin.

46 Sjá 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. Reykjavík JHÍ, VÍ, Almvarnardeild RLS. Ítarlegri greinargerð má finna í Pagneux, E., Gudmundsson, M. T., Karlsdóttir, S. &

Roberts, M. J. (ritstj.) 2015. Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain. Reykjavík: IMO, IES-UI, NCIP-DCPEM.

47 Elín Fjóla Þórarinsdóttir, Fanney Ósk Gísladóttir, Arna Björk Þorsteinsdóttir, Sigmundur Helgi Brink og Guðmundur Halldórsson, 2017. Kortlagning á áfallaþoli vistkerfa í nágrenni Heklu með tilliti til öskufalls Landgræðsla Ríkisins.

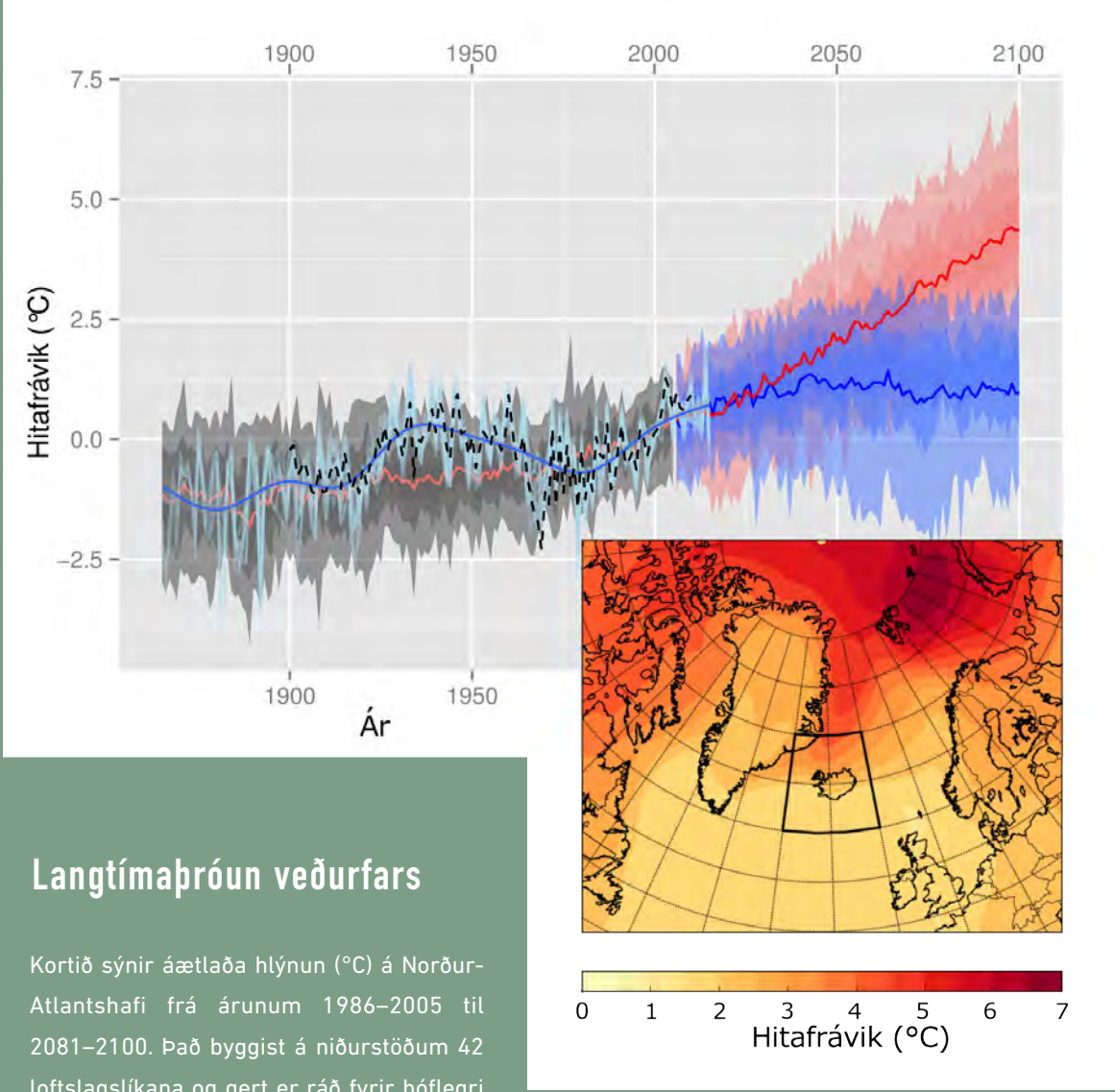
48 Sjá kafla 4.7.4 í V2008.

49 Watts, N ofl. 2017 The Lancet Countdown: tracking progress on health and climate change. Lancet 389 1151 – 1164.

50 Ziska L. ofl. 2011. Recent warming by latitude associated with increased length of ragweed pollen season in central North America, Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(10): 4248–4251.

51 Frei T. & Gassner E. 2008. Climate change and its impact on birch pollen quantities and the start of the pollen season an example from Switzerland for the period 1969-2006., Int J Biometeorol, 52(7):667-74.

52 Jaakkola M.S ofl. 2011. Indoor dampness and mold problems in homes and and asthma onset in children. Í Braubach M., og fleiri (ritstj.) í Environmental burden of disease associated with inadequate housing – a method guide to the quantification of health effects of selected housing risks in the WHO European region. 2011, World health organizaion, Geneva, Switzerland, 5-31.



Langtímaþróun veðurfars

Kortið sýnir áætlaða hlýnun (°C) á Norður-Atlantshafi frá árunum 1986–2005 til 2081–2100. Það byggist á niðurstöðum 42 loftslagslíkana og gert er ráð fyrir hóflegri losun gróðurhúsalofttegunda. Hlýnun er meiri norðan við landið, sérstaklega á svæðum þar sem minni hafís verður á síðari hluta aldarinnar.

Á kortið er teiknaður reitur umhverfis Ísland og á línuritinu má sjá þróun meðalhita í þessum reit. Fyrir tímabilið 1865–2005 byggist myndin á sögulegum gögnum (svartar og bláar línur) og niðurstöðum loftslagslíkana fyrir sama tímabil (gráskyggt svæði). Niðurstöður líkana og mælinga sýna mikinn náttúrulegan breytileika í veðurfari allt tímabilið sem og hlýnun á síðustu áratugum liðinnar aldar. Einnig sýnir línuritið líklega hlýnun á öldinni ef losun gróðurhúsalofttegunda verður mikil (rauðskyggt) og ef hún verður lítil (bláskyggt). Sjá nánari umfjöllun í kafla 4.