

Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi

Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar



UMHVERFISRÁÐUNEYTIÐ

Myndir á forsiðu:

Bæjarstaðaskógur er einn fátta sem stóð af sér marghátt-
aðar skógarnytjar sem og kólnandi veðráttu Litlu ísald-
ar, en hún náði hámarki á milli 1750 og 1850. Fyrir
hverja 1°C sem meðalhiti sumars og hausts hækkar má
gera ráð fyrir því að skógarmörk birkis færist ofar um
150 metra í landinu. *Ljósmynd: Bjarni Diðrik Sigurðsson.*

Langvía er algengur sjófugl hér við land. Sjófuglastofnar
eru viðkvæmir fyrir umhverfisbreytingum í hafinu við
landið og sveiflur eru talsverðar í stofnum bjargfugla og
varpi þeirra. Ekki er ólíklegt að umtalsverðar breytingar
geti orðið á varpstofnum margra sjófuglategunda á
næstu áratugum samfara hlýnandi veðurfari. *Ljósmynd: Freydis Vigfúsdóttir.*

Brúin yfir Heinabergsvötn á Mýrum í Austur-Skaftafells-
sýslu. Nýlokið var að brúa vötnin árið 1948 þegar þau
brutu sér leið til vesturs í Kolgrímu meðfram hopandi

jökuljaðri og brúin stóð á þurru. Heinabergsjökull hefur
hopað um 2,7 km á liðlega einni öld. Ein afleiðing
minnkandi jökla eru breyttir farvegir jökulvatna sem frá
þeim rennur. *Ljósmynd: Helgi Jóhannesson.*

Fjallkrækill er sjaldgæf háfjallaplanta sem vísbendingar
eru um að sé á undanhaldi í flóru Íslands. Fjallkrækill er
hánorrænn og vex eingöngu á stöku fjallavæðum norð-
anlands. Plantan er á valista og með hlýnandi loftslagi er
hætt við að hún hverfi algerlega úr flóru Íslands. *Ljós-
mynd: Hörður Kristinsson.*

Úti af Skoruvíkurbjargi á Langanesi eru fengsæl fiski-
mið. Hlýnun sjávar á norðurslóð kann að takmarka út-
breiðslu norrænna fiskistofna eins og loðnu. Það gæti
aftur haft neikvæð áhrif á fæðubúskap þorsks. Hafa
verður í huga að orsakasamhengi í vistkerfi sjávar er
flókið og óvíst hvernig einstakir stofnar bregðast við
hlýnandi umhverfi. *Ljósmynd: Ragnar Th. Sigurðsson.*



UMHVERFISRÁÐUNEYTIÐ

Umhverfisráðuneytið júlí 2008

Umbrot og hönnun: Margrét E. Laxness
Prentun: Guðjón Ó vistvæn prentsmiðja
ISBN 978-9979-839-28-6



Hvernig á að vitna í skýrsluna:

Halldór Björnsson, Árný E. Sveinbjörnsdóttir, Anna K. Danielsdóttir,
Árni Snorrason, Bjarni D. Sigurðsson, Einar Sveinbjörnsson, Gísli
Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Snorri Baldursson, Sólveig Þor-
valdsdóttir og Trausti Jónsson. 2008. Hnattrænar loftslagsbreytingar
og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreyt-
ingar. Umhverfisráðuneytið.

Ávarp umhverfisráðherra



Fyrir rúmum 100 árum sýndi Svíinn Svante Arrhenius fram á að aukinn styrkur koldíoxíðs gæti valdið hlýnun lofthjúpsins, en langur tími leið áður en fólk vaknaði almennt til vitundar um að mannkynið hefði áhrif á loftslag jarðar með athöfnum sínum. Árið 1990 kom út fyrsta úttekt Vísindanefndar Sameinuðu þjóðanna, sem færði sterk rök fyrir því að loftslagsbreytingar af manna völdum ættu sér stað. Fjórdða úttektin kom svo út 2007 og þar er tekinn af allur efi: Loftslagsbreytingar af völdum manna eru ótvíræðar og munu valda mikilli röskun á komandi áratugum ef ekki er gripið í taumana.

Viðbrögð við hlýnun jarðar snerta flest svið mannlegra athafna og er því ekki að undra að það sé flókið og umdeilt viðfangsefni. Við þurfum að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og auka bindingu kolefnis úr andrúmslofti, auk þess að laga okkur að óhjákvæmilegum breytingum. Aðgerðir gegn loftslagsbreytingum eru hnattrænt verkefni sem kallar á þátttöku allra ríkja eftir getu og aðstæðum.

Aðgerðir munu duga skammt ef þær eru ekki vel grundaðar. Leiðsögn vísindanna er nauðsynleg til þess. Við þurfum að skilja líklegar afleiðingar loftslagsbreytinga og afleiðingar aðgerða gegn þeim—og afleiðingar aðgerðaleysis. Þekkingu manna á loftslagsbreytingum, orsökum þeirra og afleiðingum, hefur fleygt fram á undanförunum árum, á heimsvísu sem hér á landi. Þessi skýrsla vísinda-

nefndar um loftslagsbreytingar ber því glöggvitni og markar nokkur tímamót í umræðu um loftslagsbreytingar á Íslandi. Aldrei fyrr hefur upplýsingum um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra verið safnað saman á einn stað á jafn aðgengilegan hátt og hér. Ég vonast til að þær muni gagnast jafnt almenningi sem stjórnámálamönnum og öðrum þeim sem þurfa að taka ákvarðanir á grundvelli vísindalegra upplýsinga.

Ísland er að mörgu leyti kjörinn vettvangur rannsókna og vöktunar á loftslagsbreytingum og ég vonast til að í framtíðinni verði vísindastarf sem miðar að auknum skilningi okkar á afleiðingum loftslagsbreytinga eftt. Hér má vakta áhrif hlýnunar á hafstrauma og hafís og lífríki sjávar á svæði þar sem heitir og kaldir straumar mætast. Nýjar tegundir lífvera nema land á meðan aðrar kuldakærari hoga. Jöklar Íslands eru líka að hoga og sýna hlýnun á áþreifanlegan hátt. Útlínur Vatnajökuls, stærsta jökuls heims utan heimskautasvæðanna, gætu orðið lifandi táknmynd loftslagsbreytinga.

Ég vil þakka þeim einstaklingum og stofnunum sem tóku þátt í gerð þessarar skýrslu og óska þeim til hamingju með útkomuna. Vísindin efla alla dáð og eiga að vera okkur leiðsögn í glímunni við eitt mest aðkallandi viðfangsefni 21. aldarinnar.

Þórunn Sveinbjarnardóttir
umhverfisráðherra

Ávarp umhverfisráðherra	3	2.2.3 Úrkoma	34
Efnisyfirlit	4	2.2.4 Loftþrýstingur	34
Inngangur	7	2.2.5 Aðrir veðurþættir	35
1. kafli Yfirlit um hnattrænar loftslagsbreytingar		2.3 Náttúrulegar veðurfarssveiflur og hafið við Ísland	37
1.1 Fjórða úttekt Millirikjanefndar Sameinuðu þjóðanna	9	2.3.1 Breytingar á ástandi sjávar við Ísland	37
1.2 Breytingar sem þegar hafa átt sér stað	9	2.3.2 Breytingar á sjávarstöðu	39
1.2.1 Breytingar á gróðurhúsalofttegundum, loftörðum og varmageislun í lofthjúpnunum	9	2.4 Vatnafar og jöklar	42
1.2.2 Breytingar á lofthita	11	2.4.1 Flokkun vatnsfalla	42
1.2.3 Úrkomubreytingar	11	2.4.2 Jöklar	44
1.2.4 Breytingar á snjóhulu, jökulum, jökulhvelum og hafis	12	2.5 Breytingar á lífríki sjávar við Ísland	45
1.2.5 Breytingar á hafsvæðum	14	2.5.1 Plöntu- og dýrasvif	45
1.3 Orsakir orðinna loftslagsbreytinga	14	2.5.2 Nýttastofnar sjávar og fisktegundir	47
1.4 Breytingar á umhverfi og vistkerfum	16	<i>Þorskur og aðrir botnfiskar</i>	47
1.5 Orsakir breytinga á umhverfi og vistkerfum	16	<i>Uppsjávarstofnar</i>	51
1.6 Samfélagsleg áhrif loftslagsbreytinga á liðnum áratugum	17	<i>Sjaldgæfar tegundir og nýjar</i>	52
1.7 Breytingar á komandi öld	17	<i>Sjávarspendýr</i>	52
1.7.1 Jafnvægissvörun loftslags: Hlýnun vegna tvöföldunar gróðurhúsalofttegunda	17	2.6 Breytingar á lífríki á landi	54
1.7.2 Mögulegar losunarsögur gróðurhúsalofttegunda: Sviðsmyndir IPCC	18	2.6.1 Gróðurfar	54
1.7.3 Hnattræn hlýnun vegna aukningar gróðurhúsalofttegunda	19	<i>Bein áhrif CO₂</i>	54
1.7.4 Aðrar afleiðingar loftslagsbreytinga	20	<i>Áhrif loftslagsbreytinga</i>	54
1.8 Afleiðingar loftslagsbreytinga fyrir umhverfi og vistkerfi	21	2.6.2 Dýralíf	56
1.9 Samfélagleg áhrif loftslagsbreytinga á komandi öld	22	<i>Fuglar</i>	56
1.10 Svæðisbundin áhrif loftslagsbreytinga	23	<i>Smádýr</i>	56
1.11 Viðbrögð við loftslagsbreytingum	23	2.6.3 Vatnalíf	57
Tilvísanir	24	2.7 Áhrif veðurfarsbreytinga á atvinnulíf	59
2. kafli Loftslag og náttúrufar á Íslandi		2.7.1 Sjávarútvegur	59
2.0 Inngangur	27	2.7.2 Landbúnaður	60
2.1 Náttúrulegar veðurfarsbreytingar á Íslandi	27	2.7.3 Orkukerfi	62
2.1.1 Elstu jarðlög á Íslandi	29	2.7.4 Aðrar atvinnugreinar	63
2.1.2 Síðasta jökulskeld	29	Tilvísanir	65
2.1.3 Nútími	29	3. kafli Túlkun sviðsmynda fyrir Ísland	
2.1.4 Um hitafar á Íslandi frá landnámi til 1800	32	3.0 Inngangur	71
2.2 Veðurfar á Íslandi síðustu 200 ár	33	<i>3A Náttúrulegur breytileiki og spár um hitafar</i>	72
2.2.1 Tímabil veðurmælinga	33	3.1 Svæðisbundnar breytingar við Ísland	73
2.2.2 Hitafar	33	3.1.1 Lofthiti	73
		3.1.2 Breytingar á árstíðasveiflu hita	76
		3.1.3 Ársúrkoma	77
		<i>3B Hringrásin í Norður-Atlantshafi</i>	
		<i>og loftslagsbreytingar</i>	78
		3.1.4 Breytingar á árstíðasveiflu úrkomu	81
		3.2 Breytingar á öðrum veðurtengdum þáttum	83
		Tilvísanir	84

4. kafli Afleiðingar loftslagsbreytinga á Íslandi

4.0 Inngangur	85
4.1 Breytingar á ástandi sjávar og hafiss	85
4.2 Afleiðingar loftslagsbreytinga á jökla og vatnafar	88
4.2.1 Jöklar	88
4.2.2 Vatnafar	89
4.2.3 Sífreri	91
4.3 Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki sjávar	92
4.3.1 Fiskistofnar	92
4.3.2 Annað lífríki í sjó	93
4.4 Áhrif á lífríki á landi	94
4.4.1 Gróðurfar	94
4.4.2 Dýralíf	95
4.5 Líklegar sjávarstöðubreytingar	96
4.6 Loftslagsbreytingar og Náttúruvá	98
4.6.2 Áhættustýring vegna loftslagsbreytinga	100
4A Almenn yfirlit um áhættustýringu vegna náttúruvá	101
4.7 Samfélagsmál	102
4.7.1 Landbúnaður	102
4.7.2 Sjávarútvegur	103
4.7.3 Samgöngur	104
4.7.4 Heilsufar	104
4.7.5 Hönnun mannvirkja á lágsvæðum	105
4.7.6 Orkuframleiðsla og orkukerfi	106
Tilvísanir	107

5. kafli Samantekt

Inngangur	111
Hnattrænar breytingar	111
Merkjanlegar breytingar í náttúrufari á Íslandi	112
Náttúrufar og samfélag á Íslandi er viðkvæmt fyrir hitabreytingum	112
Vatnafar	112
Lífríki sjávar	112
Lífríki á landi	112
Atvinnulíf	113
Sjávarborð	113
Margþættir orsakavaldar	113
Umfang og afleiðingar loftslagsbreytinga á Íslandi á næstu áratugum	113
Loftslagsspár	113
Vatnafar	113
Breytingar í hafi	113
Lífríki sjávar	116
Lífríki á landi	116
Náttúruvá	116
Atvinnulíf	116
Samgöngur	117
Heilsufar	117
Sjávarborð	117
Vöktun, rannsóknir og aðlögun	117
Vöktun	117
Rannsóknir	118
Atriði sem huga þarf að varðandi aðlögun	118

Inngangur

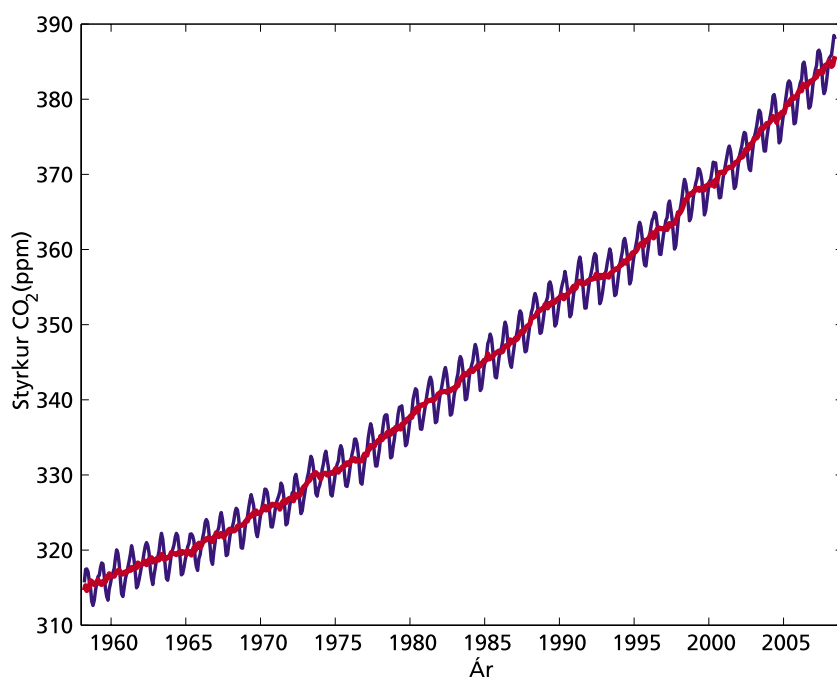
Á 19. öld varð mönnum ljóst að lofthjúpurinn hækkar meðalhita jarðar. Vissar lofttegundir breyta varmageislun frá jörðinni þannig að neðri hluti lofthjúpsins og yfirborð jarðar hlýna. Þessi áhrif eru nefnd gróðurhúsaáhrif, og án þeirra væri meðalhiti jarðar undir frostmarki. Vitað var að koldíoxíð (CO_2) er mikilvirk gróðurhúsalofttegund og því þótti ástæða til að fylgjast með styrk þess í lofthjúpunum. Ef magn CO_2 og annarra gróðurhúsalofttegunda eykst má búast við auknum gróðurhúsaáhrifum og hnattrænni hlýnun. Um miðja síðustu öld lék grunur á að bruni jarðefnaeldsneytis hefði aukið styrk CO_2 í lofthjúpunum frá því um iðnbyltingu 1750, en ítarlegar mælingar vantaði.

Samfelldar mælingar á styrk CO_2 í lofthjúpunum hófust 1958 á Mauna Loa fjalli í Kyrrahafi. Þessi mælistaður var

valinn þar sem hann er langt frá helstu útblástursslóðum. Strax á fyrstu árum mælinganna kom í ljós að styrkur CO_2 í lofthjúpunum jókst ár frá ári. Niðurstöður mælinga frá Mauna Loa má sjá á mynd 1.1 og er aukningin er greinileg. Við upphaf mælinganna var styrkur CO_2 um 315 ppm¹ en árið 2008 hafði hann vaxið í rúmlega 380 ppm.

Í kjölfar rannsókna á áhrifum og afleiðingum aukinna gróðurhúsaáhrifa varð ljóst að alþjóðasamfélagið þurfti að geta gengið að traustum upplýsingum um stöðu þekkingar hverju sinni og settu Sameinuðu þjóðirnar á fót stofnun í þessum tilgangi.

Milliríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar var stofnuð árið 1988 og hefur það hlutverk að taka



Mynd 1.1 Styrkur CO_2 í lofthjúpunum mældur á Mauna Loa. Bláa línan sýnir mánaðargildi, rauða línan sýnir reiknaðan ársferil. Mælingar ná frá marsmánuði 1958 til júnímánaðar 2008. Mæliröðin frá Mauna Loa er sú lengsta samfellda, en samhljóða niðurstöður hafa fengist víðsvegar um heim. (Gögn frá bandarísku veðurstofunni NOAA).

saman vísinda-, tækni-, félags- og efnahagslegar upplýsingar um grundvöll þekkingar á loftslagsbreytingum af mannavöldum og miðla þeim til ríkisstjórna og annarra stefnumótenda. Á ensku heitir nefndin *Intergovernmental Panel on Climate Change* sem er skammstafað IPCC².

Nefndin vinnur reglulega úttektir sem fjalla um vísindalega þekkingu á loftslagsbreytingum af mannavöldum, um afleiðingar þessara breytinga og um aðlögun og viðbrögð til þess að sporna við þeim. Úttektir eru gerðar á opinn og gagnsæjan hátt en IPCC stundar hvorki rannsóknir né eftirlit með veðurfari, heldur byggja samantektir nefndarinnar að megninu til á greinum sem birtar hafa verið í ritrýndum tímaritum.

Úttektir nefndarinnar eru unnar í þremur mismunandi vinnuhópum. Vinnuhópur eitt (WGI) fjallar um vísindalega þekkingu á veðurfari og loftslagsbreytingum. Vinnuhópur tvö (WGII) metur tjónnæmi (e. vulnerability) félags-, efnahags- og náttúrulegra kerfa, neikvæðar og jákvæðar afleiðingar loftslagsbreytinga og möguleika á aðlögun. Vinnuhópur þrjú (WGIII) metur leiðir til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda og aðrar leiðir til að koma í veg fyrir loftslagsbreytingar.

Milliríkjanefndin hefur gefið út fjórar úttektir og kom sú þriðja (s.k. TAR úttekt) út árið 2001 en sú fjórða (s.k. AR4 úttekt) árið 2007. Á þeim árum sem liðu á milli útgáfu TAR og AR4 bættist verulega í sarp vísindalegrar þekkingar á loftslagsbreytingum, auk þess sem ummerki loftslagsbreytinga af mannavöldum urðu merkjanlegri en fyrr.

Í kjölfar útgáfu fjórðu úttektarinnar skipaði umhverfisráðherra vísindanefnd um loftslagsbreytingar á haustdögum 2007 og fól henni að skila skýrslu um líkleg áhrif hnattrænna loftslagsbreytinga á Íslandi og atriði sem huga þyrfti að varðandi aðlögun að þeim.

Nefndina skipuðu

Halldór Björnsson, haf- og veðurfræðingur, formaður, Árný Erla Sveinbjörnsdóttir, jarðfræðingur, varaformaður,

Anna Kristín Daniëlsdóttir, líffræðingur,

Árni Snorrason, vatnafræðingur,

Bjarni D. Sigurðsson, skógfræðingur,

Gísli Viggóssón, verkfræðingur,

Jóhann Sigurjónsson, sjávarlíffræðingur,

Snorri Baldursson, líffræðingur,

Sólveig Þorvaldsdóttir, verkfræðingur,

Trausti Jónsson, veðurfræðingur.

Ritari nefndarinnar var Einar Sveinbjörnsson, veðurfræðingur.

Þessi skýrsla er afrakstur vinnu nefndarinnar. Hún byggir að hluta á fjórðu úttekt IPCC, en einnig að verulegu leyti á rannsóknum íslenskra og erlendra vísindamanna á umhverfisbreytingum á Íslandi. Margir vísindamenn mættu á fundi nefndarinnar og kynntu rannsóknaniðurstöður, og einnig lögðu margir vísindamenn nefndinni til efni og lásu yfir skýrsludrög. Nefndin er þessum aðilum mjög þakklát. Hjálmar Vilhjálmsson fiskifræðingur, Jón Egill Kristjánsson prófessor og Tómas Jóhannesson jöklafræðingur komu að efnislegri samræmingu skýrslunnar. Kann nefndin þeim þakkir fyrir.

Fyrsti kafli skýrslunnar fjallar um niðurstöður fjórðu úttektar milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna (IPCC). Annar kafli fjallar um loftslag á Íslandi og þær breytingar sem orðið hafa á náttúrufari Íslands síðustu áratugina samfara hnattrænni og staðbundinni hlýnun. Þriðji kafli fjallar um líklegt umfang loftslagsbreytinga á Íslandi á nýhafinni öld og í fjórða kafla er fjallað um áhrif þessara breytinga á náttúrufar á Íslandi og á ýmsa innviði samfélagsins, s.s. frumatvinnuvegi, orkugeira og samgöngur. Einnig er í þessum kafla rætt um náttúruvá og um sjávarborðshækkun og áhrif hennar á skipulag lágsvæða. Skýrslunni lýkur með stuttri samantekt á helstu niðurstöðum.

1. kafli

Yfirlit um hnattrænar loftslagsbreytingar

1.1 Fjórða úttekt Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna

Fjórða úttekt IPCC kom út á árinu 2007. Hér verða raktar stuttlega niðurstöður vinnuhópa eitt og tvö³. Fyrst verða raktar þær breytingar á varmageislun sem hafa átt sér stað frá upphafi iðnbyltingar, en þessar breytingar eru hin eiginlegu auknu gróðurhúsaáhrif. Síðan verður rætt um loftslagsbreytingar liðinnar aldar og að hve miklu leyti þær séu af mannavöldum. Þá verður rætt um loftslagsbreytingar á komandi öld, og áhrif þeirra á ýmis náttúru- og samfélagskerfi. Loks verður stuttlega rætt um aðlögun að áhrifum loftslagsbreytinga.

1.2 Breytingar sem þegar hafa átt sér stað

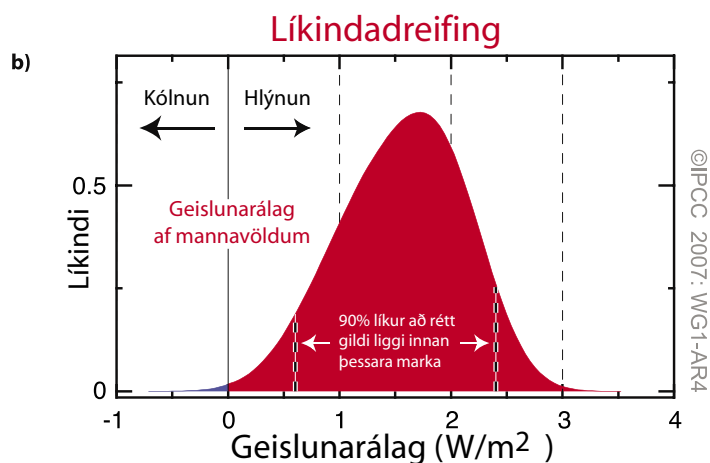
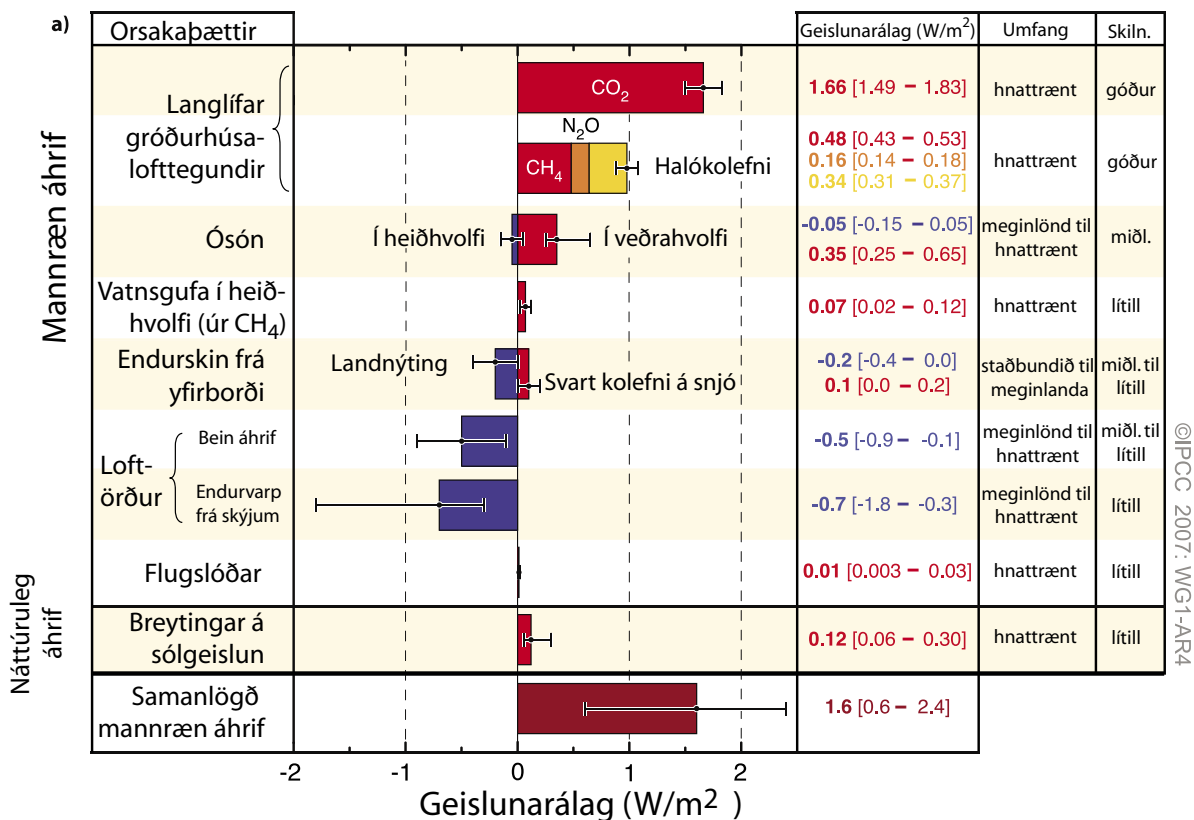
1.2.1 Breytingar á gróðurhúsalofttegundum, loftörðum og varmageislun í lofthjúpnun

Frá upphafi iðnbyltingar (um 1750) hafa athafnir manna valdið því að styrkur koldíoxíðs (CO_2), metans (CH_4) og köfnunarefnisoxíðs (N_2O) í andrúmsloftinu hefur aukist verulega. Styrkur CO_2 í andrúmslofti er nú þriðjungur meiri en fyrir upphaf iðnbyltingar. Styrkur bæði CO_2 og CH_4 er nú meiri en verið hefur í a.m.k. 650.000 ár, eða eins langt aftur í tímann og hægt er að sjá út frá upplýsingum úr ískjörnum. Þessar þrjár lofttegundir eru helstu langlífðu gróðurhúsalofttegundirnar⁴, en aukning þeirra stafar ýmist af bruna jarðefnaeldsneytis eða breytingum á landnotkun. Aukning á styrk CO_2 er einkum vegna bruna jarðefnaeldsneytis en í minna mæli af völdum breytinga á landnotkun. Hins vegar er aukning á styrk N_2O er fyrst og fremst tengd landbún-

aði og breytingum á landnotkun. Meðal tilbúinna gróðurhúsalofttegunda (sem eru *manngerðar*, þ.e. myndast ekki af náttúrulegum orsökum) eru s.n. klór-flúor-kolefni (CFC), vetnis-flúor-kolefni (HFC) og fleiri efna-sambönd sem innihalda kolefni og flúor. Sum þessara efnasambanda eru ósóneyðandi og hefur notkun þeirra verið bönnuð skv. Montreal-bókuninni og styrkur þeirra fer minnkandi⁵.

Aukning gróðurhúsalofttegunda breytir afdrifum varmageislunar í lofthjúpnun. Mælikvarði á þetta er *geislunarálág*⁶ sem er aukning varmageislunar í átt að yfirborði jarðar. Jákvæðu geislunarálagi fylgja aukin gróðurhúsaáhrif. Geislunarálág vegna aukningar CO_2 er um $1,66 \text{ W/m}^2$ en samantlagt álag allra langlífra gróðurhúsalofttegunda er $2,63 \text{ W/m}^2$. Ryk í lofti, sót, ar⁷ og aðrar loftörður, geta endurvarpað sólgeislun frá lofthjúpnun, auk þess sem það getur haft áhrif á skýjamyndun. Þetta eru s.n. *bein* og *óbein* áhrif loftarða og í heild eru þau kælandi⁸. Geislunarálág loftarða er því neikvætt og vegur á móti geislunarálagi langlífra gróðurhúsalofttegunda. Samantekt á þessum áhrifum má sjá á mynd 1.2. Myndin sýnir jákvætt geislunarálág vegna aukningar gróðurhúsalofttegunda og neikvætt álag loftarða. Einnig eru sýnd áhrif þátta sem valda minna álagi, þ.e. áhrif endurskins frá yfirborði, áhrif ósóns, flugslóða (þ.e. skýja sem myndast í kjölfari flugvéla) og breytinga í sólgeislun. Dálkurinn lengst til hægri gefur til kynna vísindalegan skilning á hinum ýmsu ferlum. Skilningur á áhrifum gróðurhúsalofttegunda á geislunarálág er góður, en síðri að því er varðar loftörður og ýmsa aðra þætti. Neðri myndin sýnir að í heildina hefur geislunarálág aukist, líklegast um $1,6 \text{ W/m}^2$ en rifleg viki-

Breyting geislunarþúskaþar síðan 1750



Mynd 1.2 a) Geislunarálág (W/m^2) frá upphafi iðnbyltingar og helstu orsakabættir. Rauðar súlur sýna áhrif til hlýnunar jarðar en bláar til kólnunar. Sýnd eru áhrif gróðurhúsalofttegunda, auk beinna og óbeinna áhrifa loftarða. Einnig eru sýnd áhrif ósóns, vatnsgufu í háloftum, áhrif breytinga á yfirborði jarðar á endurskinsstuðul, áhrif flugslóða, og breytinga á sólgeislun. Þriðji dálkurinn sýnir mat á geislunarálági þessara áhrifavalda. Fjórði dálkurinn sýnir hversu víðfeðm áhrif hvers orsakabættar eru, og fimmti dálkurinn gefur til kynna stöðu vísindalegrar þekkingar á hverjum orsakabætti. b) Mat á samantöldu geislunarálági allra þáttanna í a) með óvissumörkum. (Heimild IPCC, sjá nánar tilvísun 4).

mörk eru þó á þessu mati. Þessi ríflegu víkmörk stafa að stórum hluta af takmörkuðum skilningi á beinum og óbeinum áhrifum loftarða.

Með því að skoða framlag hversrar gróðurhúsalofttegundar og loftarða til geislunarálags má reikna *jafngildisstyrk* CO_2 , eða $\text{CO}_{2\text{-jg}}$. Þetta er sá styrkur CO_2 sem þarf til þess að framkalla sama geislunarálag og gefin samsetning af gróðurhúsalofttegundum og loftörðum⁹. Þegar rætt er um aukningu gróðurhúsalofttegunda er handhægt að mæla aukninguna í $\text{CO}_{2\text{-jg}}$. Ef geislunarlagið er þekkt¹⁰ er hægt að meta styrk $\text{CO}_{2\text{-jg}}$. Fyrir geislunarálagið á mynd 1.2 ($1,6 \text{ W/m}^2$) er styrkur $\text{CO}_{2\text{-jg}}$ um 375 ppm en með ríflegum óvissumörkum.

1.2.2 Breytingar á loftþita

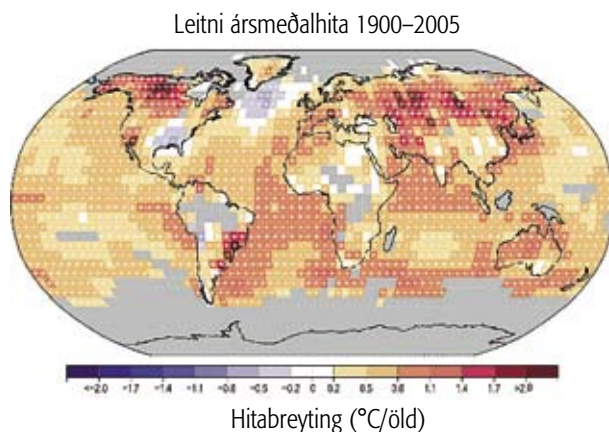
Frá upphafi iðnbyltingar (um 1750) hefur hlýnað á jörðinni. Á síðastliðnum 100 árum er hlýnun við yfirborð jarðar um $0,74^\circ\text{C}$ að meðaltali. Mynd 1.3 sýnir¹¹ að víðast á yfirborði jarðar hefur hlýnað frá upphafi 20. aldar. Hlýnunin er mest yfir vissum hlutum N-Ameríku og Asíu og er almennt minni yfir úthöfum en yfir meginlöndum. Á nokkrum stöðum í heiminum hefur ekki hlýnað á þessu tímabili, t.d. yfir hafsvæðinu suðvestan við Ísland. Mynd 1.4 sýnir¹² að á síðustu áratugum hefur hlýnunin aukist: á tímabilinu 1981–2005 var hlýnunin tæplega $0,18^\circ\text{C}$ á áratug sem er ríflega tvöföld meðalhlýnun hvers áratugar síðustu 100 árin og u.þ.b. fjórföld meðalhlýnun hvers áratugar síðustu 150 árin. Einnig sýnir myndin að á síðustu áratugum er hlýnunin víðtækari en á mynd 1.3, og m.a. hefur hlýnað yfir hafsvæðinu suðvestan við Ísland. Efst til hægri á mynd 1.4 eru sýndar niðurstöður gervihnattamælinga á hitabreyt-

ingum í veðrahvolfi og sýna þær einnig hlýnun um allt norðurhvel jarðar, og víðast hvar á suðurhvelinu.

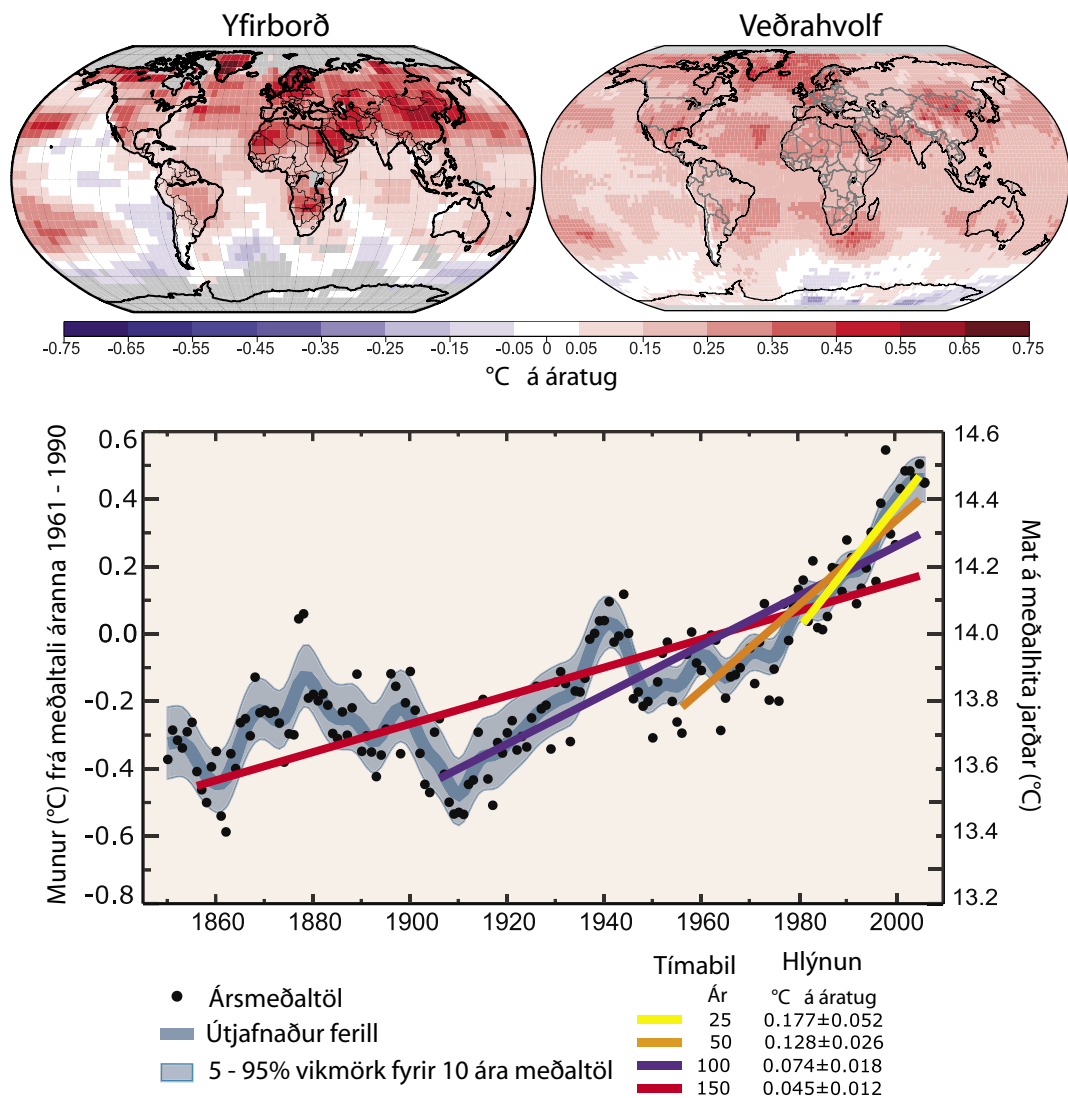
Gervihnattamælingar, mælingar með veðurbelgjum og fleiri gögn sýna að í heiðhvolfinu fyrir ofan veðrahvolfið hefur kólnað um $0,32\text{--}0,47^\circ\text{C}$ á áratug¹³. Ýmsar breytingar tengdar hlýnun við yfirborð og í veðrahvolfi eru merkjanlegar. Frostdögum hefur fækkað, jafnframt því sem óvenjuköldum dögum fækkar, en heitum dögum fjölgar. Hitabylgjur eru tíðari¹⁴.

1.2.3 Úrkomubreytingar

Náttúrulegur breytileiki úrkomu, svæðisbundinn jafnt sem tímaháður, er mjög mikill. Víða er því erfitt að greina marktæka hneigð í úrkomubreytingum. Athuganir sýna þó breytingar á tíðni úrkomu, magni og úrkomutegund. Mynd 1.5 sýnir¹⁵ að á tímabilinu 1900 til 2005 má sumstaðar merkja verulegar langtíma breytingar á magni úrkomu, hún hefur aukist um austanverða Norður- og Suður-Ameríku, í Norður-Evrópu og Norður- og Mið-Asíu. Úrkoma hefur minnkað í suðurhluta Afríku, á Sahel svæðinu, umhverfis Miðjarðarhafið og í sunnanverðri Asíu. Myndin sýnir einnig að þegar skoðuð eru styttri tímabil má víða merkja breytingar sem ganga í öfuga átt við aldarhneigðina, en marktækni breytinga er minni á styttra tímabilinu. Á norðlægum svæðum fellur meiri úrkoma en fyrr sem rigning, en minni sem snjór. Mjög víða hefur helliregn aukist, jafnvel á svæðum þar sem dregið hefur úr heildarúrkomu. Tíðni flóða og þurrka hefur einnig aukist á sumum svæðum. Merkja má samband milli úrkomubreytinga og hitabreytinga. Á meginlöndum er fylgnin víða neikvæð á sumrin, þ.e. hlý sumur og þurrkar fylgjast að, sem og köld sumur og vætutíð. Þegar nær dregur heimskaufa-



Mynd 1.3 Línuleg leitni yfirborðshita ($^\circ\text{C}/\text{áratug}$) yfir 105 ára tímabil (1901 til 2005). Á grálituðum svæðum voru ekki til nægilega mikil gögn til að reikna línulega leitni. Miðað var við að a.m.k. 66 ár og 10 mánuði til að leitni væri reiknuð. Þeir reitir þar sem leitnin er tölfraðilega marktæk (miðað er við 95% marktækni) eru merktir með hvítum '+'. (Heimild IPCC, sjá nánar tilvísun 11).



Mynd 1.4 Efri myndirnar tvær sýna línulega hneigð yfirborðshita frá 1979 til 2005 við yfirborð jarðar (til vinstri) og hita í veðrahvolfi (til hægri). Þau svæði þar sem ekki eru til nægileg gögn eru grálituð. Neðri myndin sýnir árshitabreytingar 1850 til 2005. Punktarnir sýna hitafrávik hvers árs frá meðaltali árunna 1961 til 1990. Útjafnaður ferill sýnir áratuga-sveiflur í meðalhita, og skyggðu svæðin sýna áreiðanleika þessa mats á áratugasveiflum. Línuleg hneigð fyrir fjögur ólík tímabil er einnig sýnd á myndinni. Tímabilin eru 1856–2005 (rauð lína), 1906–2005 (blá lína), 1956–2005 (rauðgul lína) og 1981 til 2005 (gul lína). (Heimild IPCC, sjá nánar tilvísun 12).

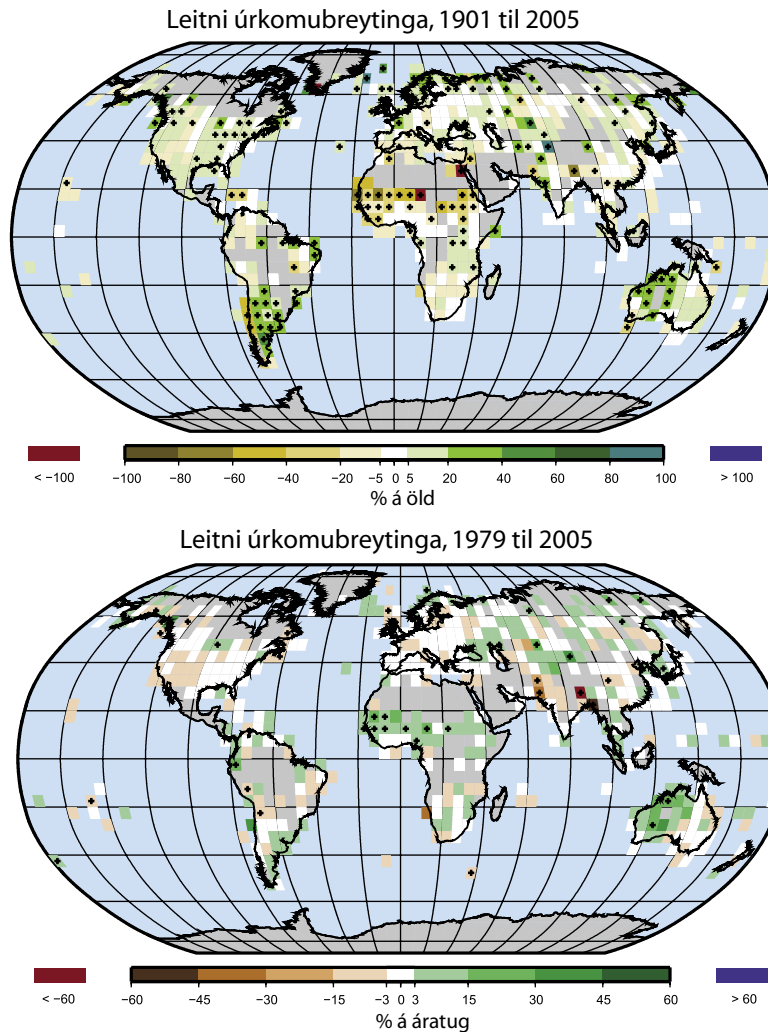
svæðum er annað orsakarsamhengi að vetri til, norðan 40°N og sunnan 40°S er sterk jákvæð fylgni milli aukinnar vetrarúrkomu og hlýnunar, meiri úrkomu verður vart á hlýjum vetrum og minni á köldum¹⁶.

1.2.4 Breytingar á snjóhulu, jöklum, jökulhvelum og hafis

Snjóhula hefur minnkað víðast hvar, sérstaklega að vorlagi. Á norðurhveli færðist vorbráðnun fram um nærri tvær vikur á tímabilinu 1972 til 2000. Snjór nær nú mestri útbreiðslu í janúar í stað febrúar áður auk

þess sem ársmeðaltöl sýna að útbreiðsla snævar er nú minni en áður¹⁷. Mest minnkar snjóhulan á þeim svæðum þar sem meðalhiti í apríl og maí liggur milli 0° og 5°C. Í fjallendi minnkar snjóhulan meira neðarlega í hliðum þar sem hlýnun hefur meiri áhrif. Á suðurhveli jarðar er minna um snjóhulugögn en þau sýna ýmist minnkun eða engar breytingar á næstliðnum fjórum áratugum¹⁸.

Flatarmál þess svæðis á norðurhveli þar sem frosts í



Mynd 1.5 Úrkomubreytingar. Efra kortið sýnir breytingar á tímabilinu 1901 til 2005 (mælt í % á öld) en neðra kortið sýnir breytingar á tímabilinu 1979 til 2005 (mælt í % á áratug). Hlutfallslegar breytingar eru miðaðar við tímabilið 1961 til 1990. Þeir reitir þar sem línuleg leitni nær 95% marktækni eru merktir með +. Þau svæði þar sem ekki eru til næg gögn til að meta breytingar eru lituð grá. (Heimild IPCC, sjá nánar tilvísun 15).

jörðu verður vart minnkaði á 20. öldinni og yfirborðslagið á sífrerasvæðum hlýnaði¹⁹.

Hörfun jökla frá 19. öld er víðtæk og nær jafnt til fjalljökla á norður- og suðurhveli sem og í hitabeltinu. Á síðasta áratug hefur jökulhvelið þyknað um miðbik Grænlands en jökullinn hefur þynnst við ströndina. Líklegt er að ísmassi beggja stóru jökulhvelanna (á Grænlandi og á Suðurskautslandinu) hafi minnkað á tímabilinu 1993–2003. Á þessu tímabili hefur massatap

jökla og ishvela átt þátt í hækkun sjávarborðs og hefur framlag þeirra til hækkunar legið á bilinu 0,77 til 1,60 mm/ári²⁰.

Hafis á norðurhveli hefur minnkað, sérstaklega sumarísinn í N-Íshafi sem hefur minnkað um 7,4% á áratug²¹. Samdráttur vetraríss er minni og á ársgrundvelli hefur útbreiðsla hafíss minnkað um 2,7% á áratug. Á suðurhveli jarðar hefur orðið smávægileg aukning á hafisútbreiðslu, en sú aukning er ekki tölfræðilega marktæk.

1.2.5 Breytingar á hafsvæðum

Ýmsar vísbendingar eru um að lægðabrautir hafi hnikað nær heimskautasvæðum og lægðir dýpkað. Áratugasveiflur eru þó verulegar og erfitt að merkja langtíma-breytingar. Bæði á N-Atlantshafi og N-Kyrrahafi hefur ölduhæð vaxið á liðnum áratugum og a.m.k. í N-Atlantshafi hefur þessi þróun verið tengd breytingum á lægðagangi²².

Tíðni hitabeltislægða hefur ekki aukist síðan á 8. áratugnum, en hitabeltislægðir hafa orðið öflugri og fleiri stórir fellibyljir myndast. Verulegur breytileiki er á fjölda fellibylja, bæði ár frá ári og milli myndunar-svæða²³. Þannig hefur tíðni hitabeltislægða og fellibylja aukist á N-Atlantshafi á síðustu áratugum, en gögn frá því fyrr á 20. öldinni eru ekki nægilega ítarleg til að hægt sé að leggja mat á hversu óvenjulegt núverandi ástand er. Þessi auking yfir Atlantshafinu helst í hendur við hlýnun yfirborðssjávar í hitabeltinu.

Mælingar sýna merkjanlega hlýnun sjávar á tímabilinu 1961 til 2003 og að varmainnihald efstu 700 m heims-hafanna hefur aukist frá miðjum 6. áratugnum²⁴. Eðlis-massabreytingar vegna hlýnunar heimshafanna haldast í hendur við hækkandi sjávarýfirborð. Á heildina litið hefur selta aukist í efri lögum sjávar á hlýsvæðum en minnkað á kaldari svæðum²⁵. Aukning á styrk CO₂ í lofthjúpunum leiðir til aukinnar upptöku hafsins. Þetta sýrir hafið og hefur það súrnað um 0,1 pH stig að með-altali frá upphafi iðnbyltingar. Takmarkaður vísinda-legur skilningur er á áhrifum súrnunnar á vistkerfi hafsins²⁶. Auk þessa má merkja ýmsar breytingar líf- og jarðefnafræðilegum ferlum í hafinu²⁷.

Náttúrulegur breytileiki í heimshöfunum er mikill, og þrátt fyrir að hlýnað hafi á heildina litið hefur kólnað á sumum hafsvæðum. Áratugalangar sveiflur eru í styrk lóðréttar hringrásar²⁸ í Atlantshafinu en gögn styðja ekki að hægt hafi á þessari hringrás eða dregið úr djúp-sjávarmyndun.

Frá 1961 til 2003 hækkaði yfirborð sjávar að meðaltali um 1,8 mm á ári og frá 1993 um 3,1 mm á ári. Þáttur varmaþenslu í hækkun sjávarborðs vegna hlýnunar sjávar er um 0,47 mm á ári fyrir tímabilið 1961 til 2003 en 1,6 mm á ári eftir 1993. Þótt gögn um sjávarstöðu

fyrir á tíð séu brotakennd þá er mikil víska fyrir því að hraði sjávarborðshækkunar jókst á tímabilinu frá 1871 til 2000²⁹.

1.3 Orsakir orðinna loftslagsbreytinga

Við formlegt mat á orsökum loftslagsbreytinga notar milliríkjanefndin *kvarðað orðalag* sem er ætlað að lýsa óvissu³⁰. Gerður er greinarmunur á þekkingarlegri óvissu í mati, og líkum þess að einhver atburður gerist. Í fyrri tilvikinu er valið orðalag sem greinir á milli til-vika þar sem hægt er að segja eitthvað með vissu og tilvika þar sem slíkt er ekki hægt. Þessir flokkar og kvörðun þeirra sýnd í töflu 1.1.

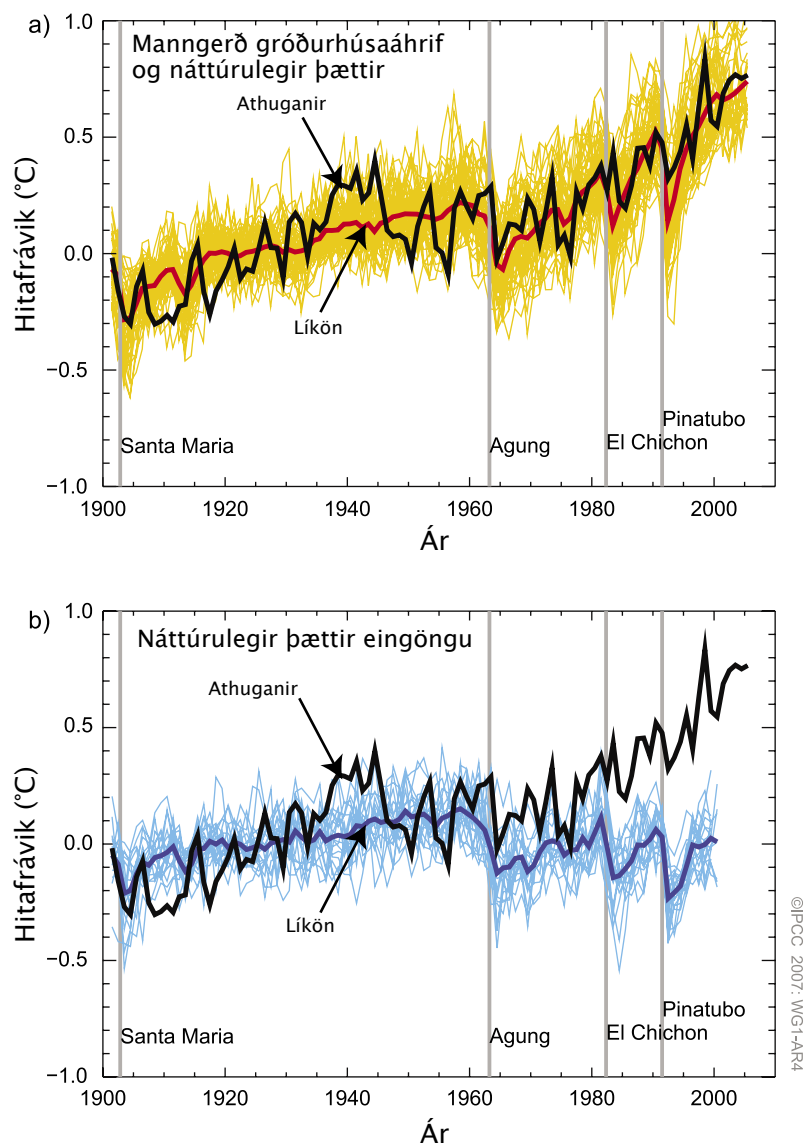
Stig þekkingar	Líkur á að mat sé rétt	Einnig táknað
Mjög mikil víska	amk. 9 af 10 líkur á að mat sé rétt	(***)
Mikil víska	um 8 af 10 líkur á að mat sé rétt	(**)
Miðlungs víska	um 5 af 10 líkur á að mat sé rétt	(*)
Lítill víska—um 2 af 10 líkur á að mat sé rétt		
Mjög lítill víska—minna en 1 af 10 líkur á að mat sé rétt.		

Tafla 1.1 Flokkun þekkingarlegrar óvissu í textanum.

Í skýrslu vinnuhóps tvö er stig fullyrðinga oft táknað með ofangreindri stjörnuþjöf, t.d. í ágripi fyrir stefnu-mótendur (SPM). Ef hægt er að meta líkindi á einhverjum atburði eða einhverri niðurstöðu með tölfræðileg-um aðferðum eru notaðir flokkar sem eru kvarðaðir eins og sýnt er í töflu 1.2.

Líkindastig	Líkur
NÁNAST ÖRUGGT	MEIRA EN 99%
AFAR LÍKLEGT	95–99%
MJÖG LÍKLEGT	90–95 %
LÍKLEGT	66–99 %
EINS LÍKLEGT OG EKKI	33–66 %
ÓLÍKLEGT	10–33 %
MJÖG ÓLÍKLEGT	5–10 %
AFAR ÓLÍKLEGT	1–5%
EINSTAKLEGA ÓLÍKLEGT	MINNA EN 1%

Tafla 1.2. Meðhöndlun líkinda í textanum.



Mynd 1.6 a) Hitafrávik við yfirborð jarðar á síðustu öld. Svarta breiða línan sýnir athuganir, findregnu línurnar sýna niðurstöður margra loftslagslíkana þar sem geislunarálgjöð þróaðist í samræmi við aukningu gróðurhúsalofttegunda og náttúrulegra þátta (s.s. breytinga á sólgeislun og loftarða vegna eldgosa). Breiða rauða línan sýnir meðaltal líkananna. Stærstu eldgos á 20. öldinni eru einnig merkt inn á myndina. b) Eins og í a) - nema í loftslagslíkönunum var ekki tekið tillit til áhrifa gróðurhúsalofttegunda. (Heimild IPCC, sjá nánar tilvísun 33).

Megin niðurstaða fjórðu úttektar milliríkjanefndarinnar er að breytingar í ýmsum náttúruþáttum í lofthjúpinum, hafinu og í jökum og ís bera óumdeilanleg merki hlýnunar jarðar³¹.

Það er mjög líklegt að meðalhiti á norðuhveli jarðar hafi á síðari hluta 20. aldar verið hærri en á nokkru öðru 50-ára tímabili síðustu 500 árin, og líklega sá hæsti í a.m.k. 1300 ár³².

Það er afar ólíklegt að þá hnattrænu hlýnun sem orðið hefur á síðustu fimm áratugum megi útskýra án ytri

breytinga (sjá geislunarálag á mynd 1.2). Samanlögð áhrif náttúrulegra þátta, þ.e. eldgosaösku og breytinga á styrk sólar, hefðu líklega valdið kólnun á tímabilinu. Þetta má sjá á mynd 1.6 þar sem borin er saman mæld hlýnun jarðar og niðurstöður margra loftslagslíkana³³. Myndin sýnir að líkönin herma að meðaltali vel eftir langtímabreytingum á meðalhita, en einungis ef tekið er tillit til aukningar gróðurhúsalofttegunda (mynd 1.6 a). Séu gróðurhúsalofttegundir ekki teknar með í reikninginn (mynd 1.6 b) ná líkönin ekki að herma eftir hlýnun síðustu áratuga.

Mjög líklegt er að aukning gróðurhúsalofttegunda vegna athafna mannkyns valdi megninu af þeirri hnattrænu hlýnun sem átt hefur sér stað frá því um miðja seinustu öld. Án kælandi áhrifa loftarða er *líklegt* að gróðurhúsalofttegundirnar einar sér hefðu valdið enn meiri hlýnun³⁴.

Líklegt er að hlýnun yfirborðslaga heimshafanna og einnig bráðnun hafiss á norðlægum breiddargráðum megi rekja til athafna mannsins³⁵. Á sama hátt er *líklegt* að breytingar á ýmsum hitatengdum þáttum (m.a. tíðni hitameta og hitabylgna og fjölda frostdaga) megi rekja til mannlegra athafna³⁶.

Þótt skilningur á áratugasveiflum í sjávarstöðu sé takmarkaður er *mjög líklegt* að hækkun yfirborðs sjávar á síðari hluta 20. aldar stafi³⁷ af hlýnun sem rekja má til losunar gróðurhúsalofttegunda og hörfun jökla sem er í samræmi við hlýnunina³⁸.

Ósóneyðing veldur kólnun í heiðhvoli. Athuganir sýna að heiðhvolfið hefur kólnað jafnframt því að veðrahvolfið hefur hlýnað. *Mjög líklegt* þykir að þessi þróun stafi af aukningu gróðurhúsalofttegunda og eyðingu ósóns í heiðhvoli³⁹.

Í samræmi við það sem búast má við vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa er *líklegt* að hlýnun í veðrahvoli sé meiri en við yfirborð jarðar. Það er *mjög líklegt* að þessi hlýnun sé af mannavöldum⁴⁰.

Það er *líklegt* að á 20. öldinni hafi athafnir manna átt þátt í hlýnun á öllum meginlöndum nema Suðurskautlandinu. Erfitt reynist að rekja orsakir hlýnunar á minni svæðum og fyrir tímabil styttri en 50 ár⁴¹.

1.4 Breytingar á umhverfi og vistkerfum

Athuganir frá öllum meginlöndum og flestum hafsvæðum sýna að mörg náttúruleg kerfi hafa orðið fyrir áhrifum svæðisbundinna loftslagsbreytinga, sér í lagi hlýnunar⁴². Gögn um breytingar á náttúrulegum kerfum dreifast ekki jafnt um jörðina. Mest er af gögnum frá tempruðum svæðum í Evrópu, norðurhluta Asíu, og Norður Ameríku. Minna er af gögnum frá öðrum heimshlutum⁴³. Eftir sem áður eru greinileg merki um

áhrif loftslagsbreytinga af mannavöldum á ýmis náttúruleg og samfélagsleg kerfi. Meðal þeirra má nefna:

Aukið rennsli í jökul- og dragám þar sem snjóbráðar gætir og stækkun og fjölgun lóna við jökuljaðra. Vorflóð eru fyrr á ferðinni. Aukinn óstöðugleiki yfirborðsjarðlaga á svæðum þar sem sífreri ríkir og aukin tíðni grjóthruns í fjallendi. Breytingar sjást á vistkerfum heimskautasvæða, þ.m.t. lífríki á hafissvæðum og dýr ofarlega í fæðukeðjunni⁴⁴.

Það vorar fyrr. Á síðustu þremur áratugum færðist vorið fram um 2,3 til 5,2 daga á áratug. Þessara breytinga verður m.a. vart í laufgun trjáa, ferðum farfugla og varptíma. Gervihnattagögn sýna að víða hefur hlýnun síðustu áratuga valdið því að nú grænkar fyrr á vorin og gróðurtími hefur lengst⁴⁵.

Breytingar hafa orðið á útbreiðslu ýmissa dýra og plöntutegunda, þannig að þær finnast nú nær heimskautasvæðum eða hærra í fjallendi⁴⁶.

Víða hafa stöðu- og straumvötn hlýnað en það hefur áhrif á vatnsgæði. Sterkar vísbendingar eru um breytingar á vistkerfum í hafi⁴⁷ og ferskvatni⁴⁸ vegna hækkandi hita, en þar koma einnig við sögu breytingar á ísþekju, seltu, sýrustigi, súrefnismagni og straumhringrás. Nærri heimskautasvæðum hafa meðal annars orðið breytingar á útbreiðslu þörunga, dýrasvífs og fisktegunda, bæði í ferskvatni og í sjó. Einnig má sjá sambærilegar breytingar í fjallavötnum, auk breytinga á fiskgengd í ám. Flókið orsakasamband er á milli óvenjulegra hitafrávika í sjónum og skemmda á kóralrífjum, en hækkandi sjávarhiti, lækkandi sýrustig sjávar og aukin stormatíðni auka álag á kórala.

1.5 Orsakir breytinga á umhverfi og vistkerfum

Margir ólíkir þættir geta valdið breytingum á náttúrulegum kerfum. Sumir eru af mannavöldum en þó ekki loftslagstengdir. Sem dæmi um slíka þætti má nefna hnignun landgæða, skógareyðingu, mengun og vöxt þéttbýlis. Áhrif slíkra þátta þarf að greina frá áhrifum loftslagsbreytinga⁴⁹. Þegar jörðin er skoðuð í heild sinni er *líklegt* að loftslagsbreytingar af mannavöldum hafi

þegar haft merkjanleg áhrif á umhverfi og mörg vistkerfi. Gögn sem styðja þessa tengingu hafa styrkst síðan þriðja úttekt milliríkjanefndarinnar kom út. Það eru sérstaklega þrennskonar vísbendingar sem skipta máli:

1. Fjölmarginar mæliraðir úr mörgum mismunandi rannsóknnum sýna breytingar sem eru í samræmi við það sem búast má við vegna hlýnandi loftslags. Af um 29.000 mæliröðum úr 75 rannsóknum sýndu meira en 89% þeirra breytingu sem búast má við samfara hlýnun⁵⁰. Þótt megnið af þessum mæliröðum séu frá Evrópu fundust breytingar í samræmi við hlýnun á öllum meginlöndum.

2. Landfræðileg dreifing breytinga sem rekja má til hlýnunar er með þeim hætti að *afar ólíklegt* er að hún stafi eingöngu af náttúrulegum breytileika⁵¹.

3. Líkanreikningar hafa tengt breytingar á náttúrulegum kerfum við þær breytingar sem búast má við vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa. Í slíkum líkönum má aðskilja náttúruleg áhrif (eldgos og breytileika sólar) og áhrif af mannavöldum (gróðurhúsalofttegundir, ryk og aðrar agnir af völdum mengunar) á hlýnun. Mun betra samræmi milli reiknaðra og raunverulegra breytinga fæst ef áhrif af mannavöldum eru tekin með í reikninginn⁵².

1.6 Samfélagsleg áhrif loftslagsbreytinga á liðnum áratugum

Samfélagsleg áhrif loftslagsbreytinga eru ekki jafn greinileg og áhrif á umhverfi og vistkerfi⁵³. Fleiri þættir en loftslagsbreytingar hafa áhrif á samfélög auk þess sem aðlögunarhæfni samfélaga er meiri en umhverfis og vistkerfa.

Helstu breytingar innan skógariðnaðar og landbúnaðar sem tengja má loftslagsbreytingum eru ræktunartími (sáð er fyrr á vorin), aukin tíðni skógarelda og útbreiðsla ýmissa skaðvalda og sjúkdóma⁵⁴. Einnig má merkja áhrif loftslagsbreytinga á þætti tengda heilsufari, svo sem á dauðsföll vegna sumarhita í Evrópu, frjókornaofnæmi utan hitabeltisins á norðurhveli jarðar og smitleiðir farsóttar á sumum svæðum⁵⁵. Á heimskautasvæðum má merkja áhrif loftslagsbreytinga á ýmsa félagslega þætti s.s. veiðar og samgöngur yfir snjó eða ís sem og á iðkun vetrariþrótta víða annars staðar⁵⁶. Tjón

vegna aftakaveðurs hefur aukist á liðnum áratugum. Áhrif aftakaveðurs og tjóns samfara því valda meiri bú-sifjum meðal fátækra samfélaga⁵⁷.

Að lokum má nefna breytingar sem nýlega hefur orðið vart. Ekki er hægt að leggja tölulegt mat á áreiðanleika þessara breytinga þótt aðlögun að þeim eigi sér stað. Dæmi um þetta⁵⁸ er aukin hætta á tjóni vegna jökulhlaupa í fjallendi. Einnig hefur hlýnun og auknir þurrkar á Sahel-svæðinu í Afríku stýtt ræktunartíma og dregið úr uppskeru. Í suðurhluta Afríku hefur þurrkatími lengst og úrkoma orðið óáreiðanlegri. Hækkun sjávarborðs og breytt landnotkun hafa leitt til þess að votlendi hefur tapast, sem og fenjasvæði þar sem saltvatn leikur nú um gróður.

Milliríkjanefndin telur einungis *miðlungs vissu* á þeirri staðhæfingu að breytingar samfélaga stafi af hlýnun loftslags. Eins og áður sagði eru þær ekki jafn greinilegar og í umhverfi og vistkerfum, og erfiðara að tengja þær loftslagsbreytingum.

1.7 Breytingar á komandi öld

Framtíðarlosun gróðurhúsalofttegunda er háð bruna á jarðefnaeldsneyti, landnýtingu og ýmsum atriðum sem tengjast efnahagsþróun. Spár um losun eru því óvissar, sérstaklega marga áratugi fram í tímann. Jafnvel þótt hægt væri að spá nákvæmlega fyrir um framtíðarlosunina er eftir sem áður nokkur óvissa um þá hlýnun sem af hlytist. Hér að neðan verður fyrst rætt um óvissuna á hlýnun fyrir þekkta losun (tvöföldun á styrk gróðurhúsalofttegunda), og síðan rætt um hlýnunarspár fyrir mismunandi forsendur um losun.

1.7.1 Jafnvægisvörun loftslags:

Hlýnun vegna tvöföldunar gróðurhúsalofttegunda

Sú hlýnun sem yrði af tvöföldun styrk gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpunum⁵⁹ hefur lengi verið talin liggja á bilinu 1,5 til 4,5°C. Þetta hitabil var fyrst kynnt fyrir tæpum þrem áratugum og hefur lítið breyst þrátt fyrir stórstígar framfarir varðandi skilning á loftslagsbreytingum síðan þá⁶⁰. Í AR4 er þetta talnabil uppfært og talið er *líklegt* að tvöföldun á styrk gróðurhúsalofttegunda leiði til hlýnunar á bilinu 2,0–4,5°C þar sem 3°C hlýnun er talin líklegust. *Mjög ólíklegt* er að hlýnunin yrði minni en 1,5°C. Ekki er hægt að útiloka gildi hærri

CO ₂ -g* styrkur (ppm)	besta mat	Hlýnun í °C mjög líklega meiri en	Líklega á bilinu
350	1,0	0,5	0,6–1,4
450	2,1	1,0	1,4–3,1
550	2,9	1,5	1,9–4,4
650	3,6	1,8	2,4–4,5
750	4,3	2,1	2,8–6,4
1000	5,5	2,8	3,7–8,3
1200	6,3	3,1	4,2–9,4

Tafla 1.3. Hlýnun (í°C) eftir að jafnvægi hefur verið náð ef aukning gróðurlofttegunda í lofthjúpnun stöðvast við mismunandi styrk. Hlýnunin er miðuð við hita jarðar fyrir daga iðnbýlingar, en nokkurn tíma tekur fyrir loftslag að aðlagast.

en 4,5°C en niðurstöðum reiknilíkana ber ekki saman um efri mörkin⁶¹. Í skýrslunni er reiknað mat á jafnvægis-hlýnun fyrir mismunandi styrk CO₂-g₂ (tafla 1.3).

1.7.2 Möguleg losun gróðurhúsalofttegunda:

Sviðsmyndir IPCC

Hlýnun næstu aldar verður ekki metin án forsendna um aukningu gróðurhúsalofttegunda, breytingar á landnotkun, hagvaxtar- og mannfjöldaþróun o.s.frv.. Milliríkjanefndin notar við s.k. sviðsmyndir til þess að lýsa tiltekinni atburðarás⁶⁴. Þessar sviðsmyndir skiptast í fjóra meginhópa sem auðkenndir eru með eftirfarandi skammstöfunum: A1, A2, B1 og B2. Sviðsmyndir í hópi A1 einkennast af hröðum hagvexti, svæðisbundinni samþættingu hagkerfa, nýrri orkusparandi tækni og miðast við að mannfjöldi í heiminum muni ná hámarki um miðja öldina en minnka síðan. Í þessum hópi eru þrjár sviðsmyndir A1FI, A1T og A1B þar sem greint er á milli áhrifa mismunandi tækniþróunar. Í A1FI byggist tækni á jarðefnaeldsneyti, í A1T byggist tæknin ekki á jarðefnaeldsneyti, og sviðsmynd A1B fer milliveg hinna tveggja. Í sviðsmyndahópi B1 er gert ráð fyrir sömu mannfjöldaþróun og í A1, en að hnattvæðing verði meiri og hraðari. Hagkerfi í B1 byggjast á upplýsingatækni og þjónustu og því minni hráefnisnotkun og umhverfisvænni tækni en í A1. Í sviðsmyndahópi A2 er samþætting hagkerfa lítil og fólki fjölga út öldina. Áhersla er á staðbundnar lausnir en tækniþróun og hag-

vöxtur er hægari en í öðrum sviðsmyndum. Sviðsmynd B2 lýsir heimi þar sem áhersla er á umhverfisvænnar og staðbundnar lausnir og fólki fjölga stöðugt út öldina, þó hægari en í A2. Í samanburði við A1 og B1 eru hagvöxtur og tækniþróun hægari í B2.

A1T og B1 eru einu sviðsmyndirnar þar sem dregur úr losun á síðari hluta aldarinnar og þetta eru þær sviðsmyndir þar sem styrkur CO₂ nálgast jafnvægi við lok aldarinnar. Þetta eru einnig einu sviðsmyndirnar þar sem geislunarálag hættir að aukast fyrir lok aldarinnar⁶⁵.

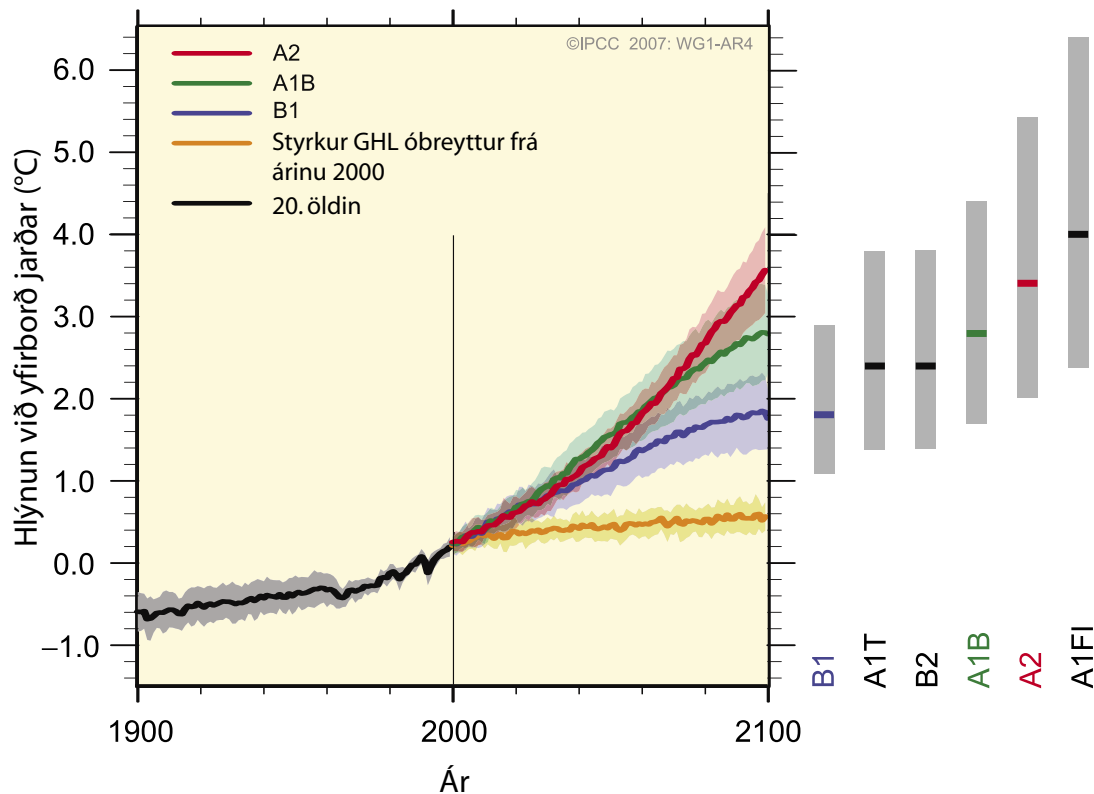
Þessar sviðsmyndir eru hver fyrir sig mögulegar afleiðingar mismunandi atburðarása, en milliríkjanefndin leggur ekki mat á hvaða sviðsmyndir eru líklegastar. Hvergi er sérstaklega gert ráð fyrir áhrifum aðgerða til þess að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda.

1.7.3 Hnattræn hlýnun vegna aukningar gróðurhúsalofttegunda

Mynd 1.7 sýnir þá hlýnun sem losun gróðurhúsalofttegunda veldur samkvæmt sviðsmyndum A2, A1B og B1. Sviðsmyndunum þremur er fylgt til ársins 2100. Til

Tilvik	Hlýnun °C		Sjávarborðshækkun(m)
	Besta mat	Líklegt bil	
styrkur fastur við 2000	0,6	0,3–0,9	ekki metið
B1	1,8	1,1–2,9	0,18–0,38
A1T	2,4	1,4–3,8	0,20–0,45
B2	2,4	1,4–3,8	0,20–0,43
A1B	2,8	1,7–4,4	0,21–0,48
A2	3,4	2,0–5,4	0,23–0,51
A1FI	4,0	2,4–6,4	0,26–0,59

Tafla 1.4. Hlýnun og hækkun sjávarstöðu fyrir sviðsmyndirnar sex. Einnig eru sýndar niðurstöður fyrir tilvik þar sem gert er ráð fyrir að styrkur gróðurhúsalofttegunda haldist óbreyttur frá árinu 2000. Fyrsti dálkurinn sýnir besta mat á hlýnun frá síðustu áratugum nýliðinnar aldar (meðaltal 1980–1999) til loka 21. aldar (meðaltal 2090–2099) og annar dálkurinn sýnir 5–95% víkmörk. Þriðji dálkurinn sýnir líklega hækkun sjávarborðs (5% og 95% mörk).



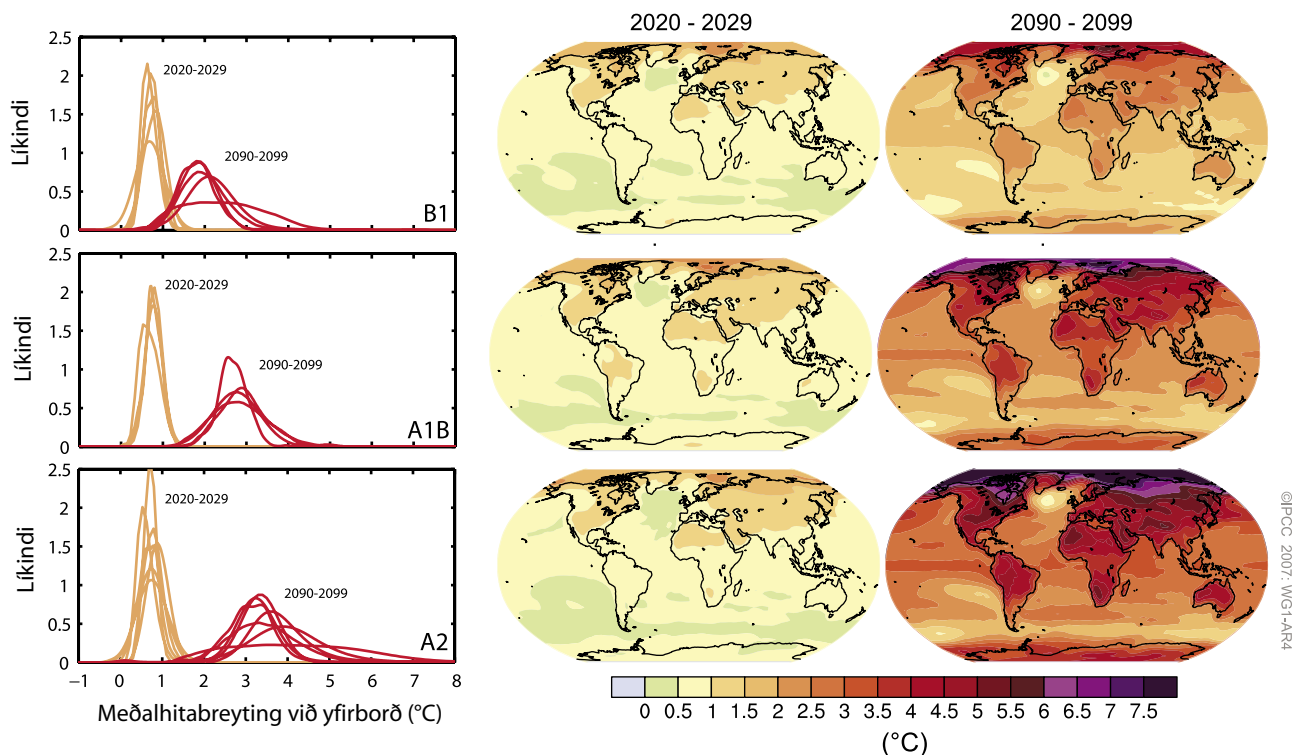
Mynd 1.7 Hnattræn hlýnun fyrir mismunandi sviðsmyndir. Línurnar á myndinni sýna niðurstöður fyrir A2, B1 og A1B auk þess sem sýnd er niðurstaða fyrir tilvik þar sem styrkur gróðurhúsalofttegunda breytist ekkert eftir árið 2000 (neðsta línan). Einnig eru sýndir reikningar fyrir 20. öldina (sambærilegir við mynd 1.6a). Stöplaritið til hægri sýnir þá hlýnun í lok aldarinnar sem leiðir af hverri sviðsmynd, auk sviðsmyndanna A1T, A1FI og B2 sem ekki eru sýndar á línuritinu. Myndin er byggð á útreikningum margra líkana, og eru breiðu línurnar meðaltöl allra líkana en skyggðu svæðin gefa til kynna dreifingu niðurstaðna. (Heimild IPCC, sjá nánar tilvísun 66).

samanburðar er sýnt tilvik þar sem styrkur gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpinum hættir að breytast árið 2000. Fyrir 20. öldina eru sýndar niðurstöður loftslagslíkana, sambærilegar við þær sem sjá má á mynd 1.6a. Hægra megin á myndinni er sýnd hlýnun í lok aldarinnar fyrir sviðsmyndirnar þrjár, auk sviðsmyndanna A1T, A1FI og B2. Myndin sýnir samantekt á niðurstöðum margra loftslagslíkana og eru breiðu línurnar meðaltöl, en skyggðu svæðin gefa til kynna óvissuna⁶⁶.

Myndin sýnir að jafnvel þótt styrkur gróðurhúsalofttegunda hefði ekkert breyst frá árinu 2000 myndi samt hlýna um 0,6°C. Aðrar sviðsmyndir sýna mjög svipaða hlýnun fyrstu þrjá áratugi aldarinnar eða um 0,2°C á áratug. Við lok aldarinnar er hlýnunin mest í þeim sviðsmyndum þar sem losun var mikil (A2 og A1FI) en minnst í B1. Sviðsmyndir A1T og B2 sýna álíka hlýnun en A1B litlu meiri. Óvissumörkin vaxa með hlýnun og eru einnig meiri við lok aldarinnar en um miðbik hennar⁶⁷. Tölulega samantekt upplýsinganna í mynd 1.7 má

finna í töflu 1.4 sem sýnir besta mat á hlýnun fyrir hverja sviðsmynd auk líklegrar óvissu á hlýnuninni⁶⁸.

Yfirborð sjávar mun hækka á 21. öldinni bæði vegna hlýnunar heimshafanna og vegna bráðnunar jökla. Um 70–75% af áætlaðri hækkun er vegna varmaþenslu, en afgangurinn vegna bráðnunar jökla og hveljökla⁶⁹. Tafla 1.4 sýnir líklega hækkun yfirborðs sjávar fyrir mismunandi sviðsmyndir. Talnabilið í töflunni eru 90% vikmörk hækkunar sjávaryfirborðs, en auk þessa eru óvissuþættir sem ekki er lagt tölulegt mat á. Þessir óvissuþættir tengjast sjávarborðshækkun vegna mögulegra breytinga á íslæði frá íshvelunum á Grænlandi og á Suðurskautslandinu. Eins og stendur er vísindaleg þekking ekki nægilega mikil til að hægt sé að leggja tölulegt mat á þessa óvissu, en aukið flæði frá íshvelunum gæti bætt 0,1–0,2 m við efri mörkin í töflu 1.4 miðað við að aukningin yrði í beinu hlutfalli við hlýnun⁷⁰.



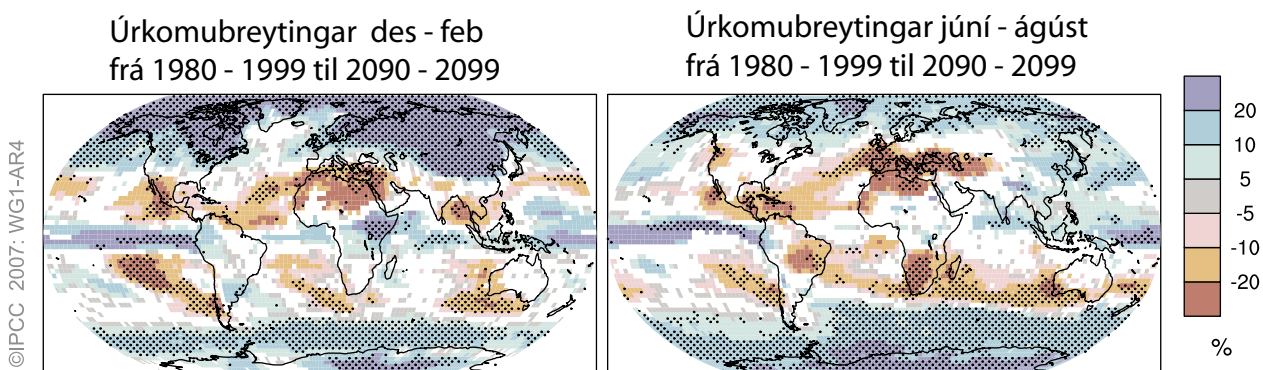
Mynd 1.8 Hlýnun frá meðaltali árána 1980 til 1999. Kortin til hægri sýna hlýnun á þriðja - og síðasta áratug 21. aldarinnar í þremur sviðsmyndum. Kortin sýna meðaltal margra líkana. Línuritinn vinstra megin sýna líkindadreifingu hnatt-rænnar hlýnnunar fyrir sömu sviðsmyndir. (Heimild IPCC, sjá nánar tilvísun 71).

Mynd 1.8 sýnir hvernig hlýnunin dreifist um jörðina. Þrjár sviðsmyndir (B1, A1B og A2) eru sýndar, og einnig er sýnd dreifing hnatt-rænnar hlýnnunar á þessum tímabilum⁷¹. Hlýnunin er sýnd fyrir þriðja áratug og síðasta áratug 21. aldar. Myndin sýnir að hlýnun er meiri yfir meginlöndum en yfir heimshöfunum, og hlýnunin er óveruleg yfir stórum hluta heimshafanna á fyrra tímabilinu. Hlýnunin er meiri nærri heimskautasvæðum, sérstaklega á norðuhveli og meiri að vetri til en á sumrin⁷².

Verulegar líkur eru á að hitabylgjur verði stærri, algengari og langlífari, en kuldaköst fágætari. Færri frostdagar á miðlægum og háum breiddargráðum lengja gróður tímenn. Horfur eru á að lágmarkshiti að næturlagi muni hækka meira en hámarkshiti að degi til, sem leiðir til þess að dægursveifla hita minnkar⁷³.

1.7.4 Aðrar afleiðingar loftslagsbreytinga

Nokkur svæðisbundinn breytileiki verður á hækkan



Mynd 1.9 Hlutfallslegar breytingar á úrkomu (%) frá 1980–1999 til 2090–2099. Sýndar eru niðurstöður fyrir desember, janúar og febrúar og júní, júlí og ágúst. Svæði þar sem amk. 90% af líkönum voru sammála um formerki breytingarinnar eru skyggð, svæði þar sem færri en 66% líkana voru sammála um formerki eru hvít. (Heimild IPCC, sjá nánar tilvísun 75).

sjávarborðs og hlýnun á 21. öldinni mun hækka sjávarfirborð næstu aldirnar, jafnvel þótt styrkur gróðurhúsalofttegunda nái jafnvægi. Bráðnun jökla (þ.m.t. Grænlandsjökuls) mun einnig halda áfram, þó talið sé að á Suðurskautslandinu verði nægilega kalt til að halda aftur af viðfeðmri bráðnun. Óvissan er talsverð og með aukinni snjókomu gæti íshvelið jafnvel vaxið á næstu öld⁷⁴.

Mynd 1.9 sýnir hlutfallslegar breytingar á úrkomu á 21. öld⁷⁵. Samfara aukningu á hringrás vatns í lofthjúpnunum er líklegt að úrkoma aukist milli 20° S og 20° N og mjög líklegt er að úrkoma aukist norðan og sunnan 50° breiddargráðu (á svæðum þar sem ríkir kaldtempraðeða heimskaualoftslag). Líklegt er að úrkoma minnki víða á miðlægum breiddargráðum og á jaðri hitabeltisins, þ.e. milli 20° og 40° N og S (á svæðum þar sem ríkir s.n. heittemprað loftslag). Vísbendingar eru um að tíðni steypiregns geti aukist, jafnvel á svæðum þar sem dregur úr úrkomu⁷⁶.

Draga mun áfram úr snjóhulu á flestum sífrerasvæðum og sumarþíða ná dýpra ofan í jörðina. Hafísþekja á norðurhveli mun minnka og við lok aldarinnar verður stór hluti N-Íshafsins íslaus að sumarlagi⁷⁷.

Ekki er gert ráð fyrir stórfelldum breytingum á hafhringrás, þótt *mjög líklegt* sé að það dragi úr lóðréttu hringrásinni í N-Atlantshafi. Samkvæmt líkanreikningum er líklegt að við lok 21. aldar hafi hægt á þessari hringrás sem nemur 0–50%. Ekki er hægt að leggja öruggt mat á langtímabreytingar á lóðréttu hringrásinni⁷⁸. Jafnvel þótt litlar styrkbreytingar verði á hringrásinni geta orðið staðbundar breytingar á hita og seltu sjávar með staðbundum áhrifum, eins og t.d. á djúpsjávarmyndun í Labradorhafi.

Loftþrýstingur við yfirborð mun líklega hækka utan hitabeltissvæða, en minnka þegar nær dregur heimskautasvæðum. Þessar breytingar má tengja stækkun á áhrifasvæðum Hadley-hringrásarinnar út frá miðbaug og breytingum tengdum norður- og suður-heimskautasveiflunum. Þær síðarnefndu eru grundvallarsveiflur í lofthjúpnunum á heimskautasvæðum, og er norður Atlantshafssveiflan (NAO) nátengd annarri þessara sveiflna⁷⁹. Þessar breytingar geta haft í för með sér að

NAO vístalan verði oftár jákvæð en áður og lægðabrautir færast nær heimskautasvæðum. Vel þekkt er náið samband langtímabreytinga á NAO og hita við yfirborð sjávar í Norður Atlantshafi⁸⁰.

Horfur eru á að hitabeltislægðum og fellibyljum fækki. Þó er gert ráð fyrir að stærri fellibyljir verði tíðari og hámarksvindur og úrkoma í þeim muni aukast⁸¹.

1.8 Afleiðingar loftslagsbreytinga fyrir umhverfi og vistkerfi

Til að greina á milli þeirra atriða sem nokkuð mikil víska er um og þeirra sem óvissari eru, er í þeirri samantekt sem fylgir lagt mat á áreiðanleika fullyrðinga⁸² með stjörnujöf. Miðlungs víska (a.m.k. 5/10 líkur á að mat sé rétt) er merkt með (*), mikil víska (a.m.k. 8/10 líkur á að mat sé rétt) er merkt með (**) og mjög mikil víska (a.m.k. 9/10 líkur á að mat sé rétt) merkt með (***). Mikilvægt er að hafa í huga að þetta er mat á áreiðanleika og kann að breytast í framtíðinni, t.d. með betri skilningi á þáttum sem valda óvissu. Þetta er ekki mat á alvarleika áhrifanna. Þannig eru áhrif súrnunar sjávar hugsanlega mjög alvarleg, en orsakasamhengið óvíst og þau eru því merkt með einni stjörnu.

Búast má við að um miðja öldina hafi úrkoma aukist um 10–40% í kaldtempruðu beltunum, á heimskautasvæðunum og á vissum stöðum í hitabeltinu. Úrkoma mun minnka um 10–30% á þurrum svæðum í hita- og heittempruðu beltunum, en á þessum svæðum er sums staðar nú þegar vatnsskortur⁸³. Þótt þurrkasvæði muni líklega stækka mun tíðni hellirigningar *mjög líklega* aukast, en það eykur flóðahættu. Aukin tíðni þurrka og flóða mun sums staðar hafa neikvæð áhrif á ræktun og fæðuframléiðslu. Vatnsbirgðir í jökum og snjóalögum munu minnka á 21. öldinni. Það mun hafa áhrif á vatnsframboð hjá um sjötta hluta mannkynsins⁸⁴. (**)

Líklegt er að á öldinni verði álag á mörg vistkerfi meira en þau ráða við. Þetta stafar bæði af afleiðingum loftslagsbreytinga og breytingum á landnotkun, mengun og ofnýtingu umfram það sem dæmi eru um⁸⁵. (**)

Um 20–30% af þeim plöntu- og dýrategundum sem hafa verið rannsakaðar verða í aukinni útrýmingarhættu

ef hlýnun fer yfir 1,5–2,5°C. (*) Ef hlýnun fer yfir þessi mörk samfara aukningu koldíoxíðs í andrúmslofti má ætla að miklar breytingar verði á vistkerfum, að mestu leyti með neikvæðum afleiðingum fyrir tegundafjölda, fæðuframboð og vatnsgæði⁸⁶. (**)

Aukið koldíoxíð í andrúmslofti veldur því að sjórinn verður súrari sem hefur væntanlega neikvæð áhrif á skeldýr (þ.m.t. kóralrif) og tegundir sem eru háðar þeim⁸⁷. (*)

Náttúruleg upptaka kolefnis í vistkerfum mun líklega ná hámarki um miðja öldina en minnka eftir það og jafnvel verða minni en nú er. Þetta magnar loftslagsbreytingar⁸⁸. (**)

Svæðisbundnar breytingar verða væntanlega á dreifingu og viðkomu eða ræktun sumra fiskistofna vegna hlýnunar loftslags, og rannsóknir benda til að hætta sé á viðtækri hnignun fiskistofna⁸⁹. (**)

Afrakstur ræktarlands utan hitabeltissvæða kann að aukast lítillega ef hlýnun verður á bilinu 1–3°C, en frekari hlýnun getur sums staðar haft neikvæð áhrif. Í heildina er því spáð að möguleikar til fæðuframleiðslu muni aukast ef hlýnun verður á bilinu 1–3°C, en minnka ef meira hlýnar. Utan hitabeltis geta breyttir ræktunarhættir viðhaldið afrakstri kornræktar ef hlýnun verður hófleg. Á þeim svæðum í hitabeltinu þar sem árstíðabundir þurrkar verða algengari mun draga úr afrakstri ræktarlands, jafnvel þótt hlýnun verði einungis 1–2°C. Þetta getur leitt til aukinnar hættu á hungursneyðum⁹⁰. (*)

Talið er að ýmis áhætta á strandsvæðum muni aukast, m.a. vegna aukins rofs sem stafar af loftslagsbreytingum og hækkun sjávarborðs. Aukið álag af mannavöldum mun bætast þar á ofan. Spáð er að um 2080 muni svæði þar sem milljónir manna búa verða fyrir flóðum árlega vegna hækkunar sjávarborðs. Áhættan er sérstaklega mikil á þéttbýlum svæðum og á láglandi þar sem möguleikar til aðlögunar eru tiltölulega takmarkaðir. Sum þessara svæða eiga nú þegar í erfiðleikum vegna hitabeltisstorma eða staðbundins landsigs við ströndina. Flestir sem lenda í erfiðleikum af þessum sökum búa á stórum árósasvæðum í Afríku og Asíu, en einnig eru smáeyjar í sérstakri hættu. Aðlögun að loftslags-

breytingum verður erfiðari á strandsvæðum í þróunarlöndum en í þróuðum löndum⁹¹. (***) Þetta er rætt nánar í næstu grein.

1.9 Samfélagleg áhrif loftslagsbreytinga á komandi öld

Áhrif loftslagsbreytinga á iðnað og samfélög geta verið bæði bein og óbein. Í síðara tilvikinu geta loftslagsbreytingar haft áhrif á félags- og efnahagslegar breytingar sem orðið hafa af öðrum ástæðum. Kostnaður og ábati loftslagsbreytinga fyrir iðnað, byggð og þjóðfélög verður mjög mismunandi og mun fara eftir staðsetningu og umfangi breytinganna. Samanlagt verða áhrifin samt óhagstæðari eftir því sem loftslagsbreytingar verða meiri. Almenn gildir að viðkvæmust fyrir eru iðnaður, byggð og þjóðfélög á standsvæðum, áreyrum, flæðilöndum, á svæðum þar sem efnahagslífið er nátengt loftslagi og á svæðum þar sem aftakaveður eru tíð, sérstaklega ef byggð hefur aukist mikið á liðnum árum. Á svæðum þar sem aftakaveður versna og verða algengari mun félags- og efnahagslegur kostnaður vegna þeirra aukast. Gert er ráð fyrir að kostnaðaraukningin verði veruleg á þeim svæðum sem verst verða úti. Þessi áhrif geta svo dreifst til efnahagsgeira og svæða sem ekki verða fyrir beinu veðurtengdu tjóni⁹². (**)

Fátæk samfélög eru sérstaklega viðkvæm fyrir loftslagsbreytingum. Möguleikar þeirra til aðlögunar eru gjarnan takmarkaðir, og þau eru oft háð loftslagstengdum auðlindum, svo sem staðbundnum vatns- og matarforða⁹³. (**)

Telja verður líklegt að loftslagsbreytingar hafi áhrif á heilsu milljóna manna (**), einkum hópa sem hafa litla möguleika á því að aðlagast breytingunum⁹⁴, þar eð:

- Vannæring mun vaxa og henni fylgja sjúkdómar. Vannæring hefur slæm áhrif á vöxt og þroska barna.
- Hitabylgjur, fárviðri, flóð, þurrkar og eldar munu fjölga slysum og dauðsföllum og auka sjúkdóma.
- Niðurgangssóttir munu taka aukinn toll. Einnig:
- Öndunarfærarsjúkdómar, er tengjast vaxandi ósónmagni við yfirborð jarðar.
- Smitberar kunna að nema ný lönd.

Reiknað er með að loftslagsbreytingar hafi margvísleg

áhrif á heilsu. Til að mynda minnki smíðhæfni mýra-köldusýkils sums staðar og aukist annars staðar í Afríku. Rannsóknir á tempruðum svæðum benda til að loftslagsbreytingar verði til einhverra bóta. Má þar nefna færri dauðsföll vegna kulda. Í heild er þó líklegt að neikvæð áhrif hlýnunar yfirgnæfi þau jákvæðu, einkum í þróunarlöndum⁹⁵. (**)

Jafnvægið milli góðra og slæmra áhrifa á heilsufar verður mismunandi eftir stöðum og breytist þegar hiti hækkar. Afgerandi verða þeir þættir sem hafa áhrif á heilsufar heilla þjóða, svo sem menntun, heilsugæsla, forvarnir, innviðir samfélags og efnahagsþróun⁹⁶. (***)

1.10 Svæðisbundin áhrif loftslagsbreytinga

Áhrif loftslagsbreytinga munu koma fram með mismunandi hætti í hverri heimsálfu, á heimskautasvæðum og á smáum eyjum, og hafa helstu áhrifaþættirnir verið ræddir hér að ofan. Í þessari grein er gefið örstutt ágrip yfir helstu svæðisbundin áhrif, en vísað er í skýrslu vinnuhóps tvö um nánari umfjöllun⁹⁷.

Í Afríku má gera ráð fyrir að loftslagsbreytingar dragi úr matvælaframleiðslu. Í sumum löndum má vænta allt að helmingssamdráttar í úrkomuháðum landbúnaði. Horfur eru á að um 2020 verði 75–250 milljónir manna fyrir auknu álagi vegna vatnsskorts sem rekja má til loftslagsbreytinga⁹⁸.

Í hluta Asíu mun vaxandi hagsæld ásamt loftslagsbreytingum auka álag á vatnsforðabúr um sjötta hluta mannkyns. Loftslagsbreytingar munu draga úr möguleikum til sjálfbærrar þróunar og auka álag á náttúrukosti, og bætast við álag vegna hagþróunar. Á strandsvæðum við ósa stórfjöta eykst flóðahætta vegna hækkunar yfirborðs sjávar. Aðlögunargeta þjóðfélaga í Asíu er mismunandi eftir svæðum⁹⁹.

Í Eyjaálfu munu tíðari þurrkar hafa neikvæð áhrif á vatnsbúskap og hætta er á fækkun tegunda í sumum vistkerfum, s.s. kóralrifum. Aðlögunarhæfni þjóðfélaga er þó góð, en náttúruleg kerfi á svæðinu hafa takmarkaða möguleika til aðlögunar¹⁰⁰.

Í Mið- og Suður-Ameríku er hætta á verulegri tegundafækkun, m.a. á frumskógasvæðum. Breytingar á

úrkomu munu leiða til seltuaukningar og eyðingar lands á landbúnaðarsvæðum. Hækkun sjávarborðs mun auka álag á láglendi, og hlýnun sjávar mun leiða til breytinga á útbreiðslumörkum fiskistofna. Aðlögun á sér stað í sumum löndum en aðlögunargeta þjóðfélaga á svæðinu er mismunandi¹⁰¹.

Í Norður-Ameríku er aðlögunargeta meiri en víða annarsstaðar, en tjónnæmi strandbyggða mun aukast vegna vaxandi verðmæta þar. Einnig stafar hætta af aukinni tíðni á hitabylgjum og breytingum í úrkomu, uppgufun og leysingu. Aðlögun er mislangt komin og lítill viðbúnaður er gagnvart aukinni hættu¹⁰².

Í Evrópu eru ýmsar afleiðingar hlýnunar nú vel þekktar og falla þær að framtíðarspám. Dæmi um áhrif eru tegundafækkun á fjallasvæðum, aukin tíðni flóða bæði á strandsvæðum og inni á meginlandinu, hörfun jökla, minni sumarúrkoma víða, tíðari hitabylgjur svo og skógareldar. Víðast í Evrópu verða heildaráhrif neikvæð, bæði fyrir náttúruleg kerfi og samfélög. Neikvæðar afleiðingarnar verða þó minni norðar í álfunni og þar verða nokkur jákvæð áhrif fyrst í stað. Gera má ráð fyrir mismunandi aðferðum til aðlögunar, en einungis fáar ríkisstjórnir hafa kerfisbundið kannað hvaða kosta er völ¹⁰³.

Á heimskautasvæðum mun hörfun jökla og hafíss hafa umtalsverðar neikvæðar afleiðingar á vistkerfi. Afleiðingar fyrir samfélög eru þó bæði jákvæðar og neikvæðar. Aðlögun að þeim breytingum sem þegar hafa átt sér stað hefur reynt á þjóðfélög frumbyggja á heimskautasvæðum norðursins, og verulegra fjármuna er þörf til að bregðast við frekari breytingum¹⁰⁴.

Á smáum eyjum er tjónnæmi vegna aftakaveðra og sjávarborðshækkunar sérstaklega mikið. Hrörnun kóralrifja mun hafa áhrif á fiskveiðar og ferðamennsku, og úrkomubreytingar geta víða aukið líkur á þurrki. Aðstæður eru mismunandi, og á sumum eyjum hefur nú þegar hafist aðlögun til að tryggja ferskvatnsforða¹⁰⁵.

1.11 Viðbrögð við loftslagsbreytingum

Vinnuhópur tvö fjallar einnig um viðbrögð við loftslagsbreytingum. Viðbrögð geta falist í aðlögun auk ýmissa aðgerða til að draga úr losun. Þetta síðara atriði er að

mestu umfjöllunarefni vinnuhóps þrjú og er ekki umfjöllunarefni þessarar skýrslu. Í þessari grein er stutt yfirlit um möguleika til aðlögunar¹⁰⁶.

Flest þjóðfélög eiga langa sögu aðlögunar að veðurfarsbreytingum, en lofslagsbreytingum á 21. öld kunna að fylgja nýir áhættuþættir sem engin reynsla er af. Dæmi um aðlögun eru breytingar á ræktunarháttum og landnotkun, ýmsar framkvæmdir til að miðla vatni, breyttir byggingarstaðlar, skipulagstengt áhættumat og tryggingar¹⁰⁷.

Nokkur aðlögun að veðurfarsbreytingum hefur þegar átt sér stað en þó einungis í takmörkuðum mæli. Ljóst er að frekari aðlögunar er þörf til að draga úr áhrifum hlýnunar sem er óumflýjanleg vegna þeirrar losunar gróðurhúsalofttegunda sem þegar hefur átt sér stað. Ýmsir möguleikar koma til greina, en viðtækrar aðlögunar er þörf til að draga úr tjónnæmi vegna loftslagsbreytinga sem vænta má í framtíðinni¹⁰⁸. Ekki er fullur skilningur á hindrunum og kostnaði vegna þessa¹⁰⁹. Aðlögun ein saman mun þó ekki ráða við öll áhrif loftslagsbreytinga¹¹⁰.

Tjónnæmi getur aukist vegna annarra álagsþátta, s.s. mengunar, sjúkdóma, efnahagsörðugleika o.s.frv. Aðlögun felst yfirleitt í viðbrögðum við fleiri þáttum en loftslagsbreytingum einum sér, og getur t.d. tengst bættari stjórnum vatnsforða og bættum almannavörnum. Tjónnæmi í framtíðinni er einnig háð efnahagsþróun. Þetta birtist m.a. í því tjónnæmi sem samsvara mismunandi sviðsmyndum IPCC. Sjálfbær þróun getur dregið úr tjónnæmi, en einnig geta loftslagsbreytingar dregið úr möguleikum þjóða til sjálfbærrar þróunar¹¹¹.

Koma má í veg fyrir eða draga úr áhrifum loftslagsbreytinga eða seinka þeim með aðlögun og öðrum aðgerðum, einkum með því að draga úr útblæstri gróðurhúsalofttegunda¹¹². Þó ekki sé hægt að koma í veg fyrir öll áhrif, þá er líklegt að án aðgerða muni áhrif loftslagsbreytinga að lokum verða meiri en aðlögunargeta náttúrulegra og samfélagslegra kerfa fær við ráðið¹¹³. Þetta bendir til þess að besta leiðin sé sambland aðlögunar og annarra aðgerða. Hægt er að auka aðlögunargetu með því að taka í auknum mæli tillit til áhrifa loftslagsbreytinga við hagstjórn og skipulag.

Tilvísanir

- 1 Styrkur CO₂ er mældur í milljónustu hlutum af rúmmáli lofts, og er einingin skammstöfuð ppm.
- 2 Nánari upplýsingar um starfsemi IPCC má finna á vefsetri stofnunarinnar www.ipcc.ch.
- 3 Helstu heimildir hér eru bækurnar: IPCC, 2007: *Climate Change 2007 The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon ofl. (ritstj.)] Cambridge University Press, og 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* [Parry ofl. (ritstj.)]. Cambridge University Press. Vitnað er beint í kafla þessara bóka þar sem við á og eru nöfn bókanna þá stytt í WGI-AR4 og WGII-AR4. Hver bók hefur tvo inngangskafila fyrir framan tölusetta kafla. Fyrst er kafli sem nefndur er ágríp fyrir stefnumótendur (Summary for Policy Makers, eða SPM), næsti kafli er s.n. tæknileg samantekt (Technical Summary, eða TS) og svo fylgja tölusettir kaflar. Notað er við skammstöfunina SPM eða TS þegar vitnað er í ágrípskaflana. Hlaða má þessum bókum niður frá vefsetri IPCC.
- 4 Yfirlit um hvaða lofttegundir valda gróðurhúsaáhrifum má finna í kafla 2 í WGI-AR4. Yfirlit um líftíma og styrk gróðurhúsaáhrifa hverrar lofttegundar (þ.e. gróðurhúsamætti, e. *Greenhouse Warming Potential*) má finna í töflu 2.14 og samantekt á áhrifum þeirra má lesa um í töflu 2.12 sjá á mynd 2.20. Mynd 1.2 er einföldun á mynd 2.20, og er byggð á mynd TS.5 í WGI-AR4.
- 5 Umræðu um ósoneýðandi efnasambönd og gróðurhúsaáhrif þeirra má finna í WGI-AR4 kafla 2.3.3 og kafla 2.3.4. Líftími þessara efna í lofthjúpinum er langur og styrkur þeirra fellur því hægt.
- 6 Geislunarálág er skilgreint sem breyting á styrk varmageislunar á flatareiningu (t.d. W/m²) efst í veðrahvolfi. Miðað er við breytingar á styrk gróðurhúsalofttegunda og loftarða frá því fyrir iðnbyltingu. Geislunarálagið er jákvætt ef heildarbreyting í varmageislun í átt að yfirborði eykst, neikvæð annars (sjá skilgreiningu á *radiative forcing* í Annex 1 í WGI-AR4).
- 7 Ar (e. *aerosol*) er sveimur af þurrum eða votum smáögnum í andrúmslofti.
- 8 Visindaleg óvissa vegna beinna og óbeinna áhrifa loftarða er mun meiri en vegna áhrifa gróðurhúsalofttegunda. Þetta sést m.a. í síðasta dálknum á mynd 1A og á mynd 2.20b í WGI-AR4.
- 9 Það flækir umræðu um jafngildisáhrif að bæði geislunaráhrif og líftími lofttegunda er ólíkur. Rætt er um mismunandi áhrif ólíkra lofttegunda í kafla 2.10 í WGI-AR4, og yfirlit gefið í töflu 2.14.
- 10 Aðferðir til að meta jafngildiseiningar gróðurhúsalofttegunda má sjá í töflu 6. 2 á bls 358 í bókinni IPCC, 2001 *Climate Change 2001: The Scientific Basis Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [J. T. Houghton ofl. (ritstj.)] Cambridge University Press.
- 11 Mynd 1.3 byggir á mynd 3.9 í WGI-AR4.
- 12 Mynd 1.4 byggir á mynd TS.6 í WGI-AR4. Yfirborðsgögn eru frá HadCRU gagnasafninu, en gögn frá veðrahvolfi byggja á mælingum með gervihnöttum.

- 13 Mælingar á kólnun heiðhvolfsins eru ræddar í grein 3.4.1.2 og samantekt þeirra má sjá á mynd 3.18 í WGI-AR4.
- 14 Nánar má lesa um breytingar á tíðni kaldra og hlýrra daga, og tíðni hitabylgna í WGI-AR4 í 3.8 kafla og TS 3.1.1 auk klausu TS-3.5 á blaðsíðu 53 í tæknilegum samantektarkafli WGI-AR4.
- 15 Mynd 1.5 byggir á mynd 3.12 í WGI-AR4.
- 16 Nánar má lesa um úrkomubreytingar í WGI-AR4 köflum 3.3.2, 3.8.2.2 og kafla TS 3.1.3.
- 17 Fjallað er um snjóhulu í kafla 4.2 í WGI-AR4. Yfirlit um breytinga á norðurhveli eru í kafla 4.2.2.2.
- 18 Samantekt á snjóhulubreytingum í fjalllendi og á suðurhveli má finna í kafla TS3.2 í WGI-AR4.
- 19 Fjallað er um breytingar á sífrera í kafla 4.7 í WG-AR4 og í kafla TS 3.2.
- 20 Fjallað er um breytingar á jöklum og jökulhvelum í kafla 4.5 og 4.6 í WGI-AR4 og í kafla TS3.2. Einnig má lesa um framlag jökulbráðar til sjávaryfirborðshækkunnar í sömu köflum og í töflum 4.4 og 4.6.
- 21 Fjallað er um breytingar á hafisútbreiðslu í kafla 4.4.2 TS3.2 í WGI-AR4. Lágmarksútbreiðsla hafiss í N-Íshafi hefur minnkað hraðast og á 7,4% talan við þá stærð. Sumarið 2007, eftir að AR4 skýrslan kom út, náði útbreiðsla hafiss á Norðurhveli sögulegu lágmarki. Hafisútbreiðsla í september var þá 39% af meðaltali septembermánaða fyrir árin 1979–2000.
- 22 Nánar má lesa um breytingar á lægðagangi í kafla 3.5.3 í WGI-AR4, og breytingar á ölduhæð í kafla 3.5.6.
- 23 Umræðu um breytingar á tíðni hitabeltislægða og fellibylja má finna í kafla 3.8.3 í WGI-AR4 og í kafla TS 3.1.3.
- 24 Fjallað er um varmainnihald heimshafanna í kafla 5.2.2 í WGI-AR4.
- 25 Fjallað er um seltubreytingar í grein 5.2.2.3 í WGI-AR4.
- 26 Lesa má um súrnun hafsins hafsins í kafla 7.3 í WGI-AR4 og áhrif hennar á vistkerfi í kafla 4.4.9 í WGII-AR4. Einnig er minnst á þessi áhrif í kafla 4.3 í þessari skýrslu.
- 27 Um breytingar í hafi er fjallað í 5. kafla WGI-AR4. Yfirlit um þær má lesa í kafla TS3.3 og í samantekt í kafla 5.6.
- 28 Hér er *lóðrétt hringrás* notað sem þýðing á *meridional overturning circulation* sem er nafngift á hafhringrás þar sem hlýr yfirborðsjór streymir á kaldari svæði, kólnar, sekkur og myndar djúpsjó. Þessi hringrás er einnig stundum nefnd *varma-seltu-hringrásin* eða *færibandið*. Um breytingar á hafhringrás er fjallað um í kafla 5.3 í WGI-AR4 og í klausu 5.1 á bls 397.
- 29 Um breytingar á sjávarstöðu má lesa í kafla 5.5 og kafla TS 3.3.3 í WGI-AR4. Einnig er fjallað um sjávaryfirborðhækkun í klausu TS4 á blaðsíðu 51 í tæknilegri samantekt WGI-AR4 og í spurningu 5.1 á blaðsíðu 409 í WGI-AR4.
- 30 Töflur 1.1 og 1.2 byggja á töflum í hliðargrein TS.1 í WGI-AR4. WGII-AR4 notast ekki við flokkana *afar líklegt* og *afar ólíklegt* heldur ná flokkarnir *mjög líklegt* og *mjög ólíklegt* yfir þessa flokka.
- 31 Samantekt um orsakagreiningu loftslagsbreytinga má lesa í kafla TS4 í WGI-AR4 auk þess ítarlega er fjallað um þetta efni í 9. kafla WGI. Tafla 9.4 inniheldur samantekt á rökstuðningi fyrir mati á líkindastigi.
- 32 Sjá kafla TS3.5 og 6.6 og 6.7 í WGI-AR4.
- 33 Mynd 1.6 byggir á mynd 9.5 í kafla 9.4.1.2 í WGI-AR4. Sjá frekari umfjöllun um náttúrulegar sveiflur í grein 9.4.1.2.
- 34 Sjá umfjöllun í grein 9.4.1.5 í WGI-AR4.
- 35 Sjá umfjöllun í köflum 9.5.1 og 9.5.5 í WGI-AR4.
- 36 Sjá umfjöllun í kafla 9.4.3 í WGI-AR4.
- 37 Sjá umfjöllun í kafla 9.5.2 í WGI-AR4.
- 38 Sjá grein 9.5.5.3 og lokamálsgrein kafla 9.5.6 í WGI-AR4.
- 39 Veigamikil eðlisfræðileg rök eru fyrir því að aukning gróðurhúsalofttegunda kæli heiðhvolfið þó þær leiði til hlýnunar í veðrahvoli. Sjá umfjöllun í kafla 9.2.2 og mynd 9.1 í WGI-AR4.
- 40 Um samanburð á hlýnun við yfirborð og í veðrahvoli má lesa í grein 3.4.1.5 í WGI-AR4 og um orsök hlýnunar má lesa í innangangsgrein kafla 9 og nánar í grein 9.4.4.4. Einnig má í þessu samhengi bera saman mynd 9.22 og 3.18 í WGI-AR4.
- 41 Sjá umfjöllun í köflum 9.4.1 og 9.4.2 og sérstaklega mynd 9.12 í WGI-AR4.
- 42 Sjá ágríp fyrir stefnumótendur (SPM) í WGII-AR4.
- 43 Samantekt á gögnum má sjá á myndum 1.8 -1.9 og í töflu 1.12 í WGII-AR4. Þessar myndir eru ræddar í kafla 1.4.2.3 og úrdrátt þeirra má finna á mynd TS1 í WGII-AR4.
- 44 Fjallað er um breytingar sem stafa af hörfun jökla, minnkandi snjóhulu og hafiss í kafla 1.3.1.1 og breytingar á afrennsli í kafla 1.3.1.2 í WGII-AR4.
- 45 Fjallað er um breytingar í lífríki á landi í kafla 1.3.5 í WGII-AR4. Tímasetning ýmissa vortengdra þátta (og 2,3 til 5,2 daga framrásin) er rædd í köflum 1.3.5.1 og 1.4.1 og í töflu 1.8. Einnig má sjá yfirlit um lengingu gróðurtíma í töflu 1.7.
- 46 Fjallað er um breytingar á útbreiðslu tegunda á landi í kafla 1.3.5.2 og töflu 1.9 í WGII-AR4.
- 47 Fjallað er um áhrif hlýnunar á vistkerfi hafsins í kafla 1.3.4.1 og 1.3.4.2 ásamt samantekt í töflu 1.5 í WGII-AR4.
- 48 Fjallað er um áhrif hlýnunar á stöðuvötn og straumvötn í kafla 1.3.2 og áhrif á vistkerfi þeirra í kafla 1.3.4 í WGII-AR4.
- 49 Fjallað er um loftslagstengda þætti og um breytingar af mannavöldum sem ekki eru loftslagsháðar í kafla 1.2 í WGII-AR4.
- 50 Sjá samantekt á mynd TS1 og kafla TS2 og 1.4 í WGII-AR4.
- 51 Sjá kafla 1.4 og lið 3 á bls 28 í TS kafla WGII-AR4.
- 52 Sjá kafla 1.4 og lið 1 á bls 28 í TS kafla WGII-AR4.
- 53 Fjallað er um samfélagsleg áhrif í kafla 1.3.6 (landbúnað) 1.3.7 (heilsufar) og 1.3.9 í WGII-AR4 auk ítarlegri umfjöllunar í köflum 5–7.
- 54 Sjá kafla 1.3.6 og kafla 5 í WGII-AR4.
- 55 Sjá kafla 1.3.7 og kafla 8 í WGII-AR4.
- 56 Sjá kafla 1.3.1 og kafla 7 í WGII-AR4.
- 57 Sjá kafla 7.1 og 7.2 í WGII-AR4.
- 58 Sjá kafla B í ágrípi fyrir stefnumótendur (SPM) í WGII-AR4.
- 59 Hér er miðað við að styrkur gróðurhúsalofttegunda sé tvöfaldaður og haldist síðan óbreyttur meðan loftslag nær að aðlagast. Sjá nánar útskýringu á *climate sensitivity* í Annex I í WGI-AR4.
- 60 Sögulegt ágríp loftslagsvísinda má finna í 1. kafla WGI-AR4.
- 61 Sjá umræðu í köflum 8.6, 9.6 og klausu 10.2 á bls. 798 í WGI-AR4.
- 62 Tafla 1.3 byggir á töflu 10.8 í WGI-AR4.
- 63 Sjá umfjöllun um langtímabreytingar og þær breytingar sem þegar eru óumflýjanlegar í kafla 10.7.
- 64 Þær sviðsmyndir sem notast er við í fjórðu úttekt (AR4) eru nefndar SRES sviðsmyndir og taka við af eldri sviðsmyndum sem byggt var á í fyrri skýrslum. Skilgreining sviðsmynda sem kynntar eru til sögunnar í SPM kafla WGI-AR4, kafla TS3.2 í WGII-AR4 eru ótengdar 4. úttekt IPCC og eru skilgreindar nánar í *Emissions Scenarios*. 2000. Nakicenovic og Swart (ritstj.). Cambridge University Press, 570 bls. Þessi bók er aðgengileg á vefsetri IPCC.

- 65 Mynd 10.26 í WGI-AR4 sýnir losunarsögu helstu gróðurhúsalofttegunda fyrir sviðsmyndirnar. Myndin sýnir einnig mat á styrk hvernar gróðurhúsalofttegundar í loftþjúpnum út 21. öldina. Í B1 og A1T nálgast styrkur CO₂ jafnvægi við 550 og nærri 600 ppm. Heildarlosun allra gróðurhúsalofttegunda er þó nokkuð meiri í A1T og því er geislunarálág (og styrkur CO_{2-jg}) við jafnvægi mun hærri í A1T en í B1.
- 66 Mynd 1.7 byggir á myndum 10.4 (línuritið) og 10.29 (stöplaritið) í WGI-AR4. Á línuritinu samsvara breidd skyggðu svæðanna tveimur staðalfrávikum ársmeðaltala líkananna, en á stöplaritinu er þykka línan besta mat en stærð súlunnar endurspeglar líklega óvissu (sjá nánar grein 10.5.4.6 í WGI-AR4). Sjá einnig samantekt í kafla TS.5.
- 67 Fjallað er um niðurstöður líkanakeysla með ólíkum sviðsmyndum í kafla 10.5.3 í WGI-AR4.
- 68 Tafla 1.4 byggir á töflu TS.6 í WGI-AR4.
- 69 Fjallað er um líklega sjávarborðshækkun í kafla 10.6 í WGI-AR4, sérstaklega töflu 10.7 og mynd 10.33 í grein 10.6.5.
- 70 Fjallað er um þá óvissu á sjávarfyrirborðshækkun sem rekja má til mögulegra breytinga á ísskriði í grein 10.6.4.2. í WGI-AR4. Deila má um hvort viðbótarhækkun upp á 0,1–0,2 m sé nægileg. Þetta atriði er rætt nánar í kafla 4.5 í þessari skýrslu.
- 71 Mynd 1.8 byggir á mynd TS.28. Sjá einnig myndir 10.8 og 10.28 í WGI-AR4.
- 72 Greining loftslagsbreytinga eftir svæðum og árstíðum er umfjöllunarefni kafla 11 í WGI-AR4. Auknin hlýnun að vetri til á við um heimskautasvæði á norðuhveli sem m.a. má sjá á myndum 11.5, 11.9, 11.12 og sérstaklega 11.18 og 11.19. Einnig má sjá samantekt í töflu 11.1 og 11.2. Samantekt í kafla TS5.2 fjallar einnig um svæðisbundar loftslagsbreytingar.
- 73 Lesa má um útgildi og dægursveiflu hita í grein 10.3.6.2 í WGI-AR4. Mynd 10.19 sýnir samantekt fyrir frostdaga, hitaþylgur og gróðurtíma.
- 74 Fjallað eru um svæðisbundnar breytingar á sjávarstöðu í kafla 10.6.2 og langtímahorfur eru ræddar í grein 10.7.4.1 í WGI-AR4. Rætt er um breytingar á jöklum og íshvelum í kafla 10.6.3.
- 75 Mynd 1.9 byggir á mynd TS.30. Sjá einnig mynd 10.9 í WGI-AR4.
- 76 Fjallað er um úrkomubreytingar í kafla TS5.2 og grein 10.3.2.4 í WGI-AR4.
- 77 Rætt er um horfur á sífrerasvæðum í grein 10.3.3.2 og breytingar á hafs í grein 10.3.3.1 í WGI-AR4.
- 78 Fjallað er um breytingar á lóðréttri hringrás N-Atlantshafsins og djúpsjávarmyndun í kafla 10.3.4 í WGI-AR4. Einnig er rætt um djúpsjávarmyndun í hliðargrein í kafla 3 síðar í þessari skýrslu.
- 79 Stutt yfirlit yfir grundvallar sveiflumáta (*e. modes of oscillation*) í loftþjúpnum má finna í kláusu TS.2 á bls 39 í tæknilegum ágrípskafla WGI-AR4.
- 80 Stuttlega er fjallað um breytingar á loftþrýstingi við yfirborð í grein 10.3.2.4 og fjallað er um breytingar á NAO og öðrum sveiflumátum í grein 10.3.5.6 í WGI-AR4. Einnig er þetta rætt sem hluti samantektarinnar í kafla TS5.2.
- 81 Fjallað er um hitabeltislægðir og fellibylji í grein 10.3.6.3 í WGI-AR4 og samantektinni í kafla TS5.2.
- 82 Stjörnujöfin er útskýrð í töflu 1.1 hér að framan. Frekari útskýringu má finna í ágrípi fyrir stefnumótendur í WGII-AR4 (sjá grein C).
- 83 Fjallað er um úrkomubreytingar 10.3.2.4 í WGI-AR4 og kafla 3.4.1 í WGII-AR4.
- 84 Fjallað er um breytingar á tíðni þurka og afleiðingar bráðnunar jökla á vatnsfordabirgðir í kafla 3.4.3 í WGII-AR4.
- 85 Fjallað er um breytingar í vistkerfum í kafla 4.4. Ítarlegt yfirlit má finna í töflu 4.1 í WGII-AR4, og samantekt á mynd 4.1.
- 86 Fjallað er um útrýmingarhættu plöntu- og dýrategunda í kafla 4.4 í WGII-AR4. Talnabilið (20–30%) kemur úr grein 4.4.11 (á bls. 242). Þar er hlýnunin miðuð við upphaf iðnbyltingar og því hærrí en í textanum hér að ofan.
- 87 Lesa má um súrnun hafsins hafsins í kafla 7.3 í WGI-AR4 og áhrif hennar á vistkerfi í kafla 4.4.9 í WGII-AR4. Sjá einnig umfjöllun í kafla 4.3 í þessari skýrslu.
- 88 Fjallað er um getu vistkerfa til að taka upp kolefni í kafla 4.4.1 í WGII-AR4. Mynd 4.1 sýnir dæmi um hugsanlegan viðsnúning upptöku þegar liður á öldina.
- 89 Fjallað er um fiskveiðar og fiskeldi í kafla 5.4.6 í WGII-AR4.
- 90 Fjallað er um breytingar á afrakstri ræktarlands í kafla 5.4.2 í WGII-AR4.
- 91 Fjallað er um strandsvæði í kafla 6 í WGII-AR4 og horfur á komandi öld í kafla 6.4.3.
- 92 Fjallað er um ýmissa samfélagsleg áhrif í kafla 7 í WGII-AR5. Horfur á komandi öld eru ræddar köflum 7.4 og 7.4 og yfirlit gefið í töflu 7.3.
- 93 Sjá umræðu um tjónnæmi fátækra samfélaga í kafla 7.2 (sérstaklega liður 7 á bls 383) og í grein 7.4.3.5 í WGII-AR4.
- 94 Fjallað er um heilsufarsleg áhrif í kafla 8 í WGII-AR4. Ítarlegri lista yfir heilsufarsleg áhrif (með beinum tilvitnunum) má finna í ágrípi í inngangi kafla 8 og töflum 8.2, 8.3 og 8.4.
- 95 Fjallað er um mýrarköldusýkil í grein 8.4.1.2 og dauðsföll tengd kulda í grein 8.4.1.3. Heildaráhrif eru rædd í sem hluti af samantekt í kafla 8.7 í WGII-AR4.
- 96 Sjá kafla 8.3 og kafla 8.7 í WGII-AR4.
- 97 Áhrif á mismunandi svæðum eru rædd í köflum 9–16 í WGII-AR4. Í inngangi hvers kafla er ágríp sem dregur saman helstu atriði. Samantektin hér er að mestu byggð á ágrípi fyrir stefnumótendur.
- 98 Fjallað er um Afríku í kafla 9 í WGII-AR4.
- 99 Fjallað er um Asíu í kafla 10 í WGII-AR4.
- 100 Fjallað er um Eyjaálfu í kafla 11 í WGII-AR4.
- 101 Fjallað er um Mið- og Suður Ameríku í kafla 13 í WGII-AR4.
- 102 Fjallað er um Norður Ameríku í kafla 14 í WGII-AR4.
- 103 Fjallað er um Evrópu í kafla 12 í WGII-AR4.
- 104 Fjallað er um heimskautasvæði í kafla 15 í WGII-AR4.
- 105 Fjallað er um smáeyjar í kafla 16 í WGII-AR4.
- 106 Fjallað er um aðlögun í köflum 17 og 18 í WGII-AR4. Samantektin hér að ofan byggir að miklu leyti á ágrípi fyrir stefnumótendur.
- 107 Mismunandi möguleikar til aðlögunar eru ræddir í inngangsgrein í kafla 17 og dæmi eru gefin í töflu 17.1 í WGII-AR4.
- 108 Kort af dreifingu tjónnæmis í heiminum má sjá á mynd 20.5 og 20.6 í WGII-AR4.
- 109 Sjá nánari umfjöllun í inngangsgrein í kafla 17 og 20.7 í WGII-AR4. Rætt er um hindranir við aðlögun í kafla 17.4.2.
- 110 Sjá nánar kafla D í ágrípi fyrir stefnumótendur og kafla 20.7.
- 111 Sjá umfjöllun í köflum 17.5, 20.3 og 20.7 í WGII-AR4. Rætt er um sjálfbæra þróun sérstaklega í 20. kafla.
- 112 Sjá töflu 20.6 og umfjöllun um í kafla 20.6 í WGII-AR4.
- 113 Sjá mynd 20.9 í WGII-AR4.

2. kafli

Loftslag og náttúrufar á Íslandi

2.0 Inngangur

Loftslag á jörðinni einkennist af náttúrulegum sveiflum sem ná yfir mislöng tímabil, allt frá veðrabreytingum innan sólarhrings til veðurfarssveifla sem taka milljónir ára. Breytingar sem vara í hundruðir ára eða lengur, ráðast m.a. af eftirfarandi þáttum:

- stærð og legu meginlanda og úthafa af völdum landreks
- braut jarðar um sólu, pólveltu og sveiflum á halla jarðmöndulsins
- útgeislun sólar
- efnasamsetningu andrúmsloftsins, þ.m.t. rykmengun og gróðurhúsalofttegundum
- hringrás heimshafanna og
- yfirborðseiginleikum lands, þ.m.t. breytingum á landnotkun.

Að undanskildum fyrstu tveimur atriðunum hér að ofan koma hin einnig við sögu skammtímabreytinga veðurfars. Eldgos geta haft í för með sér tímabundna kólnun loftslags en veðurfarsbreytingar frá ári til árs ráðast að miklu leyti af tilviljanakenndum innri breytileika andrúmsloftsins. Sveiflur sem vara í áratugi eða aldir stafa hins vegar að stórum hluta af samspili loftþjúps og úthafa og einnig af mannavöldum eftir að kemur fram á 20. öldina.

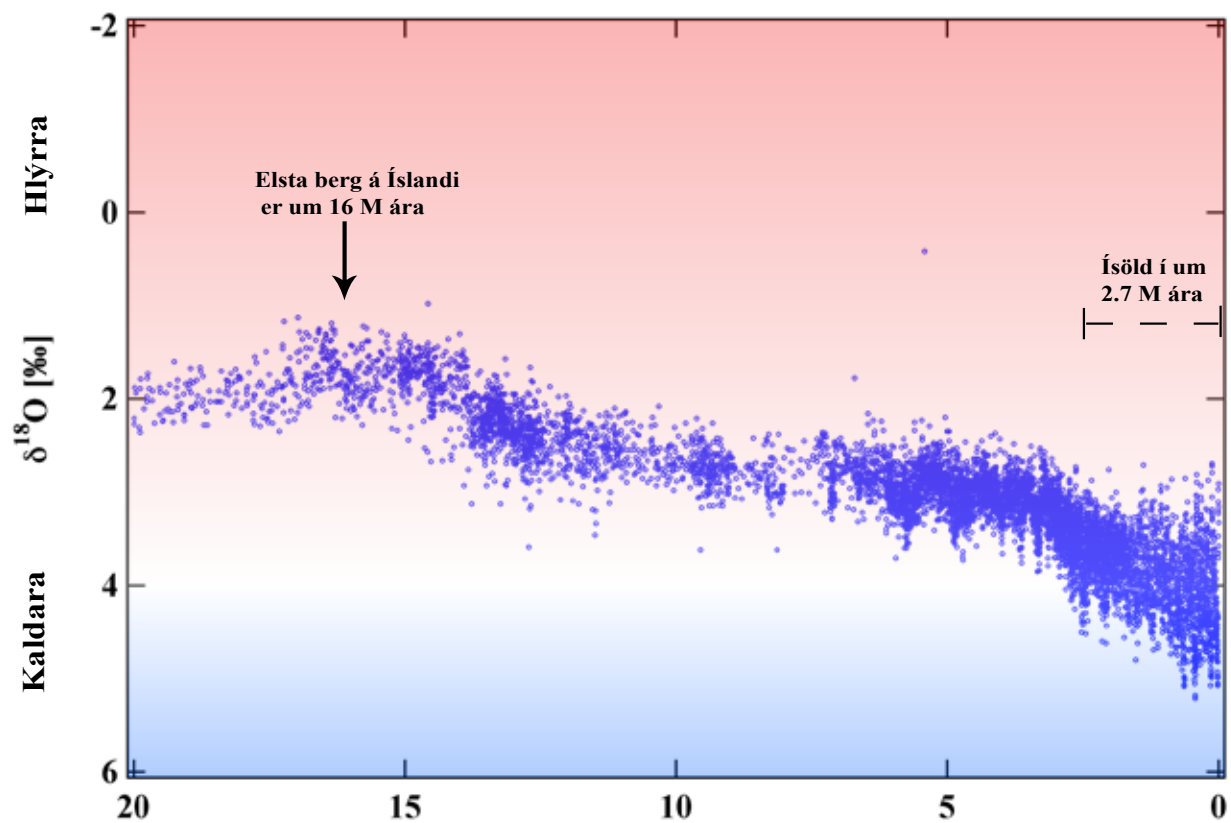
Þessi kafli fjallar um náttúrufarsbreytingar á Íslandi fram á okkar daga. Fyrsti hluti hans fjallar um veðurfarssögu Íslands, bæði á jarðsögulegum tíma og á tímabilinu frá landnámi uns mælingar hófust. Þá er

rakin veðurfarssaga Íslands eftir að mælingar hófust og að því loknu rætt um breytingar í vatnafari og á stærð jökla. Þá eru raktar breytingar á lífríki bæði í sjó og á landi, með sérstakri áherslu á afleiðingar hlýnunar undangenginna áratuga. Í lokin eru rædd stuttlega áhrif náttúrufarsbreytinga á atvinnulíf.

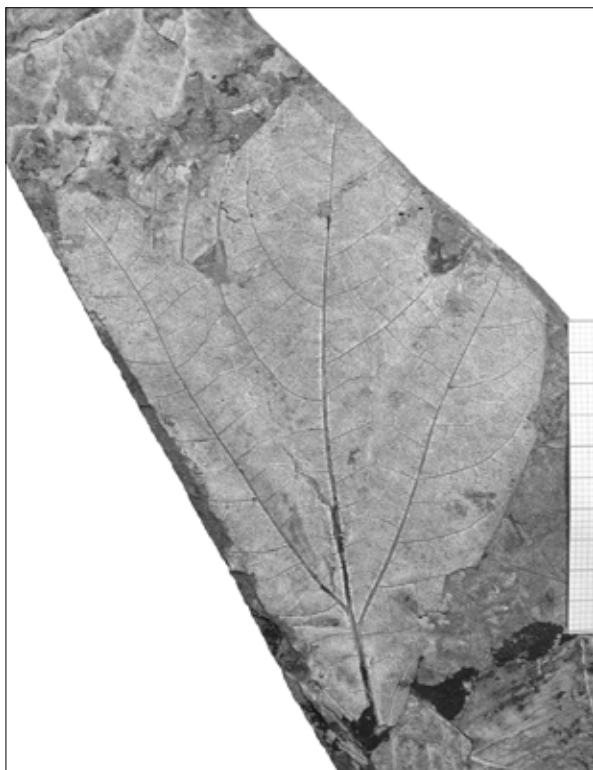
2.1 Náttúrulegar veðurfarsbreytingar á Íslandi

Um alla jörð eru skráðar í jarðlög miklar breytingar, sem hafa átt sér stað bæði í veðurfari og margvíslegum umhverfisþáttum. Heimildir um náttúrulegar loftslags-sveiflur sem þekktar eru í jarðsögunni finnast m.a. í setlögum og ískjörnum. Rannsóknir hafa sýnt að sumar þessar breytingar eru hægara en aðrar hafa gerst mjög hratt. Til dæmis hafa rannsóknir á ískjörnum úr Grænlandsjökli sýnt að síðasta jökulskeiði lauk á innan við 50 árum¹. Á þessum stutta tíma hækkaði hiti á Grænlandi um u.þ.b. 15°C, frá helkulda jökulskeiðsins til tiltölulega milds veðurfars eins og við þekkjum nú. Á sama tíma hækkaði yfirborðshiti sjávar fyrir norðan Ísland að sumarlagi um u.þ.b. 8°C². Svæðið í kringum Ísland er talið mjög áhugavert til rannsókna á bæði hægara og hröðum veðurfarsbreytingum, þar sem landið liggur á mörkum hlýrra og kaldra sjávar- og loftstrauma.

Sem dæmi um miklar náttúrulegar veðurfarsbreytingar má nefna kólnunina í lok tertíer þegar ísöld gekk í garð. Á mynd 2.1 er rakin veðurfarssagan síðustu 20 milljón árin eins og hún hefur verið lesin út frá súrefnissamsætum í djúpsjávarkjörnum³. Eins og sést af myndinni var



Mynd 2.1. Loftslagsbreytingar síðustu 20M ára, eins og þær eru lesnar út frá sürefnissamsætumælingum í djúpsjávarkjörnum³.



Mynd 2.2 Fornanganviður (*Sassafras ferrettianum* Mass.). Anganviður var algengur í laufskógum á Norðurhveli jarðar svo og á Íslandi á Miósentíma. Núlífandi tegundir vaxa á aðskildum svæðum í heittempruðum og tempruðum laufskógum í austurhluta Norður-Ameríku og Austur-Asíu.

mjög hlýtt fyrir um 16 til 14 milljónum ára, þá kólnaði lítillega en fyrir 12 til 7 milljónum ára virðist hafa verið stöðugleiki í veðurfari. Fyrir um 7 milljónum ára byrjaði að kólna það mikið að jöklar tóku að myndast, þótt hin eiginlega ísöld hæfist ekki fyrr en síðar. Rannsóknir á sjávarsetlögum benda til að tugir jöklunar- og hopunarskeiða hafi átt sér stað á síðustu 4 til 5 milljónum ára⁴. Í jarðlögum á Íslandi má einnig sjá ummerki þessara veðurfarsbreytinga^{5,6}. Ísöld gekk í garð fyrir um 2,7 milljónum ára, hún var þó ekki einn fimbulvetur heldur skiptust á s.k. jökulskeið annars vegar og hlýskeið hins vegar. Lengd þessara skeiða er mismunandi en síðastliðin 600.000 ár hafa jökulskeiðin varað í um 100.000 ár og hlýskeiðin í um 20.000 ár.

Annað dæmi um miklar náttúrulegar veðurfarsbreytingar má lesa úr sjávarsetkjörnum við Ísland, sem sýna að við hámark síðasta jökulskeiðs var yfirborðshiti sjávar fyrir norðan land að sumarlagi um 3–4°C. Við upphafi nútíma, fyrir um 11.500 árum síðan, hækkaði sjávarhitinn við Ísland um u.þ.b. 8°C² og í upphafi nútíma sýna rannsóknir bæði á vatnaseti og sjávarkjörnum að hiti hafi verið u.þ.b. 2–4°C hærri en í dag^{7,8,9,10,11,12}.

2.1.1 Elstu jarðlög á Íslandi

Elstu jarðlög á Íslandi eru frá síðterti og eru u.þ.b. 16 milljón ára gömul. Plöntusteingervingar úr 15 til 10 milljón ára gömlum setlögum á Vestfjörðum sýna að loftslag hér á landi var þá hlýtt og fremur rakt. Tegundasamsetning bendir til þess að hlýjast hafi verið fyrir um 12 milljónum ára, en þá var ársmeðalhiti um 10°C hærri en hann er nú. Á þessum tíma þrífust hér ýmsar hitakærar plöntur sem í dag vaxa einvörðungu í heittempruðum og tempruðum skógum Norður-Ameríku, Evrópu og Asíu (á 20–45° N). Þegar loftslag var sem mildast fór meðalhiti heitasta mánaðar yfir 20°C og meðalhiti kaldasta mánaðar var vel yfir frostmarki. Mynd 2.2 sýnir steingerðan anganvið (*Sassafras ferrertianum* Mass.) úr Surtarbrandsgili við Brjánslæk. Anganviður var algengur í laufskógum á Norðrhveli jarðar svo og á Íslandi á Míósentíma. Núlifandi tegundir vaxa á aðskildum svæðum í heittempruðum og tempruðum laufskógum í austurhluta Norður-Ameríku og Austur- Asíu.

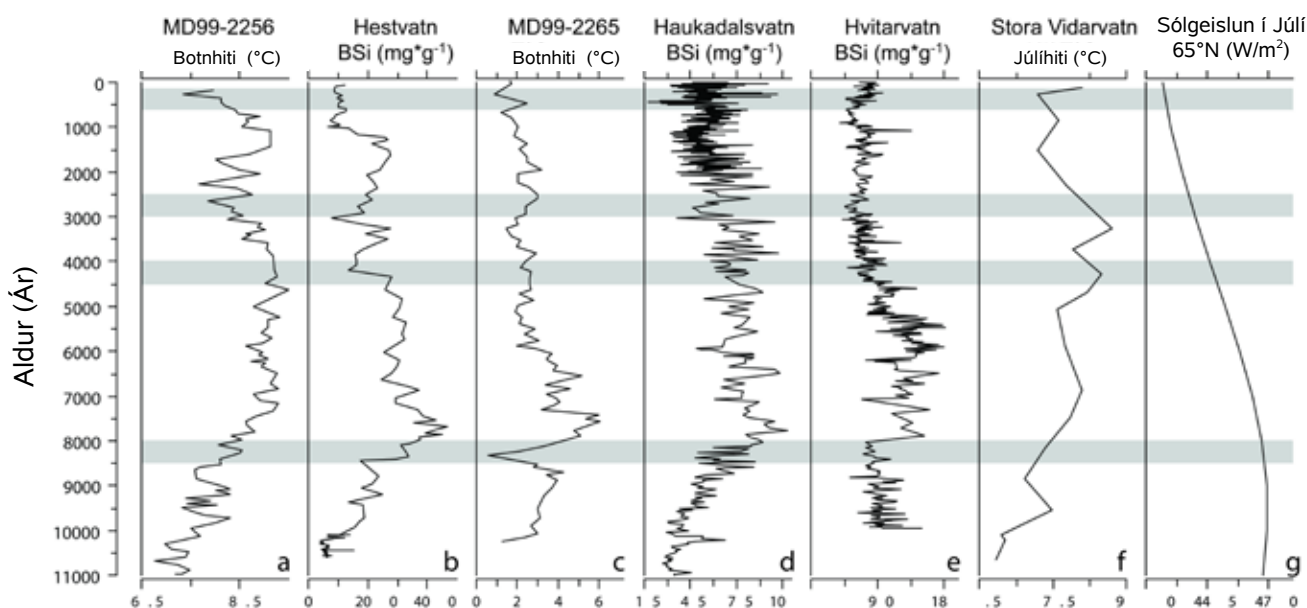
Þegar leið að lokum terti fór hægt kólnandi¹³, eins og rakið var hér að framan.

2.1.2 Síðasta jökulskeið

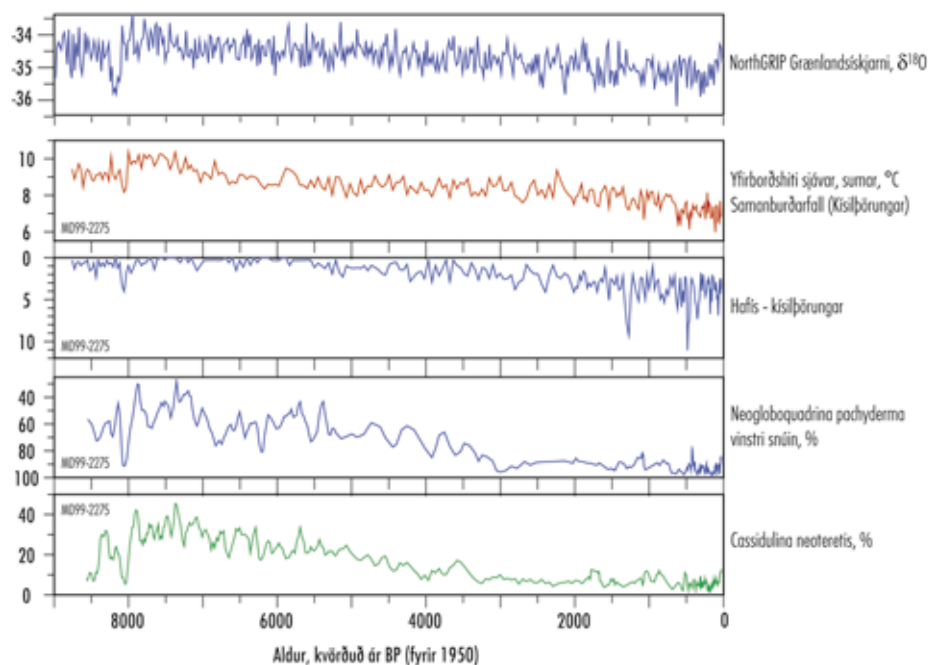
Á síðasta jökulskeiði er íslenski meginjökullinn talinn hafa náð mestri stærð fyrir um 20.000 árum^{14,15} eða þegar síðasta jökulskeið er talið hafa verið í hámarki, samkvæmt rannsóknum á Grænlandskjörnum¹⁶ og sjávarsetlögum¹⁷. Á þeim tíma var hnattrænt sjávarborð um 100 m lægra en það er í dag. Fyrir um 18.000 árum tók að hlýna verulega þegar hlýir sjávarstraumar náðu á ný til hafsvæðanna við landið og fyrir um 14.000 árum er talið að allstór hluti landsins hafi verið jökullaus¹⁴. Samkvæmt rannsóknum á seti úr Torfadalsvatni á Skaga þreifist runnagróður (*e. shrubs og dwarf shrubs*) á Skaga um 1000 árum síðar (Alleröd tíð) og frumframleiðni vatnsins hafði aukist mikið¹⁸. Þá kólnaði á ný (Yngri Dryas tíð) og íslenski meginjökullinn stækkaði og mun hafa náð víðast hvar út undir þáverandi strendur landsins¹⁴. Talið er að Yngri Dryas jökullinn hafi myndað jökultungur eða skriðjökla út í helstu firði og flóa á þessum tíma, en þá var Suðurlandsundirlendið undir sjó svo og aðrir dalir sem eru framhald núverandi fjarða^{11,19}. Fyrir um 11.700 árum tók að hlýna verulega, þó með bakslagi fyrir um 11.000 árum (Preboreal kólnun). Sú hlýnun sem þá tók við markar endalok síðasta jökulskeiðs en þá er talið líklegt að Irmingerstraumurinn (sjá hliðargrein B í kafla 3) hafi náð núverandi styrkleika^{10,20,21}. Þetta óstöðuga veðurfar í lok síðasta jökulskeiðs sést einnig vel í setkjörnum sem rannsakaðir hafa verið norður af landinu²¹.

2.1.3 Nútími

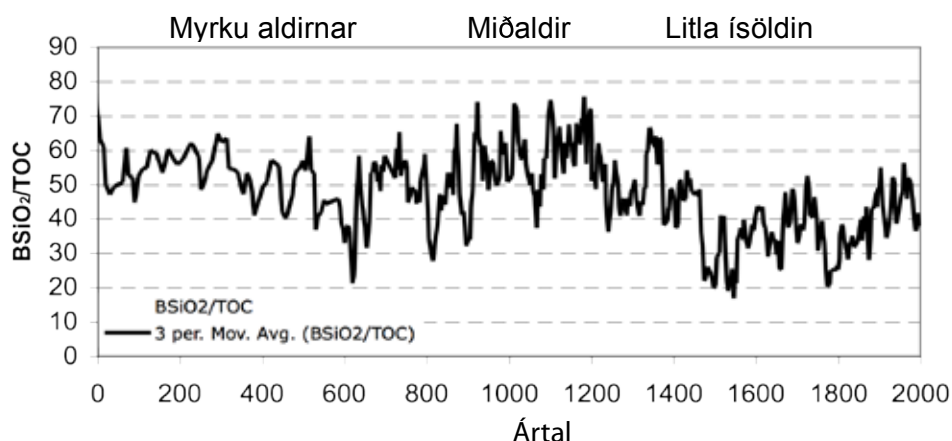
Gögn um loftslagsbreytingar síðustu árþúsunda (Nútíma) má einkum fá með rannsóknum á setlögum úr stöðuvötnum eða af hafsbótnei, en einnig má lesa gróðurfarssögu þessa tíma með rannsóknum á frjókornum í mómýrum. Rofhraði á Íslandi er tiltölulega mikill og því hafa þykk setlög (15–50m) safnast fyrir í mörgum vötnum síðastliðin 11.500 ár eða frá lokum síðasta jökulskeiðs¹¹. Á landgrunni Íslands er einnig að finna þykk setlög sem geyma upplýsingar um umhverfisbreytingar á Nútíma og seinni hluta síðasta jökulskeiðs. Vegna vel aldursgreindra gjóskulaga, sem finnast í setkjörnunum er hægt að aldursgreina setið mjög vel og þannig tíma-



Mynd 2.3 sýnir niðurstöður rannsókna á vatnaseti úr Hestvatni, Haukadalsvatni, Hvítarvatni og Stóra Viðarvatni, auk niðurstaðna úr sjávarseti úti fyrir suðvestur- og norðvesturlandi. Kjarnarnir sýna allir vel hitahámark fyrir um 7000 árum og kaldara tímabil sem hófst fyrir um 6000 árum. Litla ísöldin kemur einnig fram í þessum gögnum. (Mynd frá Áslaugu Geirsdóttur. Sjá nánar tilvísun 29).



Mynd 2.4. Loftslagsbreytingar á Nútíma á Íslandi. Samfelld gögn úr sjávarsetkjörnum fyrir norðan land. Gott samræmi er milli niðurstaðna súrefnissamsætumælinga NGRIP kjarnans á Grænlandi³⁵ (efsta boxið) og ýmissa veðurvitna úr sjávarsetkjörnunum. Á báðum stöðum er hlýjast í upphafi nútíma og ef miðað er við yfirborðshita sjávar að sumarlagi sem metinn er út frá tegundum kísilþörungna í setinu hefst kólnun á svæðinu norður af landinu fyrir um 7000 árum. Kísilþörungar sem fylgja hafs verða þó ekki algengir hér við strendur fyrr en fyrir um 5000 árum. Fyrir um 3000 árum herðir enn á almennri kólnun við Norðurland (mynd frá Jóni Eiríkssyni).



Mynd 2.5. Hlutfallið milli $BSiO_2$ (lífrænn kísill) og TOC (heildarmagn lífræns kolefnis) í seti úr Haukadalsvatni er talið endurspeglar sumarhita²⁹. Þannig er lágt $BSiO_2/TOC$ hlutfall talið merki um kulda meðan hátt hlutfall merkir hlyndi. Á myndinni kemur litla ísöldin mjög vel fram og virðist mega rekja upphaf hennar annars vegar til kaldra sumra milli 1250-1300 og hins vegar milli 1450-1500. Kaldast virðist um 1500 og 1800. Á myndinni sést einnig að hinar hlýju miðaldir hafa verið rofnar af nokkrum kuldaköflum (mynd frá Áslaugu Geirsdóttur)

setja nákvæmlega þær umhverfisbreytingar sem lesa má úr setkjörnunum.

Flestar rannsóknir á sögu hitafars á Nútíma á Íslandi, sem gerðar hafa verið á vatnaseti eða úr mómýrum, sýna að skipta megir Nútíma í eftirfarandi þrjú tímabil:

- Tiltölulega hlýtt tímabil í upphafi Nútíma, þar sem hiti náði hámarki fyrir um 7000 árum (Holocene thermal maximum). Rannsóknir á mýi í setkjörnum tveggja stöðuvatna á Tröllaskaga sýna að hiti hækkaði um 4°C á tímabilinu fyrir 10.500 og 7.500 árum síðan²². Birkiskógur dafnaði vel á þessum tíma og skógarmörk voru hærri sums staðar á landinu en þau eru í dag^{23,24}. Rannsóknir á stöðuvatnaseti á Suður-, Mið- og Vesturlandi sýna einnig mestu frumframleiðni í vötnunum og minnstu jöklun á þessum tíma^{11,25}. Þá er talið mögulegt að Langjökull hafi alveg horfið á þessu tímabili¹⁰.
- Fyrir um 6000 árum má sjá merki um kólnun í veðurháðum gögnum, bæði í stöðuvatna- og sjávarseti eins og fram kemur á myndum 2.3 og 2.4.
- Þriðja tímabilið er kennt við litlu ísöldina (ca. 1300–1900) og kemur þetta kalda tímabil vel fram í setkjörnum frá hafsbótunum norður af Íslandi, en þar benda breytingar á lífríki og setgerð til kólnunar á 14. öld^{26,27}. Setkjarni úr Hvítárvatni sýnir að Langjökull nær þá hámarksstærð og kelfir í Hvítárvatni^{28,29}.

árvatni^{28,29}. Líkanreikningar sýna að stærð Langjökuls hefur verið hvað mest árið 1840 og að á litlu ísöldinni hafi sumarhiti verið $1-2^{\circ}\text{C}$ lægri en í dag. Sömu rannsóknir sýna að skriðjökurnir tveir, Suðurjökull og Norðurjökull urðu stærstir á seinni hluta 19. aldar en minnkuðu tiltölulega hratt eftir miðja 20. öld²⁸. Ísrekið efni í seti Hvítárvatns og lífrænt kolefni í Haukadalsvatni benda til þess að hámark litlu ísaldarinnar hafi verið á milli 1750 og 1850^{28,29}.

Rannsóknir á mýi (Chironomidae) úr fimm vatnasetkjörnum á Norðurlandi mynda samfellda sögu hitabreytinga á landi á Nútíma. Gögnin úr vatnaseti úr tveimur vötnum á Tröllaskaga passa ágætlega við þrískiptingu loftslagssögunnar á Nútíma²², eins og rakið var hér að framan. Hins vegar benda rannsóknir á vatnaseti úr þremur strandvötnum á Norðurlandi til að sumur hafi verið tiltölulega köld í upphafi Nútíma og að hámarkshita hafi fyrst verið náð fyrir um 5000 árum³⁰.

Mynd 2.3 sýnir niðurstöður rannsókna á vatnaseti úr Hestvatni, Haukadalsvatni, Hvítárvatni og Stóra Viðarvatni, auk niðurstaðna úr sjávarseti úti fyrir suðvestur- og norðvesturlandi. Kjarnarnir sýna allir vel hitahámark fyrir um 7000 árum og kaldara tímabil sem hófst fyrir um 6000 árum. Litla ísöldin kemur einnig fram í þessum gögnum.

Samfelld gögn um sjávarhita hafa verið lesin úr setkjörnum á landgrunni fyrir norðan Ísland^{31,32,33}. Mynd 2.4 sýnir gott samræmi milli niðurstaðna súrefnissamsetumælinga NGRIP kjarnans á Grænlandi³⁴ og ýmissa veðurvitna úr sjávarsetkjörnum á landgrunninu norðan Íslands. Á báðum stöðum er heitast í upphafi nútíma og þá virðist styrkur hlýs Atlantssjávar vera mestur. Í öllum gögnum kemur fram að hlýja tímabilið á fyrri hluta nútíma (10.200 til ca 7000) er rofið af stuttu (allt að 600 ára), köldu tímabili sem varð fyrir um 8200 árum. Mun hitalækkunin norður af landinu hafa numið um 3°C³⁵.

Eins og sést af mynd 2.4 hefst kólnun á svæðinu norður af landinu fyrir um 7000 árum ef miðað er við yfirborðshita sjávar að sumarlagi sem metinn er út frá tegundum kísilþörungna í setinu. Kísilþörungar sem fylgja hafis verða þó ekki algengir við strendur landsins fyrir en fyrir um 5000 árum, sem sýnir að þá hafi fyrst farið að bera á hafis við Norðurland. Þar sem finnst meira en 90% af götungaum *Neogloboquadrina pachyderma* (vinstri snúin) er talið að arktískt yfirborðsvatn hafi verið ráðandi, en lægri prósentu af götungaum þýðir vaxandi atlantískt vatn. Götungategundin *Cassidulina neoteretis* bendir til Atlantssjávar við botn landgrunnins. Í upphafi Nútíma er þessi götungur tiltölulega algengur í sjávarseti fyrir norðan land, sem sýnir að Irmingersstraumurinn hafi verið sterkur á þeim tíma. Eins og áður segir hófst kólnun á svæðinu fyrir um 7000 árum (a.m.k. urðu sumrin kaldari) og fyrir um 5000 árum eru einnig merki um aukinn hafis. Fyrir um 3000 árum herðir enn á kólnun. Samkvæmt rannsóknunum á setkjarna sem tekinn var á Húnaflóa er töluverður breytileiki í veðurfari á Nútíma, sérstaklega eykst óstöðugleikinn fyrir um 5000 árum og þá kemur einnig í ljós 1500 ára sveifla í veðurfari³⁶.

2.1.4 Um hitafar á Íslandi frá landnámi til 1800

Flestar greiningar á veðurlagi fortíðar með aðstoð ritadra heimilda^{37,38,39,40} og svokallaðra veðurvitna benda til þess að talsverðar sveiflur hafi verið í veðurlagi hér á landi frá landnámi til okkar daga. Þótt Ísland sé á mörkuum hins byggilega heims þegar illa árar hefur árferði aldrei orðið það slæmt til lengdar að byggð hafi eyðst í landinu. Þetta setur ágiskunum um veðurlag fortíðar skorður.

Næsta víst er að við landnám var gróður betur á sig kominn en nú og hefur honum hnignað fram undir þetta. Erfitt er að greina í sundur áhrif versnandi veðurlags annars vegar og áníðslu á landinu hins vegar. Ekki er víst að landgæðahnignun sé eingöngu hægt að túlka sem versnandi veðurlag.

Menn hafa hingað til einkum reynt að lesa í veðurlagið með aðstoð heimilda um harðindi og góðæri⁴¹, auk þess sem greinilegt samband er milli hafiss og veðurlags⁴². Einnig er vitað að jöklar hafa gengið fram á sögulegum tíma, en mikil óvissa er um útbreiðslu þeirra við landnám. Nokkra vissu telja menn fyrir því að sumir jöklar hafi ekki náð hámarksútbreiðslu fyrir en undir lok 19. aldar, en aðrir eitthvað fyrir⁴³.

Ýmislegt bendir til þess að gróðurþekju hafi hnignað mest á síðari öldum og að uppblástur hafi aukist seint á 17. öld. Það var ekki fyrir en á 19. öld sem sandurinn hélt loks innreið sína niður á austanvert Suðurlandsundirlendi^{44,45}. Uppblástur heldur enn áfram þótt víða hafi vörn verið snúið í sókn⁴⁶.

Nokkrar samantektir eru til um líklegt hitafar á norðurhveli síðustu eitt til tvö þúsund árin, þær virðast segja svipaða sögu og sú mynd sýnir sem hingað til hefur verið dregin upp af veðurfari á Íslandi^{47,48}. Flestar eru samantektirnar á þeim nótum að hlýindi hafi verið víða á norðurhveli framan af miðöldum, en kólnað hafi eftir 13. öld⁴⁹ og 17. öldin hafi verið sú kaldasta. Hlýnunin í kjölfarið var ójöfn og 18. öldin var líklega hlýrri en 19. öldin, en á norðurhveli er svo 20. öldin langhlýjust.

Hvað Íslandssöguna varðar hefur þróunin líklega verið álíka og á norðurhveli. Almennt er talið að hlýtt hafi verið fyrstu aldir byggðar í landinu. Vitað er um kuldaköst á 13. og 14. öld. Ritaðar heimildir segja mjög lítið um veðurfar á 15. og 16. öld og ekki er ljóst hvort 17. öldin var sú kaldasta hér á landi eins og í samantektum fyrir norðurhvelið. Setlagarannsóknir sem lýst er í kafla 2.1.3 virðast staðfesta þessa gröfu mynd af hitafari á Íslandi frá landnámi (mynd 2.5).

Tímabil samfelldra veðurmælinga á Íslandi hófst snemma á 19. öldinni og eftir það er meira vitað um þróun veðurfars.

Samantekt

- Almennt er gott samræmi milli veðurvitna af landi (stöðuvatnaskjarnar og mómyrar), sjávarsetkjarna af landgrunni Íslands og rannsókna á ískjörnum úr Grænlandsjökli. Rannsóknirnar endurspeglar því veðurfarsbreytingar sem urðu á öllu Norður-Atlantshafssvæðinu.
- Hámark hita á Nútíma var fyrir u.þ.b. 8000–7000 árum. Mat á sjávarhita norðvestur og norður af landinu og hiti byggður á líkani af Langjökli á þessum tíma bendir til 2–4°C hærri hita en á tímabilinu 1961–1990.
- Kólnunar verður vart í hvort tveggja sjávar- og landrænum gögnum fyrir um 6000 árum og veðurfar verður óstöðugara.
- Litla ísöldin var kaldasta tímabil Nútíma. Rannsóknir benda til að hámark litlu ísaldarinnar hafi hér á landi verið á milli 1750 og 1850.

2.2 Veðurfar á Íslandi síðustu 200 ár

2.2.1 Tímabil veðurmælinga

Fyrstu hitamælingar hérlandis voru gerðar um miðja 18.öld. Benda heimildir til þess að hiti hafi verið mældur á landinu flest ár síðan⁵⁰. Því miður virðist mikið af þeim athugunum hafa glatast, auk þess sem þær eru óvissar lengi framan af. Meira er vitað um mæliaðstæður frá því um 1830 og síðan og má telja að upplýsingar um hitafar á landinu síðustu 170 árin séu nokkuð áreiðanlegar. Mikil fylgni er á milli hita í hinum ýmsu landshlutum. Mánaðameðaltöl á einum stað gefa því upplýsingar um hita á öðrum. Stundum bregður þó út af. Sé veður hægviðrasamt er kaldara inn til landsins á vetrum en hlýrra á sumrin. Sé hafis við land verður líka kalt við sjóinn fyrir norðan og almennt samband milli hita á Norður- og Suðurlandi raskast. Á sumrin ráða vindáttir miklu um hitafar, á þeim tíma árs eru tengsl milli landshluta minnst.

Lágmarkshitamælingar hafa verið gerðar hér um mjög langt skeið en hámarksælingar voru mjög strjálar fyrir en undir 1930. Sjávarhiti er mikilvægur veðurþáttur, en mælingar við ströndina truflast af tilviljanakenndu

rennsli ferskvatns af landi og einnig hafa framkvæmdir raskað mælistöðum⁵¹.

Fyrstu úrkomumælingar sem vitað er um hérlandis voru gerðar við Lambhús við Bessastaði 1789, en aðeins það ár og síðan eru engar úrkomumælingar fyrr en í Reykjavík um 1830. Mælingar þar héldu áfram til 1854, þá vantar rúm tvö ár þar til farið var að mæla úrkomu í Stykkishólmi haustið 1856. Síðan hafa mælingar verið samfelldar á landinu⁵². Þekking á hitafari 19. aldar er allgóð, en mun meiri óvissa er varðandi úrkomuna. Stöðvar voru fáar og úrkomumælingar á einum stað segja oft lítið um úrkomu annars staðar. Auk þess er erfitt að mæla úrkomu. Úrkoma á landinu er því ekki vel þekkt fyrr en undir 1925 þótt samfelldar mælingar hafi byrjað 70 árum áður.

Snemma var farið að mæla loftþrýsting og reyndar eru til fleiri loftþrýstingsmælingar á tímabilinu 1749 til 1820 en mælingar á hita. Fyrir utan þrýstinginn skiptir bratti þrýstisviðsins einnig miklu máli þegar ljá skal þrýstingnum merkingu og ekki er hægt að bæta úr því nema með mælingum á mörgum stöðum. Þrýstingurinn gefur veigamiklar upplýsingar um veðurlag og ástand veðrakerfa á Norður-Atlantshafi^{53,54,55}.

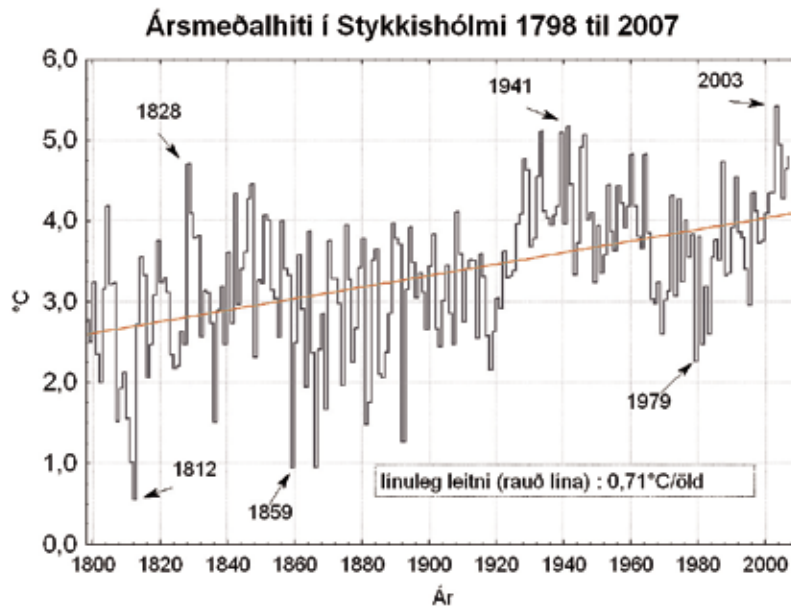
Vindstyrkur var lengst af áætlaður hérlandis en ekki mældur. Langtímabreytingar hans eru því óvissar. Miklar ósamfellur eru bæði í vindáttar- og vindhraðamælingum⁵⁶.

Skýjahula er einnig metin og er því mjög háð athugunarmönnum. Breytileiki hennar er minni en víða er erlendis og er ekki vel þekktur⁵⁷. Snjóhula hefur verið athuguð hérlandis í um 80 ár⁵⁸.

2.2.2 Hitafar

Mynd 2.6 sýnir meðalhita hvers árs í Stykkishólmi 1798 til 2007⁵⁹. Í fljótu bragði sýnist sem hiti hafi smám saman farið hækkandi, leitnin upp á við samsvarar tæpum 0,7°C á öld. Þetta er svipað og hækkun meðalhita á norðurhveli öllu á sama tíma⁶⁰.

Hlýindaskeiði 20. aldar sem hófst upp úr 1920 lauk mjög snögglega 1965 og tók þá við kuldaskiði til 1986.



Mynd 2.6. Meðalhiti hvers árs í Stykkishólmi 1798 til 2006. Örvar benda á nokkur sérlega köld og hlý ár. Rauða línan sýnir leitni alls tímabilsins. Tölur fyrir 1830 eru minna áreiðanlegar, sjá nánar tilvísun 59. (Veðurstofa Íslands, Trausti Jónsson).

Síðan hefur hlýnað. Síðustu árin, 2003 til 2007, hafa verið jafnhlý og best gerðist á fyrra hlýindaskeiði.

Breytileiki veðurfars er mestur hér á landi að vetrarlagi. Vetrarhiti (desember til mars) hefur hækkað á mælitímabilinu og er leitnin um 1,2°C á öld. Leitni summarhitans (júní til september) yfir allt mælingatímabilið er lítil, eða aðeins um 0,2°C á öld og er ekki marktæk, en stutt hlýindatímabil á 20. öld sker sig nokkuð úr. Sömuleiðis hafa síðustu sumur verið hlý. Leitni vorhitans (apríl og maí) er um 0,7°C á öld og hausthitans um 0,8°C á öld (október og nóvember).

Ársspönn (mismunur á meðalhita hlýjasta og kaldasta mánaðar ársins) hefur farið minnkandi, leitnin er um -1,0°C á öld. Merkjanlegur munur er á þróun hitafars í einstökum landshlutum, meira hefur hlýnað norðanlands en sunnan⁶¹. Virðist þetta tengjast minnkandi tíðni hafiss við landið.

2.2.3 Úrkoma

Þegar litið er á einstakar mæliraðir kemur í ljós að í þeim eru ósamfellur. Það var fyrst um 1960 sem farið

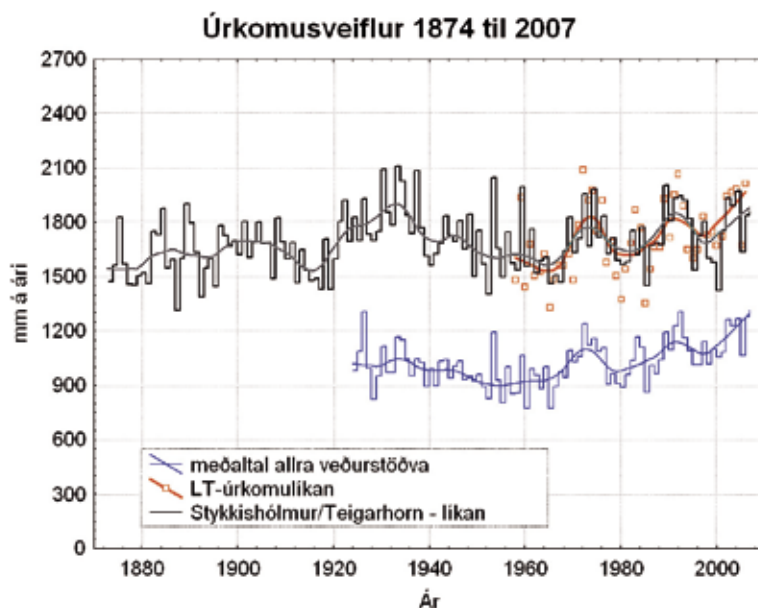
var að mæla úrkomu í flestum byggðum landsins. Líklegt er talið að meðalúrkoma allra stöðva eftir þann tíma sé sæmileg vísbending um úrkomumagn í einstökum landshlutum frá einum áratug til annars. Kort af dreifingu úrkomu á Íslandi er sýnt á mynd 2.14.

Úrkoma var í hámarki um og uppúr 1930, minnkaði síðan, en hefur aftur aukist frá 1965 (mynd 2.7). Úrkoma er að jafnaði heldur meiri í hlýjum árum en köldum um mikinn hluta landsins. Stundum er þó bæði mjög þurrt og hlýtt norðaustanlands. Langtímamælingar virðast gefa til kynna að úrkoma aukist um 4 til 8% við hlýnun um 1°C

2.2.4 Loftþrýstingur

Munur er á veðri í lægðum og hæðum. Úrkoma er fylgiskapur lægða, en að jafnaði fylgir hjart veður háum loftþrýstingi. Meðalloftþrýstingur ársins segir nokkuð um hvort hefur betur, Íslandslægðin svonefnda, sem hefur aðsetur suðvestur af landinu, eða hæðin við austanvert Grænland.

Heildarleitni þrýstings síðustu 180 árin er ekki mark-



Mynd 2.7. Úrkomusveiflur á Íslandi 1874 til 2007 í millimetrum á ári. Bláu ferlarnir sýna meðaltal allra veðurstöðva, súlur einstök ár, en heildregin lína er útjöfnun. Rauðu ferningarnir sýna meðalúrkomu á landinu eins og hún kemur fram í línulegu líkani sem spyrðir saman mæligögn, landslag og endurgreiningu evrópsku veðurspármíðstöðvarinnar⁶³. Heildregna rauða línan sýnir útjafnaðan feril. Gráu súlurnar sýna mat meðalársúrkomu á landinu eftir sambandi fyrra líkans og meðalúrkomu í Stykkishólmi og á Teigarhorni, grái ferillinn er útjöfnun. (Veðurstofa Íslands, Trausti Jónsson).

tæk en þrýstingur var þó ívið hærri á 19. öld en á þeirri 20. Hann var aftur tiltölulega hár á sjöunda áratug 20. aldar. Þrýstingur á Íslandi ræður miklu um breytileika svokallaðrar NAO-tölu⁶², en hún mælir styrk vestanáttar yfir Norður-Atlantshafi. Hún er há þegar þrýstimunur er mikill milli Íslands og Asíeyja, en lág ef munurinn er lítill. Munurinn er mikill þegar þrýstingur á Íslandi er lágur. Heldur úrkomusamara er hérlandis þegar NAO-talan er há heldur en þegar hún er lág, en bein tengsl við hita eru engin.

Þrýstifallið frá því um 1970 til 1990 (og tilsvarendi hækkun NAO-tölunnar) olli miklum umræðum og sumir tengdu það hnattrænum veðurfarsbreytingum af mannavöldum⁶⁴. Þrýstingur hefur hækkað aftur eftir það, en hann er enn nokkuð lágur.

2.2.5 Aðrir veðurþættir

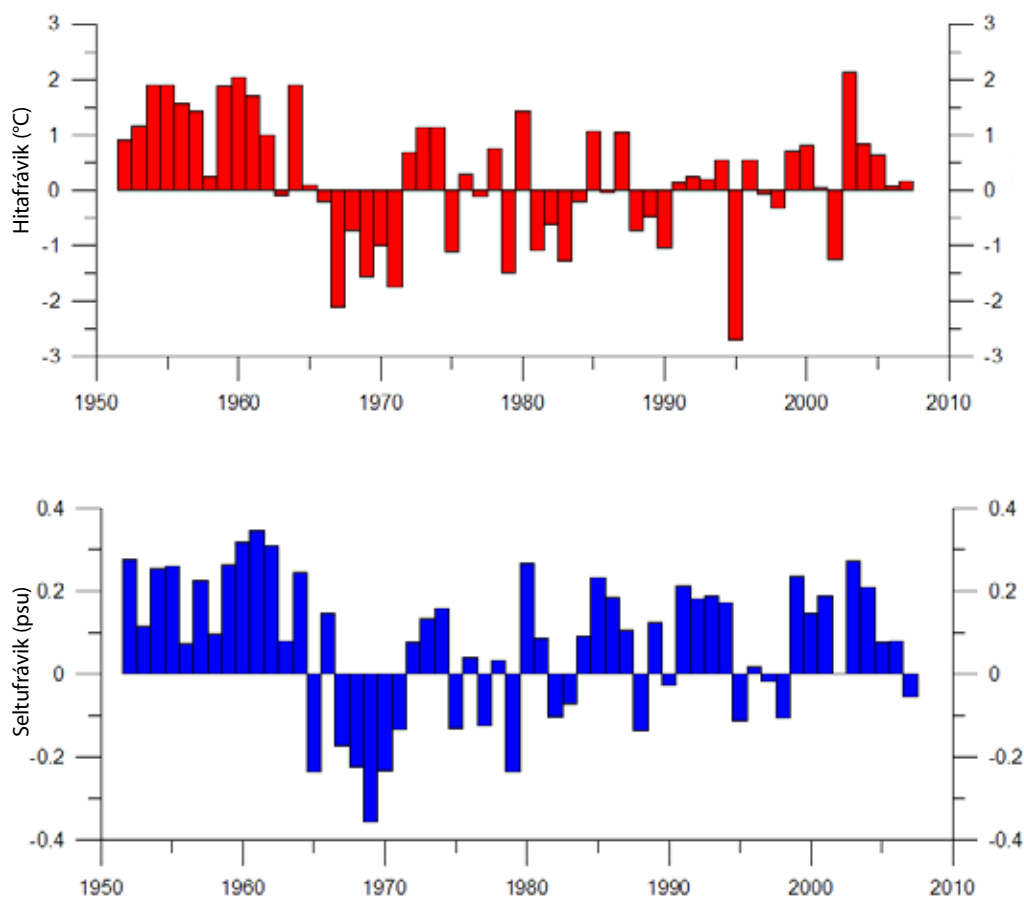
Skýjahula er ætíð metin af athugunarmönnum og hefur það áhrif á gagnaraðir sem eru gjarnan ósamstæðar. Óvenju skýjað var sunnanlands á tímabilinu frá 1972 og fram yfir 1995, þótt nokkur bjartari ár hafi komið inn á milli. Árin frá og með 1998 hafa aftur á móti ver-

ið álíka björt og gerðist fyrir 1970⁶⁵. Engin langtímaleitni hefur komið fram í skýjahulunni.

Leitni er ekki teljandi í snjóhulu sé litið á það tímabil sem fylgst hefur verið með henni sem heild (frá 1925) en miklar ára- og áratugasveiflur eru ríkjandi⁶⁶. Fyrstu ár 21. aldar voru mjög snjólétt. Samband er á milli ársmeðalhita og snjóhulu (sjá umfjöllun í kafla 3.2).

Hafis hefur minnkað mjög við Íslandi síðan á 19. öld, þó mikill ís hafi aftur verið við landið á árunum 1965 til 1971^{67,68}. Ekki hefur verið teljandi hafis við landið frá árinu 1979, þó í einstaka árum verði hans vart um stutt skeið. Á siglingaleið norðan við landið getur hafiss þó orðið vart flest ár.

Síðustu 60 árin hefur heldur dregið úr austlægum áttum en vestlægur vindáttir aukist lítillega. Þetta er þó á mörkum marktækni og óráð að framlengja þá leitni í blindni. Freistandi er þó að telja að minnkandi austanátt stafi af því að meira hefur hlýnað í veðri fyrir norðan og austan land heldur en fyrir sunnan og vestan og að dregið hefur úr ís á norðurslóðum.



Mynd 2.8. Hita- og seltufrávik í efstu 200 metrum sjávar að vori árin 1952–2007 á sniði norður frá Siglunesi að 67°N. Frávik er frá meðaltali árunna 1961–1980. (Mynd frá Héðni Valdimarssyni. Byggt á gögnum Hafrannsóknarstofnunarinnar).

Kuldaköst voru í hámarki á hafisárunum (1965 til 1971) en í lágmarki í hlýindunum um og upp úr 1930⁶⁹. Síðustu 30 árin eða svo hefur kuldaköstum smám saman farið fækkandi.

Hitabylgjur voru í hámarki milli 1930 og 1945, úr þeim dró mjög um 1950 og hitabylgjur voru fæstar á sjöunda áratugnum, um svipað leyti og hafís var í hámarki hér við land. Hitabylgjum hefur farið fjölgandi á síðari árum í takt við hækkandi sumarhita⁷⁰.

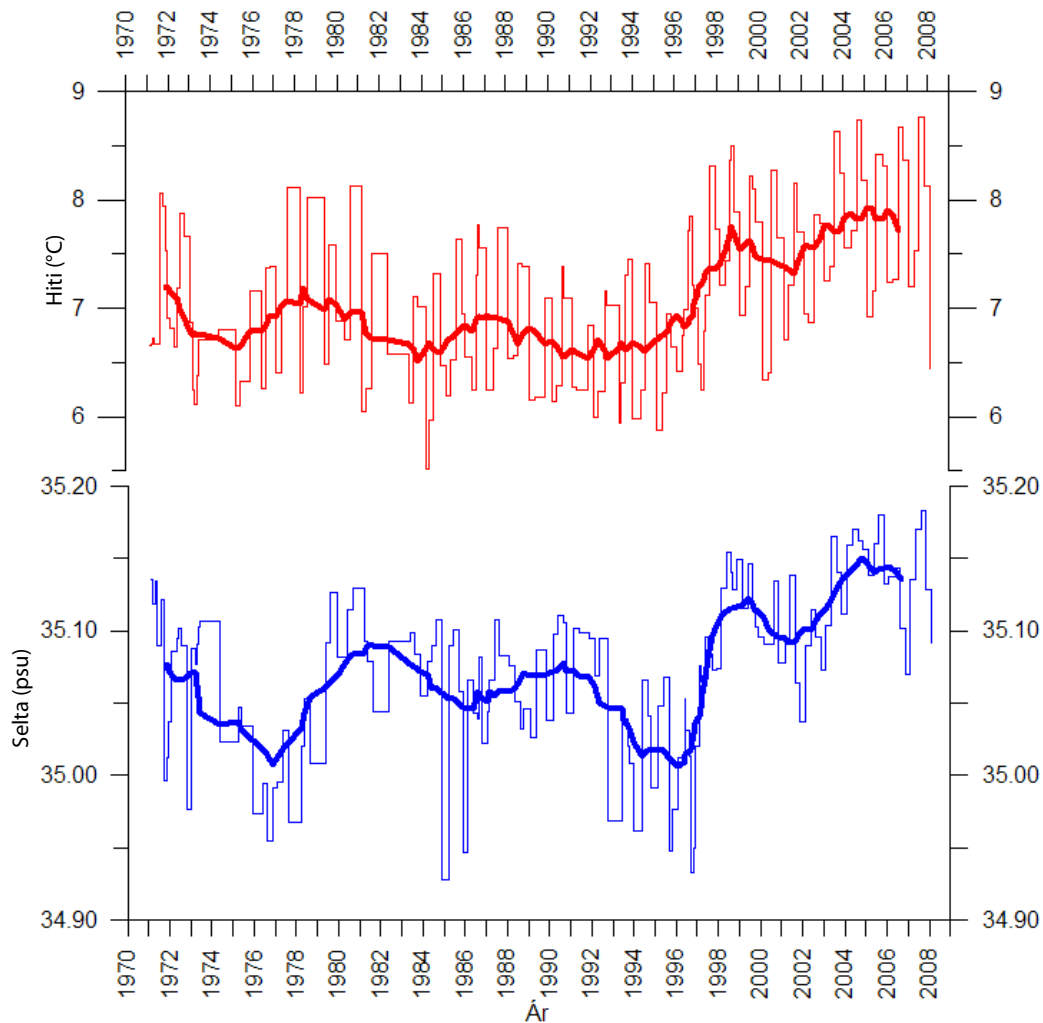
Samantekt

- Telja má að upplýsingar um hitafar á landinu síðustu 170 árin séu nokkuð áreiðanlegar.
- Hlýindaskeiði 20. aldar sem hófst upp úr 1920 lauk mjög snögglega 1965 og tók þá við kuldaskið til

1986. Síðan hefur hitinn legið upp á við. Síðustu árin, 2003 til 2007, hafa verið jafnhlý og best gerðist á fyrri hlýindaskeiði.

- Úrkoma var í hámarki um og uppúr 1930, minnkaði síðan en hefur aftur aukist frá 1965.
- Hafís hefur minnkað mjög við Íslandi síðan á 19. öld, þó mikill ís hafi aftur verið við landið á árunum 1965 til 1971. Ekki hefur verið teljandi hafís við landið frá árinu 1979.
- Hitabylgjur voru í hámarki milli 1930 og 1945, úr þeim dró mjög um 1950. Hitabylgjum hefur farið fjölgandi á síðari árum í takt við hækkandi sumarhita.

Reykjanes-Faxaflói, Hiti og selta, 1970 - 2008



Mynd 2.9. Meðalhiti og selta í efstu 200 metrum sjávar nær ársfjórðungslega árin 1971-2008 í kjarna hlýsjávar vestur af landinu (stöðvar Fx9 og Re8). (Mynd frá Héðni Valdimarssyni. Byggt á gögnum Hafrannsóknarstofnunarinnar).

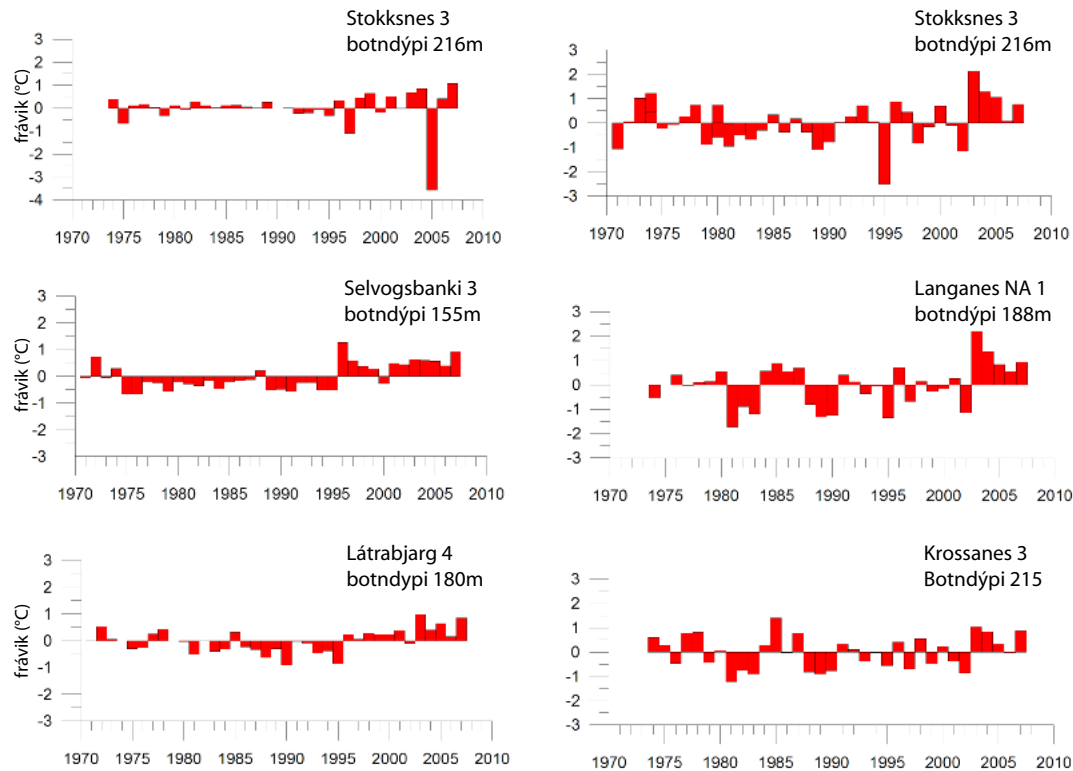
2.3 Náttúrulegar veðurfarssveiflur og hafið við Ísland

2.3.1 Breytingar á ástandi sjávar við Ísland

Hlýsjórinn sunnan úr hafi nær að allri suðurströndinni og streymir auk þess til norðurs vestan landsins inn á Norðurmið allt austur fyrir Langanes. Grein úr hinum kalda Austur-Grænlandsstraumi liggur til suðausturs yfir Kolbeinseyjarhrygg og streymir til suðurs með landgrunnsbrún úti fyrir Austfjörðum og síðan til austurs norðan Færeyja. Alla jafna er þetta streymi ákveðnast yfir landgrunnsköntum hringinn í kringum landið. Svo nefndur strandsjór eða strandstraumur rennur réttsælis umhverfis landið sem tiltölulega mjótt band af selt-

uminni sjó vegna ferskvatnsrennslis af landi. Þetta band er breiðara að sumri og oft hlýrra en sjórinn utar og myndar því títt skil við kaldari og saltari sjó utar á landgrunninu⁷¹. Skil þessi stuðla að því að halda sviflægu lífi á landgrunninu.

Breytileiki hita og seltu sjávar á landgrunninu umhverfis Ísland er mismikill. Þannig eru sveiflur á svæðinu norðan við landið yfirleitt mun meiri vegna nálægðar við pólsjóinn í Austur-Grænlandsstraumi, hafisáhrifa, breytinga á innflæði hlýsjávar norður fyrir land og kaldari vinda úr norðri. Sveiflur fyrir sunnan eru oft minni og á lengri tímaskala^{72,73}.



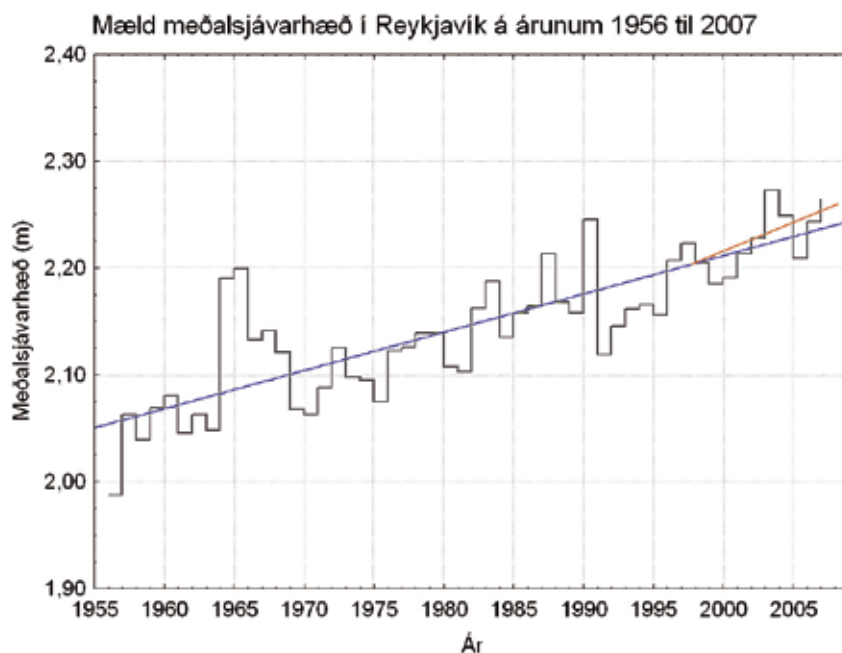
Mynd 2.10. Hitafrávik botnhita á sex mælistöðvum umhverfis landið. Stöðvar St3, Sb3 og Lb4 eru undan Stokksnesi, á Selvogsbanka og undan Látrabjargi. Stöðvar Si3, Ln1 og Kr3 eru út af Siglunesi, Langanesi og Krossanesi. Meðaltal er tekið af 50-100m vatnsúlu yfir botni. Vikin eru frá meðaltali mælitímans. (Mynd frá Hæðni Valdimarssyni. Byggt á gögn- um Hafrannsóknarstofnunarinnar).

Selta og hiti sjávar norður af landinu eru mjög breytileg eftir tíma og hafsvæðum. Þetta kemur skýrt fram í mælingum á röð athugunarstöðva sem nær frá Siglunesi norður í Íslandshaf. Þaðan eru til samfelldar athuganir að vorlagi frá 1952. Meðalhiti og meðalselta á Siglunessniði niður á 200 metra dýpi og tæpa 90 km norður frá Siglunesi hafa verið reiknuð fyrir hvert vor (mynd 2.8)⁷⁴. Sveiflur í ástandi sjávar úti fyrir miðju Norðurlandi að vorlagi eru á myndinni sýndar sem frávik hita og seltu frá meðaltali árána 1961–1980. Á hafisár- unum (1965–1971) var sjávarhiti lægri og selta minni en áður. Enn fremur virðist sem ástand sjávar hafi verið fremur óstöðugt eftir hafisárin. Árið 1979 var t.d. mjög kalt en árið eftir hlýtt og fremur hagstætt. Árin 1998–2008 hefur sjávarhiti og selta oftast verið yfir meðallagi, sér í lagi að vetri til⁷⁵.

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. Auknu flæði Atl- antssjávar inn á Norðurmið fylgir því aukin frumfram- leiðni þörungum.

Hafrannsóknastofnunin hefur mælt hita og seltu í yf- irborði sjávar á landgrunninu umhverfis Ísland því sem næst fjórum sinnum á ári frá því um 1970. Breytileiki hita og seltu er jafnan mestur fyrir norðan og austan land einkum fyrir áhrif hafiss, en getur jafnframt stafað af breytingum á þeim sjó sem streymir úr suðri til landsins. Þetta má sjá af tímaröð mælinga úti yfir land- grunnskantinum vestur af landinu, en þar er alla jafna kjarni þess hlýsjávar sem streymir norður með land- grunninu og að hluta norður fyrir land. Árin eftir 1996 fór hiti og selta sjávar á þessum slóðum vaxandi (mynd 2.9) og var það í takt við svipaðar breytingar austur í hafinu^{75,76}. Síðan 1998 hafa hiti og selta sunnan lands og vestan haldist tiltölulega há fram til 2007. Þessar breytingar hafa að nokkru endurspeglast í heldur hlýrri og saltari sjó úti fyrir Norðurlandi á sama tíma, en



Mynd 2.11 Meðalsjávarhæð í Reykjavík. Búið er að fjarlægja áhrif flóðs og fjöru sem og áhrif loftþrýstings en ekki áhrif landsigs eða hitabreytinga. Tvær línur eru dregnar í gegnum myndina, annarsvegar fyrir árabilið 1956 til 2007 (halli þeirrar línu er 3,6 mm á ári), og hinsvegar fyrir tímabilið 1997 til 2007 (halli þeirrar línu er 5,5 mm á ári). (Mynd frá Gísli Viggóssyni).

breytingar þar eru þó oft margþættari eins og sést á breytileika botnhita á nokkrum stöðvum umhverfis landið síðustu ár⁷⁷ (mynd 2.10).

2.3.2 Breytingar á sjávarstöðu

Mælingar á sjávarborði í Reykjavík hafa farið fram á vegum Sjósmælinga Íslands frá árinu 1951 og á grundvelli mælinganna hefur Raunvísindastofnun Háskóla Íslands reiknað sjávarborðshækkun fyrir tímabilið 1956 til 1989. Siglingastofnun Íslands ásamt Raunvísindastofnun setti upp sítitandi mæla í Reykjavík, á Akranesi, í Ólafsvík, á Patreksfirði, á Skagaströnd, á Dalvík, á Húsavík, á Höfn í Hornafirði, í Vestmannaeyjum, í Þorlákshöfn, í Grindavík, í Sandgerði, í Njarðvík og í Hafnafirði. Þessir mælar eru í eigu viðkomandi hafna. Landmælingar Íslands⁷⁸ kvörðuðu sítitamælana á árinu 2000. Þegar vinna Vísindanefndarinnar um loftlagsbreytingar fór af stað haustið 2007, ákvað Siglingastofnun að ljúka við kvörðun sjávarborðsmælisins í Reykjavík til að niðurstöður um sjávarborðshækkun árunum 1956 til 2007 lægu fyrir. Stefnt er að kvörðun annarra

sjávarborðsmæla á árinu 2008. Umfjöllunin sem hér fylgir er því einungis um mældar breytingar á sjávarstöðu í Reykjavík.

Mælingar á sjávarborði hafa farið fram í Reykjavík-urhófn frá árinu 1956. Á Raunvísindastofnun Háskóla Íslands var þróuð aðferðafræði til að vinna úr mælingum árunum 1956 til 1989 og gefin út í handriti⁷⁹ árið 1991. Beitt var aðfallsgreiningu til að skilja áhrif loftþrýstings, hitabreytinga og stjarnfræðilegra áhrifa (flóðs og fjöru) frá tímaháðri breytingu sjávarstöðu. Árið 1994 var settur upp sjávarborðsmælir á Miðbakknum í Reykjavík-urhófn sem mælir sjávarborðið á 10 mínútna fresti. Á Siglingastofnun Íslands hefur verið unnið úr öllum gögnum fyrir tímabilið 1956 til 2007.

Mynd 2.11 sýnir meðalsjávarhæð samkvæmt gögnum sem eru leiðrétt fyrir breytingum á loftþrýstingi. Niðurstöður þessara athugana eru að sjávarborð fór hækkandi um 3,6 mm árlega á tímabilinu 1956 til 2007, en frá 1997 til 2007 hækkaði sjávarborð um 5,5 mm á ári.

Myndin sýnir að meðalsjávarborð hefur farið stighækkandi allt tímabilið með stökki á árunum 1964 til 1967 en þá hækkaði meðalsjávarborðið um 15 cm og aftur árið 1989 til 1991 þegar sjávarborð hækkaði um 9 cm en lækkaði síðan aftur um 13 cm.

Á mynd 2.11 er ekki leiðrétt fyrir landsigi, en mikilvægt er að greina áhrif þess frá þáttum sem eru beintengdir loftslagsbreytingum. Ef niðurstöðurnar eru bornar saman við niðurstöðu 9 valinna sjávarborðsmæla⁸⁰ víða um heim sem leiðréttir hafa verið fyrir breytingum á loftþrýstingi og landsigi/landrisi þá sýna þeir að hækkun sjávarborðs á tímabilinu 1904 til 2003 er um 1,74 mm á ári.

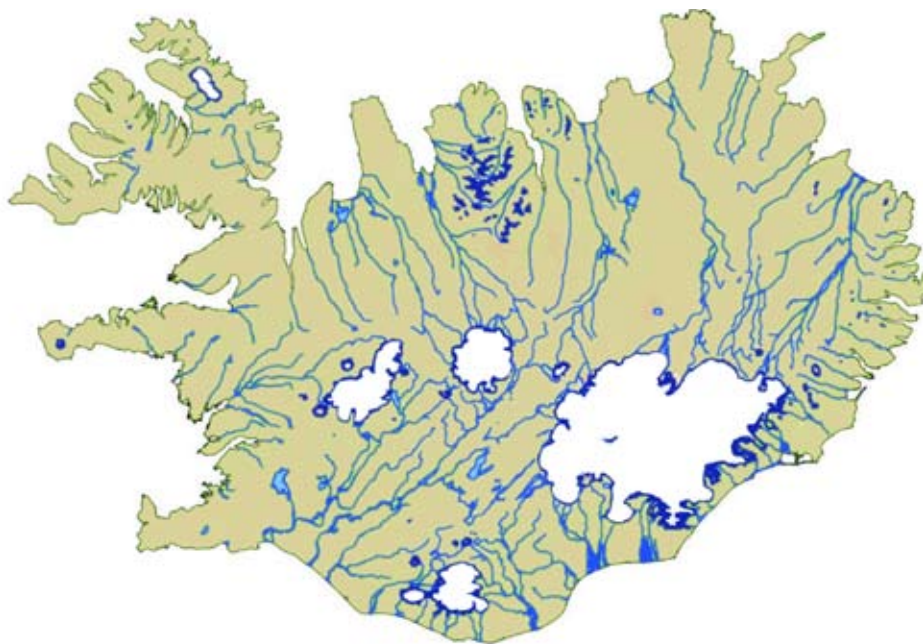
Nákvæmar GPS mælingar á landsigi í Reykjavík liggja fyrir frá árinu 1997. Niðurstöður sýna að á þessum tíma er landsig nokkuð skrykkjótt en leiðrétt gögn sýna landsig um 2,13 mm á ári að jafnaði⁸¹. Ef miðað er við landsig 2,1 mm á ári á tímabilinu 1956 til 2007 hefur sjávarborðshækkunin verið 1,5 mm á ári að jafnaði.

Eins og mynd 2.11 sýnir þá hefur sjávarborðshækkun verið mun meiri síðasta áratug eða um 5,5 mm á ári sem að frádregnu landsigi er um 3,4 mm á ári frá 1997.

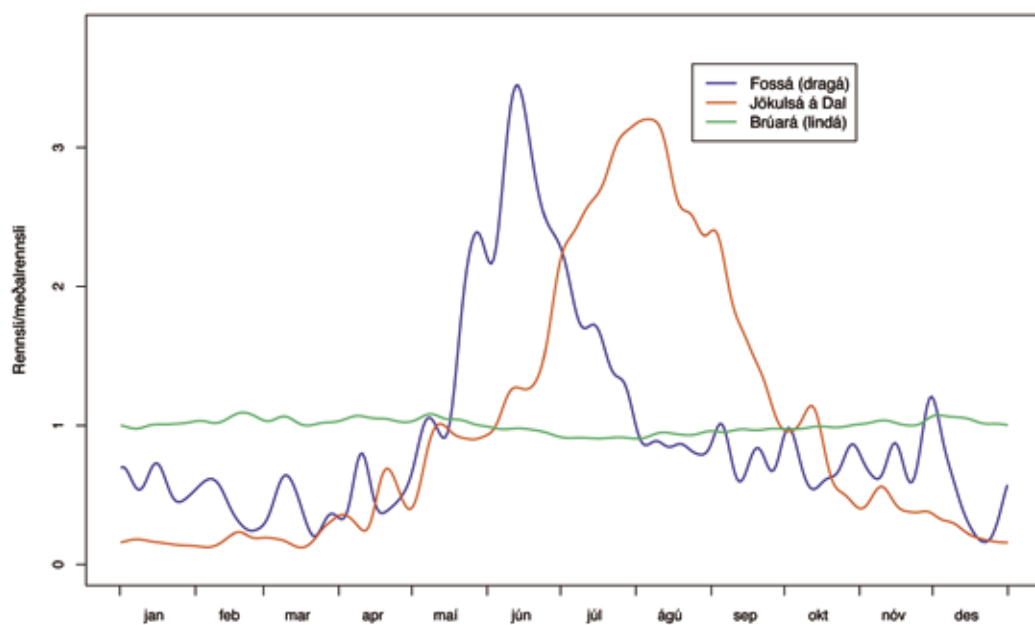
Samkvæmt IPCC 2007 skýrslunni hækkaði sjávarborð heimshafanna á árunum 1961 til 2003 að meðaltali um $1,8 \pm 0,5$ mm á ári en samkvæmt mælingum á 9 mæla netinu sem minnst var á hér að ofan reyndist sjávarborðshækkun vera 1,45 mm á ári fyrir tímabilabilið 1954 til 2003. Á tímabilinu 1993 til 2003 mældist hækkun sjávar með gervitunglamælingum um $3,1 \pm 0,7$ mm á ári sem er marktækt meira en meðaltal fyrir tímabil sem nær lengra aftur í tímann. Ef gert er ráð fyrir að á tímabilinu 1956 til 2007 hafi landsig í Reykjavík að jafnaði verið um 2,1 mm á ári fæst niðurstaða sem fellur ágætlega að hnattrænni hækkun sjávar.

Samantekt

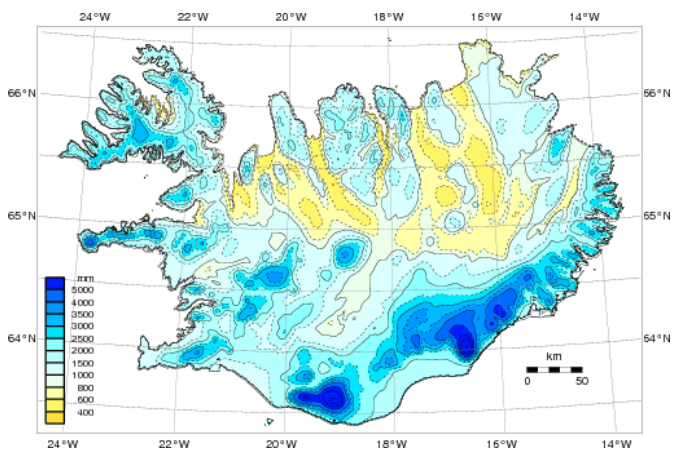
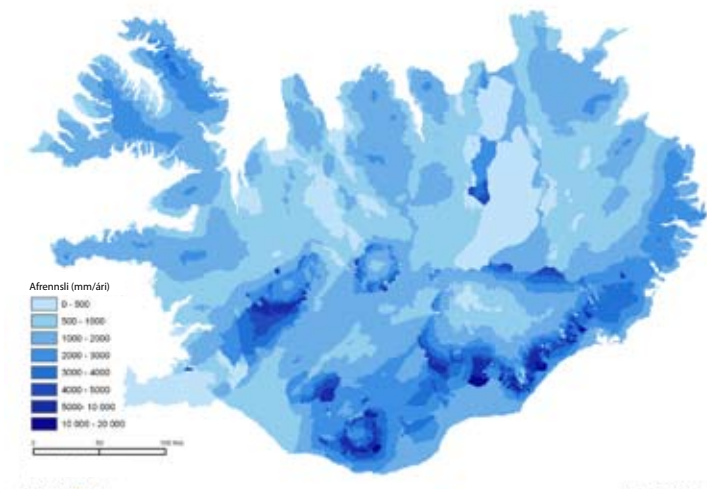
- Samfelldar athuganir á sjávarhita og seltu að vorlagi ná aftur til ársins 1952, en Hafrannsóknastofnunin hefur mælt hita og seltu í yfirborði sjávar því sem næst fjórum sinnum á ári umhverfis Ísland frá því um 1970.
- Á hafisárunum 1965–1971 var sjávarhiti lægri og selta minni en áður og frá þeim tíma mátti ástand sjávar heita fremur óstöðugt fram yfir 1995.
- Frá 1998 hefur sjávarhiti og selta oftari verið yfir meðallagi við landið og bæði hiti og selta haldist tiltölulega há úti fyrir Suður- og Vesturlandi.
- Mælingar á sjávarborði hafa farið fram í Reykjavík-urhöfn frá árinu 1956 og hefur Siglingastofnun Íslands unnið úr mælingunum til þessa dags.
- Sjávarborð fór hækkandi um 3,6 mm árlega á tímabilinu 1956 til 2007. Á síðustu tíu árum (1997-2007) hækkaði sjávarborð um 5,5 mm að jafnaði á ári. Að teknu tilliti til mælinga á landsigi hefur sjávarborðshækkunin í Reykjavík verið 1,5 mm að jafnaði á ári frá 1956.
- Meðalsjávarborð í Reykjavík sveiflast verulega frá ári til árs en að teknu tilliti til landsigs fylgir sjávarborðshækkun í Reykjavík til lengri tíma litið meðaltalshækkun heimshafanna.



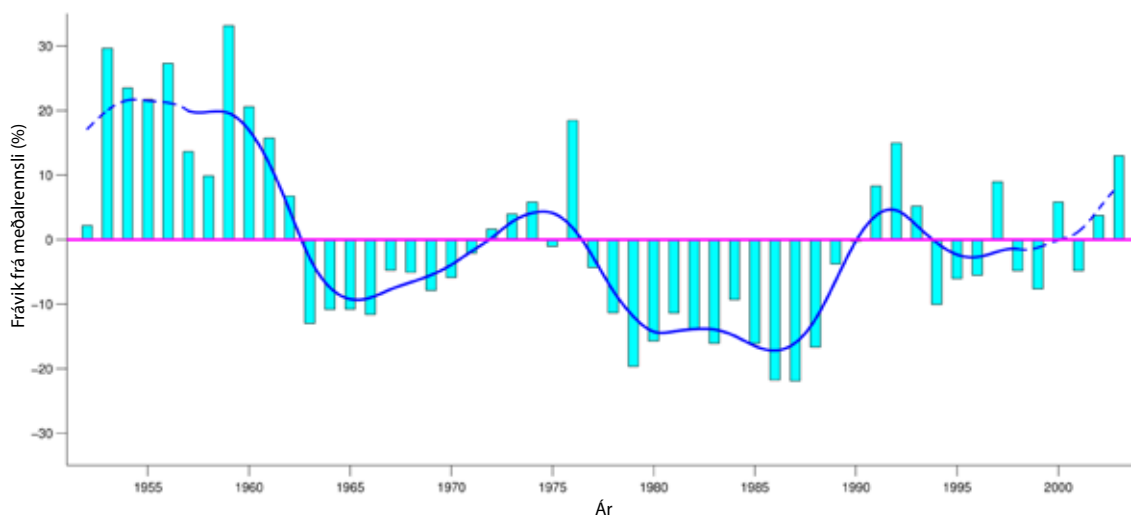
Mynd 2.12 Helstu ár, vötn og jöklar á Íslandi. (Byggt á gögnum frá Vatnamælingum Orkustofnunar).



Mynd 2.13 Árstíðasveifla í rennsli Fossár (dragá), Jökulsár á Dal og Brúarár (lindá). (Byggt á gögnum frá Vatnamælingum Orkustofnunar).



Mynd 2.14 Meðalafrennslí af Íslandi á tímabilinu 1961–1990 reiknað með afrennslislíkani⁸⁵. Einnig er sýnt kort af meðalársúrkomu fyrir sama tímabil⁸⁸.



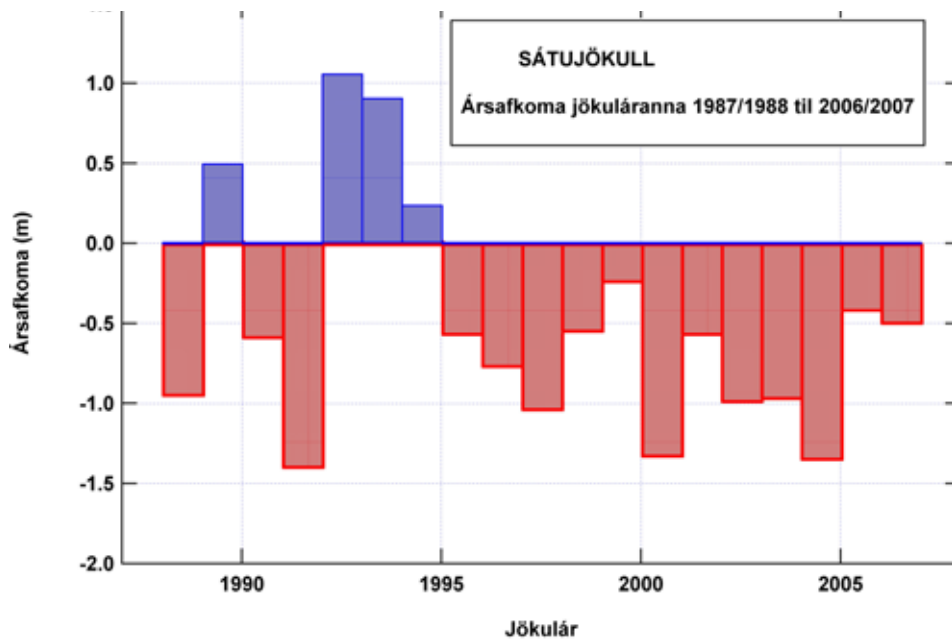
Mynd 2.15 Árleg frávik (í %) frá meðalrennslí Hvítár í Borgarfirði við Kljáfoss. Bláa línan sýnir útjafnaðan feril⁸⁷. (Byggt á gögnum frá Vatnamælingum Orkustofnunar).

2.4 Vatnafar og jöklar

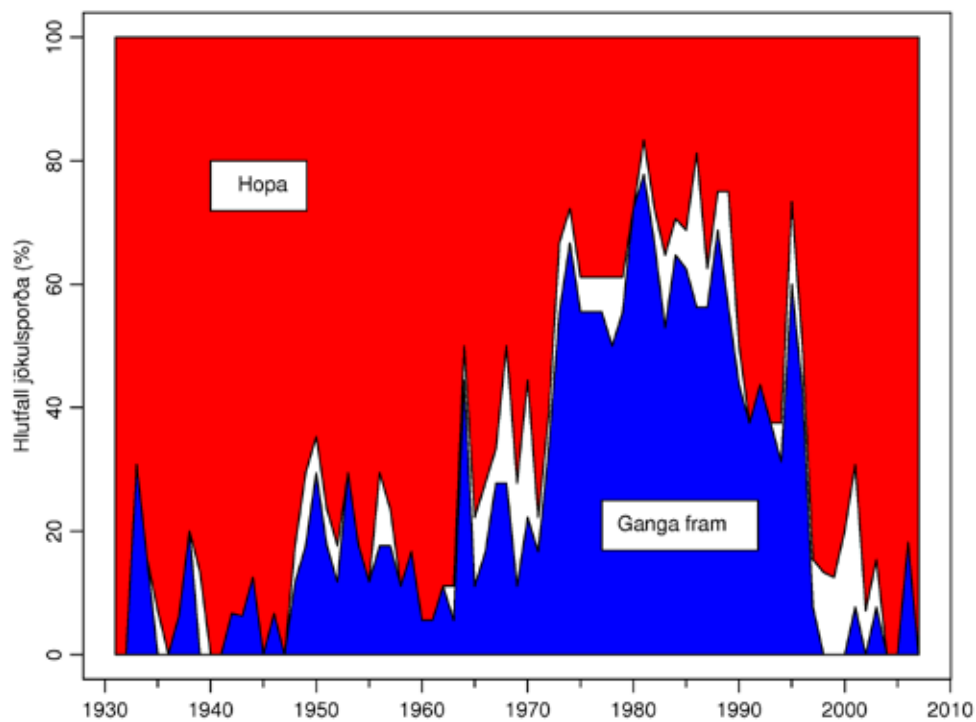
2.4.1 Flokkun vatnsfalla

Vatnsföll á Íslandi (mynd 2.12) eru venjulega flokkuð í lindár, dragár og jökulár⁸². Uppruni vatnsins er í úrkomunni sem fellur á einstök vatnasvið og mótast rennslishættir vatnsfallanna af því hvernig úrkoman skilar sér af vatnasviðunum til þeirra. Miðlunareiginleikar vatnasviða stjórna af landslagi og jarðlagaskipan. Vatnasvið þakin jökli skila mestum hluta afrennslis að sumarlagi þegar leysing er á jöklinum og verulegrar dægursveiflu gætir í rennslí jökulvatna. Hluti úrkomunnar sígur í jörð niður streymir grunnvatn neðanjarðar og kemur fram sem *lindavatn* árum eða áratugum seinna. Þar sem land er bratt og berggrunnur þéttur rennur vatn fram á yfirborði og safnast saman í sístækkiandi vatnsföll, svokallaðar *dragár*. Þessi vatnsföll eru mest að sumri, þó mikil flóð geti orðið í vetrarblotum.

Á mynd 2.13 er sýnd árssveifla rennslis í vatnsföllum sem tilheyra hverjum hinna þriggja flokka⁸³ og mynd 2.14 sýnir nýtt vatnafarskort af Íslandi^{84,85}. Áætlað hefur verið að um 60% afrennslis af Íslandi eigi upptök sín á dragárvæðum, 20% sé lindavatn og 20% sé að uppruna jökulvatn undan jökulrönd.



Mynd 2.16 Afkoma Sátujökuls á norðanverðum Hofsjökli 1988-2007. (Gögn frá Vatnamælingum Orkustofnunar).



Mynd. 2.17 Árlegt hlutfall íslenskra jökla sem gengu fram og hopuðu á árunum 1931 til 2007. Aðeins eru taldir með jöklar sem ekki eru framhlaupsjöklar. Myndin sýnir gögn frá 10-20 jöklum fyrir þessi ár. Gögn frá Jöklarannsóknafélagi Íslands og Oddi Sigurðssyni, Vatnamælingum Orkustofnunar.

Afrennsli af Íslandi á árunum 1961–1990 var metið með líkanreikningum í norræna rannsóknaverkefnum *Climate and Energy (CE, 2003–2006)* og íslenska systurverkefnum *Veður og orka (VO, 2004–2007)*^{85,86,87}. Mikill hluti afrennslis af landinu á upptök á hálendinu og þar sem úrkoma þar var illa þekkt var lögð sérstök áhersla á að reikna fyrst úrkomu á ofangreindu tímabili. Notað var veðurlíkan auk líkans sem gerir ráð fyrir áhrifum landslags á úrkomu^{88,89}.

Afrennslislíkanið byggist á 1 km reitaskiptingu landslags og áður nefndri vatnafarsflokkun og nýtir inntaksgögn reiknuð með veðurlíkaninu. Niðurstaðan er sýnd á mynd 2.14. Heildarafrennsli af landinu öllu reiknaðist 4.770 m³/s að meðaltali á þessu tímabili og fyrir hvern fermetra landsins samsvarar það meðalafrennslinu 1.460 mm á ári. Til samanburðar má nefna að heildarafrennsli á árabílinu 1948–1955 var með eldri aðferðum áætlað 5.500 m³/s að meðaltali⁹⁰ og 5.150 m³/s á árabílinu 1950–1975⁹¹.

Í CE og VO verkefnunum var leitni í rennsli vatnsfalla könnuð með tölfræðilegum aðferðum^{92,93}. Við slíkar athuganir ber að hafa í huga að verulegar rennslissveiflur hafa átt sér stað milli áratuga eins og sjá má á mynd 2.15 og geta niðurstöður því stjórnað nokkuð af vali á tímabilum. Lengstu rennslisráðir vatnsfalla á Íslandi (frá 1940) eru byggðar á mælingum í Elliðaám og Svartá í Skagafirði og reyndist leitnin neikvæð (þ.e. minnkun) í Elliðaám á árabílinu 1941–2002 en jákvæð (þ.e. aukning) í Svartá um 4% á áratug að meðaltali. Kannaðar voru tíu rennslisráðir vatnsfalla af mismunandi vatnasviðum, frá árabílinu 1961–2000 og sýndi engin þeirra marktæka leitni í ársmeðalrennsli, en 6–7% jákvæð leitni á áratug fannst í sumarrennsli Tungnaár og Dynjandisár. Má sennilega skýra hið aukna sumarrennsli með köldum vorveðrum á þessu tímabili (a.m.k. fram yfir 1990), sem leiddi til þess að leysingu seinkaði fram á sumar.

2.4.2 Jöklar

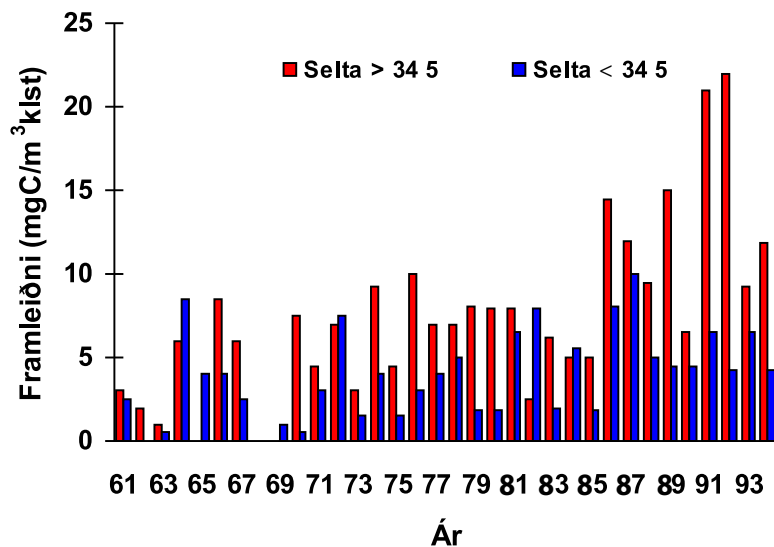
Snjór sem fellur á hálendi Íslands að vetrarlagi bráðnar að mestu á sumrin, utan jökla og háfjalla. Jöklar þekja um 11% landsins og á þá falla um 20% heildarúrkomunnar. Ofan jafnvægislínu á Langjökli, Hofsjökli og Vatnajökli er dæmigerð vetrarákoma 2000–4000 mm

vatns, en enn meiri á Mýrdalsjökli og Drangajökli. Vetrar- og sumarafkoma meginjökla á miðhálandinu hefur verið mæld á undanförunum árum og hefur ársafkoma þeirra að meðaltali verið neikvæð um nálægt 500 mm vatns á ári frá 1995 (mynd 2.16). Áætla má að Langjökull hafi rýrnað um 7% á árabílinu 1997–2006, Hofsjökull um 5% á árabílinu 1995–2007 og Vatnajökull um 2.7% frá 1995 til 2006⁹⁴.

Jöklar hafa gengið fram og hörfað á víxl á sögulegum tíma hérlandis. Telja má víst að útbreiðsla jökla hafi verið verulega minni á fyrstu öldum Íslandsbyggðar en síðar varð og mestri útbreiðslu náðu þeir um 1890. Höfst þá skeið hægfare jökulhörfunar en hlýnun eftir 1920 leiddi til þess að jöklar hopuðu mjög ört fram yfir 1960. Þeir tóku að nýju að ganga fram eftir kuldakast sjöunda og áttunda áratugarins og stóð svo fram yfir 1990, þegar hlýnunar tók að gæta á ný. Frá árinu 2000 hafa allir þeir jöklar, sem ekki eru framhlaupsjöklar, hopað hratt⁹⁵. Á mynd 2.17 eru tekin saman gögn um breytingar jökulsporða, sem safnað hefur verið á vegum Jöklarannsóknafélags Íslands frá árinu 1930.

Samantekt

- Áætlað hefur verið að um 60% afrennslis af Íslandi eigi upptök sín á dragárvæðum, 20% sé lindavatn og 20% sé að uppruna jökulvatn undan jökulrönd.
- Enginn þeirra 10 rennslisráða vatnsfalla af mismunandi vatnasviðum sem könnuð voru sýnir marktæka leitni í ársmeðalrennsli tímabilið 1961–2000.
- Frá upphafi Íslandsbyggðar er talið víst að jöklar hafi náð mestri útbreiðslu um 1890. Höfst þá skeið jökulhörfunar og hlýnun eftir 1920 leiddi til þess að jöklar hopuðu mjög ört fram yfir 1960.
- Frá árinu 2000 hafa allir þeir jöklar sem ekki eru framhlaupsjöklar hopað hratt.



Mynd 2.18 Meðalfrumframleiðni ($\text{mgC m}^{-3} \text{klst}^{-1}$) við mismunandi seltu á landgrunninu norðaustanlands að vorlagi í rannsókn sem náði til árunna 1961-1994. Lítill selta endurspeglar yfirleitt kaldan sjó en mikil selta hlýjan sjó. Framleiðni er yfirleitt meiri í selturíkum og hlýjum sjó⁹⁷.

2.5 Breytingar á lífríki sjávar við Ísland

2.5.1 Plöntu- og dýrasvif

Sjávarhiti hefur stöðug og mikil áhrif á allar lífverur sjávar og hefur til dæmis áhrif á útbreiðslu, hrygningu, atferli og afkomu lífvera svo og á át, meltingu fæðunnar og vöxt. Nokkuð var fjallað um þessi áhrif í fyrri skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar⁹⁶ og þar sagði m.a.:

Í yfirborðslögum sjávar fer fram ljóstillífur þörunga og við hana myndast þau lífrænu efni sem svifdýr þurfa til þess að geta vaxið og dafnað. Hiti og selta hafa áhrif á eðlisþyngd sjávar sem aftur hefur mikil áhrif á getu þörunga til þess að halda sér í birtu- og næringarríkum yfirborðslögum sjávar. Áhrif veðurfars á hita og seltu í sjónum, eða svokallað ástand sjávar, ræður því miklu um framvindu gróðurs og vaxtarskilyrða fyrir svifdýrin í sjónum og þar með nytjastofnana.

Sem dæmi má nefna að fylgni er milli meðalþyngdar þriggja og fjögurra ára loðnu að vetrarlagi og breytinga á seltu sjávar á Siglunessniði vorið á undan eins og sýnt er á mynd 2.20. Vegna ónógra gagna hefur hins vegar ekki tekist að tengja magn dýrasvifs beint við ásigkomulag loðnunnar.

Hafrannsóknarstofnunin hefur um árabíl mælt frumframleiðni (lífræna bindingu kolefnis) í sjó að vorlagi,

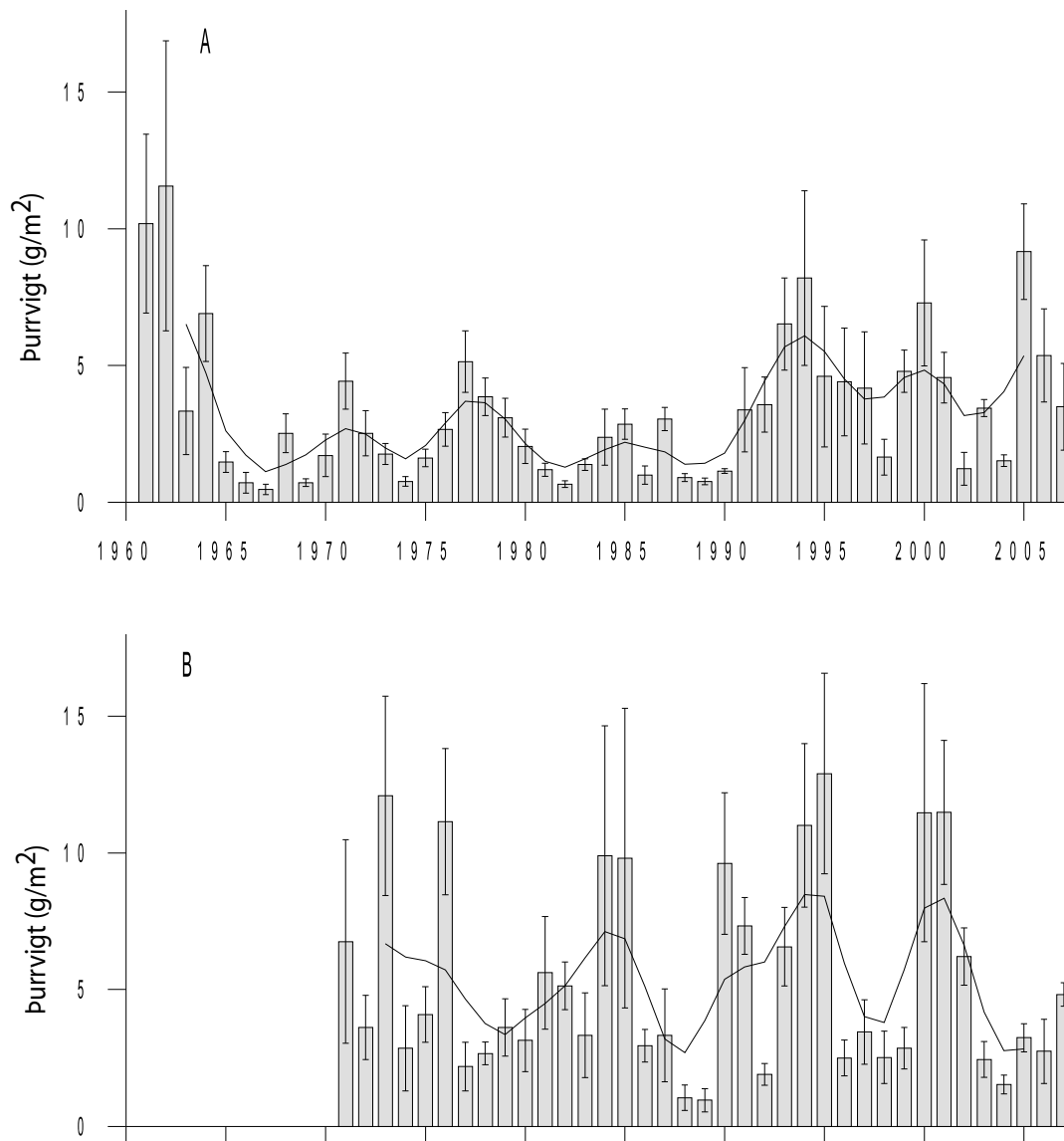
og hafa þessar rannsóknir aukið við þekkingu á sambandi ástands sjávar og frumframleiðni.

Í fyrri skýrslu var rakið að rannsóknir sem gerðar voru á Norðurmiðum á árunum 1961–1994⁹⁷ sýna að meðalfrumframleiðni þörunga er allt að tvisvar sinnum meiri þegar þar ríkir hlýr selturíkur Atlantssjór að vorlagi heldur en þegar þar er kaldur og ferskari pólsjór (sjá mynd 2.18).

Rannsóknir frá því fyrri skýrsla kom út styðja þá mynd sem gefin er hér að ofan og svipaða sögu má segja um lífmassa dýrasvifs^{98,99}, en meðalátumagn fyrir Norðurlandi að vori í hlýju árferði er um tvöfalt meira en í köldu árferði (mynd 2.19).

Langtímarannsóknir á lífmassa dýrasvifs við Ísland hafa leitt í ljós nokkuð reglubundnar sveiflur með 6–10 árum milli hámarka. Þessar sveiflur eru í samræmi við langtímasveiflur á átu á stóru svæði í Norður Atlantshafi. Það er talið benda til þess að breytileikinn í lífmassa átu norðanlands stjórnist að miklum hluta af hnattrænum veðurfarsþáttum sem hafa áhrif á viðáttumiklu svæði. Um þetta efni í fyrri skýrslu:

Hér er ekki rúm til þess að rekja í smáatriðum hvers vegna ástand sjávar er talið skipta svo miklu fyrir framleiðslu lífríkisins en í stuttu máli er orsakasamhengið þetta: Hlýr Atlantssjór ber með sér næringarefni norður fyrir land og því veldur aukið inn-



Mynd 2.19 Breytingar í átumagni að vorlagi á Siglunes-(A) og Selvogsbankasniði (B). Súlnurnar sýna meðaltöl allra stöðva á sniðunum. Staðalskekkja er sýnd með lóðréttum strikum. Einnig er sýndur reiknaður ferill (7 ára keðjumeðaltöl) sem jafnar mikla óreglu einstakra ára (heildregin lína). Átumagn fyrir norðan land minnkaði mjög á köldu árunum á síðari hluta sjöunda áratugarins en síðan hafa skipst á hæðir og lægðir með um 7-10 ára millibil. Þegar reiknað er út meðalátumagn fyrir hlý ár og köld kemur í ljós að lífmassi átu er mun meiri á hlýjum árum en köldum⁹⁹.

streymi hans m.a. auknu framboði á næringarefnum. Minnkað streymi Atlantssjávar og aukin útbreiðsla kaldsjávar fyrir norðan land veldur því hins vegar að minna berst þangað af næringarefnum og þar verður minni blöndun og því minna af næringarefnum í yfirborðslögum. Takmarkað magn næringarefna leiðir svo til minni frumframleiðni þörungum sem aftur hefur

í för með sér skert fæðuframboð fyrir dýrasvifið þannig að stofnar þess minnka. Lágur hiti hefur í sjálfu sér einnig þau áhrif að átan þroskast og vex hægar. Loks er líklegt að minna innstreymi Atlantsjávar á Norðurmið hafi þær afleiðingar að þangað berist minna af átu frá hafsvæðinu sunnan- og vestanlands. Beint eða óbeint er því líklegt að ástand

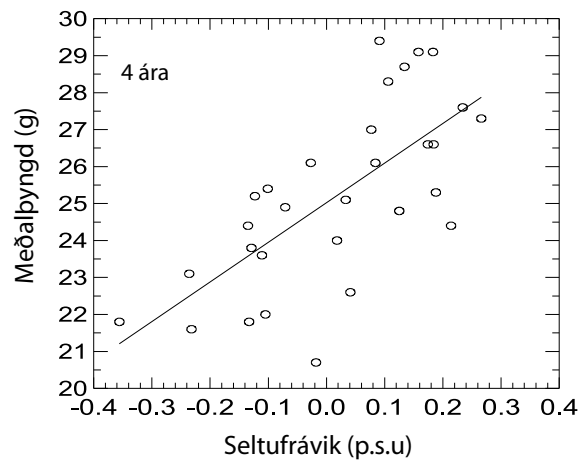
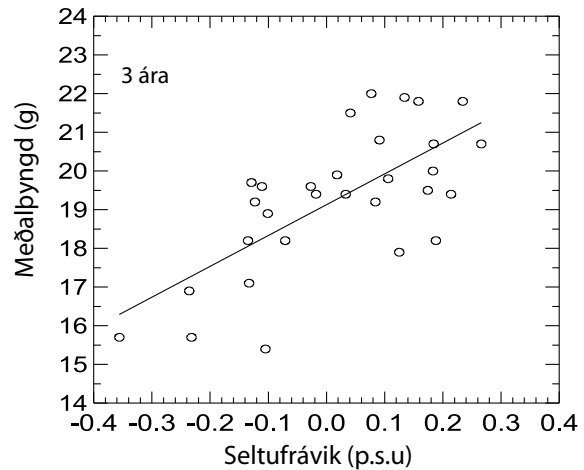
sjávar á Norðurmiðum ráði að verulegu leyti hve mikið er af dýrasvifi og þar með afkomumöguleikum seiða og ungfisks á uppeldisslóð fiskistofna norðanlands, og á afkomu uppsjávarfiska^{100,101,102}.

Öfugt við það, sem er á Norðurmiðum og fyrir austan land, eru áhrif hins hlýja Golfstraums nokkuð stöðug við landið sunnan- og vestanvert. Engu að síður eru þar greinileg áraskipti í vorkomu og vexti þörunga, svo og átumagni. Breytileikann sunnanlands má að einhverju leyti rekja til leysinga og vinda en þeir þættir hafa mikil áhrif á þörungagróðurinn sem dýrasvifið lifir á.

Rannsóknir frá því fyrri skýrsla kom út hafa ekki breytt þeirri grundvallarmynd sem gefin er hér að ofan. Ljóst er að sviptingar í ástandi sjávar og í lægstu þrepum fæðukeðjunnar í sjónum geta sagt til sín í vexti og viðgangi nytjastofna og þar með haft áhrif á efnahag Íslendinga (sjá kafla 2.7.1). Hér að neðan verða stuttlega rakin þessi áhrif á fiskistofna og sjávarspendýr.

2.5.2 Nytjastofnar sjávar og fisktegundir

Snemma á 20. öldinni urðu miklar breytingar á sjávardýrafánunni við landið sem tengdust þeirri miklu hlýnun sem varð í Norður-Atlantshafi upp úr 1920^{103,104}. Þessum breytingum lýstu náttúrufræðingarnir Bjarni Sæmundsson og Árni Friðriksson m.a. á þann hátt að útbreiðslusvæði og hrygningar- og fæðuslóð ýmissa fisktegunda hefði stækkað og færst norður á bóginn með auknum hlýindum. Til dæmis fóru þorskur og síld að hrygna í stórum stíl norðanlands, en fram til 1920 var hrygning þessara tegunda nánast einskorðuð við suðurströndina. Enn fremur sýndu merkingar að þorskur sem ólst upp í kalda sjónum fyrir Norður- og Austurlandi, hafði vaxið mun hægar en sá fiskur sem dvaldi í hinum tiltölulega hlýja sjó fyrir suðurströndinni. Þá urðu margar suðlægar tegundir algengar, svo sem makrill, túnfiskur, sverðfiskur, augnasild, lýr, geirnefur og tunglfiskur. Á hinn bóginn hafði hlýnunin þau áhrif að loðnan, sem er kaldsjávarfiskur, hætti hrygningargöngum sínum í hlýsjóinn fyrir sunnan land og hrygndi fyrir norðan og austan land og á Hornafjarðarsvæðinu. Þetta ástand hófst rétt fyrir 1930 en virðist hafa gengið til baka 4–5 árum seinna. Frá þeim tíma

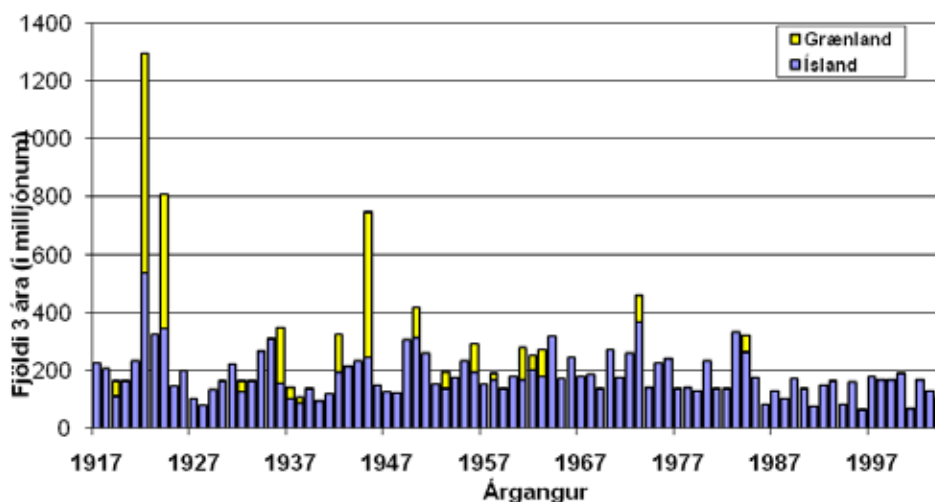


Mynd 2.20. Meðalþyngd þriggja og fjögurra ára loðnu að vetrarlagi er breytileg en tengist allnáið seltufrávikum á Siglunessniði eins og þau mældust vorið á undan. (Byggt á gögnum Hafrannsóknarstofnunarinnar).

hefur loðna hrygnt að mestu sunnan lands og vestan eftir því sem best er vitað^{877,101}.

Þorskur og aðrir botnfiskar

Líkt og við Ísland urðu miklar breytingar á útbreiðslu þorsks við Grænland í upphafi 20. aldar^{100,103,104}. Um aldamótin 1900 var þorskur sjaldséður við Grænland og svo er að sjá að Atlantsporskur (*Gadus morhua*) þrífist ekki við Grænland á köldum tímabilum. Það er al-kunna að um og eftir 1920 hlýnaði mjög í Norður-Atlantshafi og upp úr miðjum þriðja áratug síðastliðinnar aldar var þorskur skyndilega orðinn algengur bæði við Vestur- og Austur-Grænland^{105,106}. Þetta er án efa til komið vegna risastórra árganga sem urðu til við Ísland



Mynd 2.21 Stærð þorskárganganna 1917-2005. Fjöldi í milljónum við þriggja ára aldur. Grænlandsgöngur voru mun algengari á hlýskeyðinu frá um 1920 og fram á miðjan sjöunda áratuginn en fjóra síðustu áratugi (Byggt á gögnum Haf-rannsóknastofnunarinnar).

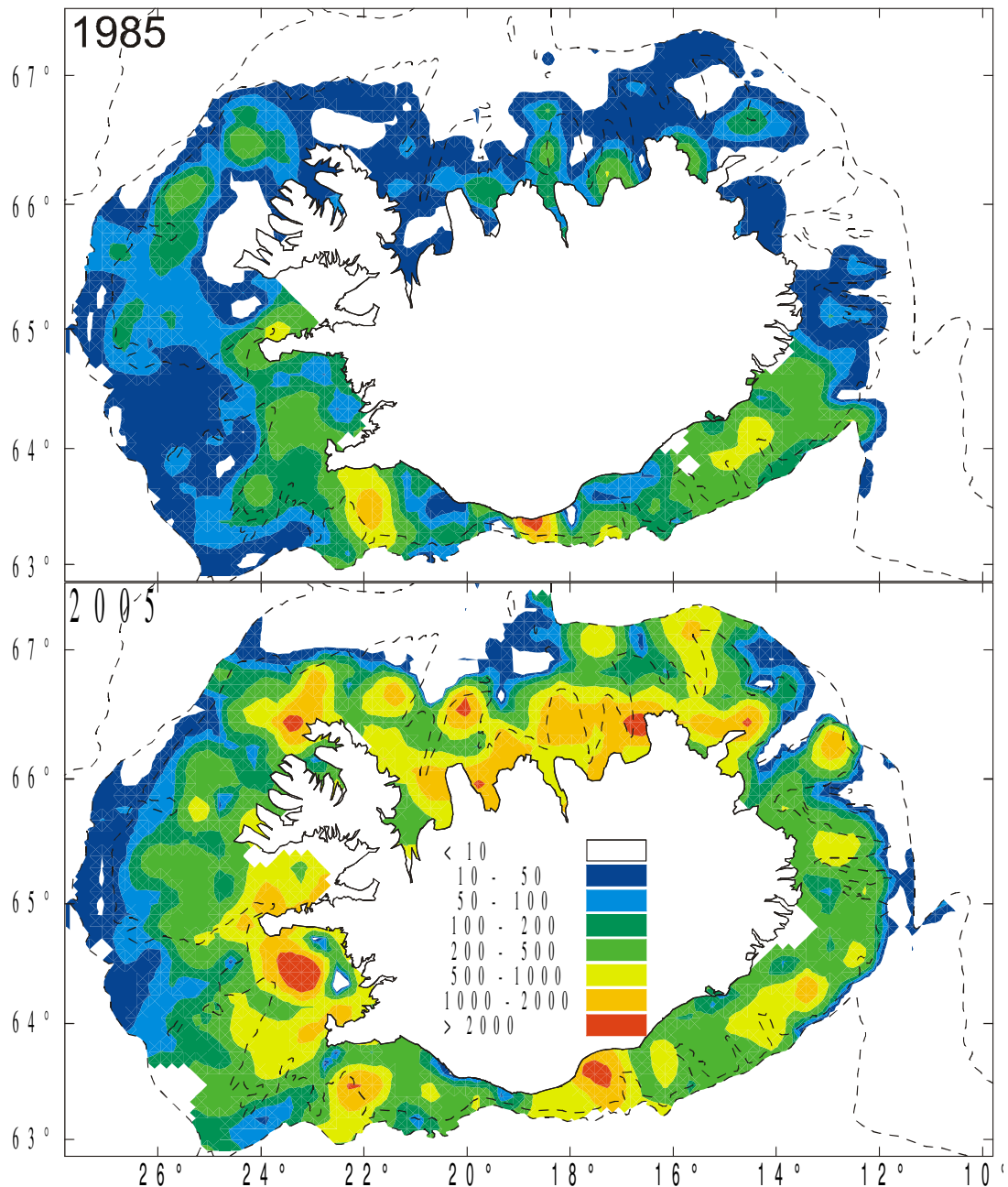
1922 og 1924, og sem rak í stórum stíl yfir til Grænlands og uxu þar upp. Enda þótt þorsklirfur ræki áfram til Grænlands á næstu áratugum, með hámarki árið 1945, leikur enginn vafi á að Grænlandsþorskurinn var sjálfbær allt þar til hann hrundi á 8. áratug seinustu aldar vegna ofveiði og mikillar kólnunar á seinni hluta áratugarins.

Mikið af þorski sem rekur frá Íslandi til Grænlands skilar sér aftur til hrygningar við Ísland og virðist ekki snúa til baka nema að litlu leyti. Rek þorsklirfa frá hrygningarstöðvum við Ísland til Grænlands stækkar því uppeldissvæði þorsks af íslenskum uppruna. Þess vegna hafa veðurfar og fiskveiðar við Grænland áhrif á ástand þorskstofnsins við Ísland. Lirfurek frá Íslandi til Grænlands og síðan göngur þess fiskis á Íslandsmið við kynþroska er ásamt almennri hlýnun í Norður-Atlantshafi upp úr 1920 talið hafa skipt miklu varðandi stærð og veiðipól íslenska þorskstofnsins, einkum á 4. og 6. áratug seinustu aldar.

Göngur frá Grænlandi voru mun algengari á árunum fyrir hafísárin 1965–1971 en síðan hefur einungis tvisvar orðið vart við Grænlandsgöngur (árgangar 1973 og 1985) (mynd 2.21). Ástæða þessa er að hluta til lakara ástand íslenska þorskstofnsins á síðustu áratugum og því væntanlega minna lirfurek til Grænlands en ekki

siður þær gríðarlegu þorskveiðar sem stundaðar voru við Vestur-Grænland frá stríðslokum og þar til Grænlandsstofninn hrundi samfara kólnuninni upp úr miðjum sjöunda áratugnum. Minna af íslenskum þorski hefur því getað skilað sér til baka. Einnig hefur verið bent á að minna rek af þorsklirfum til Grænlands hin síðari ár kunni að tengjast breytingum á straumakerfinu fyrir vestan Ísland og í Irmingerhafi milli Íslands og Grænlands⁹⁸.

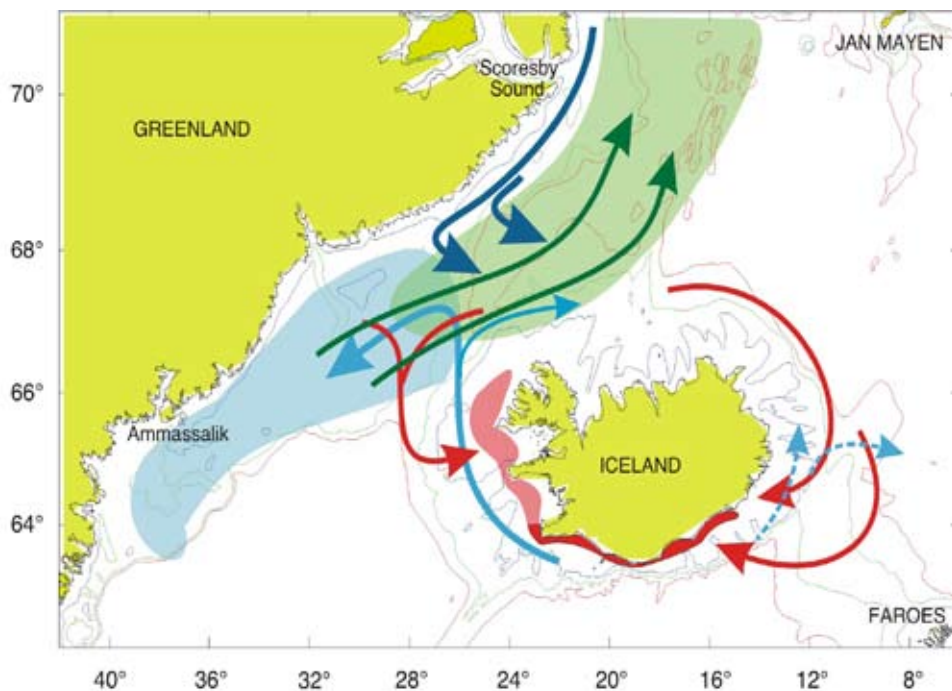
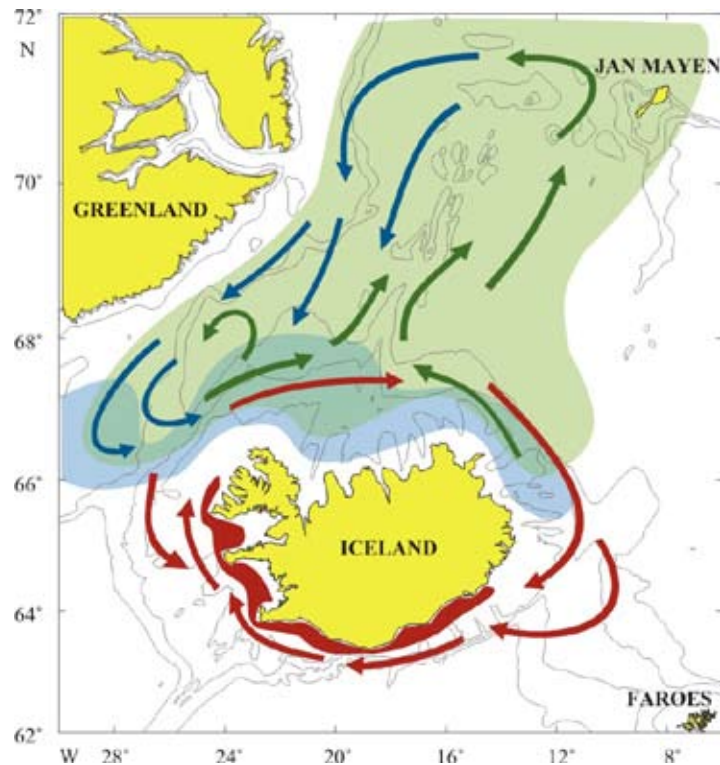
Þrátt fyrir tiltölulega góð skilyrði í hafinu við Ísland síðastliðin 10 ár eða svo hefur nýliðun þorsks verið afar léleg. Á tímabilinu 1920–1985 var meðalnýliðun 247 milljónir fiskar, þ.m.t. yfir 40 milljónir úr Grænlandsgöngum, en á seinustu 20 árum var meðaltalið hins vegar aðeins 134 milljónir. Það svarar til um 200 þúsund tonna í afla á ári. Sterkara innflæði Atlantssjávar á Norðurmið hefur á hinn bóginn leitt til austlægarar útbreiðslu hinna uppvoxandi þorskárganga. Bent hefur verið á mikilvægi stórra hrygna fyrir nýliðun stofnsins en sem stendur er hlutfall þeirra aðeins brot af því sem það var þegar stofninn var hvað stærstur og nýliðun best á fyrri hluta síðustu aldar. Léleg nýliðun við tiltölulega góð skilyrði í sjónum á undanförmum árum tengist að öllum líkindum samverkandi áhrifum mikils fiskveiðialags sem leitt hefur til litils hrygningarstofns og ungrar aldursamsetningar hans⁷⁷.



Mynd 2.22 Útbreiðsla (fjöldi í togi) ýsu í stofnmælingu botnfiska í mars árin 1985 og 2006 (Byggt á gögnum Hafrannsóknastofnunarinnar).

Því hefur oft verið haldið fram að stórir árgangar séu oft afkomendur lítils hrygningarstofns og árgangarnir frá 1984 og 1985 nefndir sem dæmi. Því er til að svara að í báðum þessum tilfellum var enn í hrygningarstofninum allmikið af þorski frá 1973 og 1976 og hlutfall stórfisks því miklu hærra en verið hefur síðan. Þá kunna breyttar umhverfisaðstæður að hafa áhrif þó orsakasamhengið sé ekki ljóst.

Á hlýndatímabilinu sem hófst árið 1996 hefur orðið vart greinilegra breytinga á útbreiðslu og stofnstærð nokkurra nytjafiska á Íslandsmiðum^{77,107,108,109,110} sem mjög líklega tengjast hlýnuninni. Þannig hefur útbreiðsla suðlægari botnfiska eins og ýsu, lýsu, skötusels og ufsa aukist til norðurs og stofnarnir einnig stækkað verulega (mynd 2.22).



Mynd 2.23 Loðnugöngur og útbreiðsla við Ísland og á nálægum hafsvæðum fyrir og eftir síðustu aldamót. Á efri myndinni sést hvernig hefðbundin útbreiðsla og göngumynstur hefur verið eða allt fram undir síðustu aldamót, þ.e. hrygningarganga síðvetrar suður fyrir land (rautt), uppvaxtarsvæði seiða/ungloðnu úti fyrir Norðurlandi og vestur í Grænlandssund og síðan fæðugöngur langt norður í Íslandshaf, sem standa fram að hrygningu veturinn eftir. Neðri myndin sýnir að eftir aldamótin hafa uppvaxtarsvæði ungvíðis og eldri fíks verið umfangsminni og vestanstæðari í Grænlandssundi. (Byggt á gögnum Hafrannsóknarstofnunarinnar. Mynd Hjálmar Vilhjálmson).

Uppsjávarstofnar

Eins og fram kom hér að framan þá hafa sviptingar í ástandi sjávar og í lægstu þrepum fæðukeðjunnar í sjónum sagt til sín í vexti og viðgangi uppsjávarstofna. Líklegt er að lítil frumframleiðni og síðan hrun átunnar fyrir norðan land í lok sjöunda áratugarins hafi, ásamt sjávarkulda, átt mestan þátt í breyttum göngum og seinna að nokkru leyti í hruni norsk-íslenska síldarstofnsins sem áður gekk á Norðurmið í ætisleit á sumrin. Loðnuveiðar hófust skömmu eftir að síldarstofninn hrundi, en eins og síldin er loðnan uppsjávarfiskur og lifir nær eingöngu á dýrasvífi. Nær ekkert var vitað um sveiflur í loðnustofninum áður en veiðar úr honum hófust en síðan hafa sést miklar og stundum skyndilegar breytingar á stærð árganga og þar með veiðistofnsins sem oft byggist aðeins á einum árgangi. Án efa eru breytingar á stærð loðnustofnsins að einhverju leyti tengdar veiðunum, einkum kringum 1980, en líklegt er að umhverfis- og átuskilyrði eigi mestan þátt í breytilegri nýliðun loðnunnar frá ári til árs. Hvorki hefur fundist samband milli stærðar eftirlifandi hrygningarstofns né seiðafjölda við endanlega stærð loðnuárganga, en hins vegar er gott samband milli mælds fjölda ársгамallar loðnu að hausti og fjölda í sama árgangi þegar hann er mældur síðar á ævi loðnunnar. Stærð árganga ræðst því fyrsta veturinn/vorið á ævi loðnunnar en orsakasambandið sem ræður stærðinni er óþekkt.

Loðnan er einn helsti nytjastofn Íslendinga af norrænum uppruna og hefur að því er virðist hopað fyrir hlýindunum á undanförunum árum⁷⁷, haldið sig lengra norður í höfum og vestar yfir grænlenka landgrunninu. Breytt göngumynstur loðnu er sýnt á mynd 2.23. Jafnframt hefur dregið úr nýliðun og loðnustofninn hefur minnkað. Hvort rekja megi minnkandi nýliðun til veðurfarsbreytinga eða áhrifa þeirra á fæðu loðnunnar er ekki vitað en mikilvægt er í þessu sambandi að hafa í huga að loðnan er skammlíf tegund og viðkomubrestur, þó að ekki sé nema eitt ár, getur haft mikil áhrif á stofnstærðina. Loðnan er einstök hvað nytjastofna okkar varðar að því leyti að fullorðin sækir hún æti sitt norður í kaldan sjó Íslandshafs og í Grænlandssundi á sumrin þar sem hún meira en þrefaldar þyngd sína og fitnar. Á haustin gengur hún til baka upp á íslenska landgrunnið og ber þangað orku af norðlægum slóðum¹⁰⁰. Loðnan er ein mikilvægasta fæðutegund annarra

nytjastofna, svo sem þorsks, grálúðu, ufsa og fleiri tegunda. Hún virðist t.d. svo þýðingarmikil fyrir meðalstóran þorsk (5–8 ára) að það dró mjög úr vexti þessara aldursflokka meðan loðnustofninn var hvað minnstur á árunum í kringum 1980 og 1990.

Samfara hlýnuninni uppúr 1920 jókst útbreiðsla og mergð íslensku síldarstofnanna stórlega og sama mun hafa verið um norsk-íslenska síldarstofninn (norsk vorgotssíld). Norsk-íslenski síldarstofninn hrundi svo á seinni hluta 7. áratugar seinustu aldar. Þau urðu örlög íslensku sumargotssíldarinnar einnig í kjölfar þess að snöggkólnaði norðan- og austanlands 1965 og rauðátustofninn, sem var aðalfæða síldarinnar, hrundi. Þar með hraktist öll síld af Norðurmiðum, sem áður voru ein helsta fæðuslóðin á sumrin, og austur í haf þar sem áta var minni. Engu að síður var fullorðin norsk-íslensk síld mokveidd allt til 1968 uns svo til ekkert var eftir af fullorðinni síld. Þess utan stunduðu Norðmenn veiðar á smásíld inni á fjörðum í Norður-Noregi. Nýliðun varð því engin og þessi stærsti síldarstofn veraldar hrundi. Íslenska sumargotssíldin sætti sömu örlögum.

Nú hafa báðir þessir stofnar náð sér að fullu með markvissum fiskverndaraðgerðum. Íslenska sumargotssíldin íslenska náði sér á strik uppúr 1980 og er stofninn nú í sögulegu hámarki og útbreiðsla hans meiri en fyrr. Norsk-íslenski stofninn hefur einnig náð fyrri stærð (u.þ.b. 12 milljón tonn) og hefur líkt og áður, nokkrum sinnum gengið inn á Norðurmið á seinni árum þótt lítið hafi verið veitt þar. Hlýindi sem hófust í Norður-Atlantshafi flýttu án efa fyrir þessum bata og hefur útbreiðslusvæði norsk-íslenskrar síldar stórauðist með hlýnandi veðurfari seinni ára.

Kolmunni er tiltölulega suðlæg tegund, hrygnir mest djúpt vestan og norðvestan Bretlandseyja á vorin og gengur síðan í ætisleit um Færeyjasvæðið norður í austurhluta Noregshafs, allt norður undir Svalbarða. Uppeldisstöðvar á 1. og 2. ári eru einkum djúpprennan úti af Suðvestur Noregi og við landgrunnskantinn sunnan og vestan Íslands, en eldri ungfiskur finnst gjarnan í Noregshafi í bland við fullorðna fiskinn. Þegar hlýna tók á seinustu árum síðustu aldar brá svo við að kolmunaárgangar stækkuðu mikið og þar af leiðandi veiðistofninn. Mikið varð af kolmunna á 1. og 2. ári við landgrunnskantinn sunnanlands og vestan og annars staðar



Mynd 2.24 Nýjar tegundir við landið á undanförunum árum. Vinstra megin eru tegundir sem orðnar eru algengari (efst er fjólumóri, svo litla brosmu og neðst sænál) en hægra megin eru tegundir sem nýjar eru við landið á síðustu árum (efst er svartdjöfull, þá kjáni og neðst er bláskoltur), Myndir © Jón Baldur Hlíðberg (www.fauna.is).

á uppeldisslóðinni sem án efa má tengja hlýnun sjávar við landið á síðasta áratug.

Sjaldgæfar tegundir og nýjar

Í hlýindum undanfarinna ára eru einnig mörg dæmi um það að vannýttar tegundir sem aðallega héldu sig undan suðurströndinni á árum áður hafi nú veiðst í auknum mæli norðar við landið¹⁰⁷. Af tegundum sem hér um ræðir má nefna fjólumóra, litlu brosmu og sænál (mynd 2.24). Einnig hafa tiltölulega sjaldgæfir suðrænir flækningar eins t.d. og augnasíld, hornfiskur, sæsteinsuga, og makrill fundist í auknum mæli við landið síðasta áratug. Makrillinn var reyndar í það miklu magni fyrir austan land árið 2007 að nokkur íslensk skip veiddu þar rúmlega 30 þús. tonn innan íslensku efnahagslögsögunnar.

Loks ber að geta þess að á undanförunum 11 árum hafa 26 áður óþekktar fisktegundir veiðst innan 200 sjómílna lögsögunnar. Sem dæmi um þessar tegundir má nefna þær sem hafa fundist hvað oftast en þær eru bláháfur, svartdjöfull, kjáni, svartskoltur, flundra, vígattanni, djúpmjóri og randarangi (mynd 2.24). Nær allar þessar tegundir eiga sér megin heimkynni sunnar í Atlantshafi og rannsóknir hafa sýnt að margar þeirra hafa verið að auka útbreiðslu sína til norðurs.

Sjávarspendýr

Staðsetning Íslands á kaldtempraða svæðinu rétt sunnan heimskaupsbaugs veldur því að hér er fjölskrúðug fána sjávarspendýra, þ.e. hvala og sela¹¹¹. Alls hafa sést eða fundist reknar a.m.k. 23 tegundir hvala og 7 tegundir sela við Ísland. Margar þessara tegunda hafa

megin útbreiðslu ýmist norðan eða sunnan íslenska hafsvæðisins.

Ekki liggja fyrir nákvæmar upplýsingar um hvalagengd við Ísland mestan hluta síðustu aldar, en reglulegar talningar á hvölum og selum hófust á níunda áratug aldarinnar. Af ýmsum eldri heimildum má þó ráða að loftslag hefur í gegnum tíðina haft talsverð áhrif á gengd sjávarspendýra við Ísland¹¹². Einkum virðist hafis hafa þar mikil áhrif, en ýmsar heimildir greina frá aukinni gengd tegunda sem hafa megin útbreiðslu á heimskautasvæðum þegar hafisinn er nærri landinu. Meðal þessara tegunda eru mjaldur, náhvalur og norðhvalur (Grænlands-sléttbakur) ásamt vöðusel, blöðrusel, hringanóra og kampsel.

Af reglulegum hvalatalningum, sem gerðar hafa verið á um 6 ára fresti frá 1987, má sjá talsverðar breytingar í fjölda og útbreiðslu sumra tegunda¹¹³. Ekki er á þessu stigi unnt að draga sterkar ályktanir um samhengi þessara breytinga við hlýnun sjávar eða aðrar loftslagsbreytingar. Hvalir eru blóðheit dýr og eru flestar íslensku tegundirnar lífeðlisfræðilega í stakk búnar til að þola talsverðar breytingar á hita. Stórhvelin eru hins vegar mjög hreyfanleg fardýr og koma á Íslandsmið á sumrin fyrst og fremst til fæðunáms og verður að telja líklegt að útbreiðsla þeirra ráðist að miklu af fæðuframboði á hverjum tíma. Því má vænta breytinga á útbreiðslu hvala ef breytingar verða á mikilvægustu fæðutegundum þeirra af völdum loftslagsbreytinga.

Samantekt

- Á síðustu öld hafa sveiflur í sjávarhita og sjógerð sýnt mikil áhrif umhverfisþátta á frumframleiðni, afrakstur og lífsskilyrði nytjastofna við Ísland.
- Meðalátumagn fyrir Norðurlandi að vori í hlýju árferði er um tvöfalt meira en í köldu árferði.
- Þorsklirfurek frá Íslandi til Grænlands ásamt almennt hlýnun í Norður-Atlantshafi upp úr 1920 er talið hafa skipt miklu varðandi stærð og veiðipól íslenska þorsstofnsins fram yfir miðja síðustu öld, eða þar til hafiss gætti um miðjan sjöunda áratuginn.
- Greinilegra breytinga hefur orðið vart í útbreiðslu og stofnstærð nokkurra nytjafiska á Íslandsmiðum sem mjög líklega tengjast hlýnun í sjónum umhverfis landið frá því um 1996. Útbreiðsla botnfiska á norðurmörkum útbreiðslusvæðis síns hefur aukist til norðurs, s.s. eins og ýsu, lýsu, skötusels og ufsa. Stofnarnir hafa einnig stækkað verulega.
- Loðnan, sem er kaldsjávarfiskur, hefur að því er virðist hupað fyrir hlýindunum á undanförunum árum og haldið sig lengra norður í höfum og vestar yfir grænenska landgrunninu.
- Norsk-íslenski síldarstofninn hrundi á seinni hluta 7. áratugar seinustu aldar eftir afar miklar veiðar í kjölfar þess að snöggkólnaði norðan- og austanlands og aðalfæða síldarinnar hér við land, rauðátustofninn, hrundi. Síldarstofnar hafa nú aftur náð fyrri stærð og hafa aukin hlýindi í Norður-Atlantshafi vafalítið flýtt fyrir þeim bata og stuðlað að stóru auknu útbreiðslusvæði norsk-íslensku síldarinnar.
- Á undanförunum árum hafa 26 áður óþekktar fisktegundir veiðst innan 200 sjómílna lögsögunnar. Nær allar þessar tegundir eiga sér megin heimkynni sunnar í Atlantshafi og rannsóknir hafa sýnt að útbreiðsla margra þeirra hefur aukist til norðurs.

2.6. Breytingar á lífríki á landi

2.6.1. Gróðurfar

Hækkandi styrkur koldíoxíðs (CO_2) í andrúmslofti hefur tvíþætt áhrif á gróðurfar. Annars vegar hefur hækkandi styrkur CO_2 bein áhrif á ljóstillifun. Hins vegar hafa hugsanleg áhrif hans á loftslag margvísleg áhrif á lífsskilyrði gróðurs.

Bein áhrif CO_2

Plöntur umbreyta lofttegundinni CO_2 í sykrur með ljóstillifun. Séu aðrir umhverfiþættir ekki takmarkandi má búast við að hækkandi styrkur CO_2 í andrúmslofti leiði einn og sér til meiri vaxtar og framleiðni gróðurs. Tvær rannsóknir hafa verið unnar hérlandis á áhrifum hækkads styrks CO_2 . Önnur byggðist á einstökum aðstæðum við laugar¹¹⁴ sem gefa stöðugt frá sér CO_2 . Í þeirri rannsókn reyndust langtíma áhrif af hærri styrk CO_2 á vöxt grastegundarinnar finnungs, sem óx við næringarsnaud skilyrði, ekki afgerandi. Í hinni var rannsökuð alaskaösp sem ræktuð var annarsvegar í fremur ófrjósömum og hinsvegar í frjósömum jarðvegi (mynd 2.25). Í frjósömum jarðvegi svaraði alaskaösp auknum styrk¹¹⁵ CO_2 með um 16% meiri ársvexti ofanjarðar og neðan¹¹⁶, en í ófrjósömum jarðvegi var ekki marktæk vaxtaraukning.

Áhrif loftslagsbreytinga

Veðurfarsþættir hafa mikil áhrif á lífsskilyrði plantna og þar með á gróðurfar landsins. Þeir þættir sem mestu skipta eru lengd vaxtartíma, hiti, úrkoma og vindafar. Áhrifin geta verið bein og óbein. Bein áhrif hækkandi hita birtast einkum í auknum vexti og útbreiðslu plantna, en óbein áhrif í auknu framboði næringarefna vegna hraðari umsetningar þeirra í jarðvegi. Aukinn meðalhiti yfir vaxtartímann veldur því m.a. að gróðurmörk færast ofar í landið. Nýlegar rannsóknir sýna að hæðarmörk birkiskóga hafa færst upp á síðustu áratugum og birki vex nú margfalt betur við skógarmörk en það gerði á 7. áratugnum¹¹⁷ (mynd 2.26).

Plöntutegundir sem hafa hærra kjörhitastig en hefur verið ríkjandi á Íslandi svara hlýnandi veðurfari með meiri framleiðni og vexti. Til dæmis leiddi 1,2°C hlýnun yfir vaxtartímann til 9–15% meiri árlegs vaxtar alaskaaspar í áðurnefndri tilraun í Gunnarsholti¹¹⁸. Vaxtaraukningin var hlutfallslega meiri hjá trjám sem uxu í ófrjósömum jarðvegi en þeim sem uxu í frjósömum jarðvegi. Í öðru rannsóknaverkefni þar sem plastskermar voru notaðir til að hækka hita um 1–2°C í tveimur mjög ólíkum gróðurlendum, mosapembu og fjalldrapamóa, kom í ljós umtalsverður munur á vaxtarsvörum¹¹⁹. Mosapemban sýndi litla svörun, en hæð-



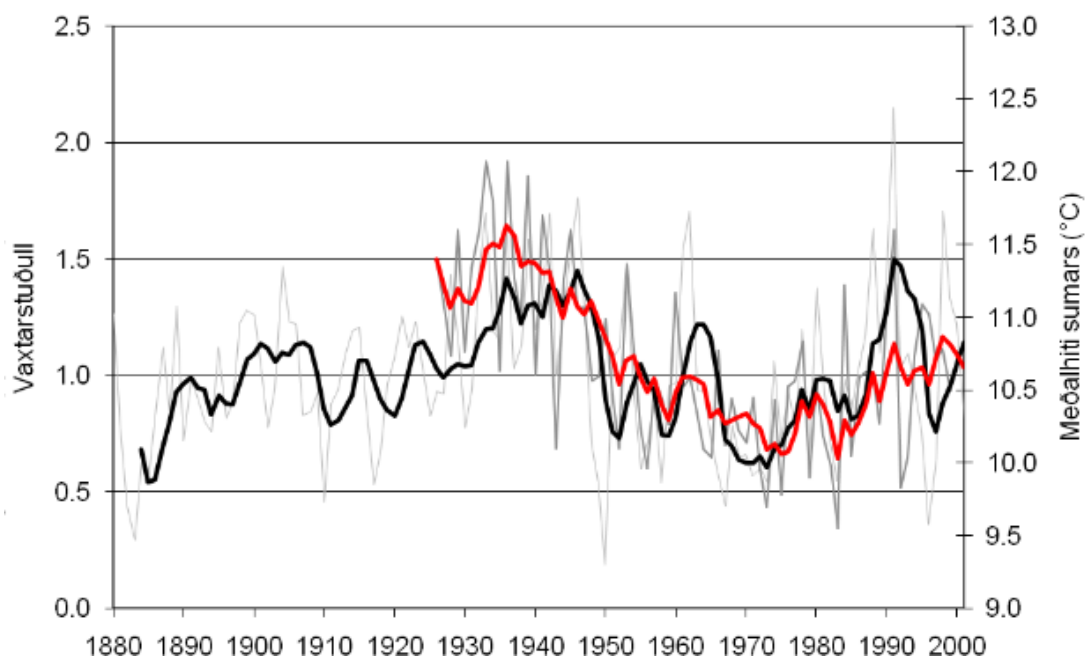
Mynd 2.25 Tilraun með áhrif hækkandi styrk CO_2 í andrúmslofti, hækkandi lofthita og frjósemi á vöxt alaskaaspar í Tilraunaskóginum í Gunnarsholti á Rangárvöllum 1993–1997 (Ljósmynd: Bjarni Diðrik Sigurðsson).



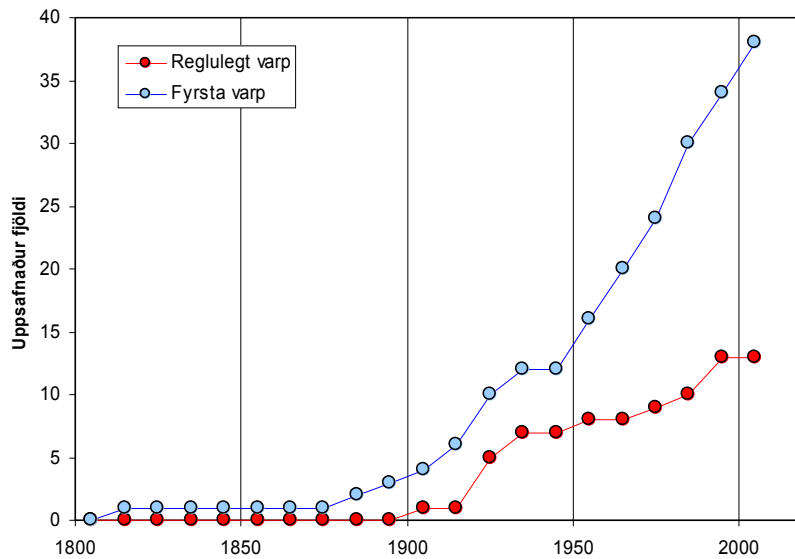
Mynd 2.26 Birki vex upp við ný tegundamörk sín í um 500 m h.y.s. í þjóðgarðinum í Skaftafelli. (Ljósmynd: Bjarni Diðrik Sigurðsson).

arvöxtur runnagróðurs jókst um allt að 100% og tegundasamsetning plantna breyttist verulega í fjalldrapamóanum. Áhringjagreiningar á birki í Bæjarstaðarskógi sýna einnig að vöxtur þess breytist með meðalhita sumars á nálægum veðurstöðvum eins og sýnt er á mynd 2.27. Mælingarnar sýna jafnframt að vöxtur trjáanna hefur aukist umtalsvert síðan á kalda tímabilinu 1965–1985, og er nú svipaður og hann var á hlýja tímabilinu á árunum 1925–1945¹²⁰.

Mælingar í langtíma rannsóknareitum (vöktunarmælingar) hafa einnig sýnt aukna framleiðni gróðurs í úthaga víða á Norður- og Suðurlandi á liðnum áratug¹²¹. Þar er þó erfitt að skilja í sundur áhrif hlýnandi veðurfars og breytinga sem samtímis hafa orðið á landnýtingu, einkum búfjárbreit. Til að fá óyggjandi svör við spurningunni um það hvort breytingar á gróðurfari og öðru lífríki eru vegna loftslagsbreytinga eða annarra þátta er mikilvægt að gera beinar tilraunir samhliða vöktunarmælingum.



Mynd 2.27 Áhringjavöxtur birkis (dökk lína) og meðalhiti sumars (rauð lína) í Bæjarstaðarskógi í Skaftafelli. (Mynd var aðlöguð úr grein Ólafs Eggertssonar og Hjalta Guðmundssonar. Sjá nánar tilvísun 120).



Mynd 2.28 Fjöldi nýrra fuglategunda sem hafa reynt varp hér á landi á tímabilinu 1900–2007 (Náttúrufræðistofnun Íslands, óbirt gögn).

Með því að rannsaka svæði þar sem áhrifa landnýtingar gæti ekki má fá áreiðanlegri hugmynd um áhrif loftslagsbreytinganna einna og sér. Slík svæði eru vandfundin á Íslandi en þó má nefna Esjufjöll í Breiðamerkurjökli þar sem er nú er fylgst með breytingum á gróðurfari og smádyralífi. Rannsóknir þar hafa staðið í of stuttan tíma til að hægt sé að draga af þeim lærdóm um þetta atriði¹²².

Hlýindi að vetri ásamt breytingum á snjó- og svellalögum geta einnig haft veruleg og oftast neikvæð áhrif á gróður. Vindur hefur mikil áhrif á gróðurfar. Hann færir hitastig 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. Þar með batna staðbundin skilyrði fyrir annan gróður.

2.6.2 Dýralíf

Fuglar

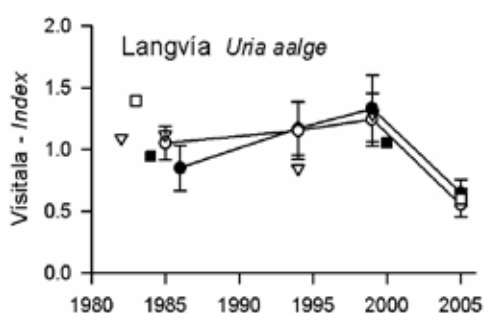
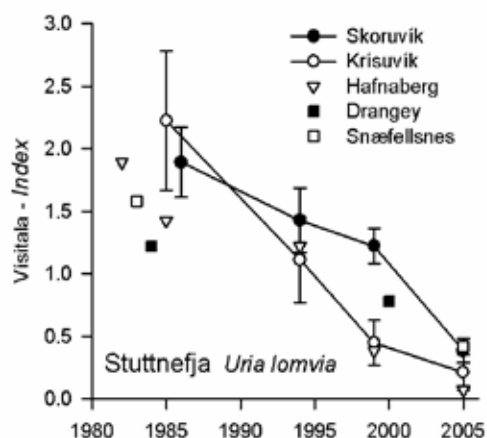
Þrjár fuglategundir eru útdauðar sem varpfuglar í íslenskri náttúru, svo vitað sé: Geirfugl (árið 1844), keldusvín (um 1970) og haftyrdill (1995). Haftyrdill er hánorræn tegund sem síðast verpti í Grímsey og var þar á suðurmörkum útbreiðslusvæðis síns. Hvarf hans frá landinu hefur verið tengt hlýnandi veðurfari en fyrrnefndu tegundirnar hurfu að því talið er vegna beinna eða óbeinna áhrifa manna. Um 35 nýjar fuglategundir

reyndu varp og margar settust að á Íslandi á síðustu öld. Má þar nefna fuglategundir eins og svartþröst, stara, sílamáf, stormmáf, brandönd og helsingja. Tíðni landnáms virðist hafa aukist eftir því sem leið á 20. öldina¹²³ (mynd 2.28). 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 barrskógarfuglana glókoll og skógarsnípu sem nýlega hófu hér varp.

Varpfuglum í sjófuglabyggðum við norðanvert Atlantshaf hefur fækkað verulega frá síðustu aldamótum og flestir sjófuglastofnar virðast fara minnkandi.

Hér við land hefur stuttnefju fækkað allt frá miðjum 9. áratug síðustu aldar; þessi fækkun leiddi til þess að stuttnefja var sett á válista árið 2000¹²⁴ (mynd 2.29). Hjá öðrum tegundum sjófugla, svo sem langvíu, álku, lunda og fyl hefur fækkunar í vörpum fyrst og fremst gætt á þessari öld. Fækkunin er þó alls ekki einhlít og mikill breytileiki er milli sjófuglabyggða á mismunandi stöðum á landinu. Um og uppúr 2005 varð vart við miklar sveiflur í varpi annarra sjófugla en bjargfugla á Suðurlandi (mynd 2.30).

Ástæða þessarar fækkunar hefur verið rakin til víðtækra umhverfisbreytinga í hafinu við landið (sjá kafla 2.3.1). Margir sjófuglastofnar við suður og vesturströndina byggja afkomu sína að stórum hluta á sandsíli¹²⁵ og er



Mynd 2.29 Breytingar í fjölda sturtnefju og langvíu í nokkrum íslenskum sjófuglabjörgum¹⁵⁶. (Ljósmyndir: Yann Kolbeinson (sturtnefjur) og Freydís Vigfúsdóttir (langvíur).

líklegt að ástæða fækkunar í sjófuglabýggðum þar stafi af lægð sandsílastofnsins 2004–2006¹²⁶.

Smádýr

Ýmsar tegundir fiðrilda berast til landsins á sumrin með vindum frá meginlandi Evrópu. Flestar þeirra drepast næsta vetur. Undanfarin ár hafa mildari vetur gert sumum þeirra kleift að lifa veturinn af. Sem dæmi má nefna skrautyglu, garðyglu, kálmöl og lerkivefara, sem fannst fyrst á Tumastöðum í Fljótshlíð sumarið 1997 og varð á fáeinum árum algengasta tegund fiðrilda þar á staðnum¹²⁷.

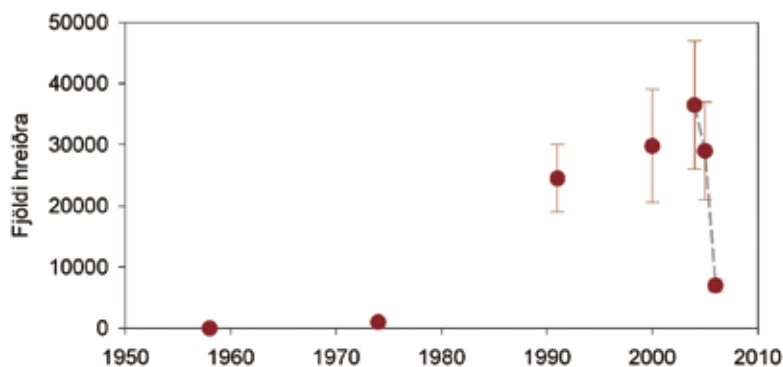
2.6.3 Vatnalíf

Breytingar hafa orðið á efnasamsetningu og lífríki ferskvatns á undanförunum árum. Mælingar Jarðvísindastofnunar Háskólans sýna skýrar breytingar í efnasamsetningu straumvatns mismunandi vatnasviða á NA-landi milli 1998 og 2003, en á tímabilinu mældust þrjú hlýj-

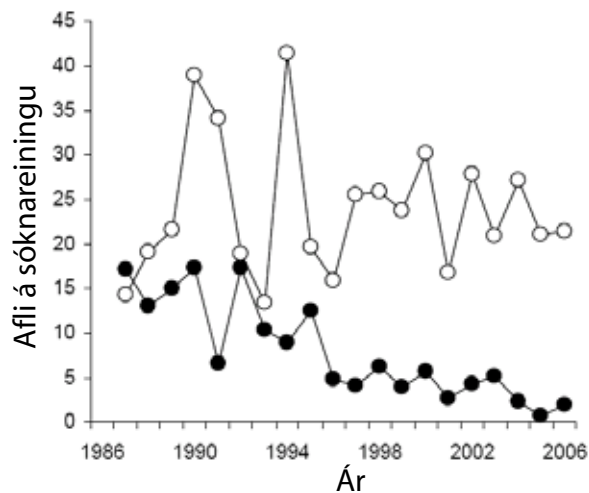
ustu ár til þess tíma¹²⁸. Lífrænt og ólífrænt uppleyst kolefni jókst í jökulám með hækkandi hita.

Rannsóknir á vegum Veiðimálastofnunar sem staðið hafa yfir frá því um 1980 í Selá og Hofsá sýna lækkandi aldur gönguseiða lax og aukningu á vaxtarhraða og heildarlífþyngd á flatareiningu. Þetta hefur m.a. verið tengt hækkun vatnshita og hlýnun loftslags á sama tímabili¹²⁹. Einnig hefur orðið veruleg breyting á dvalartíma laxins í sjó, þannig að stórlaxi (tvö ár í sjó) fækkar verulega en fjöldi smálaxa (eitt ár í sjó) stendur í stað eða fjölgar. Ástæður þessa eru óljósar.

Vísbendingar eru um að bleikja eigi undir högg að sækja í stöðuvötnum landsins vegna hækkandi vatnshita, einkum í mjög grunnum vötnum^{129,157}. Gott dæmi um þetta eru rannsóknagögn frá Elliðavatni sem spanna langt tímabili (mynd 2.31). Á undanförunum 20 árum hefur bleikjustofninn í Elliðavatni nánast hrunið á með-



Mynd 2.30 Breytingar á fjölda silamáfs-hreiðra á Miðnesheiði 1958-2006 með 95% öryggismörkum. Brotalínan sýnir árlegar breytingar á fjölda hreiðra yfir tímabilið 2004-2006. Tölur frá 1958 og 1974 eru byggðar á talningum á fullorðnum fuglum í varpi á Miðnesheiði. (Aðlagð frá 158).



Mynd 2.31 Afli bleikju (fylltir hringir) og urriða (opnir hringir) á sóknareiningu í Elliðavatni á tímabilinu 1986–2006¹⁵⁷.

an urriðastofninn hefur meira eða minna staðið í stað¹⁵⁷. Samtímis fækkun bleikjunnar hefur vatnið hlýnað umtalsvert, mest snemma vors og síðsumars. Vatnshitinn hefur verið vel yfir kjörhita bleikju til vaxtar og viðgangs, en bæði urriði og lax þola hitann betur. Aðrir umhverfispættir kunna einnig að skýra hrun bleikjunnar í Elliðavatni, s.s. óvenju basískt ástand vatnsins og hár álstyrkur¹⁵⁷.

Ný tegund flatfisks, flundra, hefur gert sig heimakomna í árósasvæðum héraendis, en fyrsta flundran sem greind var hér á landi veiddist í Ölfusárósi í september 1999¹³⁰.

Sennilegast er að hún hafi borist hingað frá Færeyjum. Einnig hafa nýjar tegundir lífvera, svo sem sandrækja¹³¹ og sandskel¹³² fundist og útbreiðsla þeirra aukist verulega við strendur landsins. Aukin útbreiðsla þessara tegunda hefur verið tengd þeirri hlýnun sem orðið hefur hér á síðustu árum.

Aðeins hefur verið drepð hér á nokkrar helstu breytingar sem orðið hafa á lífríki landsins á síðustu árum og áratugum, og mest áhersla lögð á að bæta við það yfirlit sem birtist í skýrslu fyrri vísindanefndar frá árinu 2000¹³³.

Samantekt

- Hækkandi styrkur gróðurhúsalofttegundarinnar koldíoxíðs (CO₂) getur haft bein jákvæð áhrif á vöxt og framleiðni plantna. Niðurstöður rannsókna sýna að þetta gerist þó almennt ekki nema þar sem frjóssemi er mikil.
- Ýmsar rannsóknir hafa sýnt að aukning hefur orðið á framleiðni gróðurs á síðustu árum og áratugum og beinar tilraunir með að hækka hita benda til að slík svörun sé líkleg í flestum gróðurlendum ef loftslag hlýnar enn.
- Skógarmörk birkis eru að færast ofar í landið og birki vex nú mun betur við skógarmörk en það gerði á 7. áratug síðustu aldar.

- Hafa þarf í huga að erfitt getur verið að skilja í sundur áhrif hlýnandi veðurfars á gróður og áhrif breytinga sem samtímis hafa orðið á landnýtingu, einkum búfjárbætur.
- Ein norðlæg fuglategund, haftyrdill, hætti varpi á Íslandi um 1995 og er það rakið til hlýnandi loftslags. Tíðni landnáms nýrra fuglategunda hefur hinsvegar verið að aukast frá því um 1900.
- Varp ýmissa sjófugla hefur raskast mikið á síðustu árum sem líklega stafar af breyttu fæðuframboði í hafinu.
- Breytingar hafa orðið á vatnalífi á undanförunum árum sem hafa bæði verið raktar til hækkandi vatnshita (t.d. meiri vaxtarhraði laxaseiða og fækkun bleikju) og til breytinga í sjó (t.d. styttri dvalartími laxa í sjó og minnkandi hlutfall stórlaxa).
- Búast má við að áhrif loftslagsbreytinga á lífríkið verði fyrir sýnileg á Íslandi en á mörgum öðrum svæðum, þar sem það er á mörkum tveggja loftslagsbelta, kaldtempraða beltisins og heimskauta-beltisins.
- Áhrifin af hlýrra loftslagi síðustu ára eru þegar orðin umtalsverð á lífríki landsins.

2.7 Áhrif veðurfarsbreytinga á atvinnulíf

2.7.1. Sjávarútvegur

Þær breytingar á lífríki sjávar á liðnum áratugum sem lýst er í kafla 2.5 snerta fyrst og fremst fiskistofna, sem mikilvægir hafa verið í efnahagslegu tilliti og safnað hefur verið gögnum um af þeirri ástæðu. Til eru upplýsingar sem lýsa afar glögglega þróun þorskstofnsins við Ísland og á nærliggjandi hafsvæðum s.l. öld, þar sem miklar og vaxandi veiðar á árabílinu 1920–1960 voru að hluta til vegna hagstæðra veðurfarskilyrða fyrir þorsk við Ísland á þessum árum og að til staðar voru viðbótar uppvaxtarlendur við strendur Grænlands fyrir þorsk sem gekk á Íslandsmið til hrygningar^{105,106,109,134}. Óhætt er einnig að fullyrða að langlífi þorsksins og margir sterkir árgangar fyrr á árum hafi gert það að verkum að stofninn þoldi töluvert langvarandi ofveiði án þess að hrynja. Af þessum sökum reyndust þorskveiðarnar afar mikilvægar alla síðustu öld og er svo enn í dag þrátt fyrir breytingar á umhverfisskilyrðum.

Á síðari hluta 20. aldar (sjá mynd 2.32) var þorskur sem fyrr mikilvægasta botnfisktegundin^{77,106,109,137} en mikil aukning varð í karfa og ufsaveiði landsmanna, að hluta til utan efnahagslögsögu Íslands. Mest aukning var þó í veiðum á uppsjávarfiski, fyrst síld (íslensk vor- og sumargotssíld, og norsk- vorgotssíld) en síldveiðarnar náðu hámarki árin 1965 og 1966 (um 800 þúsund tonn). Þær stóðu þó aðeins stutt eða fram undir lok sjötta áratugarins er stofnarnir hrundu nánast á hafisár-unum¹³⁵. Þótt miklar veiðar hafi haft úrslitaáhrif er enginn vafi á því að áhrif breyttra umhverfisaðstæðna voru mikil^{109,136}. Eftir hrun síldarstofnanna tók við endurreisn þeirra og jukust veiðar sumargotssíldar á Íslandsmiðum jafnt og þétt næstu áratugina. Um miðjan síðasta áratug hófust síðan stórtækar veiðar á ný úr norsk-íslenska síldarstofninum (norsk vorgotssíld) á grundvelli samkomulags strandríkja við Norður Atlantshaf, þ.m.t. Íslands.

Ekki er vitað hvernig loðnustofninum reiddi af á fyrri hluta síðustu aldar, þó þekkt sé að í byrjun hlýskeyðsins uppúr 1920 hafi þrengt að búsvæði loðnu og hún nánast hætt að hrygna við suður- og suðvesturströndina^{100,101}. Eftir 1970 hófust stórtækar loðnuveiðar sem

mestar urðu á aðra milljón tonna árin 1996 og 1997. Um aldamótin höfðu Íslendingar tekið við sér í veiðum á kolmunna, en eftir um áratugs hlé varð aflinn um 10 þúsund tonn árið 1996, fór hraðvaxandi, varð um 500 þúsund tonn árið 2003, en hefur nokkuð minnkað síðustu árin og varð 310 þúsund tonn árið 2006⁷⁷. Vaxandi kolmunnaveiðar hafa verið í takt við hlýnandi skilyrði í hafinu við landið og auknar göngur kolmunna inn í efnahagslögsögu Íslands á undanförunum árum.

Á 20. öld jókst verg þjóðarframleiðsla að jafnaði um 4% á ári^{109,137}. Þetta stafaði fyrst og fremst af framþróun í fiskveiðum og fiskvinnslu. Sveiflur í þjóðarhag voru lengst af nátengdar sveiflum í sjávarútvegi og mátti rekja allar efnahagslæggðir á liðinni öld beint eða óbeint til erfiðleika í fiskveiðum eða á fiskmörkuðum landsmanna. Á árunum milli 1960 og 1970 var hagvöxtur á Íslandi um 4,8%, sem fyrst og fremst mátti rekja til mikilla síldveiða¹⁰⁹. Hrun síldarstofnanna og þar með síldveiðanna orsakaði alvarlega efnahagslega lægð, með tilheyrandi atvinnuleysi og flutningi vinnuafis frá Íslandi. Verg þjóðarframleiðsla minnkaði um 1,3% árið 1968 og 5,5% árið 1969.

Eins og fram hefur komið hefur afli á Íslandsmiðum verið á bilinu 1,5–2,0 milljónir tonna undanfarin ár og er uppsjávarafli um 1/2 til 2/3 hluti aflans. Heildar útflutningsverðmæti aflans fór úr 86 milljörðum króna í 97 milljarða króna á föstu verðlagi, á árabílinu frá 1990 til 2000, en var 112 milljarðar árið 2005^{138,139}. Sem fyrr er botnfiskafliinn mikilvægastur í verðmætum talið. Þótt þorskstofninn sé nú í lægð, er aflaverðmæti hans mest, rétt innan við helming heildarinnar. Hið mikla magn uppsjávarfisks gaf um árabíl um eða innan við 10% aflaverðmætis, en aukning í vinnslu afla til manneldis

hefur breytt hlutfallslegu vægi uppsjávarfisks í efnahagslegu tilliti þannig að aldamótaárið var 73% aflans uppsjávarfiskur sem gaf 12% aflaverðmætis, en var 68% aflans og 21% aflaverðmætis árið 2005.

Útflutningur sjávarafurða hefur ávallt verið snar hluti heildarútflutningsins eða 70–80% vöruútflutnings. Allra síðustu ár hefur hlutdeildin verið rétt um eða innan við 60% vöruútflutnings, en fer minnkandi. Árið 1980 var hlutur sjávarútvegs um 16% af vergri þjóðarframleiðslu, en var aldamótaárið 2000 aðeins 11%¹⁰⁹. Það er því ljóst að vægi sjávarútvegsins hefur minnkað þó atvinnugreinin sé enn einn aðalburðarás velmegunar í landinu.

2.7.2 Landbúnaður

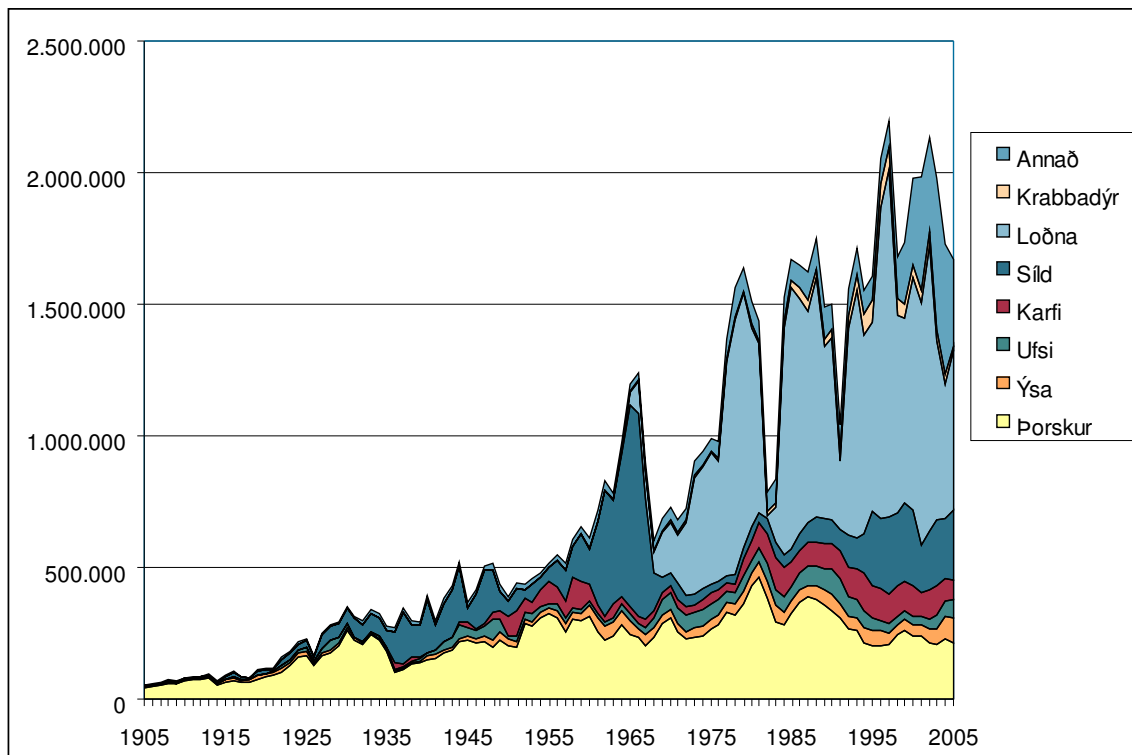
Öll ræktun jarðargróða verður fyrir sömu áhrifum af veðurfarsbreytingum og hækkandi styrk CO₂ og áður var lýst fyrir náttúruleg gróðurlendi í kafla 2.6. Áhrifin eru sérstaklega áberandi þegar um er að ræða ræktun nytjategunda sem eru hér á norðurmörkum sínum.

Tiltölulega mikill náttúrulegur breytileiki í veðurfari hérlandis hefur gefið möguleika á að rannsaka þessi áhrif m.a. á heyfeng bænda. Heyfengur jókst um 735 kg (þurrefnis) á hektara fyrir hverja gráðu sem hlýnaði vetur og vor¹⁴⁰. Mildum vetrum fylgir lítill jarðklaki og þar með lengra sumar en ella. Þessar upplýsingar má nota til að spá fyrir um möguleg áhrif hlýnandi veðurfars á heyfeng bænda, a.m.k. á meðan hlýnunin er innan þeirrar náttúrulegu sveiflu sem þetta samband er byggt á¹⁴¹.

Sá þáttur sem mest áhrif hefur á breytileika í heyfeng bænda er kalskemmdir, en þær tengjast beint veðurfari

Tafla 2.1: Hlutfallsleg skipting afla og aflaverðmætis árið 2005

	Afli (%)	Verðmæti (%)	Magn í tonnum	Verðmæti í 1000 kr
Botnfiskafli	29	69	491.316	47.209.259
Flatfiskafli	2	7	27.296	5.076.550
Uppsjávarafli	68	21	1.136.624	14.158.769
Skel/krabbaafli	1	2	14.036	1.497.054
Annar afli	0	0	306	9.331
	100	100	1.669.578	67.950.963



Mynd 2.32 Fiskaflí Íslendinga 1905-2005. Fiskaflí Íslendinga síðustu öldina fór úr rúmum 50 þúsund tonnum í kringum 1,5-2 milljónir tonna nú um og eftir aldamótin 2000. Lengst af var mestur hluti aflans veiddur á Íslandsmiðum. Fyrstu áratugi síðustu aldar byggðist aflinn á botnlægum tegundum og var hann lengst af, eða fram undir miðja öldina, vel innan við 400 þúsund tonn. Þorskur var lang mikilvægasta tegundin, en þar á eftir komu ýsa, úfsi og karfi, en síldveiðar fóru brátt að skipa stóran sess að lokinni fyrri heimsstyrjöldinni, loðnuveiðar eftir 1970 og kolmunni s.l. áratug. (1905-1944 aflí við Ísland, 1945-2005 aflí af öllum miðum). (Gögn frá Hafrannsóknarstofnuninni).

að vetri. Kalskemmdir ollu miklum búsifjum á seinni hluta 20. aldar. Sum ár rýrnaði hefyndur um 20–30% á landsvísi og enn meira í þeim héruðum sem verst urðu úti¹⁴². Eftir síðustu aldamót hefur veðurfar breyst þannig að hiti að vetri hefur hækkað og svell hafa því sjaldan legið lengi á tünnum og kalskemmdir litlar sem engar orðið.

Á síðustu tveimur áratugum hefur kornrækt rutt sér til rúms sem mikilvæg grein í íslenskum landbúnaði. Gróflega áætlað má nú rækta fljótþroska bygg með sæmilegu öryggi á um helmingi allra bújarða á landinu. Kornræktarsvæðið er Suðurland mestallt, útsveitir vestanlands og bestu innsveitir norðanlands og á Fljótsdals-heraði. Framfarir í kornrækt má að hluta til þakka tilkomu nýrra byggafbrigða, og líka því að sumarhiti síðustu 10 árin hefur jafnast á við það besta sem þekktist á 20. öld.

Bygg (kornið) þarf um 1200 gráðudaga (margfeldi meðalhita og fjölda daga) til að hægt sé að nýta það, en fullum þroska nær það þó ekki fyrr en eftir 1300–1500 gráðudaga, eftir byggryrkjum.¹⁴³ Meðan korn er ræktað við það hitafar að það nær sjaldnast fullum þroska og er að bæta við sig fram á síðasta dag, þá eykst kornuppskera um tæpt tonn (970 kg þurrefnis) fyrir hvert hækkanði hitastig¹⁴⁴.

Ýmsar nýjar nytjategundir eru nú á mörkum þess að geta vaxið hérlandis. Til dæmis hefur nú tekist að rækta vetrarhveiti um fjögurra ára skeið syðst á landinu (mynd 2.33). Þó má ekki mikið útaf bregða í veðurfari við slíka ræktun, þar sem vetrarhveiti hefur ekki mikið vetrarþol.

Allt skógræktar- og landgræðslustarf hefur orðið auðveldara með hlýnandi veðurfari á síðustu árum og ára-



Mynd 2.33 Hveiti skorið á Þorvaldseyri undir Eyjafjöllum haustið 2006. Kornrækt hefur rutt sér til rúms á Íslandi á síðustu tveimur áratugum (Ljósmynd Ólafur Eggertsson, Þorvaldseyri).

tugum. Toppvöxtur trjáa er háður vaxtarskilyrðum á hverjum stað. Því má nota toppvöxt til að skoða skilyrði til skógræktar. Þegar það er gert kemur í ljós að toppvöxtur, til dæmis rauðgrenis, sitkagrenis og stafafuru, jókst umtalsvert frá 7. áratug síðustu aldar til dagsins í dag¹⁴⁵. Trjágróður getur þó einnig orðið fyrir vissum neikvæðum áhrifum af hlýnun. Má þar nefna ákveðin kvæmi siberíulerkis sem nú þrífast verr en áður vegna endurtekens kals í kjölfar ótímabærra hlýinda að vetrar- og vorlagi¹⁴⁶.

Ýmsir skaðvaldar í skógi og á landgræðslusvæðum virðast einnig hafa orðið meira áberandi á síðasta áratug. Til dæmis náði sitkalús, sem er evrópsk að uppruna en leggst á amerískar grenitegundir, í fyrsta sinn að mynda vorfaraldur árið 2003 eftir mildan vetur á vestanverðu landinu¹⁴⁷. Áður voru einungis haustfaraldrar af sitkalús þekktir hérlandis. Þessi vandamál hafa valdið staðbundnum skaða eða lagst á ákveðnar plöntutegundir, en áhrif hlýnandi loftslags á skógrækt og landgræðslu eru þó almennt mjög jákvæð.

2.7.3 Orkukerfi

Orkugeirinn er viðkvæmur fyrir breytingum á veðri og veðurfari. Eftirspurn eftir orku til húshitunar ræðst af hitafari og þarf dreifikerfið að annast eftirspurn við mesta álag, hvort sem heitt vatn eða rafmagn er notað. Þó er gert ráð fyrir að til einhvers skorts geti komið við verstu skilyrði, ella gæti kostnaður farið úr böndunum. Einnig er gert ráð fyrir skilgreindri meðalnotkun á orkunni við verðlagningu þjónustunnar. Ef breyting verður á ytri skilyrðum vegna breytinga á veðurfari gætu þessar forsendur raskast sem við óhagfelldari skilyrði gæti leitt til verðhækkana. Á undangengnum árum hafa breytingar á mannfjölda og eftirspurn vegna breyttra lífnaðarháttá yfirsýst að mest breytingar sem tengjast veðurfarssveiflum. Þó hafa hlýndatímabil á undanföllum árum kallað á umræðu um hækkun orkuverðs.

Dreifikerfi raforku eru einnig háð veðurtengdum atburðum og er ísing að líkindum versti tjónvaldurinn. Tíðni og stærð ísingaratburða er nátengd almennu veð-

urfari og því viðkvæm fyrir breytingum á því. Hér, eins og í umfjölluninni að ofan, hafa orðið svo miklar breytingar á kröfum til kerfisins að þær veða þyngra en áhrif veðurfarsbreytinga. T.d. er búið að leggja þúsundir kílómetra af raflinum í jörð til þess að auka afhendingaröryggi og hefur þetta sérstaklega verið gert þar sem ísing veldur búsifjum.

Framleiðslugeta vatnsaflsvirkjana er mjög háð veðurfari og vatnafari og er við hönnun mannvirkja gengið út frá því að tímaröð sem lýsi innrennsli til virkjunar sé óháð langtímabreytingum í rennsli. Nýting innrennslis ræðst af dreifingu þess innan ársins og af miðlunarmöguleikum, þannig að bæði vik frá langtímameðaltali og breytingar á árstíðasveiflu geta haft áhrif á orkuvinnslugetu virkjunar. Á liðnum árum hefur afrennsli frá jökulum verið langt umfram það sem áður var^{148,149}. Einnig hefur rennsli innan ársins líka tekið breytingum. Þetta má sjá á mynd 2.34 sem sýnir tvo meðalársferla fyrir Jökulsá í Dal. Annarsvegar er sýndur meðalársferill árabilsins 1963–1995 og hinsvegar meðalársferill árabilsins 1996–2007. Þar kemur skýrt fram að síðssumarrennsli, sem kemur að miklu leyti frá jökli, er mun meira á nýliðnum árum heldur en áður. Jafnframt byrja vorleysingar heldur fyrr, en vorflóðatoppur er minni, væntalega vegna þess að fyrr leysir eða að snjósöfnun vetrarins er minni^{150,151}. Þessar breytingar sjást um allt land og hafa leitt til þess að orkuvinnslugeta vatnsorkukerfisins er umtalsvert meiri en var raunin við hönnun kerf-

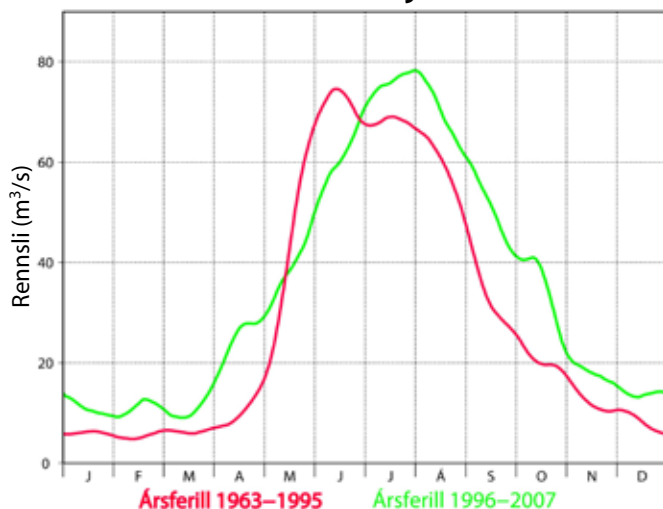
isins. Vegna þessa hefur verið að gera viðbótarsamninga um afhendingu orku án þess þó að auka líkurnar á því að til skorts komi^{152,153}.

2.7.4 Aðrar atvinnugreinar

Margt mætti nefna um áhrif breytts veðurfars síðustu ár og áratuga á annað atvinnulíf í landinu en frumvinnslugreinar. Nærtækasta dæmið er e.t.v. erfiðleikar sem ýmis skiðasvæði hafa orðið fyrir á seinni árum vegna vetrarhlýinda.

Greiðar samgöngur innanlands eru undirstaða margra atvinnugreina. Í nýrri skýrslu frá Vegagerðinni¹⁵⁴ kemur fram að það tímabil sem þungatakmörkanir ná yfir hefst fyrr á veturna nú en fyrir nokkrum árum. Þetta veldur erfiðleikum og auknum kostnaði fyrir rekstraraðila. Sama skýrsla nefnir einnig að vatnsföll hafi breytt farvegi sínum samfara hopi jökla, með þeim afleiðingum að brýr hafi staðið á þurru meðan vatnsmagn jókst undir öðrum brúarmannvirkjum. Nærtækasta dæmið um þetta er brúin yfir ána Stemmu á Breiðamerkursandi, en sú á þornaði upp haustið 1990, þegar jökulvatnið fann sér leið í Breiðarlón¹⁵⁵. Slíkar breytingar geta valdið tímabundinni röskun á samgöngum, en tíðni þeirra er svo lág að ekki er hægt að tala um umtalsverð áhrif.

Jökulsá í Fljótsdal



Mynd 2.34 Árstíðasveifla í rennsli Jökulsá í Fljótsdal á árabilinu 1963–1995 (rauður ferill) og 1996–2007 (grænn ferill). (Byggt á gögnum frá Vatnamælingum Orkustofnunar).

Samantekt

- Miklar og vaxandi þorskveiðar á árabílinu 1920-1960 voru að hluta til vegna hagstæðra veðurfarsskilyrða fyrir þorsk við Ísland á þessum árum.
- Líklegt má telja að breytt skilyrði í hafinu við Ísland í kjölfar hafisáranna upp úr 1970 hafi skilað sér í sterkari loðnustofni og auknum veiðum.
- Á s.l. tveimur áratugum hefur þorksafli minnkað um hartnær helming en á sama tíma varð mikil aukning í rækjuafla og veiði flatfiska s.s. grálúðu.
- Landbúnaður á Íslandi er að miklu leyti háður fódurverkun fyrir búpening. Rannsóknir sýna að heyfengur eykst um 0,7 tonn á hvern hektara ræktunar við hverja gráðu sem meðalhiti vetrar og vors hækkar.
- Kornrækt hefur rutt sér til rúms í íslenskum landbúnaði á síðustu tveimur áratugum. Ástæðan er bæði þróun nýrra kornafbrigða sem henta íslenskum aðstæðum, en ekki síður að veðurfar á tímabilinu hefur orðið hagstæðara kornrækt.
- Aðstæður til skógræktar og landgræðslu hafa batnað mjög á síðustu áratugum, en vetrarhlýindi geta einnig valdið því að ýmsir skaðvaldar og plöntusjúkdómar verða skæðari.
- Síðsumarrennsli jökuláa er meira á nýliðnum árum heldur en áður.
- Vorleysingar í ám byrja heldur fyrr og vorflóðatoppar eru minni vegna þess að fyrr leysir eða snjósöfnun vetrarins er minni.
- Vegna aukins vatnsrennslis á síðustu árum hefur orkuvinnslugeta vatnsorkukerfisins verið umtalsvert meiri en gert var ráð fyrir við hönnun þess.
- Vegna hlýnandi vetrarveðráttu hefjast nú þungatakmarkanir fyrr og standa lengur en áður. Þetta hefur áhrif á vöruflutninga og þar með á margháttaðan atvinnurekstur.

Tilvísanir

- 1 Dansgaard, W., White, J.W.C and Johnsen, S.J. 1989. The abrupt termination of the Younger Dryas climate event. *Nature* 339, 532-534.
- 2 Knudsen, K. L., Jiang, H., Jansen, E., Eiriksson, J., Heinemeier, J., Seidenkrantz, M.-S. 2004. Environmental changes off North Iceland during the deglaciation and the Holocene: foraminifera, diatoms and stable isotopes. *Marine Micropaleontology* 50, 273-305.
- 3 Zachos J., Pagani, M. Sloan L. et al. 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65Ma to present. *Science* 292, 686-693.
- 4 Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E. 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic ^{18}O records. *Paleoceanography* 20, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071
- 5 Geirsdóttir, Á. and Eirikson, J. 1994. Growth of an intermittent ice sheet in Iceland during the late Pliocene and early Pleistocene. *Quaternary Research* 42, 115-130.
- 6 Geirsdóttir, Á., Gifford H. Miller and John T. Andrews 2007. Glaciation, erosion, and landscape evolution of Iceland. *Journal of Geodynamics*, 43, p. 170-186.
- 7 Ran, L., Jiang, H., Knudsen, K.L., Eiriksson, J., and Gu, Z. 2006. Diatom response to the Holocene climatic optimum on the North Icelandic shelf. *Marine Micropaleontology* 60, 226-241.
- 8 Ran, L., Jiang, H., Knudsen, K. L. & Eiriksson, J. 2008. A high-resolution Holocene diatom record on the North Icelandic shelf. *Boreas*, in press.
- 9 Jiang, H. pers. comm
- 10 Flowers, G. E., Björnsson, H., Geirsdóttir, Á. Miller, G. H., Clarke, G. K. 2008. The Holocene history of Langjökull ice cap from physical modelling and empirical evidence. *Quaternary Science Reviews*, 27, 797-813..
- 11 Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Axford, Y., Ólafsdóttir, S. 2008. Holocene and latest Pleistocene climate and glacier fluctuations in Iceland. *Quaternary Science Reviews* (in review).
- 12 Ólafsdóttir, Saedis, Geirsdóttir, Aslaug, Jennings, Anne E., Andrews, John T. 2008. Irminger Current variability West and Northwest of Iceland during the Holocene. Arctic Workshop, Boulder 2008.
- 13 Grímsson, F., 2007. The Miocene floras of Iceland. Origin and evolution of fossil floras from North-West and Western Iceland 15 to 6 Ma. *Doktorsritgerð frá Háskóla Íslands*.
- 14 Norðdahl, H. and Pétursson, H., 2005. Relative sea-level changes in Iceland: new aspects of the Weichelian deglaciation in Iceland. In: Caseldine, C., Russel, A., Hardardóttir J. & Knudsen, O. (eds.) *Iceland-Modern Processes and Past Environment*, p. 25-78, Elsevier, Amsterdam
- 15 Andrews, J.T., Hardardóttir, J., Helgadóttir, G., Jennings, A.E., Geirsdóttir, Á., Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Schoolfield, S., Kristjánssdóttir, G.B., Smith, L.M., Thors, K., and Syvitski, J. 2000. The N and W Iceland shelf: Insights into Last Glacial Maximum ice extent and deglaciation based on acoustic stratigraphy and basal radiocarbon AMS dates. *Quaternary Science Reviews* 19, 619-631.
- 16 Andersen, KK., Anders Svensson, Sigfus J. Johnsen, Sune O. Rasmussen, Matthias Bigler, Regine Röthlisberger, Urs Ruth, Marie-Louise Siggaard-Andersen, Jørgen Peder Steffensen, Dorte Dahl-Jensen, Bo.M. Vinther and Henrik B. Clausen. 2006. The Greenland Ice Core Chronology 2005, 15-42 ka. Part 1: constructing the time scale. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 25, 23-24, doi:10.1016/j.quascirev.2006.08.002
- 17 Pflaumann, U., Sarnthein, M., Chapman, M., d'Abreu, L., Funnell, B., Huels, M., Kiefer, T., Maslin, M., Schulz, Swallow, J., van Kreveld, S., Vautravers, M., Vogelsang, E., and Weinelt, M. 2003. Glacial North Atlantic: Sea surface conditions reconstructed by GLAMAP 2000. *Paleoceanography*, vol. 18, no. 3, doi:10.1029/2002PA000774.
- 18 Rundgren, M., 1995. Biostratigraphic Evidence of the Allerød-Younger Dryas- Preboreal Oscillation in Northern Iceland. *Quaternary Research*, 44, 405-416
- 19 Geirsdóttir, Á., Hardardóttir, J., Sveinbjörnsdóttir, Á.E., 2000. Glacial extent and catastrophic meltwater events during the deglaciation of Southern Iceland. *Quaternary Science reviews* 19, 1749-1761.
- 20 Ólafsdóttir, S., Geirsdóttir, Á., Jennings, A.E., Andrews, J.T., 2006. Straumar og setumhverfi við Djúpálinn á síðjökultíma í ljósi götunganannsókna. Raunvísindapjng. Háskóli Íslands
- 21 Eiriksson, J., Knudsen, K.-L., Hafliðason, H., Henriksson, P., 2000. Late- glacial and Holocene paleoceanography of the North-Iceland shelf. *Journal of Quaternary Science* 15, 23-42.
- 22 Caseldine, C., Langdon, P., and Holmes, N., 2006. Early Holocene climate variability and the timing and extent of the Holocene thermal maximum (HTM) in Northern Iceland. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2314-2331.
- 23 Hallsdóttir, M., 1995. On the pre-settlement history of Icelandic vegetation. *Icelandic Agricultural Sciences*, 9, 17-29.
- 24 Hallsdóttir, M., and Caseldine, C., 2005. The Holocene vegetation history of Iceland, state-of-the-art and future research. In: Caseldine, C., Russel, A., Hardardóttir J. & Knudsen, O. (eds.), *Iceland-Modern Processes and Past Environment*, p. 319-334, Elsevier, Amsterdam.
- 25 Hannesdóttir, H., Geirsdóttir, Á., Miller, G., 2006. Setmyndun og vitnsburður fornra jökulhlaupa í Hestvatni. Raunvísindapjng. Háskóli Íslands.
- 26 Jiang, H., Eiriksson, J., Schulz, M., Knudsen, K. L. & Seidenkrantz, M.-S. 2005. Evidence for solar forcing of sea-surface temperature on the North Icelandic shelf during the late Holocene. *Geology* 33(1), 73-76.
- 27 Eiriksson, J., Bartels-Jónsdóttir, H. B., Cage, A. G., Gudmundsdóttir, E. R., Klitgaard-Kristensen, D., Marret, F., Rodrigues, R., Abrantes, F., Austin, W. E. N., Jiang, H., Knudsen, K. L. & Sejrup, H. P. 2006. Variability of the North Atlantic Current during the last 2000 years based on shelf bottom water and sea surface temperature along an open ocean/shallow marine transect in western Europe. *The Holocene* 16, 1017-1029.
- 28 Flowers, G.E., Björnsson, H., Geirsdóttir, Á., Miller, G.H. and Clarke, G.K.C., 2007. Glacier fluctuation and inferred climatology of Langjökull ice cap through the Little Ice Age. *Quaternary Science Reviews* 26, 2337-2353
- 29 Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Ólafsdóttir, K., 2008. A 2000 yr records of climate variations reconstructed from Haukadalavatn, west Iceland. *Journal of Paleolimnology*, 2008 (in review).
- 30 Axford, Y., Miller, G.H., Geirsdóttir, Á. and Langdon, P.G., 2007. Holocene temperature history of northern Iceland inferred

- red from subfossil midges. *Quaternary Science Reviews* 26, 3344-3358.
- 31 Andersen, C., Koç, N. & Moros, M. 2004b. A highly unstable Holocene climate in the subpolar North Atlantic: evidence from diatoms. *Quaternary Science Reviews* 23, 2155-2166.
 - 32 Knudsen, K.-L., and Eiriksson, J., 2002. Application of tephrachronology to the timing and correlation of palaeoceanographic events in Holocene and Lateglacial shelf sediments off North Iceland. *Marine Geology* 191, 165-188.
 - 33 Knudsen, K.L., M.K.B. Søndergaard, J. Eiriksson, H. Jiang. 2008. Holocene thermal maximum off North Iceland: Evidence from benthic and planktonic foraminifera in the 8600–5200cal year BP timeslice. *Marine Micropaleontology* 67, 120–142.
 - 34 North Greenland ice-core project (NorthGRIP) Members, High resolution Climate Record of the 2004. Northern Hemisphere reaching into the last Glacial Intergracial Period. *Nature*, 431, 147-151.
 - 35 Knudsen, K. L., Jiang, H., Jansen, E., Eiriksson, J., Heinemeier, J., Seidenkrantz, M.-S., 2004. Environmental changes off North Iceland during the deglaciation and the Holocene: foraminifera, diatoms and stable isotopes. *Marine Micropaleontology* 50, 273-305.
 - 36 Andrews, J.A., and Giraudeau, J., 2003. Multi-proxy records showing significant Holocene environmental variability: the inner N. Iceland shelf (Húnaflói). *Quaternary Science Reviews*, 22, 175-193
 - 37 Ogilvie, A. E. J. 1991. Climatic changes in Iceland A. D. c. 865 to 1598. Í *The Norse of the North Atlantic* (Presented by G. F. Bigelow). *Acta Archaeologica*, 61, 233-251.
 - 38 Ogilvie, A. E. J. 1996. Sea-ice conditions off the coasts of Iceland A. D. 1601-1850 with special reference to part of the Maunder Minimum period (1675–1715). *AmS-Varia* 25, Archaeological Museum of Stavanger, Norway, 9-12.
 - 39 Ogilvie, A. E. J. 1992. Documentary evidence for changes in the climate of Iceland, A. D. 1500 to 1800. Í R.S. Bradley and P. D. Jones. *Climate Since A.D. 1500*. Routledge. London and New York, 92-117.
 - 40 Ogilvie, A. E. J., L. K. Barlow and A. E. Jennings 2000. North Atlantic climate c. A.D. 1000: Millennial reflections on the viking discoveries of Iceland, Greenland and North America. *Weather* 55, 34-45.
 - 41 Þorvaldur Thoroddsen 1916-1917. *Árferði á Íslandi í þúsund ár*. Hið íslenska fræðafélag, Kaupmannahöfn 1916–1917, 432 s.
 - 42 Páll Bergþórsson 1969a. An estimate of drift ice and temperature in Iceland in 1000 years. *Jökull*, 19, 95–101.
 - 43 T.d. Hjalti J. Guðmundsson 1997. A review of the Holocene environmental history of Iceland. *Quaternary Science Reviews*, 16, 81-92.
 - 44 T.d. Jennings, A. E., S. Hagen, J. Harðardóttir, R. Stein, A.E.J. Ogilvie and I. Jónsdóttir 2001. Oceanographic Change and Terrestrial Human Impacts in a Post AD 1400 Sediment Record from the Southwest Iceland Shelf. *Climatic Change* 48, 83-100.
 - 45 Guðmundur Árnason, 1958 Guðmundur Árnason 1958. Uppblástur og eyðing býla í Landsveit. Í *Sandgræðslan, minnst 50 ára starfs*. s. 50-87. Búnaðarfélagið og Sandgræðslan. Reykjavík.
 - 46 Ólafur Arnalds, Fanney Ósk Gísladóttir og Hjalti Sigurjónsson 2001. Sandy deserts of Iceland: an overview. *Journal of Arid Environments* 47, 359-371.
 - 47 Páll Bergþórsson 1969b. Hafis og hitastig á liðnum öldum. Í Markús Á Einarsson (ritstj.). *Hafisinn*. Almenna bókafélagið. Reykjavík. 333-345.
 - 48 Sigurður Þórarinnsson 1974. Sambúð lands og lýðs í ellefu aldir. Í Sigurður Línal, (ritstj.), *Saga Íslands, 1. bindi*. Hið íslenska bókmenntafélag, Sögufélagið. Reykjavík, 29-97.
 - 49 IPCC 4AR WG1. Kafi 6.6. bls. 466-474.
 - 50 Trausti Jónsson og Hilmar Garðarsson 2001. Early Instrumental Meteorological Observations in Iceland. *Climatic Change* 48, 169-187.
 - 51 Hanna, E., Jónsson T., Ólafsson, J. and Valdimarsson. 2006. H. Icelandic coastal sea-surface temperature records constructed: putting the pulse on air-sea-climate interactions in the northern North Atlantic. Part I: Comparison with HadISST1 open ocean surface temperatures and preliminary analysis of long-term patterns and anomalies of SSTs around Iceland, *J. Climate* 19, pp. 5652-5666,
 - 52 Trausti Jónsson 2003a. Langtímasveiflur II. Úrkoma og úrkomutiðni. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 03010, 29 s.
 - 53 Hurrell, J.W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269, 676-679.
 - 54 Jones, P.D., T. Jónsson, D. Wheeler 1997. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *International Journal Climatology* 17, 1433-1450.
 - 55 Hurrell, W., Y. Kushnir, G. Ottesen, M. Visbeck (eds.) 2003. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact *Geophysical Monograph* American Geophysical Union.
 - 56 Trausti Jónsson 2003c. Langtímasveiflur IV. Illviðrabálfar. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 03020, 44 s.
 - 57 Trausti Jónsson 2004. Sveiflur V. Ský í veðurathugunum í Reykjavík. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 04005, 35 s.
 - 58 Trausti Jónsson 2002. Langtímasveiflur I. Snjöhula og snjókoma. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 02035, 26 s.
 - 59 Hanna, Edward, Trausti Jónsson, Jason E. Box 2006. Recent changes in Icelandic climate. *Weather* 61, 3-9. Til ágiskana á Stykkishólsmshitanum voru notaðar athuganir sem gerðar voru í Reykjavík á árabílinu 1820 til 1845, á Víðivöllum í Skagafirði 1814-1820, Akureyri 1807 til 1814 og Kotmúla í Fljótshlíð 1798 til 1807. Tölur einstakra ára eða árstíða á þessu árabíli eru því í raun mjög óvissar. Talsverður munur er þó á óvissunni fyrir 1830 og eftir þann tíma. Líklegt er þó að tímasetningar hækkandi og lækkandi hita séu réttar, en óvissa meiri um stærð sveiflnanna.
 - 60 Sjá t.d. WGI-AR4 kafi 3.2.2. síðu 241.
 - 61 Hanna, E., T.Jónsson, J.E.Box. 2004. An analysis of Icelandic climate since the nineteenth century. *International J. of Climatology* 24, 1193-2004.
 - 62 Hurrell, J.W. 1995. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269, 676-679.
 - 63 Crochet, P., T. Jóhannesson, T. Jónsson, O. Sigurðsson, H. Björnsson, F. Pálsson and I. Barstad. 2007. Estimating the spatial distribution of precipitation in Iceland using a linear

- model of orographic precipitation. *J. of Hydrometeorol.*, Vol. 8 (6), 1285-1306.
- 64 Hurrell, W., Y. Kushnir, G. Ottesen, M. Visbeck (eds.) 2003. The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact. *Geophysical Monographs* American Geophysical Union.
- 65 Trausti Jónsson 2004. Sveiflur V. Ský í veðurathugunum í Reykjavík. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 04005, 35 s.
- 66 Trausti Jónsson 2002. Langtímasveiflur I. Snjóhula og snjó-koma. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 02035, 26 s.
- 67 Jón E. Wallevik og Hjalti Sigurjónsson 1998. The Koch index: Formulation, correction and extension. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 98035 13 s.
- 68 Vinje, T. 2001. Anomalies and Trends of Sea-Ice Extent and Atmospheric Circulation in the Nordic Seas during the Period 1864-1990. *Journal of Climate* 14, 255-267.
- 69 Trausti Jónsson 2003. Langtímasveiflur VI. Kuldaköst og kaldir dagar. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 03033, 38 s.
- 70 Trausti Jónsson 2003d. Langtímasveiflur V. Hitabylgjur og hlý-ir dagar. *Veðurstofa Íslands. Greinargerð* 03030, 32 s.
- 71 H.Valdimarsson og S.A. Malmberg 1999. Near-surface circulation in Icelandic waters derived from satellite tracked drifters. *Rit Fiskideildar* 16, 23-39.
- 72 U. Stefánsson 1998. *Hafið*. Háskólaútgáfan 1999.
- 73 E.Hanna, T Jónsson, J.Ólafsson og H.Valdimarsson 2006. Icelandic Coastal Sea Surface Temperature Records Constructed: Putting the Pulse on Air-Sea-Climate Interactions in the Northern North Atlantic. Part I: Comparison with HadSST1 Open-Ocean Surface Temperatures and Preliminary Analysis of Long-Term Patterns and Anomalies of SST's around Iceland. *J. of Climate* 19, 5652-5666.
- 74 Anon 2007. Viðauki: Umhverfisþættir í maí-júní 1952-2006. *Þættir úr vistfræði sjávar. Hafrannsóknastofnunin Fjölrit* 130.
- 75 Héðinn Valdimarsson, Höskuldur Björnsson og Kristinn Guðmundsson 2005. Breytingar á ástandi sjávar á Íslandsmiðum og áhrif þeirra á lífríkið. *Þættir úr vistfræði sjávar 2004. Hafrannsóknastofnunin Fjölrit* 116.
- 76 H. Hátún, A.B.Sandoe, H.Drange, B. Hansen og H. Valdimarsson 2005. Influence of the Sub-Polar Gyre on the thermohaline circulation. *Science*, 309. no. 5742, pp. 1841-1844.
- 77 Anon 2007. Nytjastofnar sjávar 2006/2007 Aflahorfur fiskveiðiárið 2007/2008. *Hafrannsóknastofnunin Fjölrit* 129.
- 78 M. Rennen og C. Völksen. The connection of Icelandic Tide Gauges to the National Reference Network. *Landmælingar Íslands* 2000.
- 79 Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, Raunvísindastofnun Háskóla Íslands-Úrvinnsla sjávarfallagagna , sjávarföll og hæg-fara sjávarborðsbreytingar í Reykjavík-gefið út í handriti árið 1991. Endurbætt útgáfa er væntanleg árið 2008.
- 80 S. J. Holgate. 2007. On the Rate of Sea Level Change during the Twentieth Century. *Geophysical Research Letters*. 34, L01 602, doi:10.1029/2006GL028492.
- 81 Talan 2,13 mm á ári kemur frá niðurstöðum bandarísku geimferðastofnunarinnar NASA (www.sideshow.jpl.nasa.gov/mbh/all/REYK.html, skoðað 30. apríl 2008). Nokkur stökk eru í mæliröð fyrir löðrétta hreyfingu lands í Reykjavík vegna breytinga á mælitækjum. Þegar leiðrétt er fyrir þessum breytingum eykst óvissa í reikningum á leitni. Þetta er rætt betur í kafla 4.5 en þar kemur fram að þegar fullt tillit er tekið til óvissu er 3 ±1 mm á ári varlegt mat á landsigi. Rúmlega 2 mm á ári eru rétt innan óvissumarka en tvímælaust í lægra lagi. Samanburður við hnattærnar breytingar á sjávarstöðu styður þó frekar lægra mat en hitt.
- 82 Guðmundur Kjartansson. 1945. Vatnsfallategundir. *Náttúrufræðingurinn*, 15, 113-126.
- 83 Jóna Finndís Jónsdóttir. 2007. Water resources in Iceland: Impacts of climate variability and climate change. *PhD Thesis, Háskólinn í Lundi, Svíþjóð*.
- 84 Freysteinn Sigurðsson o.fl. 2006. Vatnafarsleg flokkun vatnsfalla á Íslandi. *OS Greinargerð FS/JFJ/SGH/THJ-2006/011*. Orkustofnun.
- 85 Jóna Finndís Jónsdóttir. 2008. A runoff map based on numerically simulated precipitation and a projection of future runoff in Iceland. *Hydrological Sciences Journal* 53, 100-111.
- 86 Bergström, S. et al. 2007. Impacts of climate change on river runoff, glaciers and hydropower in the Nordic area. Joint final report from the CE Hydrological Models and Snow and Ice Groups. *CE Report No. 6, The CE Project*, Reykjavík.
- 87 Tómas Jóhannesson o.fl. 2007. Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. *Report OS-2007/011*. Orkustofnun, Reykjavík.
- 88 Crochet, P., T. Jóhannesson, T. Jónsson, O. Sigurðsson, H. Björnsson, F. Pálsson and I. Barstad. 2007. Estimating the spatial distribution of precipitation in Iceland using a linear model of orographic precipitation. *J. Hydrometeorol.*, 8(6), 1285-1306.
- 89 Rögnvaldsson, Ó., P. Crochet and H. Ólafsson. 2004. Mapping of precipitation in Iceland using numerical simulations and statistical modeling. *Meteorol. Zeitschrift*, 13(3), 209-219, doi: 10.1127/0941-2948/2004/0013-0209.
- 90 Sigurjón Rist. 1956. Íslenzk vötn. *Raforakumálastjórn, Vatnamælingar*. Reykjavík.
- 91 Haukur Tómasson. 1981. Vatnsafl Íslands, mat á stærð orkulindar. Erindi flutt á Orkuþingi 1981. Orkustofnun, Reykjavík.
- 92 Jónsdóttir, J. F., P. Jónsson and C.B. Uvo. 2006. Trend analysis of Icelandic discharge, precipitation and temperature series. *Nord. Hydrol.*, 37(4-5), 365-376.
- 93 Jónsdóttir, J. F., C. B. Uvo and R. T. Clarke. 2008. Trend analysis in Icelandic discharge, temperature and precipitation series by parametric methods. *Nord. Hydrol.* (in press).
- 94 Þorsteinn Þorsteinsson. 2008. Afkoma Hofsjökuls 2006-2007. *OS-greinargerð Thor-2008/001*. Helgi Björnsson og Finnur Pálsson 2008 Icelandic Glaciers, *Jökull*, 58 (í prentun).
- 95 Oddur Sigurðsson-Skýrslur um jöklabreytingar í *Jökli*.
- 96 Umhverfisráðuneytið. 2000. Veðurfarsbreytingar og afleiðingar þeirra. Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar, Reykjavík, 34 bls.
- 97 Kristinn Guðmundsson. 1998. Long-term variation in phytoplankton productivity during spring in Icelandic waters. *ICES Journal of Marine Science* 55, 635-643.
- 98 Ólafur S. Ástþórsson, Ástþór Gíslason og Steingrímur Jónsson. 2007. Climate variability and the Icelandic marine ecosystem. *Deep-Sea Research II*, 54, 2456-2477.
- 99 Anon. 2007b. Þættir úr vistfræði sjávar 2006. *Hafrannsóknastofnun Fjölrit* 130, 1-39.
- 100 Hjálmar Vilhjálmsson. 1997. Climatic variations and some ex-

- amples of their effects on the marine ecology of Icelandic and Greenland waters, in particular during the present century. *Rit Fiskideildar* 13, 9-29.
- 101 Hjálmar Vilhjálmsson. 1994. The Icelandic capelin stock. Capelin, *Mallotus villosus* (Müller) in the Iceland - Greenland - Jan Mayen area. *Rit Fiskideildar* 13, 1-281.
 - 102 Unnsteinn Stefánsson og Jakob Jakobsson. 1989. Oceanographical variations in the Iceland Sea and their impact on biological conditions. Í Rey, L. og Alexander, V. (Ed), *Proceedings of the sixth conference of the Comité Arctique International*, 13.-15. maí 1985. E.J. Brill, Leiden, 456-467.
 - 103 Árni Friðriksson. 1948. Boreo-tended changes in the marine vertebrate fauna of Iceland during the last 25 years. Rapport et Proces-verbaux Réunion Conseil International Exploration de la Mer 125, 30-32.
 - 104 Bjarni Sæmundsson. 1934. Probable influence of changes in temperature on the marine fauna of Iceland. *Rapport et Proces-verbaux Réunion Conseil International Exploration de la Mer* 86, 1-6.
 - 105 Sigfús A. Schopka. 1992. Þorskur. Námsgagnastofnun-Haf-rannsóknastofnunin.
 - 106 Sigfús A. Schopka. 1994. Fluctuation in the cod stock off Iceland during the twentieth century in relation to changes in the fisheries and the environment. *ICES Marine Science Symposia* 198, 175-193.
 - 107 Ólafur S. Ástþórsson og Jónbjörn Pálsson. 2006. New fish records and records of rare southern fish species in Icelandic waters in the warm period. 1996-2006. *ICES CM* 2006.
 - 108 Jóhann Sigurjónsson. 2003. Breytingar á ástandi sjávar og af-rakstur fiskistofna: Hvað getum við lært af sögunni? *Fiskifrættir*, 19. des., 38-43.
 - 109 Hjálmar Vilhjálmsson og Alf Hákon Hoel. 2005. Fisheries and Aquaculture, í *ACIA, Arctic Climate Impact Assessment*, 13. kafli bls 691-780 Cambridge University Press.
 - 110 Jón Sólmundsson, Einar Jónsson, Höskuldur Björnsson. 2007. Aukin útbreiðsla skötusels við Ísland. *Náttúrufræðingurinn*, 75, 13-20.
 - 111 Jóhann Sigurjónsson og Erlingur Hauksson. 1994. Sjávarspendýr við strendur Íslands. Í Unnsteinn Stefánsson (ritstj.). Íslendingar, hafið og auðlindir þess. *Vísindafélag Íslendinga. Ráðstefnurit*, 4, 175-203.
 - 112 Bjarni Sæmundsson. 1932. Íslensk dýr II. *Spendýrin (Mammalia islandiæ)*. Reykjavík, 437 bls.
 - 113 Gísli A. Víkingsson, Daniel G. Pike, Geneviève Desportes, Nils Øien, Þorvaldur Gunnlaugsson og Dorete Bloch. 2008. Distribution and abundance of fin whales (*Balaenoptera physalus*) in the Northeast and Central Atlantic as inferred from the North Atlantic Sightings Surveys 1987-2001. *NAMMCO Sci. Publ.* vol. 7 (í prentun).
 - 114 Cook, A.C., D.T. Tissue, S.W. Roberts & W.C. Oechel. 1998. Effects of long-term elevated [CO₂] from natural CO₂ springs on *Nardus stricta*: photosynthesis, biochemistry, growth and phenology. *Plant, Cell and Environment* 21, 417-425.
 - 115 Þ.e. 700 µL CO₂/L, sem er væntanlegur styrkur CO₂ í and-rúmslofti í lok aldarinnar samkvæmt spám IPCC.
 - 116 Sigurdsson, B.D., H. Thorgeirsson & S. Linder. 2001. Growth and dry-matter partitioning of young *Populus trichocarpa* in response to CO₂ concentration and mineral nutrient availability. *Tree Physiology* 21, 941-950.
 - 117 Þetta eru ótvíræðar niðurstöður meistaraverkefnis Christoph Wöll við Tharand háskólann í Dresden í Þýskalandi. Hann hefur gert mælingar á skógarmörkum íslensks birkis á 11 stöðum á landinu.
 - 118 Sigurdsson, B.D. 2001. Environmental control of carbon uptake and growth in a *Populus trichocarpa* plantation in Iceland. *Ph.D. thesis. Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden*.
 - 119 Jónsdóttir, I.S., B. Magnússon, J. Guðmundsson, Á. Elmarsdóttir & H. Hjartarson. 2005. Variable sensitivity of plant communities in Iceland to experimental warming. *Global Change Biology* 11, 553-563.
 - 120 Ólafur Eggertsson & Hjalti J. Guðmundsson. 2002. Aldur birkis (*Betula pubescens* Ehrh.) í Bæjarstaðarskógi. Áhrif veðurfars á vöxt þess og þroska. *Skógræktarritið* 2002, 85-89.
 - 121 Borgþór Magnússon, Björn H. Barkarson, Bjarni E. Guðleifsson, Bjarni P. Maronsson, Starri Heiðmarsson, Guðmundur A. Guðmundsson, Sigurður H. Magnússon & Sigprúður Jónsdóttir. 2006. Vöktun á ástandi og líffræðilegri fjölbreytni úthaga 2005. *Rit Fræðafélags landbúnaðarins* 2006, 221-232.
 - 122 Heiðmarsson, S., Sigurdsson, B.D. & Björnsson, H. 2007. Monitoring plant succession and climate change on Nunataks in the Vatnajökull ice sheet. In: 37th International Arctic Workshop, Program and Abstracts 2007. The Earth Science Institute, University of Iceland, p. 112.
 - 123 Náttúrufræðistofnun Íslands, óbirt gögn.
 - 124 Náttúrufræðistofnun Íslands 2000. Válisti II: Fuglar. Náttúrufræðistofnun Íslands, Reykjavík, 101 bls.
 - 125 Kristján Lillendahl og Jón Sólmundsson 1998. Fæða sex tegunda sjófugla við Ísland að sumarlagi. *Bliki* 19, 1-12.
 - 126 Hafnannsóknastofnunin: <http://www.hafro.is/undir.php?ID=19&REF=3&fID=5984&nanar=1> (skoðað 02.01.08)
 - 127 Óbirt gögn frá Erling Ólafssyni, Náttúrufræðistofnun Íslands.
 - 128 Marin I. Kardjilov, Sigurður Reynir Gíslason & Gudrun Gísladóttir. 2007. Combining riverine and satellite data for monitoring the climate effect on the carbon cycle in NE Iceland. *Goldschmidt Conference Abstracts* 2007. A464.
 - 129 Þórólfur Antonsson & Guðni Guðbergsson. 2006. Áhrif loftslagsbreytinga á fiskistofna í ferskvatni. *Rit Fræðafélags landbúnaðarins* 2006, 95-101.
 - 130 Gunnar Jónsson, Jónbjörn Pálsson & Magnús Jóhannsson. 2001. Ný fiskitegund, flundra, *Platichthys flesus* (Linnaeus, 1758), veiðist á Íslandsmiðum. *Náttúrufræðingurinn* 70, 83-89; Guðmundur Ingi Guðbrandsson 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.
 - 131 Björn Gunnarsson & Þór Heiðar Ásgeirsson. 2006. Sandrækja finnst við Ísland. *Náttúrufræðingurinn* 74, 39-42.
 - 132 Guðrún G. Þórarinsdóttir, Magnús Freyr Ólafsson & Þórður Örn Kristjánsson. 2007. Lostætur landnemi. *Náttúrufræðingurinn* 75, 34-40.
 - 133 Umhverfisráðuneytið. 2000. Veðurfarsbreytingar og afleiðingar þeirra. Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar, Reykjavík, 34 bls.
 - 134 Jóhann Sigurjónsson. 2002. Vistkerfi Íslandsmiða og sjávarútvegur. Ísland. *Atvinnuhættir og menning* 2000, 1, 49-59, Hönnun og umbrot, Reykjavík 2002.

- 135 Jakob Jakobsson. 2000. Sild. *Lífriki Sjávar. Námsgagnastofnun–Hafrannsóknastofnunin*, 8 s.
- 136 Unnsteinn Stefánsson og Jakob Jakobsson. 1989. Oceanographical variations in the Iceland Sea and their impact on biological conditions. Í Rey, L. og Alexander, V. (ritstj.), *Proceedings of the sixth conference of the Comité Arctique International*, 13.-15. maí 1985. E.J. Brill, Leiden, 456-467.
- 137 Sveinn Agnarsson og Ragnar Árnason. 2003. The Role of Fishing Industry in the Icelandic Economy. An Historical Examination. W03:08. *Institute of Economic Studies*, University of Iceland.
- 138 Sjávarútvegsráðuneytið, heimasíða: www.sjavarutvegsgaduneyti.is/.
- 139 Hagstofa Íslands: www.hagstofa.is/Hagtolur/Sjavarutvegur/.
- 140 Hólmgeir Björnsson og 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. Í *The Impact of Climatic Variations on Agriculture. Vol. 1 Assessments in Cool Temperature and Cold Regions* (M. L. Parry, T. R. Carter og N. T. Konijn ritstj.) p. 445-474. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- 141 Hólmgeir Björnsson. 1990. Landbúnaður við breytt veðurfar. *Freyr* 86. árg., 621-624.
- 142 Bjarni E. Guðleifsson, 2004. Heyfengur og kalskemmdir í tún-um á Íslandi á síðustu öld. *Freyr* 100, 29-32
- 143 Jónatan Hermannsson. 2001. Ræktunarbelti á Íslandi. Í *Handbók bænda*. Útg. Bændasamtök Íslands.
- 144 Jónatan Hermannsson. 1993: Kornrækt á Íslandi. Ráðunautafundur 1993, 178-187.
- 145 Haukur Ragnarsson. 1977. Um skógræktarskilyrði á Íslandi. Í: Hákon Guðmundsson o.fl. (ritstj.). *Skógarmál*, 224-247; óbirt gögn Arnórs Snorrasonar á Mógilsá um skógræktarskilyrði á Íslandi.
- 146 Lárus Heiðarsson, Pröstur Eysteinnsson & Brynjar Skúlason. 2004. Hremskemmdir á lerki í Eyjafirði og á Héraði vorið 2003. *Skógræktarritið* 2004. 85-87.
- 147 Guðmundur Halldórsson, Thorarinn Benedikt, Ólafur Eggertsson, Edda S. Oddsdóttir & Hreinn Óskarsson. 2003. The impact of the green spruce aphid *Elatobium abietinum* (Walker) on long-term growth of Sitka spruce in Iceland. *Forest Ecology and Management* 181, 281-287.
- 148 Tómas Jóhannesson o.fl. 2007. Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. *Report OS-2007/011*. Orkustofnun, Reykjavík.
- 149 Þorsteinn Þorsteinsson. 2008. Afkoma Hofsjökuls 2006-2007. *OS-greinargerð Thor-2008/001*
- 150 Jóna Finndis Jónsdóttir. 2007. Water resources in Iceland: Impacts of climate variability and climate change. *PhD Thesis, Háskólinn í Lundi, Svíþjóð*.
- 151 Jónsdóttir, J. F., P. Jónsson and C.B. Uvo. 2006. Trend analysis of Icelandic discharge, precipitation and temperature series. *Nord. Hydrol.*, 37(4-5), 365-376.
- 152 Jónsdóttir, J. F., C. B. Uvo and R. T. Clarke. 2008. Trend analysis in Icelandic discharge, temperature and precipitation series by parametric methods. *Nord. Hydrol.* (in press).
- 153 „Viðbótarorka til Alcoa Fjarðaáls“ frétt í Morgunblaðinu þann 11. apríl 2008.
- 154 Skúli Þórðarson. 2008. Áhrif loftslagsbreytinga á rekstur og byggingu vega á Norðurlöndum. Skýrsla til Rannsóknarsjóðs Vegagerðarinnar vegna vinnu í tækninefnd NVF 41 á tímabilinu 2004-2008.
- 155 Baldur Þ. Þorvaldsson 2004. *Framkvæmdafréttir* 8/04, Vega-gerðin.
- 156 Arnþór Garðarsson 2006. Nýlegar breytingar á fjölda íslenskra bjargfugla. *Bliki* 27:13-22.
- 157 Malmquist, H.J., Th. Antonsson, H.R. Ingvarsson, F. Ingimars-son og F. Árnason 2008. Salmonid fish and warming of shallow lake Ellidavatn in SW-Iceland. *Verh. Internat. Veriein. Limnol.* 30 (í prentun).
- 158 Gunnar Thor Hallgrímsson, Elinborg S. Palsdóttir, Eva Pier, Halfdan H. Helgason, Sveinn Kari Valdimarsson and Pall Hersteinsson 2007. Collapse of Breeding Lesser Black-backed Gulls in Iceland in 2006. Veggspjald á Waterbirds Society Meeting, Barcelona 30. október–3. nóvember 2007.

3. kafli

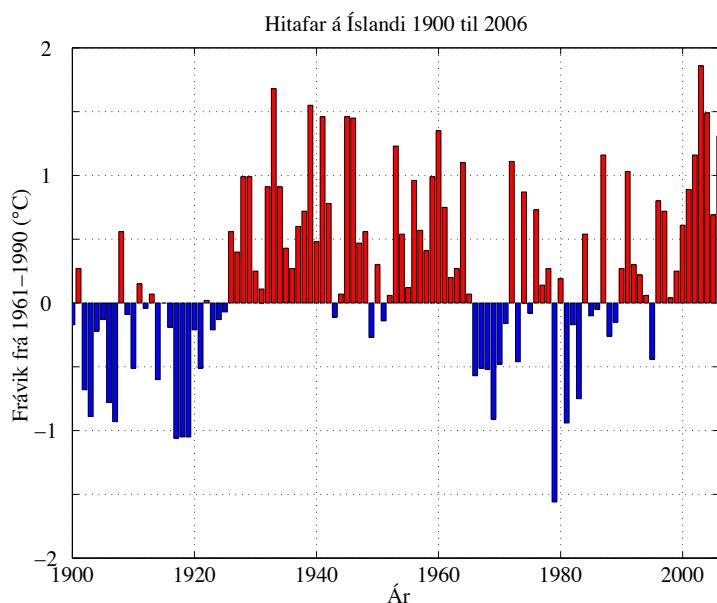
Túlkun sviðsmynda fyrir Ísland

3.0 Inngangur

Mynd 1.8 í kafla 1 sýnir horfur á hlýnun á komandi öld. Myndin sýnir hlýnun s.n. MMD líkana¹, þ.e. meðaltal af niðurstöðum margra loftslagslíkana. Af þessari mynd og sambærilegum myndum² í WGI-AR4 má ráða að meðaltalshlýnun við Ísland verði nærri 0,2°C á áratug, minnst í B1 sviðsmyndinni en meiri í A1B og A2. Í þessum kafla verður rætt um horfur á hlýnun og úrkomubreytingum á Íslandi og nærliggjandi hafsvæðum. Í hliðargreinum er rætt sérstaklega um náttúrulegan breytileika, um svæðisbundinn breytileika og tengsl hans við hafstrauma.

Mynd 3.1 sýnir að á liðinni öld voru verulegar breytingar á hitafari á Íslandi, nokkuð sem einnig má sjá á mynd 2.6 í kafla 2.2. Myndin sýnir tvö kuldatímabil,

annað í upphafi aldarinnar og hitt á síðari hluta hennar. Um miðbik aldarinnar var hlýindaskeið, og aftur í lok hennar. Eftir aldamótin 2000 náði hitafar að verða sambærilegt við það sem gerðist fyrir miðja 20. öldina. Þegar hlýnunin eftir nýliðin aldamót er skoðuð má nota tölfræðilegar aðferðir til þess að greina skammtíma-breytingar frá hægari breytingum og reikna væntigildi³ lofthita fyrir einstök ár. Slíkir útreikningar sýna að væntigildi lofthita á Íslandi árið 2008 er um 1,2°C hærri en meðalhiti árána 1961–1990, en eins og mynd 1 sýnir var það tímabil frekar kalt. Meðalhiti þessara ára er gott mat á væntigildi ársins 1975, svo hlýnunin frá 1975 til 2008 jafngildir því tæplega 0,35°C á áratug. Þessi hlýnun er því tæplega tvöföld sú hlýnun á áratug sem MMD líkönin spá fyrir komandi öld. Líklegt er að hlýnunin á Íslandi síðustu áratugi sé



Mynd 3.1 Hitabreytingar á Íslandi frá 1900. Sýnd eru frávik meðalhita á Íslandi frá meðaltali árána 1961 til 1990. Fyrir 1961 er stuðst við 10 veðurstöðvar, en eftir 1961 er stuðst við rúmlega 40 veðurstöðvar. (Byggt á gögnum frá Veðurstofu Íslands).

3A Náttúrulegur breytileiki og spár um hitafar

Allar spár um hitafar til næstu 100 ára eru settar fram með vikmörkum sem oftast eru frá 5 til 95%. Vikmörkin sýna það bil sem líklegast er að 10 ára meðaltölin liggi á. Ef spáð er hlýnun á bilinu 0,6 til 4,4°C yfir tiltekið tímabil eru þannig 90% líkur á að hlýnun verði innan þessa hitabils.

Vikmörk í spá um hlýnun t.d. í töflu 3.1 endurspeglar dreifingu á niðurstöðum í safni reikniniðurstaðna loftlagslíkana.

Vikmörkin eiga rætur að rekja til tveggja þátta. Í fyrsta lagi er breytileiki ár frá ári innan hvers líkans í MMD safninu og í öðru lagi er hlýnunin ekki jöfn í öllum líkönum.

Breytileiki veðurfars og þar með hitafars er mikill á Íslandi á milli ára og áratuga eins og þróun lofthita á Stykkishólmi á mynd 2.6 sýnir mætavel. Hér á landi eru náttúrulegar sveiflur meðalhita líkast til meiri en sá breytileiki sem fram kemur innan hvers líkans. Mismunur ólíkra líkana veldur samt því að vikmörk geta hæglega rúmað náttúrulega breytileikann, a.m.k. eins og hann var á síðustu öld.

Hér að neðan verður tekið dæmi um mögulegar hitabreytingar á einni veðurstöð. Dæminu er ætlað að sýna

hvernig þessum vikmörkum ber saman við náttúrulegan breytileika hita á Íslandi.

Útbúinn var ímyndaður ferill um þróun hita í Stykkishólmi næstu 100 árin (sjá mynd A.1) að því gefnu að það hlýni um 0,25°C á áratug til loka aldarinnar (sambærileg hlýnun við sviðsmynd A1B) Breytileikinn á milli ára og áratuga er tilbúinn og er sambærilegur við náttúrulegan breytileika í Stykkishólmi á 20. öld. Myndin sýnir dæmi um árshita (stöplarit) og 10 ára meðaltal (rauð lína). Stöplaritið er teiknað sem vik frá jafnri hlýnun (um 0,25°C á áratug) til loka aldarinnar. Einnig eru sýnd vikmörk fyrir árgildi (brotalínur) og 10 ára meðaltöl (findregnar heilar línur). Loks er gefin til kynna spönn vikmarka A1B sviðsmyndarinnar í töflu 3.1 fyrir miðja öldina og lok aldarinnar (lóðréttar línur).

Það er mikilvægt að hafa í huga að hitaferillinn á myndinni er ekki spá heldur dæmi um hitaferil með álíka náttúrulegan breytileika og í Stykkishólmi á 20. öldinni að viðbætti jafnri hlýnun. Myndinni er ætlað að sýna saman árshita, 10 ára meðaltöl og vikmörk. Hún endurspeglar breytileika milli ára og áratuga.



Mynd A.1 Dæmi um samband náttúrulegs breytileika, árgilda, 10 ára meðaltala og vikmarka á stað þar sem hlýnar um 0,25°C á áratug á komandi öld og náttúrulegur breytileiki er álíka og í Stykkishólmi á síðustu öld. Hitaferlar eru ekki spá heldur einungis dæmi um mögulega þróun hitafars í samræmi við ofangreindar forsendur.

Með þessari aðferð þar sem notuð er löng hitaröð íslenskrar veðurathugunastöðvar kemur vel í ljós að spönn vikmarka fyrir árgildin er um tvöfalt stærri en fyrir 10 ára meðaltalsgildin.

Spönn vikmarka í töflu 3.1 nær nokkuð út fyrir vikmörk 10 ára meðaltala, og nálgast spönn vikmarka árgildanna. Þetta bendir til þess að vikmörkin í töflu 3.1 rúmi náttúrulegan breytileika í 10 ára meðaltölum og mismunandi líkön eigi nokkurn þátt í spönn vikmarkanna í töflunni. Sá mikli munur sem er á vikmörkum 10 ára meðaltala og árgilda sýnir að búast má við því að einstök ár kunni að vikja nokkuð frá spánni fyrir 10 ára meðaltölin.

Mikilvægt er að hafa í huga að spönn vikmarka á myndinni tekur ekki til óvissu í langtímahlýnun. Gert er ráð fyrir að hún sé $0,25^{\circ}\text{C}$ á áratug. Það er heldur ekki sjálfgefið að náttúrulegur breytileiki í hlýnandi heimi verði sambærilegur við náttúrulegan breytileika liðinnar aldar. Það er m.a. talsverð óvissa á því hvernig hafstraumakerfi í Norður Atlantshafi þróast á öldinni, eins og rætt er í hliðargrein 3B. Ef breytingar á hafstraumum yrðu meiri en kemur fram í þeim líkönum sem hér eru notuð (MMD) kynnu áratugasveiflur að verða meiri.

Annað eftirtektarvert atriði á mynd A.1 er hversu sveiflukennt 10 ára meðaltalið getur verið. Yfir öldina skiptast á áratugir þar sem hlýnunin er allt að tvöföld meðalhlýnun, og áratugir þar sem kólnar. Þó 10 ára meðaltalið sé ekki hitaspá er þetta eðlilegt. Gera má ráð fyrir að til loka aldarinnar skiptist á skeið hraðari hlýnnunar og kólnunar jafnvel þótt í heildina hlýni til loka aldarinnar.

Tilvísun

- 1 Við gerð myndarinnar var beitt aðferð sem lýst er í Kaplan og Glass *Understanding Nonlinear Dynamics*, Springer-Verlag (1995) til þess að gera 50 þúsund hitaraðir sem höfðu sama náttúrulegan breytileika og hitaröðin frá Stykkishólmi (að frádreginni línulegri leitni). Reiknuð voru vikmörk árshita og 10 ára meðaltala og jafnri hlýnun um $0,25^{\circ}\text{C}$ á áratug bætt við. Myndin sýnir dæmi um eina af hitaröðunum. Þetta dæmi er ekki spá, heldur sýnir einungis mögulega þróun hita í samræmi við ofangreindar forsendur.

bæði vegna náttúrulegs breytileika (afturhvarf frá köldu tímabili) og hlýnnunar vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa.

Líkönin í MMD safninu hafa gróft reikninet. Algengt er að 200–400 km séu á milli reiknipunkta, en með slíkri upplausn þarf einungis örfáa reiknimöskva til þess að þekja algjörlega svæði á stærð við Ísland. Þetta þýðir að einungis er hægt að leggja gróft mat á hitabreytingar á Íslandi og erfitt að leggja mat á breytingar milli ólíkra landsvæða. Til að fá ítarlegri mynd er gjarnan beitt s.n. *niðurkvörðun*, en þá eru frekari upplýsingar notaðar ásamt líkanreikningum til þess að búa til loftslagsspá fyrir afmarkað svæði. Rannsóknir sem byggjast á niðurkvörðun falla í tvo flokka. *Tölfræðileg* niðurkvörðun ber saman veðurathuganir og líkanreikninga fyrir viðmiðunartímabil og notar samanburðinn til þess að endurbæta spána. Í *Aflfræðilegri* niðurkvörðun eru niðurstöður grófs líkans notaðar sem innlagsgögn fyrir líkan sem þekur afmarkað svæði með mun hærri upplausn reikninet (gjarnan um tífalt hærri en í grófa líkaninu).

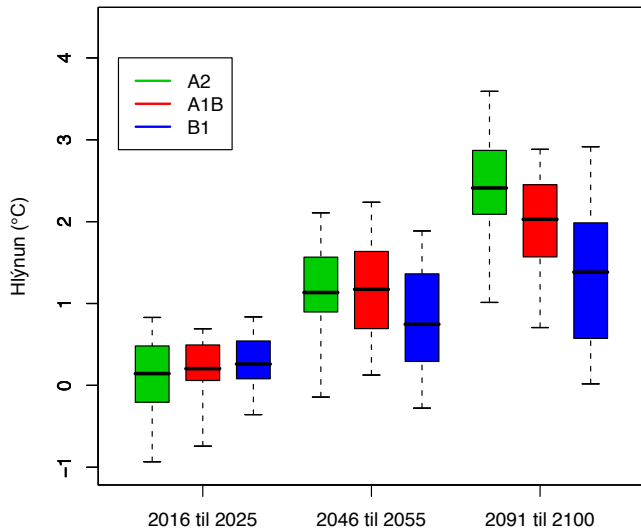
Hér að neðan verða raktar niðurstöður MMD líkananna fyrir svæði sem nær yfir Ísland og nærliggjandi hafsvæði. Þessar niðurstöður verða síðan bornar saman við niðurkvarðanir. Notaðar eru þrjár af sviðsmyndum IPCC, þ.e. A2, A1B og B1. Fyrir A2 eru notaðar niðurstöður 19 líkana, fyrir A1B eru notaðar niðurstöður 23 líkana og fyrir B2 er notuð niðurstöða 21 líkans. Með því að nota þetta mörg líkön fæst mat bæði á líklegri hlýnun og á óvissu matsins.

Skoðaðar verða horfur á hlýnun fyrir þrjú tímabil, 2016–2025, 2046–2055 og 2091–2100. Hlýnunin er reiknuð frá tímabilinu 2001–2015 en miðpunktur þess tímabils er árið 2008. Meðalhiti 2001–2015 í líkönunum er gott mat á væntigildi ársins 2008, og þannig fæst tenging milli þeirra hlýnnunar sem spáð er og þeirrar hlýnnunar sem orðið hefur á undanfönum áratugum.

3.1 Svæðisbundnar breytingar við Ísland

3.1.1 Lofthiti

Í 11. kafla WGI-AR4 er rætt um staðbundnar loftslagsbreytingar fyrir nokkra reiti á yfirborði jarðar. Ísland er á jaðri tveggja reita, s.n. CGI (*Canada-Greenland-Iceland*) reits og ARC (*Arctic*) reits. Fyrri reiturinn nær frá austurhluta Kanada, þekur Grænland og nær austur



Mynd 3.2 Hlýnun á 21. öld við Ísland. Sýnd er hlýnun frá væntigildi ársins 2008. Helmingur af reikniniðurstöðum líkana liggur innan þeirra marka sem kassarnir sýna, en 90% liggur innan þeirra marka sem línurnar afmarka. (Byggt á niðurstöðum MMD líkanasafnsins, sjá tilvísun 1).

fyrir Ísland. Síðari reiturinn nær yfir Norður-heimskautsvæðið og teygir sig suður fyrir Ísland⁴. Eins og gefur að skilja vega breytingar á heimskautasvæðinu þungt í báðum þessum reitum, en breytingar á svæðinu umhverfis Ísland hafa lítið vægi. Fyrir A1B sviðsmyndina er meðaltal árána 2090–2099 þannig 4,9°C hlýrra en meðaltal árána 1980–1999 í ARC reitnum og 4,3 í CGI reitnum. Fyrri talan samsvarar um 0,47°C hlýnun á áratug, seinni talan samsvarar tæplega 0,41°C hlýnun á áratug. Þessar tölur eru tvöfalt hærri en sú 0,2°C hlýnun á áratug sem minnst var á hér að ofan. Ástæðan er sú að hlýnunin á heimskautssvæðinu er mun skarpari en á hafsvæðinu nærri Íslandi og þessir reitir eru því ekki lýsandi fyrir Ísland.

Til þess að fá betra mat á breytingum sem MMD líkōnin sýna í reit sem þekur Ísland og nærliggjandi svæði var reiturinn sem afmarkast af 60°–70°N og 10°–30°V skoðaður sérstaklega. Til þæginda verður þessi reitur hér að neðan kallaður Íslandsreiturinn.

Mynd 3.2 sýnir niðurstöður þessa samanburðar fyrir þrjár sviðsmyndir, en tölulegar upplýsingar eru dregnar saman í töflu 3.1.

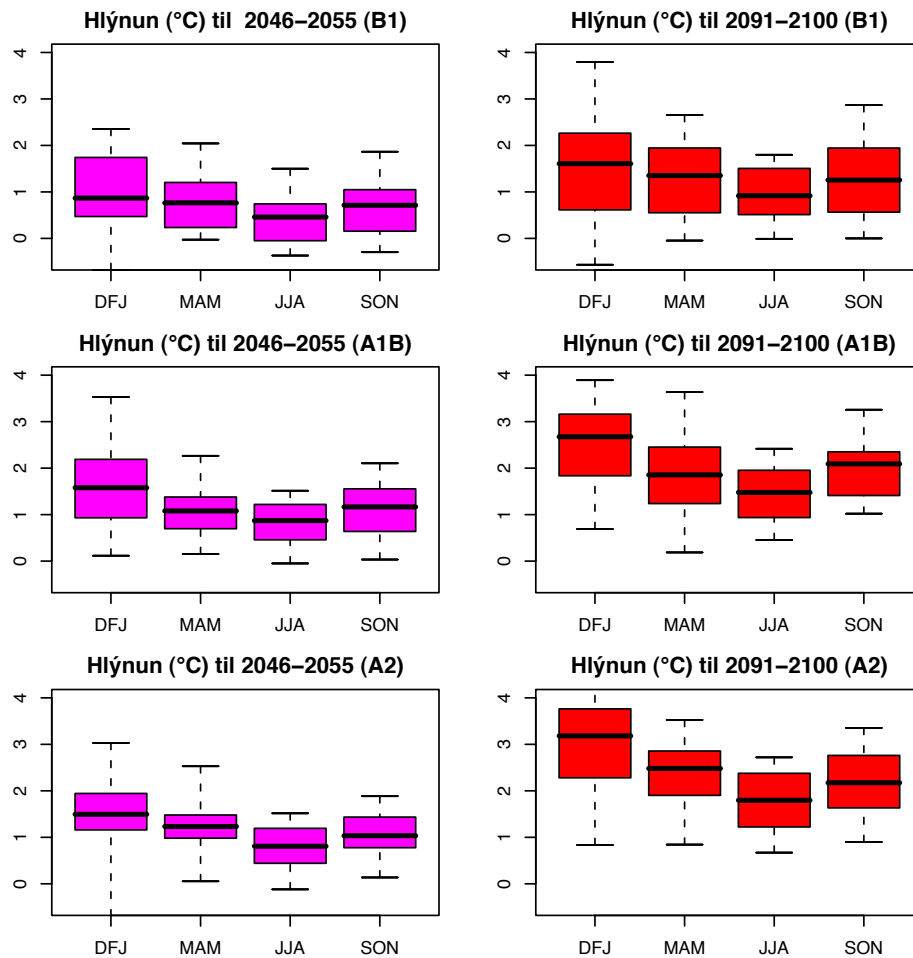
Hlýnun frá 2001 - 2015 (°C)			
Tímabil	10 ára meðaltal	Vikmörk	
		5%	95%]
Sviðsmynd A2			
2016-2025	0,1	-0,9	0,8
2046-2055	1,1	-0,1	2,1
2091-2100	2,4	1,0	3,6
Sviðsmynd A1B			
2016-2025	0,2	-0,7	0,7
2046-2055	1,2	0,1	2,2
2091-2100	2,0	0,7	2,9
Sviðsmynd B1			
2016-2025	0,3	-0,4	0,8
2046-2055	0,8	-0,3	1,9
2091-2100	1,4	0,0	2,9

Tafla 3.1 Hlýnun (°C) í Íslandsreitnum. Taflan byggist á 10 ára meðaltölum MMD líkana fyrir þrjú mismunandi tímabil og sýnir vik frá meðaltali árána 2001–2015. Sýnd eru meðaltöl líkana og einnig 90% vikmörk (það bil sem 90% af 10 ára meðaltölum liggja á).

Mynd 3.2 og tafla 3.1 sýna að sviðsmyndum ber ágætlega saman fram yfir miðja öldina, en á síðari hluta hennar dregur sundur milli þeirra. Þetta þýðir að óvissan í spánni fram að miðbiki aldarinnar er ekki jafnháð forsendum um losun gróðurhúsalofttegunda og á síðari hluta hennar. Meðaltal árána 2016 til 2025 er þannig um 0,2°C hærri en árið 2008 og meðalhlýnunin fram til 2046 til 2055 er rétt tæp 1°C. Vikmörkin spanna nokkuð breitt bil, sérstaklega í lok aldarinnar. Nánar verður rætt um óvissuna í þessari spá hér að neðan.

Hlýnunin til 2091–2100 er á bilinu 1,4°C–2,4°C. Til loka aldarinnar nemur hlýnunin því 0,16°C á áratug í sviðsmynd B1, 0,23°C í A1B og 0,28°C í A2. Ef miðað er við miðja öldina fást álíka tölur (0,17–0,28°C) fyrir hlýnun á hverjum áratug.

Þessum niðurstöðum ber vel saman við niðurstöður rannsókna þar sem beitt er niðurbörðun. Í fyrsta lagi ber þeim vel saman við tölfraðilega niðurbörðun þar sem veðurathuganir á Íslandi og MMD líkōnum var beitt til að betrubæta loftslagsspá sem gerð var með sviðsmynd A1B. Samkvæmt þeirri rannsókn⁵ verður hlýnunin á flestum veðurstöðvum sem skoðaðar voru á Íslandi um 0,2°C á áratug.



Mynd 3.3 Hlýnun í Íslandsreitnum skipt niður eftir árstíðum (DJF=des-feb, MAM=mars - maí o.s.frv.). Sýndar eru niðurstöður fyrir miðbik aldarinnar og lok aldarinnar. Hlýnunin er frá meðaltali 2001 til 2015. (Byggt á niðurstöðum MMD líkanasafnsins, sjá tilvísun 1).

Í öðru lagi ber þessum niðurstöðum ágætlega saman við sviðsmyndir sem gerðar voru með aflfræðilegri niðurvörðun á vegum norræna rannsóknarverkefnisins Climate and Energy og íslenska systurverkefnisins Veður og Orka⁶. Tvær sviðsmyndir voru notaðar, en fyrir Ísland reyndist ekki mikill munur á niðurstöðum þessara tveggja sviðsmynda⁷. Samkvæmt þessum útreikningum verður hlýnun yfir Íslandi frá 1961–1990 til 2071–2099 um 2,8°C eða um 0,25°C á áratug.

Í þriðja lagi má nefna tölfræðilega hitaspá fyrir Reykjavík sem unnin var af Kristjáni Jónassyni⁸. Þar reyndist hlýnun út öldina sambærileg við þá hlýnun sem fæst í sviðsmynd A2 hér að ofan. Þessi rannsókn lagði einnig mat á 90% vikmörk á 10 ára meðaltölum fyrir hitaspár á 21. öldinni. Bera má spönn þessara vikmarka (þ.e.

breidd þess talnabils sem vikmörkin ná yfir) saman við vikmörkin í töflu 1.

Fram yfir miðja öldina er frekar lítill munur á spönn vikmarka í töflu 1 milli ólíkra sviðsmynda. Breidd þess talnabils sem vikmörkin spanna er um 1,2–1,8°C fyrir tímabilið 2015 til 2025 og 2,1–2,3°C fyrir tímabilið 2046–2055. Spannir vikmarka í grein Kristjáns fyrir þessi tímabil eru 1,8° og 2,2°C og falla því vel að niðurstöðunum í töflu 1. Mynd 1 sýnir að dreifingarnar eru frekar samhverfar og því lýsir hálf spönn vikmarka ágætlega óvissumörkum á hlýnuninni.

Rétt er að ítreka að einstök ár geta vikið verulega frá 10 ára meðaltali og því líklegt að stöku ár verði talsvert hlýrrí eða kaldari, en fram kemur að ofan. Nánar er rætt um breytileika milli ára og áratuga í hliðargrein 3A.

Samantekt

- Fram undir miðja öld er talið að hlýna muni um rúmlega 0,2 gráður á áratug. Um miðja öldina nemur hlýnunin 1°C en óvissumörk eru $\pm 1,1^\circ\text{C}$. Þrátt fyrir að óvissumörkin séu álíka mikil og hlýnunin, eru þó yfirgnæfandi líkur á hlýnun.
- Fyrir síðari hluta aldarinnar er hlýnunin háðari sviðsmyndum og liggur á bilinu 1,4 til 2,4°C með líklegri óvissu $\pm 1,0$ til 1,5°C.

3.1.2 Breytingar á árstíðasveiflu hita

Tafla 3.2 og mynd 3.3 sýna hlýnunina fyrir ólíkar árstíðir í Íslandsreitnum. Einungis eru sýndar niðurstöður fyrir miðja öldina og lok aldarinnar, en á tímabilinu 2016 til 2025 er lítill munur á milli árstíða. Taflan sýnir að hlýnunin er meiri að vetrarlagi en að sumarlagi. Munurinn er meiri á síðari hluta aldarinnar en um miðja öldina og mestur í sviðsmynd A2 en minnstur í sviðsmynd B1. Þetta bendir til þess að með hækkandi árshita aukist umframhlýnunin að vetri. Mynd 3.4 sýnir samband hlýnunar á ársgrundvelli og mismunar vetrar og sumarhlýnunar. Á myndinni eru sýndar niðurstöður sviðsmyndanna þriggja fyrir 9 mismunandi 10 ára tímabil á 21. öldinni. Myndin sýnir að mismun-

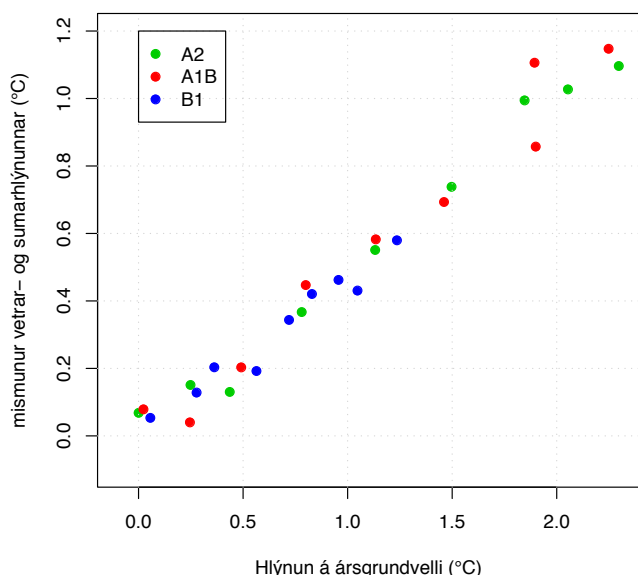
ur vetrar og sumarhlýnunar er að jafnaði um helmingur hlýnunarinnar á ársgrundvelli.

Hlýnun frá 2008 skipt niður á árstíðir				
2046–2055			2091–2100	
	meðal-tal	Vikmörk [5% 95%]	meðal-tal	Vikmörk [5% 95%]
Sviðsmynd A2				
DJF	1,5	[-1,5 3,0]	3,2	[0,8 5,6]
MAM	1,2	[0,1 2,5]	2,5	[0,8 3,5]
JJÁ	0,8	[-0,1 1,5]	1,8	[0,7 2,7]
SÓN	1,0	[0,1 1,9]	2,2	[0,9 3,4]
Sviðsmynd A1B				
DJF	1,6	[0,1 3,5]	2,7	[0,7 3,9]
MAM	1,1	[0,1 2,3]	1,9	[0,2 3,6]
JJÁ	0,9	[-0,1 1,5]	1,5	[0,4 2,4]
SÓN	1,2	[0,0 2,1]	2,1	[1,0 3,3]
Sviðsmynd B1				
DJF	0,9	[-0,7 2,4]	1,6	[-0,6 3,8]
MAM	0,8	[0,0 2,0]	1,4	[-0,0 2,7]
JJÁ	0,5	[-0,4 1,5]	0,9	[0,0 1,8]
SÓN	0,7	[-0,3 1,9]	1,3	[0,0 2,9]

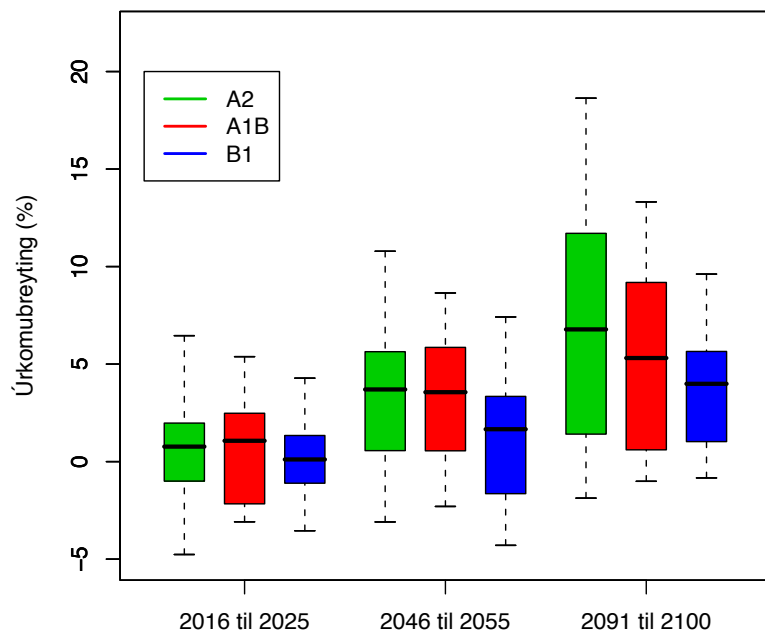
Tafla 3.2. Hlýnun ($^\circ\text{C}$) við Ísland skipt niður á árstíðir. Taflan byggist á 10 ára meðaltölum MMD líkanana fyrir tvö mismunandi tímabil og sýnir vik frá meðaltali árunna 2001–2015 (þ.e. frá væntigildi ársins 2008). Sýnd eru meðaltöl líkana og einnig 90% vikmörk.

Þessum niðurstöðum ber ágætlega saman við niðurstöður verkefnisins Climate and Energy, en þar er spáð mestri hlýnun að vetri til, en minnstri að sumarlagi⁹. Niðurstöðunum í töflu 3.2 ber einnig ágætlega saman við aflfræðilega niðurkvörðun sem unnin var á dönsku veðurstofunni fyrir Grænland og nærliggjandi hafsvæði¹⁰. Í þeirri rannsókn er hlýnunin yfir Íslandi mest að vetrarlagi og á vorin, en minnst á sumrin.

Skipting hlýnunar niður á árstíðir í töflu 3.2 og ofangreindum rannóknum ber hinsvegar ekki saman við aflfræðilega niðurkvörðun sem unnin var á vegum verkefnisins Veður og Orka og rætt var um hér að framman. Í þeim niðurstöðum hlýnaði mest á vorin og haustin, en minnst á sumrin og að vetrarlagi. Í raun eru það vetrarmánuðirnir sem skera sig úr í niðurstöðum VO



Mynd 3.4 Samband hlýnunar á ársgrundvelli og mismunar hlýnunar að vetri til og sumri. Myndin sýnir 10 ára meðaltöl fyrir tímabilin 2006–2015, 2016–2025 o.s.frv. (Byggt á niðurstöðum MMD líkanasafnsins, sjá tilvísun 1).



Mynd 3.5 Úrkomubreytingar (%) í Íslandsreitnum frá 2001-2015. Sjá mynd 3.2 fyrir nánari útskýringar. (Byggt á niðurstöðum MMD líkanasafnsins, sjá tilvísun 1).

verkefnisins, en vikmörkin í töflu 3.2 eru þó nægileg til að rúma þessar niðurstöður.

Vikmörkin í töflu 3.2 spanna stærra bil en vikmörkin í töflu 1, og er bilið stærst fyrir vetrarmánuðina. Fyrir vetrarmánuðina spanna vikmörkin um 3,2–4,8°C, en fyrir sumarmánuðina er spönnin á bilinu 1,6 til 2,0°C og er spönnin meiri á síðari hluta aldarinnar. Gróft mat á óvissu á hlýnun til loka aldarinnar er $\pm 1,5$ – $2,5^\circ\text{C}$ að vetri til, en $\pm 0,5$ – $1,0^\circ\text{C}$ að sumri til.

Í niðurstöðum IPCC kemur fram að umframhlýnun að vetri til er einkennandi fyrir norðlægar slóðir. Ástæður skarprar vetrarhlýnunar á norðlægum slóðum eru m.a. minni útbreiðsla hafíss, og snjóhulu á landi. Einnig benda rannsóknir til þess að draga muni úr tíðni norðanáhlaupa að vetri til og hefur það einnig sín áhrif¹¹.

Samantekt

- Líklegast er að hlýna muni mest að vetrarlagi en minnst á sumrin. Þessi munur nemur að jafnaði um helmingi af hlýnuninni á ársgrundvelli.
- Óvissa er mun meiri fyrir einstakar árstíðir en fyrir árið í heild sinni og er óvissan mest fyrir vetrarmánuðina.

3.1.3 Ársúrkoma

Á Íslandi eru verulegar breytingar á úrkomu milli ára og áratuga, samanber mynd 2.7. Á ársgrundvelli er úrkoma á Íslandi um 1660 mm ef notað er meðaltal áranna 1961–1990. Úrkoma á 20 ára tímabilinu 1981–2000 er 1736 mm sem er 4,6% meira en úrkoma næsta 20 ára tímabils á undan. Ef reiknað er væntigildi úrkomu fyrir árið 2008 er það enn hærra, eða nærri 1850 mm. Í 1. kafla er greint frá því að líklega muni úrkoma aukast víða í heiminum á komandi öld, m.a. norðan við 50° breiddargráðu.

Svæðisbundnar breytingar á úrkomu eru ræddar í 11. kafla AR4-WGI¹². Á sama hátt og gert var fyrir lofthita var úrkomubreytingin í reikniniðurstöðum loftslagslíkana skoðuð sérstaklega fyrir Íslandsreitinn. Sem fyrr var tímabilið 2001–2015 lagt til grundvallar og hlutfallslegar úrkomubreytingar frá meðaltali þess tímabils skoðaðar. Mynd 3.5 og tafla 3.3 sýna horfur á úrkomubreytingum í Íslandsreitnum fyrir sviðsmyndirnar þrjár.

Taflan og myndin sýna að í heildina má gera ráð fyrir að úrkoma aukist á 21. öldinni, en vikmörkin eru veruleg, og í öllum sviðsmyndum má finna líkön þar sem dregur úr úrkomu. Á sama hátt má finna líkön þar sem úrkomuaukningin er mjög mikil. Fram að miðbiki aldarinnar eru úrkomubreytingarnar 2–4% en 4–7% til

3.B Hringrásin í Norður-Atlantshafi og loftslagsbreytingar

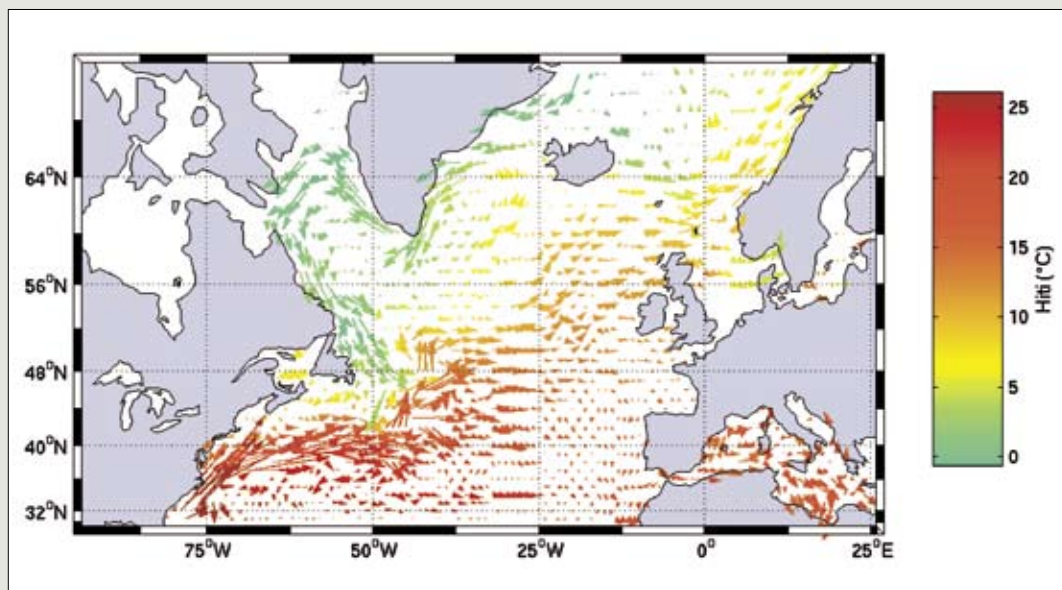
Hitafar á norðlægum slóðum ræðst að verulegu leyti af flutningi varma frá hitabeltinu. Mest af þessum varmaflutningi á sér stað í lofthjúpnun, en hafstraumar skipta einnig verulegu máli. Um nokkurt skeið hefur verið ljóst að veðurfarssveiflur á síðasta jökulsskeiði urðu samfara breytingum á hafhringrásinni í Norður-Atlantshafi. Rætt hefur verið hvort hnattræn hlýnun geti valdið samskonar breytingum á hafhringrásinni í Atlantshafi og dregið úr streymi hlýsjávar norður á bóginn. Stundum er þessi spurning orðuð sem svo: *Er mögulegt að Golfstraumurinn stöðvist eða fari eitthvað annað?*

Til að ræða þetta frekar má skipta hringrásinni Norður Atlantshafi í tvo þætti: láréttan og lóðréttan.

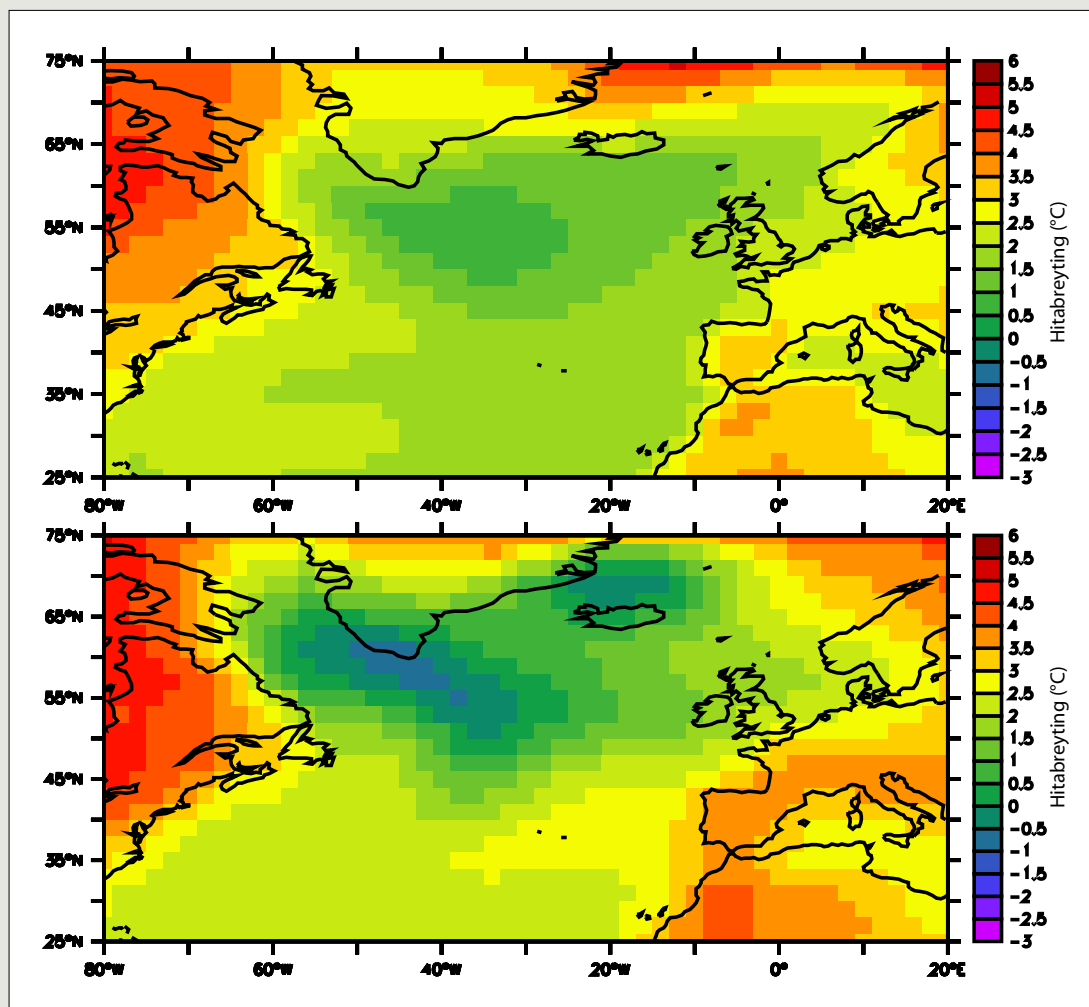
Í yfirborðslögum sjávar ríkja stór hafstraumakerfi sem teygja sig þvert yfir úthöfin. Þessi kerfi flytja hlýsjó yfir á kaldari svæði, og svalan sjó til baka. Mynd B.1 sýnir helstu yfirborðsstrauma í Norður-Atlantshafi¹. Liturinn á örvunum sýnir hitastig sjávarins. Myndin sýnir greinilega hvernig hlýr sjór streymir norður á bóginn meðfram austurströnd Norður-Ameríku. Þessi hafstraumur er hinn eiginlegi Golfstraumur en framhald hans er kallað Norður-Atlantshafsstraumurinn og nær yfir Atlantshafið að strönd Evrópu. Angi af Norður-Atlantshafsstraumnum (Irmingerstraumurinn) teygir sig norður á bóginn út af vesturströnd Íslands og streymir inn á Norðurmið. Myndin sýnir einnig Austur-Grænlandsstrauminn, sem er kaldur straumur sem flæðir suður á bóginn meðfram

strönd Grænlands, inn á Labradorhaf og suður meðfram strönd Nýfundnaland. Angi af honum flæðir austur norðan Íslands og þaðan austur í Noregshaf, en lífsskipti á Norðurmiðum (hitafar og áta) ráðast mjög af hlutfallslegum breytileika á styrk þessara tveggja strauma (sjá nánar kafla 2.4). Allir þessir straumar eru hluti af lárétttri hringrás í Norður-Atlantshafi en samfara henni er verulegur varmaflutningur norður á bóginn. Hringrásin er að miklum hluta vindknúin, sérstaklega má tengja Norður-Atlantshafsstrauminn við ríkjandi vestanáttir í norðurhluta Norður-Atlantshafsins og austanáttir í suðurhlutanum. Ekki eru horfur á að verulegar breytingar verði á ríkjandi vindáttum við Norður-Atlantshaf á komandi öld og því eru miklar breytingar á yfirborðshringrásinni ólíklegar.

Hlýsjórinn sem streymir norður á bóginn er saltari en svalsjórinn og þegar hann kólnar getur hann orðið nægilega þungur til þess að sökkva og mynda djúpsjó. Djúpsjávarmyndun af þessu tagi á sér einungis stað á örfáum stöðum í heimshöfunum, í Norður-Atlantshafi gerist það í Labradorhafi og í Norður-Grænlandshafi². Djúpsjávarmyndunin er hluti af lóðrétttri hringrás hafsins, en djúpsjórinn flæðir djúpt suður Atlantshafið og stór hluti hans leitar ekki upp á yfirborðið fyrr en í Suðurhöfum, eða jafnvel í Kyrrahafi. Á Norður-Atlantshafsvæðinu getur dregið úr varmaflutningi norður á bóginn ef djúpsjávarmyndunin minnkar. Vísbendingar eru um að á síðasta jökulsskeiði hafi breytingar á djúpsjáv-



Mynd B.1 Yfirborðsstraumar í Norður Atlantshafi. Litaskalin sýnir yfirborðshita sjávar. (Sjá tilvísun 1).



Mynd B.2 Hitabreytingar við Norður Atlantshaf á tímabilunum 2001–2015 og 2090–2099 í sviðsmynd A1B. Efri myndin sýnir meðaltal MMD líkananna, en neðri myndin sýnir hitabreytingar í líkani þar sem styrkur lóðréttu hringrásarinnar minnkaði um nærri 30% á umræddu tímabili. (Byggt á niðurstöðum MMD líkanasafnsins, sjá tilvísun 5).

armyndun gerst hratt (afleiðingar komið fram á nokkrum árum) og því skoðaði IPCC sérstaklega hvort líklegt væri að lóðréttu hringrásin myndi stöðvast skyndilega³.

Byggt var á mælingum á styrk lóðréttu hringrásarinnar í Atlantshafi, og MMD líkönunum. Líkönin náðu ekki öll að herma eftir lóðréttu hringrásinni svo viðunandi væri, en meðal þeirra líkana sem á annað borð náðu því var ekkert líkan þar sem hringrásin stöðvaðist skyndilega. Í líkönunum dró yfirleitt úr styrk lóðréttu hringrásarinnar á 21. öldinni, mest minnkaði hún um 50% til loka aldarinnar, en að jafnaði um helmingi minna. Rannsóknir sem birtar hafa verið eftir að fjórða úttekt IPCC kom út styðja þessa niðurstöðu⁴.

Áhrif þess að það dragi úr styrk lóðréttu hringrásarinnar má sjá á mynd B.2. Myndin sýnir meðalhlýnun

MMD líkananna og til samanburðar hitabreytingar í líkani⁵ þar sem styrkur lóðréttu hringrásarinnar minnkaði um 30%. Að meðaltali hlýnar um 2°C við Ísland, en ef dregur úr lóðréttu hringrásinni er hlýnunin um 1°C. Á hafsvæðinu suðvestur af Grænlandi kólnar samfara hægari lóðréttu hringrás hafsins. Sá kuldapollur er þó staðbundinn og nær ekki til Íslands. Til þess að kuldapollurinn teygir sig til Íslands þarf lóðréttu hringrásin að minnka um ríflega 50%, en þá yrði væg kólnun á Íslandi til loka aldarinnar. Sú kólnun yrði þó ekki meiri en svo að á Íslandi yrði svipað hitafar og ríkti á síðasta fjórðungi 20. aldar.

Svæðið suðvestur af Grænlandi sem kólnar á mynd B.2 má einnig sjá á mynd 1.3 en það er eitt af örfáum svæðum á jörðinni þar sem kólnaði á 20. öldinni. Þetta er einnig nánast eina svæðið á jörðinni þar sem líkönum ber illa saman um hlýnun næstu aldar⁶.

Niðurstaðan er því sú að mjög ólíklegt sé að lárétt yfirborðshringrás Norður Atlantshafsins muni raskast verulega á 21. öldinni. Golfstraumurinn og Norður Atlantshafsstraumurinn munu því enn verða til staðar í lok aldarinnar. Líklegt er að lóðréttu hringrásin minnki eitthvað en afar ólíklegt er að hún stöðvist skyndilega. Þessi þáttur eykur þó óvissu um hlýnun á Íslandi á komandi öld. Vikmörkin á hlýnun (sjá töflu 3.1 og mynd 3.2 í kafla 3) fyrir Íslandsreitinn taka tillit til þessa.

Tilvísanir

- 1 Mynd 1 byggir á mælingum sem gerðar voru með rekduflum. Myndin sýnir hringrásina einungis í grófum dráttum, og endurspeglar ekki vel hafstrauma á jaðarhafs svæðum eða strandstrauma. Lesa má um gögnin í grein Lumpkin, R. og Z. Garraffo. 2005. Evaluating the Decomposition of Tropical Atlantic Drifter Observations. *Journal of Atmos. and Oceanic Techn.*, 22, 1403-1415.
- 2 Lesa má um lárétta hringrás hafsins og um djúpsjávarmyndun í kafla 22 í bók Unnsteins Stefánssonar. 1994. *Haffræði II Háskólaútgáfan*.
- 3 Umræðu um breytingar á lóðréttri hringrás hafsins í Atlantshafi má finna í kafla 10.3.4 (sjá sérstaklega mynd 10.15) og klausu 10.1 í WGI-AR4.
- 4 Í grein Schneider ofl. 2007. Evaluation of Different Methods of Assess Model Projection of the Future Evolution of the Atlantic Meridional Overturnin Circulation. *Journal of Climate* 20: 2121–2132, kemur fram að ýmsar ólíkar aðferðir benda allar til þess að 25–30% samdráttur sé líklegastur. Samkvæmt Drijfhout ofl. 2007. Detecting Atlantic MOC changes in an Ensemble of Climate Change Simulation. *Journal of Climate* 20: 1571–1582, mun þurfa að fylgjast með lóðréttu hringrásinni í 3–4 áratugi til að hægt verði að kveða úr um hvort samdráttur sé að eiga sér stað.
- 5 Notað var MIUB-ECHO líkanið á mynd 2 en það líkan nær ágætlega að herma eftir lóðréttu hringrásinni. Í þessu líkani dregur úr lóðréttu hringrásinni um 30% milli áranna 2001–2015 og 2090–2099 og er það skarpari samdráttur en að jafnaði í öðrum líkönum, en þó ekki svo að óeðlilegt megi þykja.
- 6 Mynd 10.9 í WGI-AR4 sýnir bæði sumar- og vetrarhlýnun í MMD líkönum fyrir sviðsmynd A1B. Myndin sýnir einnig að svæðið suðvestan við Grænland er nánast eina svæðið á jörðinni þar sem líkön eru ekki sammála um hlýnunina.

Úrkomubreytingar frá 2001 - 2015 (%)		
Tímabil	10 ára meðaltal	Vikmörk [5% 95%]
Sviðsmynd A2		
2016-2025	0,8	[-4,8 6,5]
2046-2055	3,7	[-3,1 10,8]
2091-2100	6,8	[-1,9 18,6]
Sviðsmynd A1B		
2016-2025	1,1	[-3,1 5,4]
2046-2055	3,6	[-2,3 8,6]
2091-2100	5,3	[-1,0 13,3]
Sviðsmynd B1		
2016-2025	-0,1	[-3,5 4,3]
2046-2055	1,7	[-4,3 7,4]
2091-2100	4,0	[-0,8 9,6]

Tafla 3.3. Úrkomubreytingar í Íslandsreitnum. Sjá töflu 1 fyrir nánari útskýringu.

loka aldarinnar. Þessar tölur eru sambærilegar við þær úrkomubreytingar sem orðið hafa á Íslandi á undanförmum áratugum. Að meðaltali er úrkomaukning sambærileg í sviðsmyndum A2 og A1B, en minnst í B1.

Mynd 3.6 sýnir samband úrkomubreytinga og hlýnnar. Greinilegt er að með aukinni hlýnun eykst úrkoman. Nærri lætur að fyrir einnar gráðu hlýnun aukist úrkoman um 2%–3%. Á heimskautasvæðum norðursins er sambærilegt hlutfall um 5%, en fyrir heiminn í heild sinni er líklegt að úrkoma aukist um 1,2% fyrir hverja gráðu sem hlýnar¹³.

Til loka aldarinnar samsvarar aukningin 0,5% til 0,8% á áratug en 0,3% til 0,9% á áratug fyrir miðja öldina. Tölfræðileg niðurskoðun¹⁴ fyrir veðurstöðvar á Íslandi með A1B sviðsmyndinni gaf aukningu frá 0,2% til 0,9%, mest suðaustanlands. Aflfræðileg niðurskoðun á vegum rannsóknarverkefnisins Veður og Orka gaf 0,6% aukingu á áratug¹⁵. Niðurstöðum í töflu 3.3 og á mynd 3.5 ber því vel saman við aðrar rannsóknarniðurstöður, þó óvissumörkin séu veruleg í öllum tilfellum.

Samantekt

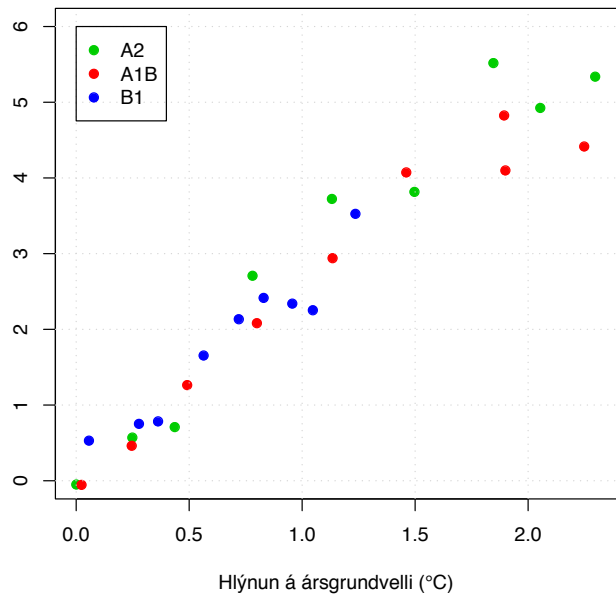
- Líklegast er að úrkoma aukist þegar á líður öldina. Að meðaltali er aukning úrkomu á bilinu 0,4% –0,8% á áratug, eða 2–3% fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Sambærilegar breytingar hafa átt sér stað á undanföllum áratugum.
- Þótt úrkoma aukist í flestum líkönum í MMD safninu ber líkönum ekki saman um hversu mikið úrkoma eykst og er óvissan því veruleg.

3.1.4 Breytingar á árstíðasveiflu úrkomu

Mynd 3.7 sýnir að á Íslandi er úrkoma að jafnaði meiri að vetri til en sumri¹⁶. Úrkoma er minnst á vorin og snemma sumars. Tafla 3.4 og mynd 3.8 sýna úrkomubreytingar í Íslandsreitnum skipt niður á árstíðir. Fram á miðbik aldarinnar er ákaflega lítill munur á úrkomubreytingum ólíkra árstíða, sérstaklega ef tekið er tillit til stórra vikmarka. Til loka aldarinnar er útlit fyrir að úrkoma aukist meira að sumarlagi en að vetri til.

Úrkomubreytingar frá 2008 skipt niður á árstíðir				
	2046–2055		2091–2100	
	meðal-tal	Víkmörk [5% 95%]	meðal-tal	Víkmörk [5% 95%]
Sviðsmynd A2				
DJF	3,9	[-7,6 12,9]	3,7	[-11,0 16,5]
MAM	2,6	[-9,8 14,4]	5,6	[-5,1 17,1]
JJÁ	3,1	[-8,6 12,6]	11,0	[-1,6 25,3]
SÓN	5,1	[-1,8 13,9]	8,9	[-3,0 26,1]
Sviðsmynd A1B				
DJF	3,1	[-7,3 17,4]	3,6	[-5,8 14,4]
MAM	2,8	[-5,4 9,6]	4,0	[-6,5 13,8]
JJÁ	4,0	[-9,8 17,4]	8,0	[0,0 19,0]
SÓN	4,7	[-0,8 12,2]	7,2	[-0,7 15,3]
Sviðsmynd B1				
DJF	-0,5	[-10,3 9,9]	1,3	[-8,7 11,7]
MAM	2,1	[-8,0 13,1]	5,6	[-3,2 16,4]
JJÁ	3,9	[-5,4 20,1]	6,0	[-4,7 17,2]
SÓN	2,0	[-4,2 7,4]	4,0	[-3,6 10,7]

Tafla 3.4 Úrkomubreytingar (%) við Ísland skipt niður á árstíðir. Taflan byggist á 10 ára meðaltölum MMD líkanana fyrir tvö mismunandi tímabil og sýnir hlutfallslega breytingu frá meðaltali árunna 2001–2015. Sýnd eru meðaltöl líkana og einnig 90% víkmörk.



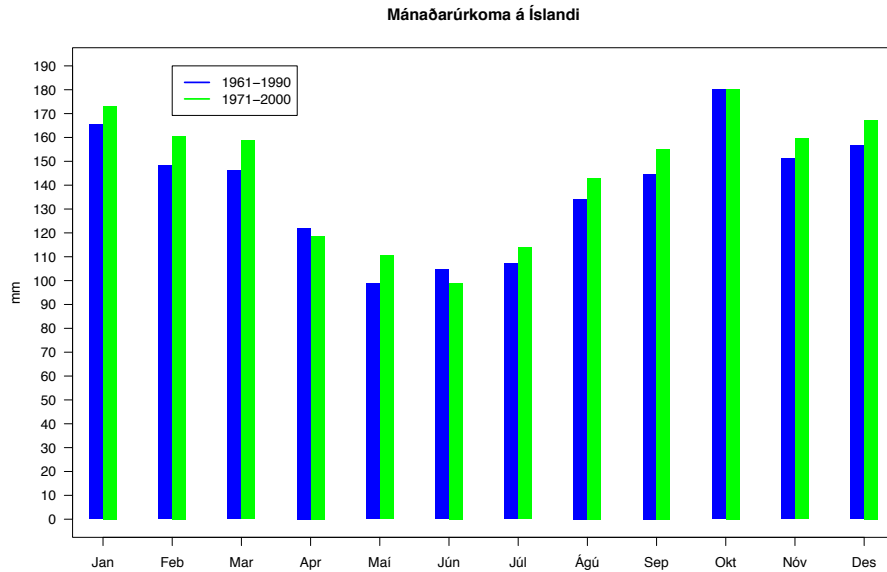
Mynd 3.6 Samband hlýnunnar og úrkomubreytinga. Myndin sýnir 10 ára meðaltöl fyrir tímabilin 2006–2015, 2016–2025 osfrv. (Byggt á niðurstöðum MMD líkana-safnsins, sjá tilvísun 1).

Þessi breyting á árstíðasveiflu er ólík þeirri breytingu sem sjá má í niðurkvörðun sem unnin var á vegum Climate and Energy, en þar er ekki spáð jafnmikilli úrkomuaukningu að sumarlagi¹⁷. Samkvæmt niðurkvörðun sem unnin var á vegum verkefnisins Veður og Orka¹⁸ er aukning úrkomu mest á haustin en minnst að sumarlagi.

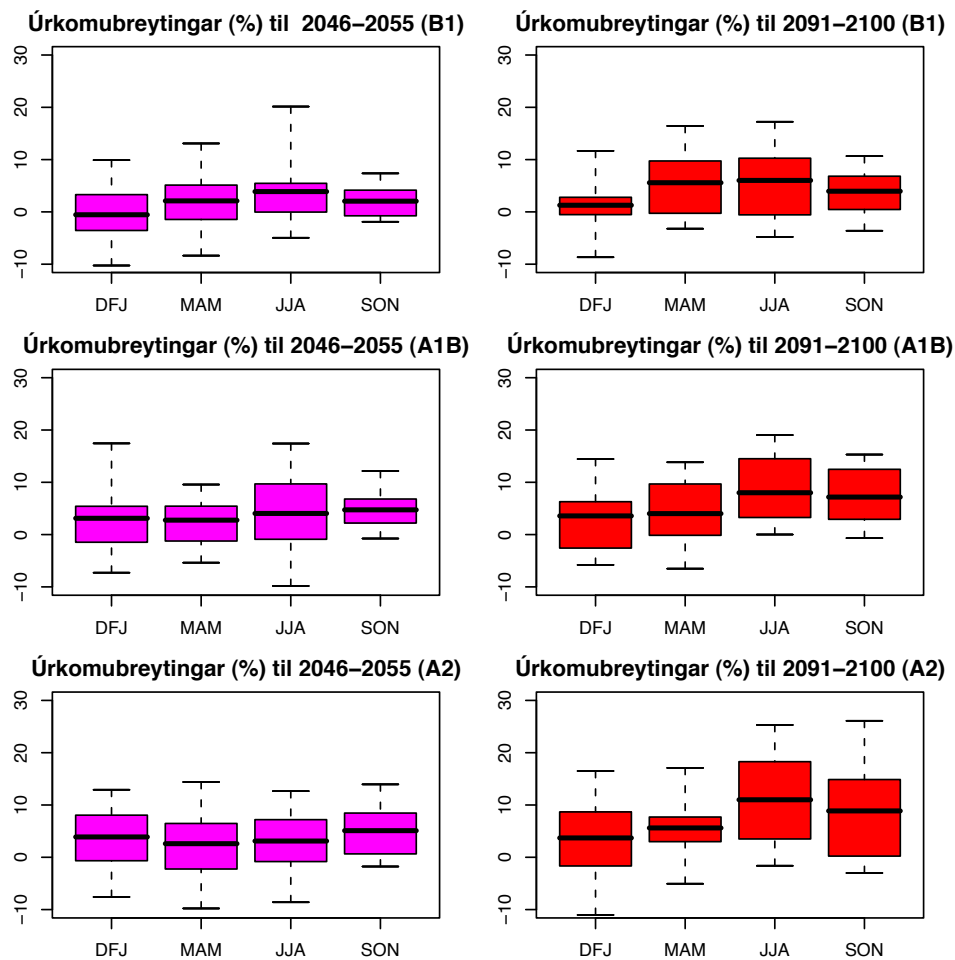
Víkmörkin í töflu 3.4 spanna mjög stórt bil, og fyrir allar árstíðir má finna líkón þar sem dregur úr úrkomu. Þó mismunur milli árstíða sé tölfræðilega marktækur á síðari hluta aldarinnar, ber niðurstöðum um að úrkoma aukist meira að sumri til en vetri ekki saman við aðrar niðurkvarðanir fyrir Ísland.

Samantekt

- Vísbendingar eru um að úrkoma muni aukast meira að sumarlagi en að vetralagi.
- Óvissa í niðurstöðum er hinsvegar veruleg, og líkönum ber ekki alfarið saman um aukningu.



Mynd 3.7 Mánaðarúrkoma á Íslandi fyrir tvö þrjátíu ára tímabil. (Byggt á gögnum frá Veðurstofu Íslands, mynd Philippe Crochet).



Mynd 3.8 Breytingar á úrkomu eftir ársíðum (DJF=des-feb, MAM=mars - maí osfrv). Sýndar eru hlutfallslegar breytingar frá meðaltali árunna 2001 til 2015. Sýndar eru niðurstöður fyrir miðbik aldarinnar og lok aldarinnar. (Byggt á niðurstöðum MMD líkanasafnsins, sjá tilvisun 1).

3.2 Breytingar á öðrum veðurtengdum þáttum

Í fjórðu skýrslu milliríkjanefndarinnar er einnig fjallað um ýmsa veðurtengda þætti. Hér verður stuttlega rætt um breytingar á þeim þáttum sem tengjast veðurfari á Íslandi. Ekki er byggt á greiningu MMD líkananna fyrir Íslandsreitinn heldur byggt á umfjöllun í fjórðu skýrslunni auk annarra heimilda.

Eins og áður hefur komið fram er líklegast að úrkoma aukist á Íslandi á komandi öld. IPCC hefur einnig lagt mat á breytingar á ákefð úrkomu, þ.e. hversu mikil úrkoma fellur í hvert skipti¹⁹. Breytingar í ákefð úrkomu geta verið á skjön við breytingar á úrkomumagni, þannig kemur fram í kafla 1 að tíðni steypiregns mun líklega aukast jafnvel á svæðum þar sem í heildina dregur úr úrkomu. Á norðlægum slóðum er þó gert ráð fyrir aukningu bæði á heildarúrkomu og úrkomuákefð. IPCC leggur einnig mat á fjölda þurra daga, þ.e. daga þar sem engrar úrkomu verður vart. Á norðlægum slóðum er gert ráð fyrir að slíkum dögum muni fækka.

Reynsla tímabilsins 1925 til 2005 bendir til þess að snjóhula minnki um 3 til 4 vikur fyrir hvert stig í hækkun hita í byggð, en um 3 vikur í 500 til 700 m hæð í fjöllum. Snjór verður óverulegur fari meðalhiti ársins á

láglandi yfir 7 stig. Hækki meðalhiti um meira en 3 stig (miðað við væntihita 2008, 4,2°C miðað við 1961–1990) verður snjóhula í fjöllum (í 500 til 700 metra hæð) svipuð og hún er á láglandi nú²⁰.

IPCC ræðir einnig breytingar á tíðni kuldakasta að vetrarlagi (sem stafa af norðanáhlauptum). Slíkum atburðum mun líklega fækka á komandi öld. Jafnframt þessu er líklegt að á sumrin verði hitabylgjur algengari²¹.

Niðurstöður margra rannsókna benda til þess að brautir lægða geti færst norður á bóginn á 21. öldinni²². Á Norður-Atlanshafi liggja lægðabrautir frá austurströnd Norður Ameríku, fyrir sunnan Grændland og út á Atlantshafið. Gangur lægða nærri Íslandi er fyrir vikið tíður. Staðsetning Grænlands setur því mörk hversu mikið norður á bóginn lægðabrautir í nágrenni þess geta færst, en eigi að síður er ekki hægt að útiloka tíðari lægðagang nærri Íslandi. Niðurstöðum ber þó ekki saman um hvar á norðurhveli lægðagangur aukist mest, og hvort lægðir verði tíðari nærri Íslandi²³.

Samantekt

- Líklegt er að úrkomuákefð aukist og dögum án úrkomu fækki.
- Líklegt er að kuldaköstum að vetri fækki en hitabylgjum að sumri fjölgi.
- Líklegt er að snjóhula að vetri minnki.

Tilvísanir

- 1 MMD (e. *multi model data set*) er safn reikniniðurstaðna loftslagslíkana. Niðurstöðurnar voru notaðar við gerð fjórðu úttektar IPCC. Lýsingu á þessum líkönum má finna í töflu 8.1 í WGI-AR4, og í kafla 10.1 er rætt um helstu útreikninga (s.n. reikni-tilraunir) sem gerðar voru með þessum líkönum og notaðar í fjórðu úttekt IPCC.
- 2 Sjá sérstaklega mynd 10.8 í WGI-AR4. Á þessari mynd er hlýnunin við Ísland á 100 ára tímabilinu frá 1980–1999 til 2080–2099 um 1,5–2°C fyrir B1 en 2–2,5°C fyrir A1B og A2. Hlýnunin er því um 0,2°C á áratug minnst í B1 en meiri í A1B og A2.
- 3 Í því samhengi sem hér um ræðir má segja að *væntigildið* sé sá hiti sem búast má við, - að frátöldum skammtíma sveiflum. Aðferð til að meta væntigildi hita er lýst í Kristján Jónasson (2003) Spá um meðalhita í Reykjavík 2004–2035. *Greinargerð Veðurstofu Íslands*. VÍ 03041. 19s.
- 4 Sjá myndir 11.11 og 11.18 í WGI-AR4. Hlýnun og úrkomubreytingar fyrir A1B sviðsmyndina má sjá í töflu 11.1.
- 5 Benestad. 2005. Climate change scenarios for northern Europe from multi model IPCC AR4 climate simulations. *Geophys. Res. Lett.* 32:L17704 doi:10.1029/2005GL023401.
- 6 Fenger J. ritstj. 2007. Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources—Their role in the Nordic Energy System. *Norræna ráðherranefndin*. NORD 2007:003.
- 7 Niðurstöður VO verkefnisins byggðu á sviðsmyndum B2 og A2 og voru niðurkvarðaðar með líkönum sem höfðu um 55 km upplausn. Sjá nánar í skýrslu eftir Tómas Jóhannesson ofl. 2007. Effects of climate change on hydrology and hydro resources in Iceland. *Orkustofnun skýrsla* OS2007/011.
- 8 Kristján Jónasson (2004) Spá um meðalhita í Reykjavík á 21. öld. *Tímarit um raunvísindi og stærðfræði* 2.árg 2.hefti bls. 25–40.
- 9 Sjá mynd 4.8 í Fenger (2007; tilvísun 6)
- 10 Stendel M. ofl. 2007. Regional climate change for Greenland and surrounding seas. Part I: Atmosphere and land surface. *Danish Climate Centre Report* 07-02.
- 11 Hlýnun á 21. öld er rædd í kafla 10.3. 2 WGI-AR4. Mynd 10.9 í kaflanum sýnir kort af vetrar- og sumarhlýnun. Rætt er um orsakir umframhlýnunar að vetri í grein 10.3.2.1 og rætt er um kuldaköst að vetri í grein 10.3.6.2.
- 12 Tafla 11.1 í WGI-AR4 sýnir m.a. úrkomubreytingar frá 1980–1999 til 2090–2099 samkvæmt útreikningum sem gerðir eru með sviðsmynd A1B.
- 13 Samband úrkomuaukningar og hlýnunar á Norður Heimskaustasvæðinu (í ARC reitnum) má sjá á mynd 11.20 í AR4-WGI, en hnattræna úttekt á úrkomubreytingum má lesa um í grein Sun ofl. 2007. How often will it rain? *Journal of Climate*, 20, 4801-4818.
- 14 Sjá umfjöllun í tilvísun 5.
- 15 Sjá umfjöllun í tilvísun 7.
- 16 Ítarlega umfjöllun um árstíðasveiflu úrkomu yfir Íslandi og nýlegar úrkomubreytingar má lesa í Chrochet P. 2007. A study of Regional Precipitation Trends in Iceland Using a High-Quality Gauge Network and ERA-40 *Journal of Climate* 20, 4659–4677.
- 17 Sjá mynd 4.8 í Fenger (2007; tilvísun 6).
- 18 Sjá mynd 17 í VO skýrslunni (tilvísun 7).
- 19 Fjallað er um breytingar á ákefð úrkomu og fjölda þurra daga í grein 10.3.6.1 í WGI-AR4. Sjá einnig mynd 10.18.
- 20 Sjá umfjöllun í Trausti Jónsson. 2001. Langtímasveiflur I. Snjóhula og snjócoma. *Veðurstofa Íslands, greinargerð VÍ-02035 (ÚR23)* 26pp. Þessar niðurstöður hafa nýlega verið uppfærðar og hér er byggt á þessum nýlegri upplýsingum.
- 21 Rætt er um breytingar á kuldaköstum að vetri til og hitabylgjum að sumri í grein 10.3.6.2 í WGI-AR4. Hitabylgja er skilgreind sem skeið nokkurra óvenjulega heitra daga. Sjá einnig mynd 10.19.
- 22 Fjallað eru um breytingar á lægðagangi og ölduhæð í grein 10.3.6.4 í WGI-AR4.
- 23 Sjá umfjöllun í Pinto, JG, U. Ulbrich, GC. Leckebusch, T. Spanghel, M. Meyers and S. Zacharias, 2007, Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM, *Climate Dynamics*, 29, 195-210 og í Debernard, Jens Boldingh, Lars Petter Røed. 2008. Future wind, wave and storm surge climate in the Northern Seas: a revisit, *Tellus A* 60 (3) , 427–438.

4. kafli

Afleiðingar loftslagsbreytinga á Íslandi

4.0 Inngangur

Þessi kafli fjallar um afleiðingar loftslagsbreytinga á Íslandi. Rakin verða líkleg áhrif á flesta þeirra náttúru- og samfélagsþátta sem fjallað er um í öðrum kafla. Fyrst er þó mikilvægt að benda á að loftslagsbreytingar eru alþjóðlegt vandamál. Komi breytingar illa niður á einstökum svæðum eða þjóðlöndum er líklegt að óbeinna áhrifa þaðan gæti um allan heim, einnig á svæðum þar sem bein áhrif eru lítil eða aðlögunarhæfni mikil. Í fyrri skýrslu Vísindanefndar var fjallað um hið alþjóðlega samhengi loftslagsbreytinga. Bent var á að gera verði ráð fyrir því að aukinn þrýstingur verði á búferlaflutninga frá svæðum þar sem tjón vegna loftslagsbreytinga verður mest til þeirra svæða sem bjóða upp á betri búsetuskilyrði. Í þessu tilliti er líklegt að horft verði til iðnvæddra norðlægra landa þar sem minna er um skaðlegar afleiðingar loftslagsbreytinga og þar sem aðlögunarhæfni er góð.

Á síðustu árum hefur umræða um siðfræðileg atriði tengd loftslagsbreytingum farið vaxandi¹. Eins og kemur fram í fyrsta kafla munu afleiðingar loftslagsbreytinga verða verstar hjá fátækum þjóðum með litla aðlögunarhæfni, þjóðum sem ekki eru valdar að aukningu gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpunum. Meðal leiða til að takast á við þetta ósamræmi er stofnun alþjóðlegra hjálparsjóða til að fjármagna aðlögun í fátækum ríkjum. Dæmi um slíkan sjóð er aðlögunarsjóður á vegum Rammasamnings Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar².

Rétt er einnig að minnast þess að loftslagsbreytingar af mannavöldum eru aðeins hluti af þeim breytingum sem

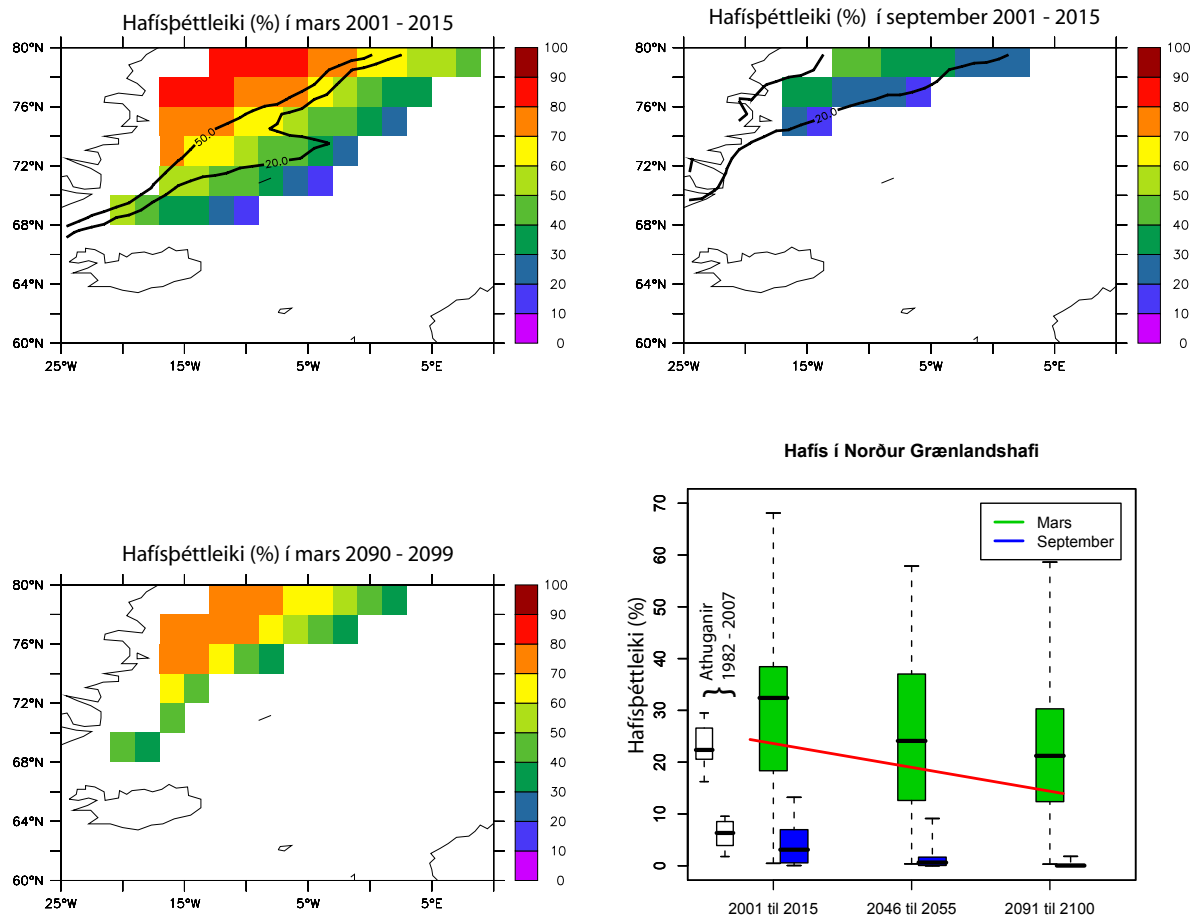
fjölgun mannkyns, aukin iðnvæðing og breytt landnotkun munu hafa í för með sér á komandi árum. Heildarsýn á breytingarnar er mikilvæg því snertifletir eru milli loftslagsbreytinga og annarra álagsþátta, sem meðal annars hafa áhrif á möguleika þróunarrikja til sjálfbærrar þróunar³. Líklegt er að á komandi áratugum verði þörf á auknum fjármunum til þess að takast á við afleiðingar loftslagsbreytinga og aðlögun að þeim í fátækum ríkjum. Líklegt er að alþjóðasamfélagið geri auknar kröfur til iðnvæddra ríkja, þ.m.t. til Íslands um fjárframlög í þessu skyni.

4.1 Breytingar á ástandi sjávar og hafíss

Mynd 1.7 sýnir að Norður-heimskautssvæðið er eitt þeirra svæða þar sem búist er við hvað mestri hlýnun á 21. öldinni. Til lengri tíma litið fylgjast yfirborðshiti sjávar og lofthiti nokkuð að svo líklegast er að sjávarhiti aukist einnig á þessu svæði. Almennt gildir þó um vetrarhitann á hafsvæðum sem einkennast af miklum frosthörkum og hafísmyndun að sveiflur í sjávarhita og lofthita fylgjast ekki endilega að, því yfirborð sjávar kólnar ekki niður fyrir frostmark. Því er líklegast að hlýnunar sjávar gæti síst á svæðum þar sem hafís myndast að vetri til.

Á hafsvæðinu sunnan við Ísland er líklegast að hlýni. Þróun hinnar lóðréttu hringrásar hafsins hefur þó áhrif á það hversu mikið hlýnar, sbr. hliðargrein 3B.

Á hafsvæðinu norðan við Ísland er einnig líklegt að hlýni við, en breytingar á útbreiðslu hafíss í Norður-Grænlandshafi skipta verulegu máli. Vel þekkt sam-



Mynd 4.1 Hafis í Norður Grænlandshafi í MMD líkönunum með A1B sviðsmyndinni. Efst t.v. er sýnt meðaltal marsmánaðar í MMD líkönunum fyrir tímabilið 2001–2015. Efst t.h. er samskonar mynd fyrir septembermánuð. Á efri myndirnar eru til samanburðar dregnar 50% og 20% þéttleikalínur sem byggjast á fjarkönnun. Neðst t.v. er mynd sem sýnir meðaltal marsmánaðar á síðasta áratug 21. aldarinnar. Neðst t.h. er mynd af dreifingu hafisþekju fyrir þrjú tímabil á öldinni. Til samanburðar er einnig sýnd dreifing á hafisþéttleika samkvæmt athugunum. Einnig er dregin rauð lína á myndina sem sýnir meðalmínkun vetraríss út öldina í þeim líkönunum þar sem hafisþéttleikinn í marsmánuði við upphaf aldarinnar var sambærilegur við athuganir. (Byggt á gögnum frá MMD reiknilíkönunum og mæligögnum⁷).

band er á milli hafisþekju í Norður Grænlandshafi og lofthita⁴ en þegar útbreiðsla hafíss á svæðinu er yfir meðallagi er þar kaldara en í meðalári. Hlýnunin að vetri til verður líklega mest á svæðum þar sem hafisinn hörfar og því verða breytingar á ísmagni á hafsvæðinu norðan Íslands ræddar sérstaklega hér að neðan.

Almennt er búist við að á norðurheimskautssvæðinu minnki hafis verulega á öldinni, sérstaklega að sumarlagi. Gert er ráð fyrir að hafis minnki ekki jafn mikið að vetrarlagi og er það í samræmi við niðurstöður mælinga á undanförunum árum⁵. Í fjórðu úttekt IPCC kemur fram að loftslagslíkönin í MMD safninu ná mörg hver afskaplega illa að herma útbreiðslu hafíss, sérstaklega á

norðurhveli⁶. Þetta ber að hafa í huga þegar lagt er mat á spár um minnkandi hafisþekju á komandi öld.

Mynd 4.1 sýnir útbreiðslu hafíss í Íslandshafi og Norður-Grænlandshafi í mars og í september, en í þeim mánuðum er hafisþekjan annarsvegar í hámarki og hinsvegar í lágmarki. Lituðu reitirnir sýna hlutfallslega hafisþekju í líkönunum. Heildregnu línurnar á efri myndunum tveimur sýna 20% og 50% mörk hafisþekjunnar, samkvæmt beinum athugunum og fjarkönnun⁷ á árabílinu 1982–2007. Á liðnum árum hefur útbreiðsla íss á þessu hafsvæði verið lítillega undir meðallagi. Ef líkönin í MMD safninu næðu að herma eftir

athugunum væri hafísþekjan nærri því sem heildregnu línurnar sýna.

Lituðu reitirnir sýna hafísþekjuna í niðurstöðum 18 líkana úr MMD safninu fyrir A1B sviðsmyndina (fyrir tímabilið 2001–2015). Í marsmánuði er greinilegt að meiri ís er samkvæmt niðurstöðum líkanreikninga en athuganir sýna en í september er samanburðurinn líkónunum hagstæðari.

Neðri myndirnar á 4.1 sýna hvernig hafísþekjan þróast á öldinni samkvæmt líkónunum. Vinstra megin er sýnt kort af útbreiðslu hafíss í mars fyrir síðasta áratug aldarinnar. Greinilegt er að vetrarísinn hefur minnkað nokkuð frá því sem var í upphafi aldarinnar, en þó reiknast enn verulegur hafís í Norður-Grænlandshafi.

Myndin hægra megin sýnir meðaltal hafísþéttleika fyrir þrjú tímabil á öldinni (upphaf aldarinnar, miðbik og aldarlok). Sýndar eru niðurstöður fyrir mars og september og dregur hver kassi saman niðurstöður fyrir 18 líkón. Lengst til vinstri er einnig sýnd dreifing og þéttleiki hafíss samkvæmt athugunum í mars og september.

Myndin sýnir að fyrir tímabilið 2001–2015 var ísþekjan í september í flestum líkönunum í ágætu samræmi við athuganir. Líkönun ber einnig saman um að á 21. öldinni muni hafís nánast hverfa úr Norður-Grænlandshafi síðsumars.

Fyrir vetrarísinn eru niðurstöðurnar ekki nærri því jafn eindregnar. Í fyrsta lagi ber líkönunum ákaflega illa saman um meðalþéttleika hafíssins. Líkönin sýna minnkandi vetrarísþekju á öldinni, en munurinn er lítill í samanburði við spönn niðurstaðna líkananna. Fyrir tímabilið 2001–2015 liggja flestar niðurstöður á bilinu 0–70%, en til samanburðar má benda á að athuganir í marsmánuði milli 1982 og 2007 sýna meðalísþekju á bilinu 15–30%.

Ef einungis eru notuð þau líkón þar sem meðalþéttleikinn hafíss í upphafi aldarinnar er í samræmi við athuganir kemur greinilega í ljós að ísþekjan minnkar á 21. öldinni. Rauða línun á myndinni sýnir leitni þessa samdráttar, og nemur hann 10% út öldina. Þegar tekið er tillit til þess að náttúrulegar sveiflur í hafísþekju í marsmánuði eru um 15% má segja að 10% minnkun sé

umtalsverð þó því fari fjarri að vetrarísinn hverfi líkt og sumarisinn.

Megnið af borgarís fyrir norðan Ísland á rætur sínar að rekja til jökla á Grænlandi. Fjöldi borgarísjaka á íslensku hafsvæði ræðst af fjölda og stærðardreifingu þeirra jaka sem brotna frá skriðjöklum Grænlands. Á síðustu árum hefur orðið vart við aukinn skriðhraða á jöklum sem kelfa í sjó fram á Grænlandi og talið er að þetta tengist hlýnun og aukinni bráðnun á jöklum⁸. Ef þessi þróun heldur áfram er líklegt að framleiðsla borgaríss aukist með hlýnun. Einnig mun borgarís sem myndast við norðurhluta Grænlands eiga greiðari leið út á hafið þegar hafísþekja minnkar. Því getur hlýnandi veðurfar leitt til þess að meira verði um borgarís á siglingaleiðum.

Streymi hlýs og selturíks Atlantssjávar norður fyrir Ísland hefur veruleg áhrif á ástand sjávar norðan við landið. Erfitt er að leggja mat á líklegar breytingar á þessu flæði, en MMD líkönin nota flest of gróft reikninet til þess að herma það vel.

Samantekt

- Líklegt má telja að sjávarhiti fari hækkandi umhverfis landið á komandi öld. Hve mikil hlýnun hafsvæða verður er þó háð breytingum á lóðréttri hringrás sjávar í Norður-Atlantshafi og hver þróun verður á útbreiðslu hafíss. Allnokkur óvissa er þó varðandi bæði þessi atriði.
- Líkönun ber saman um að á 21. öldinni muni hafís nánast hverfa úr Norður-Grænlandshafi síðsumars. Minnkun vetraríssins verður ekki eins áberandi en þó merkjanleg.
- Mögulega verður borgarís tíðari á siglingaleið við Ísland þó svo að hafís fari almennt minnkandi.

Jökull	Flatarmál (km ²)	Rúmmál (km ³)	Mesta þykkt (m)	Hæðarbil (m a.s.l.)
Langjökull	925	195	580	390-1290
Hofsjökull	880	200	760	600-1790
Vatnajökull	8100	3000	950	0-2100
Suðurhluti Vatnajökuls	3170	1279	900	0-2100

Tafla 4.1—Kennistærðir stærstu jökla á Íslandi.

4.2 Afleiðingar loftslagsbreytinga á jökla og vatnafar

4.2.1 Jöklar

Eins og fram kom í kafla 2.3 hafa skipulegar mælingar á legu jökulsporða hérlandis farið fram frá 1930 og hefur komið í ljós að sporðarnir bregðast fljótt við veður-farsbreytingum. Reglubundnar afkomumælingar á meginjökulum landsins (tafla 4.1) hófust á Hofsjökli 1988⁹, á Vatnajökli 1993 og á Langjökli 1997¹⁰. Afkoma jöklanna allra hefur verið neikvæð á hverju ári frá 1995 og sem dæmi má nefna að rúmmál Hofsjökuls hefur rýrnað um 5% á tímabilinu 1995–2008¹¹.

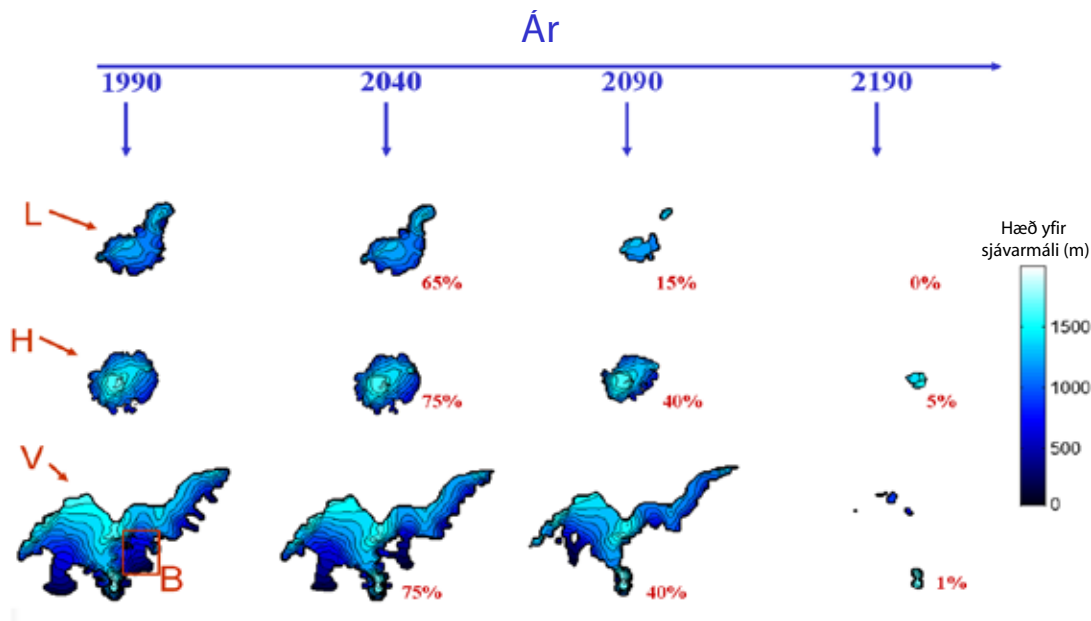
Sett hafa verið upp líkön sem reikna vetrar- og sum-arafkomu jöklanna. Inntaksgögn um úrkomu og hita eru frá veðurstöðvum á jöklunum eða nærri þeim og leysing hefur verið reiknuð bæði með gráðudagalikön-um og orkubúskaparlíkönunum^{12,13,14}. Þessi líkön hafa verið tengd kvikum ísflæðilíkönunum^{15,16}, sem keyrð voru í jafnvægisstöðu með veðurgögnum frá tímabilinu 1981–2000. Ekki var unnt að beita flæðilíkaninu á norðanverðan Vatnajökul vegna áhrifa tíðra framhlaupa á þann hluta jökulsins. Sviðsmyndir veðurfars úr CE/VO verkefnunum voru síðan notaðar til að knýja afkomu- og flæðilíkinin fyrir tímabilið 1990–2190 og breytingar í flatarmáli og rúmmáli jöklanna á þessu tímabili reiknaðar, auk afrennslis frá þeim (myndir 4.2 og 4.3). Reiknuðum niðurstöðum fyrir tímabilið 1990–2005 ber nokkuð vel saman við mældar breyt-ingar á jökulsporðum og afkomu á þessu tímabili. Þess má vænta að jöklar hofi ört alla 21. öld. Benda niður-stöður til að rýrnun Langjökuls verði örrari en rýrnun hinna jöklanna og að rúmmál hans muni minnka um 35% fram til 2040. Samkvæmt reikningunum verða aðeins 15% af rúmmáli Langjökuls eftir árið 2090 en 40% af rúmmáli Hofsjökuls og suðurhluta Vatnajökuls. Haldi svo fram sem horfir verður Langjökull með öllu

horfinn um miðja 22. öld en Vatnajökull og Hofsjökull hafa hörfað upp á hæstu tindu.

Afrennsli frá jöklunum eykst stöðugt á fyrri hluta 21. aldar en fer síðan minnkandi vegna mikillar rýrnunar jöklanna. Afrennslisaukning mun nema allt að 2,8 m vatns/ári á Langjökli miðað við árabilið 1981–2000. Þessi afrennslisaukning mun einnig koma fram í meiri leysingarflóðum af jökli.

Búast má við að eftirtalдар breytingar verði samfara hlýnun og hörfun jökla á landinu:

- Jaðarlónum við jökla mun fjölga, einkum við sunn-anverðan Vatnajökul þar sem skriðjöklar hafa grafið djúpa dali.
- Leysingarflóð frá jöklum munu aukast verulega. Einnig gætu líkur aukist á því að farið geti saman mikil úrkoma og leysing jökla sem valdið gæti stærri flóðum en nú þekkjust.
- Aurburður í jökulám eykst fyrst í stað með auknu rennsli en minnkar þegar til lengri tíma er litið. Undantekningar verða þó þær ár sem renna úr jað-arlónum við jökulsporða.
- Farvegir jökuláa breytast við hop jökla og sumar jökulár kunna jafnvel að hverfa þar sem jaðarlón myndast.
- Jökulhlaupum fækkar við hop og þynningu jökla.
- Við hop jökla léttir fargi á jarðskorpuna og landris verður, einkum nærri jökuljöðrum. Landris minnk-ar með fjarlægð frá jöklunum og léttling fargsins getur jafnvel valdið staðbundnu landsigi fjær þeim. Mælingar sýna að landris við ströndina síðasta ára-tug er mest við suðausturströndina en víða á land-inu ris land. Líklegast er að þessar breytingar muni halda áfram í kjölfar þynningar jökla á öldinni (sjá nánar umræðu í kafla 4.5).



Mynd 4.2 Reiknaðar breytingar á Langjökli, Hofsjökli og sunnanverðum Vatnajökli skv. sviðsmyndum um veðurfarsbreytingar. Gefnar eru tölur um rúmmál sem hlutfall af rúmmáli 1990¹⁷.

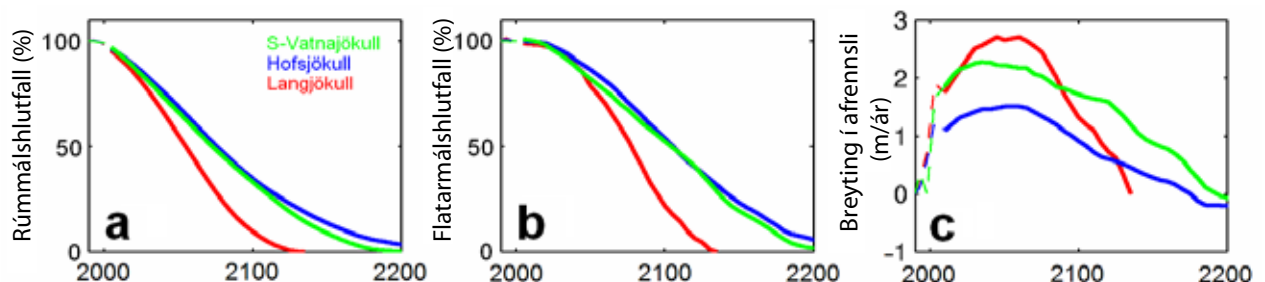
Til viðbótar má nefna að ís á stöðuvötnum leysir væntanlega fyrr á vorin og minna verður um ís á ám en nú er. Tíðni flóða vegna íss og ísstífla mun að líkindum minnka, en slík flóð gætu orðið sneggri og meiri við hlýnandi veðurfar. Tíðni ísmyndunar og grunnstinguls í ám mun einnig minnka, en aftakaatburði tengda ísmyndun, svo sem þrepahlaup og ágang vatns, er erfðara að segja fyrir um.

4.2.2 Vatnafar

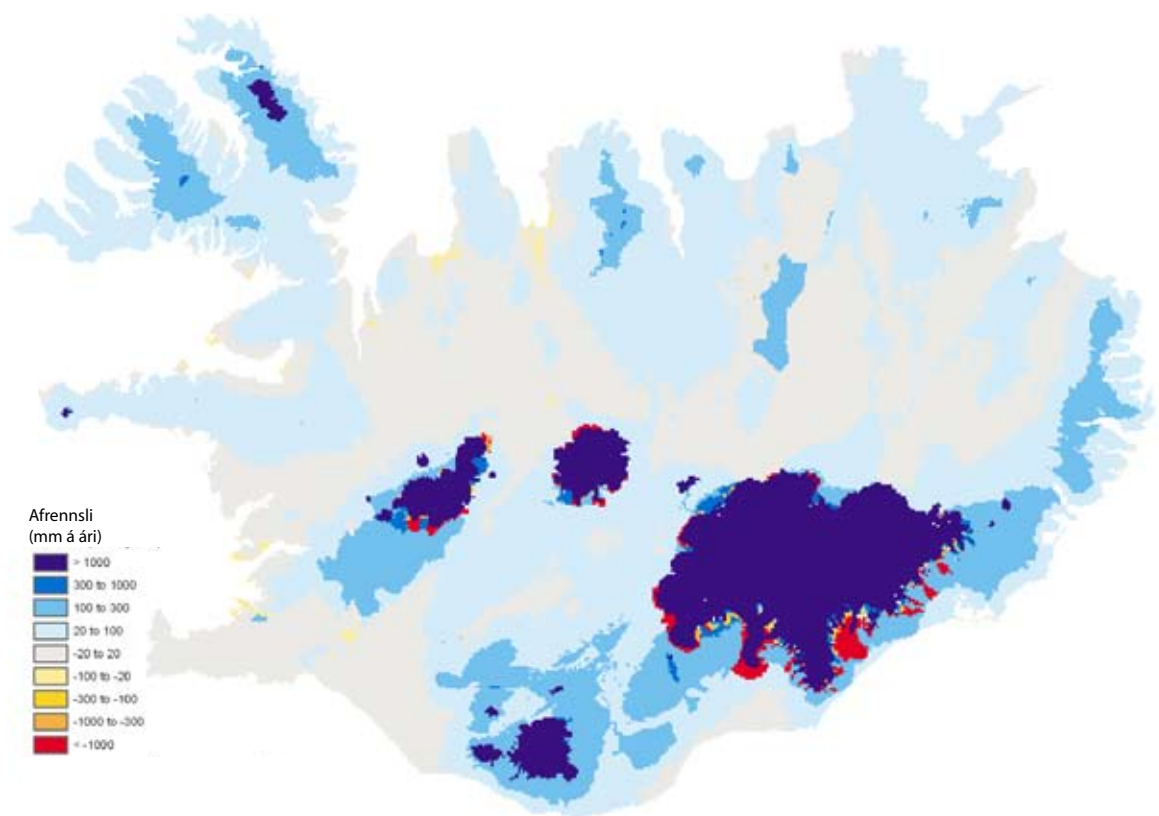
Í kafla 2.4 hefur verið gerð grein fyrir reiknuðu afrennsli á Íslandi á árunum 1961–1990 (sjá afrennsliskort á mynd 2.14 í þeim kafla). Í verkefninu *Veður og orka* var afrennslislíkani beitt til að reikna afrennsli á Íslandi á

tímabilinu 2071–2100, að gefnum forsendum sviðsmynda um hita og úrkomu á síðari hluta aldarinnar¹⁸. Á mynd 4.4 er sýndur munur á afrennsli tímabilanna tveggja¹⁹. Afrennslið 2071–2100 reiknast að meðaltali 1800 mm/ári, þ.e. nær 25% meira en á tímabilinu 1961–1990. Vegna aukinnar úrkomu og hærri vetrarhita má ætla að afrennsli jökulvana lands verði um 8% meira undir lok aldarinnar en það var 100 árum fyrr. Afrennsli frá jökulhuldum svæðum eykst aftur á móti mun meira vegna aukinnar bráðnunar, eða um 90%.

Á mynd 4.5 er sýnd reiknuð árstíðasveifla afrennslis á Íslandi á tímabilinu 2071–2100, í samanburði við sömu gögn frá 1961–1990. Á mynd 4.5a sést að aukn-

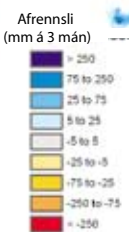
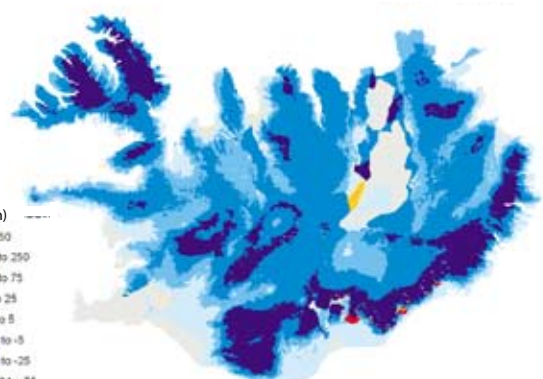
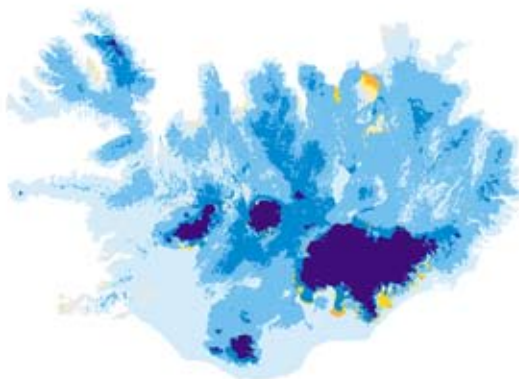


Mynd 4.3 Reiknaðar breytingar á rúmmáli, flatarmáli og afrennsli frá jöklunum þremur á tímabilinu 2000–2200¹⁷.



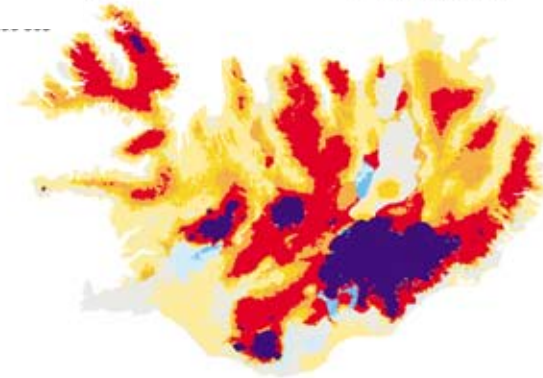
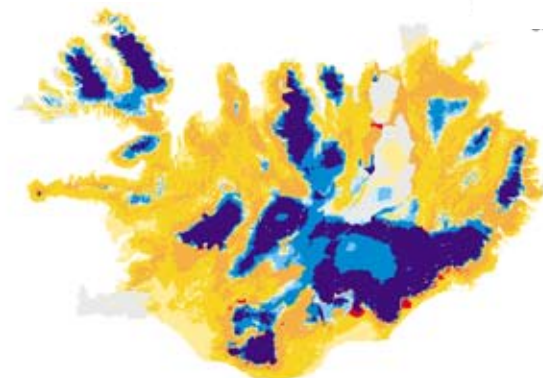
Haut: sept. - nóv.

Vetur: des. - feb.

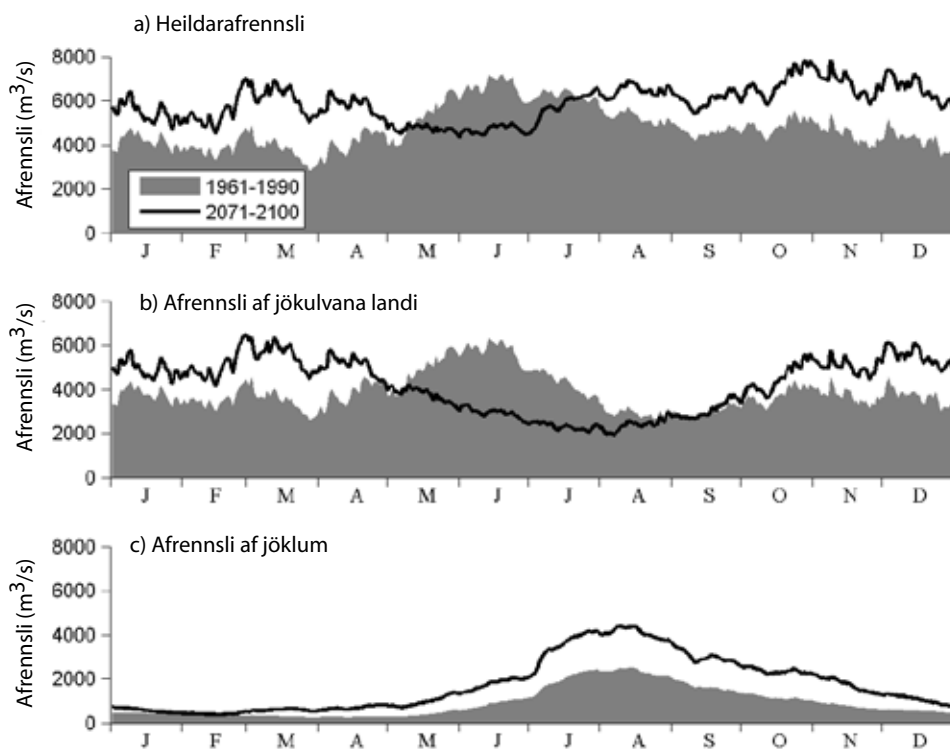


Vor: mar. - maí

Sumar: jún. - ágú.



Mynd 4.4 Breyting á afrennsli (mm/ári) frá tímabilinu 1961–1990 til 2071–2100¹⁹.



Mynd 4.5 Breyting í árstíðasveiflu afrennslis frá tímabilinu 1961–1990 til 2071–2100¹⁷.

ing mun verða nær allt árið utan vors og fyrri hluta sumars. Þessi niðurstaða skýrist betur af myndum 4.5b og 4.5c, sem sýna annars vegar breytingar á afrennsli frá jökullausu landi og hins vegar breytingar á þætti jökulvatns. Aukning afrennslis frá landi utan jökla mun verða utan sumarmánaðanna maí til ágúst. Breytingin skýrist af aukinni úrkomu auk þess sem spáð er hærri vetrarhita á árunum 2071–2100, sem leiðir af sér minni snjósöfnun og þar með minni snjóbráð að vori og sumri. Auk þess munu vorflóð færast fram í tíma og verða í mars og apríl í stað maí og júní áður. Reiknað afrennsli frá jöklum (mynd 4.5c) er mun meira en á viðmiðunartímabilinu 1961–1990, jafnvel þótt flatarmál jöklanna hafi minnkað um 2400 km². Aukningin er mest seinni hluta sumars og á haustin.

Venjuleg rigninga- og leysingaflóð munu taka breytingum við breytingar á úrkomu og hita. Það fer nokkuð eftir landsvæðum hvað ræður mestu flóðum. Vetrarflóð vegna úrkomu og leysinga eru víða mestu flóðin, sérstaklega vestanlands þar sem hálendi er í um 400 m hæð og gæti dreifing þeirra og mikilvægi breytst við hækkingu hita og úrkomu. Svæði þar sem vorflóð voru áður stærstu flóðin svo sem flóð af Sprengisandi (600 m hæð) gætu breyst þannig að vetrarflóð yrðu stærst

vegna hlýnandi veðurs að vetri. Vorflóð munu einnig taka breytingum. Þau munu koma fyrr en þau gætu einnig orðið sneggri við hærri hita. Haustflóð eru nú mest á Austurlandi þegar saman fara mikil úrcoma á nýlegan snjó sem fallið hefur á freðna jörð. Tíðni þeirra og aftök gætu breyst með breytingu á loftslagi.

4.2.3 Sífreri

Sífreri í háfjöllum er á undanhaldi í loftslagi síðustu ára og mun enn minnka ef meira hlýnar. Efstu hlíðar (yfir 900 m) gætu því orðið óstöðugri meðan bráðnunin á sér stað²⁰.

Samantekt

Jöklar hér á landi munu hopa ört á 21. öldinni.

- Gert er ráð fyrir að rýrnun Langjökuls verði örari en hinna stóru jöklanna og árið 2090 verði rúmmál hans aðeins 15% af því sem það var árið 1990.
- Afrennsli frá jöklunum eykst stöðugt á fyrri hluta 21. aldar, en fer síðan minnkandi vegna stöðugar rýrnunar þeirra. Svipað gildir um leysingaflóð frá jöklum.

- Vegna aukinnar úrkomu og hærri vetrarhita má ætla að afrennsli jökulvana lands verði um 8% meira undir lok aldarinnar en það var 100 árum fyrr. Rigninga- og leysingafloð munu einnig taka svipuðum breytingum.
- Sífreri í háfjöllum hefur verið á undanhalði við loftslag síðustu ára og gætu efstu hliðar tímabundið orðið óstöðugar.

4.3 Áhrif loftslagsbreytinga á lífríki sjávar

4.3.1 Fiskistofnar

Í kafla 2.4 var greint frá áhrifum veðurfarsbreytinga á lífríki sjávar á Íslandsmiðum og á sjávarútveg fyrir á árum. Áhrif hlýnunar á lífríki sjávar voru nokkuð rædd í fyrri skýrslu Vísindanefndarinnar²¹. Þar kom m.a. fram að erfitt væri að meta eða spá fyrir um áhrifin, þar eð slíkt réðist m.a. af því hvernig straumakerfi, blöndunarferlar og skil milli heitra og kaldra strauma brygðist við veðurfarsbreytingum². Einnig sagði þar:

Frumframleiðni kann þannig að aukast á ákveðnum svæðum og þar með framleiðsla annarra lífvera en á öðrum svæðum kann framleiðnin að minnka. Eins og fyrr er getið má færa fyrir því rök að með hlýnandi veðurfari berist hlýsjávartegundir til landsins í auknum mæli svo og að útbreiðslusvæði þeirra tegunda, sem fyrir eru, muni aukast og stofnar þeirra þar af leiðandi hugsanlega stækka. Tegundir af norrænum uppruna munu á hinn bóginn líklega fjarlægjast landið eða útbreiðslusvæði þeirra minnka. Hvaða áhrif breytingar sem þessar hafa á samkeppni milli stofna og afrakstur þegar til langs tíma er litið er hins vegar ógerningur að segja fyrir um.

Ljóst er að þrátt fyrir verulegar sveiflur í hita og sjógerð frá einu tímabili til annars á tuttugustu öld var þorskstofninn langgjöflasti botnfiskstofninn á Íslandsmiðum, bæði að magni til og verðmætum. Þess vegna er áhugavert að velta fyrir sér stöðu hans í þessu tilliti. Svo virðist sem sveiflur í nýliðun og stofnstærð þorsks séu minni hér við land en bæði í norðvestanverðu og norðaustanverðu Atlantshafi. Þetta bendir til þess að þorskurinn sé á kjörsvæði

sínu hér um slóðir. Engin ein önnur botnfisktegund er líkleg til að fylla sess þorsks hverfi hann af Íslandsmiðum vegna breyttra lífsskilyrða. Svo mikið ber þessi fisktegund af öðrum botnfiski í framleiðni, magni og gæðum. Einnig er ljóst að stór og öflugur þorskstofn er hagkvæmari fisktegund til nýtingar og veiðistjórnunar en margir smáir stofnar annarra botnfisktegunda.

Miðað við það, sem við þekkjum um líffræði þorsksins, kann mikil hlýnun sjávar að leiða til aukinna gangna frá Grænlandi og seiðareks þangað. Jafnframt má ætla að hrygningarlönd þorsks stækki og hliðrist í auknum mæli norður fyrir land ef sjór hlýnar. Á sama tíma kynni að þrengja að loðnustofninum og þar með draga úr fæðuframboði fyrir þorsk þótt slíkt yrði að minnsta kosti að hluta til bætt með breyttu fæðuvali, t.d. síld. Áhrif hlýnunar sjávar á þorskstofninn eru því langt í frá augljós þótt tegundin virðist í ljósi reynslunnar hafa töluvert svigrúm til aðlögunar að breytilegum aðstæðum. Mikil kölnun á Íslandsmiðum frá því, sem við þekkjum á þessari öld, myndi hins vegar einskorða megin hrygningarsvæðin við suðurströndina og jafnframt loka fyrir mikilvægustu hrygningar- og uppeldisstöðvar á Norðurmíðum. Það gæti leitt til uppgangs í rækjustofni og loðnustofni með óþekktum möguleikum þorsks á að nýta sér slíkar aðstæður.

Í 2. kafla kom fram að í hlýindum undangenginna ára hefur útbreiðsla suðlægari botnfiska eins og ýsu, lýsu, skötusels og ufsa aukist til norðurs og stofnarnir stækkað. Útbreiðslusvæði norsku-vorgotssildarinnar (stærsta hluta norsk-íslenska síldarstofnsins) hefur einnig aukist og síldin nokkrum sinnum gengið inn á Norðurmíð. Eins hefur stofn kolmunna stækkað og makrill hefur verið veiddur innan 200 mílna lögsögu Íslands. Líklegast er að við hóflega hlýnun muni ofangreindar breytingar halda áfram í sömu átt auk þess sem suðlægir smástofnar á borð við flundru og sandhverfu stækki ef hlýnar enn frekar.

Aukin hlýnun á norðurslóð kann að hafa jákvæð áhrif á útbreiðslu og frameiðni fiskistofna af suðlægum uppruna en getur aftur á móti takmarkað útbreiðslusvæði og framleiðni norrænna tegunda. Þannig kunna innbyrðis hlutföll mikilvægustu tegunda í vistkerfinu að

breytast frá því sem nú er með viðtækum áhrifum fyrir heildarvistkerfið. Hér er hins vegar um afar flókið orsakasamhengi að ræða sem m.a. ræðst af því hvernig einstakar lífverur vistkerfisins bregðast við hlýnandi umhverfi t.d. með tilliti til hrygningartíma, gangna, skörunar afræningja og bráðar og síðan hver áhrif þessir einstöku þættir hafa á vistkerfið sem heild.

Þær breytingar sem hér hefur verið fjallað um snerta fyrst og fremst hafsvæðið á landgrunninu í kringum Ísland og á nærliggjandi svæðum þar sem spáð er til-
tölulega takmarkaðri hlýnun sjávar (1–2°C) á næstu 50–100 árum. Líklegast er að á nýhafinni öld muni hlýna mun meira á heimsskautasvæðinu fyrir norðan okkur en hér við land. Slíkt kann að hafa mikil óbein áhrif á lífríkið hér við land, þar sem ekki er ólíklegt að flökkustofnar sem ganga á Íslandsmið breyti um hegðun og göngur þegar nýjar lendur opnast á heimsskautasvæðunum og forsendur breytast um vöxt þeirra og stærð. Þetta gæti ekki sist átt við um loðnu, síld og kolmunna.

4.3.2 Annað lífríki í sjó

Ýmsir eiginleikar sjávar gera hann að stöðugu umhverfi, hagstæðu búsvæði. Sjávarselta er einn þessara eiginleika og einnig dúahæfni sjávar (buffer capacity) sem vinnur gegn breytingum á sýrustigi. Sýrustig í heims-
höfunum er við venjulegar aðstæður á fremur þröngu bili, milli 7,6 og 8,4. Það er lægst í hafdjúpunum en hærra við yfirborð. Lífverur sjávar hafa þróast við og aðlagast þessum aðstæðum.

Undanfarin misseri hafa komið fram vísbendingar um að vaxandi styrk koldíoxíðs í lofti fylgi ekki aðeins hlýnun vegna aukinna gróðurhússáhrifa heldur einnig breytingar á sýrustigi sjávar sem kynnu að hafa áhrif á lífríkið²³. Aukin upptaka heimshafanna á koldíoxíði er talin geta valdið því að sýrustig þeirra muni lækka. Enda þótt upptaka heimshafanna á koldíoxíði dragi úr áhrifum aukins koldíoxíðs í andrúmsloftinu er talið að sú lækkan sýrustigs sem því er samfara kunni að hafa neikvæðar afleiðingar, sérstaklega fyrir lífverur í heims-
höfunum sem nota kalk við að mynda skeljar (t.d. kalkþörungar, kóralla, götungar, ígulker, krabbadýr og lindýr). Höfin eru nú yfirmettuð af kalki (kalsíum karbónati) en lækkan sýrustig lækkar mettunarstigið. Talið er að það kunni að hafa áhrif á kalkmyndun og

jafnvel að stöðgrindur sem myndaðar eru úr kalki eigi það á hættu að leysast upp. Vistfræðilegar afleiðingar slíkra breytinga eru enn óljósar en svo virðist sem þær muni hafa skaðleg áhrif á kalkmyndandi lífverur. Haf-
rannsóknastofnunin hefur um árabíl fylgst með heildarstyrk koldíoxíðs í yfirborðssjó vestur og norður af landinu og sýna þær mælingar glögglega að hann hefur hækkað með tímanum.

Á undanförunum árum og áratugum hefur víða orðið vart aukningar á marglyttu, m.a. í Norðursjó og í norðanverðu Kyrrahafi^{24,25}. Þessar breytingar hafa verið raktar til loftslagsbreytinga, en hækkandi sjávarhiti virðist vera sá þáttur sem einkum leiðir til mikils vaxtar og fjölgunar marglyttu. Í sumum tilvikum kann þó aukningin að stafa af minni samkeppni við fiska um fæðu. Marglyttur geta valdið skaða í fiskeldi, t.d. varð tugmilljóna tjón vegna brennihvelja í Mjóafirði haustið 2006. Lítið er vitað um lífshætti marglyttu hér við land og þær breytingar sem kunna að verða á magni frá ári til árs, en unnið er að því að afla grunnupplýsinga um líffræði þeirra á Íslandsmiðum þannig að unnt verði að bregðast við hugsanlegum breytingum.

Á seinustu áratugum hefur orðið vart við aukningu á sumum tegundum eittraðra svifþörungar á nálægum hafsvæðum, t.d. við Noregsstrendur, í Skagerrak og sums staðar í Norðursjó²⁶. Þessi aukning virðist tengjast veðurfarsspáttum, einkum sjávarhita, seltu og NAO-vísitölu. Hér við land hefur ekki orðið vart sambærilegrar aukningar eitruþörungar en kerfisbundin vöktun hefur verið á nokkrum stöðum hér við land frá árinu 2005²⁷. Þar sem ofvöxtur eittraðra þörungar er algengur geta þeir valdið miklum skaða, t.d. í fisk- og skelfiskeldi og því er mikilvægt í ljósi mögulegra veðurfarsbreytinga í framtíðinni að vakta ástandið og gera ráðstafanir til þess að ekki hljóti skaði af.

Samantekt

- Almennt má ætla að vaxandi hlýsjávar-einkenni á Íslandsmiðum og nærliggjandi hafsvæðum sé ávísun á aukna framleiðni lífríkis í sjó, þ.m.t. fiskistofna við landið.
- Svo virðist sem sveiflur í nýliðun og stofnstærð þorsks séu minni hér við land en bæði í norðvestanverðu og norðaustanverðu Atlantshafi. Þetta

bendir til þess að þorskurinn sé á kjörsvæði sínu hér um slóðir. Við hlýnun eru þó líkur á að uppvaxtarsvæði þorsks stækki, m.a. vegna breyttra aðstæðna við strendur Grænlands og að lírfurek til Grænlands og Grænlandsgöngur verði tíðari.

- Hlýnun sjávar á norðurslóð kann að hafa jákvæð áhrif á útbreiðslu og framleiðni fiskistofna af suðlægum uppruna, en getur aftur á móti takmarkað útbreiðslusvæði og framleiðni norrænna tegunda s.s. loðnu, grálúðu og rækju. Það gæti haft neikvæð áhrif á fæðubúskap þorsks en í vistkerfi sjávar er orsakasamhengið er afar flókið og óvíst hvernig einstakar lífverur bregðast við hlýnandi umhverfi sem og hvernig einstakir þættir hafa áhrif á vistkerfið í heild.
- Meiri hlýnun á heimskautasvæðinu en hér við land kann að hafa mikil óbein áhrif á lífríkið í sjónum við Ísland, þar sem ekki er ólíklegt að flökkustofnar eins og síld, loðna, kolmunni og makrill breyti um hegðun og göngur þegar nýjar lendur opnast í Norður-Íshafi og forsendur kunna að breytast um afrakstur og stærð þeirra.
- Breytingar á sýrustigi sjávar hér við land vegna aukins styrks koldíoxíð í sjónum geta haft skaðleg áhrif á lífríkið, vegna breytinga á kalkbúskapi sjávar.
- Með hlýnun sjávar aukast líkur á hvelju (marglyttu) á norðurslóð og ofblómgun eiturbörunga.

4.4 Áhrif á lífríki á landi

Í kafla 2.2 kom fram að áhrif hlýnandi loftslags eru þegar orðin sýnileg í lífríki landsins, en getum við spáð fyrir um hver áhrif frekari hlýnunar verða?

Þegar slíkar spár eru ræddar er mikilvægt að greina á milli frumbjarga (plöntur) og ófrumbjarga (dýr og sveppir) lífvera og ennfremur þeirra lífvera sem eru til staðar á tilteknu svæði og þeirra sem hugsanlega gætu þrífist þar. Plöntur eru einkum háðar ólífrænum umhverfisþáttum og því er almennt auðveldara að sjá fyrir breytingar sem verða á vexti og útbreiðslu þeirra heldur

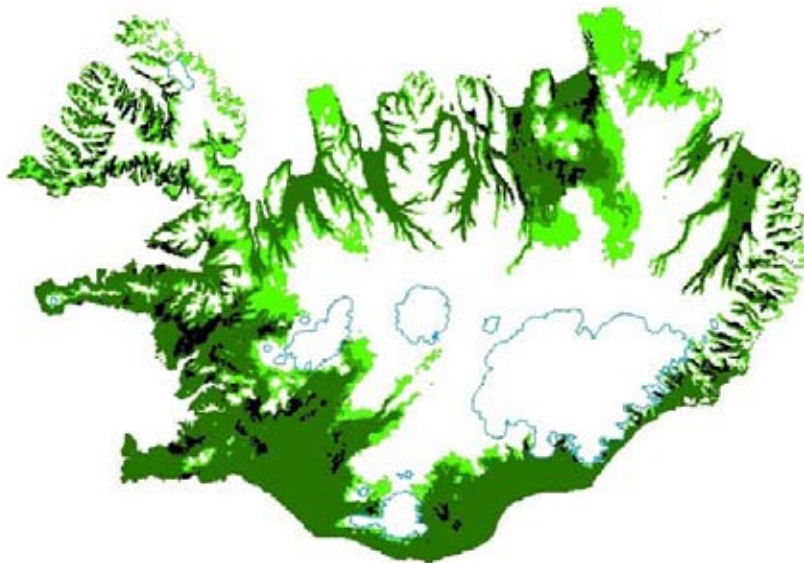
en þegar í hlut eiga dýr og sveppir sem eru háð öðrum lífverum um fæðu. Þótt þarfir fyrir ólífræna umhverfisþætti, svo sem hita og rakastig, séu uppfylltar geta líffræðilegir þættir, svo sem samkeppni við aðrar tegundir eða afrán, verið takmarkandi. Ennfremur geta landfræðilegir þættir og skortur á dreifingarhæfni hægt á eða komið í veg fyrir aðflutning lífvera inn á ný búsvæði sem opnast í kjölfar loftslagsbreytinga.

4.4.1 Gróðurfar

Núverandi útbreiðsla birkis á Íslandi sýnir í hnotskurn vandamálið við að spá fyrir um áhrif loftslagsbreytinga á útbreiðslu lífvera. Ef veðurfar eitt setti birki mörk þá þektu birkiskógar og kjarr allt að 40% landsins²⁹. Samspil landnýtingar, náttúruhamfara og veðurfars hefur hins vegar valdið því að skógar þekja nú einungis 1,2% landsins (mynd 4.6). Loftslag á Íslandi nær ekki kjörhita birkis.³⁰ Hækkandi hiti mun því bæta vaxtarskilyrði þess á öllu landinu og koma því til góða á annan hátt.

Birki myndar mishá skógarmörk upp til fjalla og út til annesja sem hægt er að útskýra að stærstum hluta (>70%) með muni á sumar- og hausthita²⁸. Að öðru óbreyttu má fullyrða að möguleg skógarmörk færist ofar sem nemur allt að 150 m fyrir hverja gráðu sem meðalhiti sumars og hausts hækkar. Þessi stækkun mögulegs búsvæðis birkisins leiðir með tímanum til stækkunar birkiskóga hérlandis að því tilskildu að aðrir áhrifaþættir, svo sem búfjárbætur, verði með þeim hætti að birkið geti sáð sér inn á ný svæði.

Líkt og þekja birkiskóga er önnur gróðurþekja landsins talsvert undir þeim mörkum sem núverandi veðurfar leyfir³¹. Hlýnandi veðurfar mun almennt hafa jákvæð áhrif á gróðurþekju landsins og getu vistkerfa til að taka upp kolefni og binda það í gróðri og jarðvegi. Meirihluti íslenskra láglendisplantna er hér nærri norðurmörkum sínum og vaxtarþróttur þeirra eykst því með hlýnun. Þó getur hlýnun haft neikvæð áhrif á tiltekin gróðurlendi svo sem á rústamýrar í Þjórsárverum, Eyjabökkum, Guðlaugstungum og víðar. Í Skandinavíu er talið er að rústamýrar viðhaldist ekki þar sem ársmeðalhiti er hærri en -1°C ³². Afar líklegt er að rústamýrar hér á landi hverfi með hlýnandi veðurfari. Einnig hefur verið bent á að snjóðædagróður geti orðið fyrir



Mynd 4.6. Mesta mögulega útbreiðsla birkis á Íslandi ef einungis núverandi veðurfar setti því mörk (græn svæði) og núverandi útbreiðsla (svartir flekkir). Mögulegri útbreiðslu birkis er skipt upp í tegundamörk (ljósgrænt) og 2 m hæðarmörk (dökkgrænt).²⁸

neikvæðum áhrifum af svellkali sem verður algengara til fjalla í loftslagi framtíðarinnar³³ Þá er líklegt að eindregnar fjallaplöntur hopi eða hverfi úr flóru landsins, en fjallkrækill virðist nú þegar á undanhaldi³⁴. Vistfræðilegir þættir, svo sem aukin skordýrabeit, geta dregið úr jákvæðum áhrifum hlýnunar á framleiðni og vöxt gróðurs. Breytt landnýting og náttúruhamfarir geta einnig haft afgerandi áhrif á gróðurþekju landsins næstu ár og áratugi.

4.4.2 Dýralíf

Á landinu verpa reglulega 75 tegundir fugla og um 25 tegundir til viðbótar hafa reynt varp eða teljast óreglulegir varpfuglar (sjá mynd 2.27). Í Loftslagsatlas fyrir evrópska varpfugla³⁵ er spáð fyrir um útbreiðslusvæði fuglanna í lok aldarinnar miðað við kröfur þeirra til loftslags í dag. Loftslagsskilyrði verða þá hér á landi fyrir um 80 nýjar tegundir varpfugla. Afar ólíklegt er að allar þessar 80 tegundir berist til landsins eða finni hér búsvæði við hæfi. Aukin útbreiðsla náttúrulegra birki-skóga og aukin skógrækt mun þó stuðla að landnámi

ýmissa spörfugla og annarra skógarfugla. Framrás skóga getur á hinn bóginn þrengrt að búsvæðum mófuglategunda ef ekki verður samsvarandi aukning á útbreiðslu bersvæðisgróðurs á kostnað auðna.

Samkvæmt fyrrnefndum Loftslagsatlas verður of hlýtt hér á landi í lok aldarinnar fyrir þórshana og stuttnefju. Því munu þessar tegundir hugsanlega hverfa úr landinu og verulega mun þrengja að varpi annarra norðlægra tegunda, svo sem snjóttittlings og hrafnсандar. Erfitt er að spá fyrir um hvernig öðrum sjófuglum en stuttnefju reiðir af, en ekki er ólíklegt að verulegar breytingar verði á varpstofnum þeirra á næstu áratugum.

Flækingsfuglar hrekjast oft til landsins í stórum hópum á haustin. Til að koma upp varpstofni hér á landi þurfa þeir að lifa af fyrsta veturinn og munu mildari vetur hjálpa þar til. Hið sama gildir um skordýr sem oft berast hingað í stórum hópum undan eindregnum suðaustan- og austanáttum. Búast má við að skordýrategundum fjölgi mikið hér á landi á þessari öld, en engin

greining hefur verið unnin á því hvaða tegundir eru líklegastar til að nema hér land.

Kanínur lifa nú villtar á nokkrum stöðum á Íslandi og má telja víst að þær breiðist mikið út á næstu áratugum ef ekki verður gripið til ráðstafana gegn þeim. Ekki er búist við að landspendýrum fjölgi nema fyrir tilstuðlan manna, en hreindýr, hagamús, minkur og tófa munu væntanlega njóta góðs af aukinni framleiðni vistkerfa.

Samantekt

- Fyrir hverja 1°C sem meðalhiti sumars og hausts hækkar má gera ráð fyrir því að skógarmörk birkis færist ofar um 150 metra.
- Þekktar rústamýrar s.s. í Guðlaugstungum og Þjórsárverum viðhaldast ekki og hverfa samfara hlýnandi veðurfari.
- Undir lok aldarinnar má ætla að loftslagsskilyrði verði hér hagfelld fyrir um 80 nýjar tegundir varp-fugla. Að sama skapi verður of hlýtt hér fyrir þórs-hana og stuttnefju og verulega mun þrengja að varpi annarra norðlægra tegunda, svo sem snjótittlings og hrafnsandar.
- Hreindýr, hagamús, minkur og tófa munu væntanlega njóta góðs af aukinni framleiðni vistkerfa samfara hlýnandi veðurfari.
- Búast má við að skordýrategundum fjölgi mikið hér á landi á þessari öld.

4.5 Líklegar sjávarstöðubreytingar

Líklegar hnattrænar breytingar á sjávarstöðu voru raktar í kafla 1 (sjá töflu 1.4). Líkleg hækkun sjávaryfirborðs til loka aldarinnar er háð því hversu mikið hlýnar, en varmaþennsla veldur um 70% af hækkuninni. Stór óvissuþáttur í sjávaryfirborðshækkun felst í hugsanlegum breytingum á íslæði í stóru íshvelunum á Grænlandi og Suðurskautlandinu. Þessi óvissuþáttur er ekki tekinn inn í útreikninga IPCC, en gæti aukið við sjávaryfirborðshækkunina. Hér að neðan verður því miðað efri mörk hækkunarinnar sem kemur fram hjá IPCC. Þetta er ófullkomin aðferð við að vega saman óþekkta óvissu vegna hugsanlegrar aukningar íslæðis

og þekktrar óvissu vegna annarra þátta, og mikilvægt er að hafa í huga að ekki er hægt að útiloka mun meiri sjávaryfirborðshækkun³⁶.

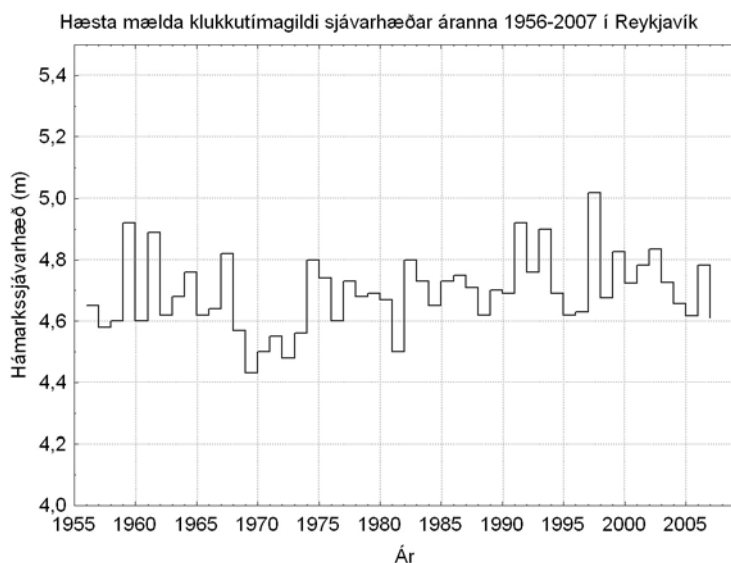
Sjávarstöðubreytingar þær sem minnst er á í kafla 1 eru mismunandi eftir sviðsmyndunum. Í þeim sviðsmyndum þar sem hlýnar mest rís sjávarborð hraðast. IPCC leggur mat á hraða sjávarborðshækkunar í lok 21. aldarinnar³⁷, og er hann mest 3,9 mm/ári í sviðsmynd B1, mest 6,0 mm/ári í sviðsmynd A1B og 8,5 mm/ári í sviðsmynd A2. Þó þessar tölur eigi við lok 21. aldarinnar er fróðlegt að bera þær saman við tölur um landris og landsig á Íslandi á undanförunum árum og áratugum.

Farglétting vegna bráðnunar jökla leiðir til þess að land rís víða um hálendið og suðausturströnd Íslands. Við ströndina er landrisið hraðast rúmlega 15 mm/ári við suðurjaðar Vatnajökuls, en landris er yfir 10 mm/ári á svæði sem teygir sig frá Vík í Mýrdal austur að Djúpa-vogi. Nokkuð landsig er á suðvesturhluta landsins, en annars staðar er landsig lítið eða ekkert. Mest er landsigið á Reykjanesskaga eða um 8 mm á ári³⁸. Líklegt er að landris og landsig á Íslandi haldi áfram á sömu svæðum á næstu áratugum, og þannig er talið að við Jökulsá á Breiðamerkursandi geti landris numið um 4 m á næstu hundrað árum³⁹ en frekari rannsóknir vantar á því hvaða hraðabreytingar séu líklegar á landsvísu.

Mælingar á lóðréttum hreyfingum lands eru með riflegum óvissumörkum. Í kafla 2.3.2 var notað gildið 2,1

Endurkomutími hæstu sjávarstöðu í Reykjavík				
	nú	2°C	3°C	4°C
		(38cm)	(48 cm)	(59cm)
5 ár	4,81	5,19	5,29	5,40
10 ár	4,90	5,27	5,38	5,48
25 ár	5,00	5,38	5,48	5,59
50 ár	5,08	5,46	5,56	5,67
100 ár	5,16	5,54	5,64	5,75

Tafla 4.2 Hæsta sjávarborð í Reykjavík⁴¹ (m) nú og við 2°, 3° og 4°C hlýnun til loka aldarinnar (hér er miðað við hnattrænar hitabreytingar, sbr. töflu 1.4). Innan sviga eru sýnd efri mörk (95% mörk) þeirrar sjávarborðshækkunar sem gert er ráð fyrir samkvæmt mismunandi sviðsmyndum IPCC. Ef gert er ráð fyrir óbreyttu landsigi í Reykjavík má bæta 0,2–0,4 m við tölurnar.



Mynd 4.7 Hæsta árlega staða sjávarborðs frá 1956 til 2007. (Mynd frá Gísla Viggóssyni).

mm á ári fyrir landsig í Reykjavík. Hafa ber í huga að leiðréttingar á stökkum í gagnaröðum, svo og það viðmiðunarkerfi sem hreyfingin er miðuð við geta haft veruleg áhrif á niðurstöðuna. Þannig hefur landsig í Reykjavík á tímabilinu 1997–2004 verið metið³⁸ sem $3,3 \pm 0,4$ mm á ári og einnig⁴⁰ allt að $4,0 \pm 0,3$ mm á ári. Þessi dreifing sýnir þá óvissu sem er á mati hraða lóðréttrar hreyfingar lands á Íslandi. Fyrir Reykjavík er niðurstaðan sú að varlegt mat á landsigi liggur á bilinu 2–4 mm/ári. Þrátt fyrir óvissuna er greinilegt að landris á suðausturhluta landsins er það mikið að það vegur upp þá sjávarstöðuhækkun sem spáð er á næstu öld.

Á þeim svæðum á landinu þar sem landris eða landsig er óverulegt mun yfirborð sjávar að meðaltali hækka í takt við hnattræna hækkun. Augljóslega verður yfirborðshækkunin mest á þeim svæðum þar sem landsig leggst við hnattræna hækkun. Þetta á sérstaklega við um suðvestanvert landið.

Hlýni um 2°C á öldinni er líklegt að sjávaryfirborð hækki að jafnaði um 0,4 m. Hlýni um 3°C á jörðinni hækkar sjávarborð líklega um 0,5 m og nái hlýnugin 4°C hækkar það um 0,6 m. Með hliðsjón af óvissumörkum bæði á hlýnun og sjávarborðshækkun þarf að lágmarki að gera ráð fyrir um hálfs metra hækkun sjávaryfirborðs og meiri þar sem landsigs gætir.

Hætta vegna sjávarflóða eykst í takt við hækkandi sjávarstöðu. Mynd 4.7 sýnir mestu mældu sjávarhæð í Reykjavík fyrir hvert ár frá 1956 til 2007. Þessar tölur

má nota til þess að meta endurkomutíma hæstu sjávarstöðu og þannig meta líkur á sjávarflóðum. Niðurstöður þessar eru sýndar í fyrsta dálki töflu 4.2. Til þess að framreikna þessar tölur fyrir lok 21. aldarinnar eru notuð efri mörkin á hækkun yfirborðs sjávar í töflu 1.4 fyrir sviðsmyndir sem gefa 2°C (B1), 3°C (A1B) og 4°C (A1FI) hnattræna hlýnun. Niðurstaðan er gefin í töflu 4.2, sem sýnir að 100 ára flóðið sem nú er í 5,16 m fer í 5,75 m við lok aldarinnar ef hlýnar um 4°C. Ef gert er ráð fyrir jöfnu landsigi út öldina hækkar þessi tala í 5,95–6,15 m.

Ef miðað er við hóflegri forsendur, t.d. 2°C hnattræna hlýnun, verður 100 ára flóðið í Reykjavík rúmlega 5,5 m og 5,7–5,9 m ef tekið er tillit til landsigs.

Vert er að setja þessar tölur í samhengi við mestu þekktu sjávarflóð á Íslandi. Sjávarflóðið í Reykjavík 1936 er talið með mestu flóðum sem þar urðu á 20. öldinni og er sjávarstaðan⁴² þá metin um 6,0 m þó heimildir séu nokkuð á reiki. Básendaflóðið 9. janúar 1799 er mesta sjávarflóð sem vitað er um að komið hafi á svæðinu þegar mjög djúp og kröpp lægð olli ofviðri og eyðileggingu við suður- og vesturströnd Íslands. Samkvæmt niðurstöðu greinargerðar um Básendaflóðið⁴³ var loftþrýstingur líklega mjög lágur og stórstreymt og hækkaði sjávarstaðan við landið vegna þessa. Sjór gekk að minnsta kosti fjórum álfnum (um 228 cm) hærra á Básendum í flóðinu en í mestu stórstraumsflóðum og 5 álfnum (285 cm) á Álftanesi og getur sjávarhæðin hafa numið allt að 6 m á Básendum og allt að

7 m á Álfanesi⁴⁴. Visst ósamræmi er á milli mestu flóða í Reykjavík og töflu 4.2, en stórflóðin áttu sér stað utan þess tímabils sem mælingarnar á mynd 4.7 byggjast á.

Samantekt

- Hér á landi er líkleg hækkun sjávarborðs á þessari öld háð bæði hnattrænni hækkun sjávarborðs og lóðréttum hreyfingum lands. Á þeim svæðum á landinu þar sem landris eða landsig er óverulegt mun sjávarborð að meðaltali hækka í takt við hnattræna hækkun, sem metin er 0,2 til 0,6 m á þessari öld. Óvissa í mati á sjávarborðshækkun er þó veruleg og ekki er hægt að útiloka að hækkunin verði mun meiri en hnattræn spá IPCC segir til um.
- Landris á suðausturhluta landsins er það mikið að það mun vega upp þá sjávarstöðuhækkun sem spáð er.
- Vegna landsigs verður hækkun yfirborðs sjávar mest um landið suðvestanvert.
- Hætta vegna sjávarflóða eykst í takt við hækkanði sjávarborð.

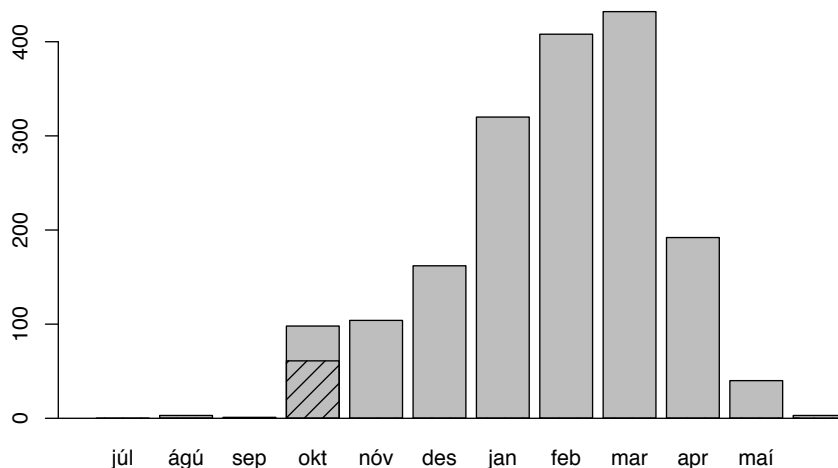
4.6 Loftslagsbreytingar og náttúruvá

Samkvæmt fjórðu úttekt IPCC er líklegt að tjón vegna veðurtengdra náttúruhamfara aukist umtalsvert á 21. öldinni. Orsakirnar eru einkum þríþættar. Í fyrsta lagi er líklegt að dreifing þurrka, flóða og hugsanlega storma breytist frá því sem nú er og rakið var framur í þessari skýrslu. Í öðru lagi er búist við hækkanði sjávarborði sem veldur aukinni tíðni hamfara á strandsvæðum og í þriðja lagi fjölgar fólki og landnýting breytist verulega. Þróun landnýtingar og byggðar á síðustu áratugum hefur víða aukið tjónnæmi (e.vulnerability) umtalsvert, jafnvel langt umfram afleiðingar þeirra veðurfarsbreytinga sem þegar eru komnar fram. Til marks um þetta tvöfaldaðist fjöldi náttúruhamfara í heiminum á fyrstu sjö árum 21. aldar miðað við tímabilið 1987–1997, úr 200–250 atburðum á ári í 400–500. Aukningin var nær eingöngu vegna veðurtengdra áfalla⁴⁵.

Óheppileg búsetuþróun, landnotkun og ófullnægjandi forvarnir auka þunga veðurfarsbreytinga umtalsvert. Mikilvægt er að einnig sé hugað að þessu þegar reynt er að meta afleiðingar hnattrænna veðurfarsbreytinga af mannavöldum. Þannig má kenna of lágum flóðvarnargörðum um umfang tjóns sem nýlega varð þegar felli-bylurinn Katrina gekk á landi við New Orleans í Bandaríkunum árið 2005 og í víðáttumiklum flóðum sem áttu sér stað í Suður-Pakistan sumarið 2007. Breytt landnotkun á strandsvæðum virðist einnig hafa aukið tjón í hamförum í Myanmar nýlega. Eins eru dæmi um að hliðar fjalla séu berskjaldaðar eftir skógarhögg sem hefur aukið líkur á skriðum í kjölfar aftakaúrkomu. Dæmi um þetta eru aurflóð í kjölfar fellibylja á Haítí árið 2004.

Í fyrri skýrslu vísindanefndar um loftslagsbreytingar²¹ var fjallað stuttlega um snjóflóð, ofviðri og jökulhlaup í tengslum við loftslagsbreytingar. Á vegum Almannavarna var nýlega unnið yfirlit um áfallapol íslensks samfélags⁴⁶. Þar eru m.a. taldir upp helstu áhættuþættir vegna tjóns tengdu náttúruhamförum á Íslandi. Fjallað er sérstaklega um eftirfarandi þætti: Eldgos, jarðskjálfta, sjávarflóð og almenna hækkun sjávar yfirborðs, ofanflóð (þ.m.t. snjóflóð), ofviðri, eldsvoða (þ.m.t. gróður og skógareldar) og jökulhlaup. Ekki var fjallað um venjuleg úrkomu- og leysingaflóð, en þau munu hiklaust taka breytingum með breyttu veðurfari eins og áður er getið. Slíkt hættumat þyrfti að gera, en í nýlegri tilskipun Evrópusambandsins um mat á flóðahættu er tekið fram að hættumat vegna flóða skuli taka tillit til loftslagsbreytinga. Loftslagsbreytingar munu hafa áhrif á suma ofangreindra áhættuþátta en í mismiklum mæli. Ekki hefur farið fram ítarleg úttekt á breytingum á náttúruvá vegna loftslagsbreytinga á komandi öld, en ætla má að búsetuþróun og landnýting geti haft áhrif á áhættuna hér sem annars staðar í heiminum.

Þó ekki sé beint samband milli snjóflóðahættu og meðalhita er sennilegt að með hlýnandi veðurfari dragi úr tíðni snjóflóða á Íslandi. Tjón og slys af völdum snjóflóða virðast hafa verið minni hér á landi á hlýjasta hluta aldarinnar milli 1930 og 1960 en bæði fyrir og eftir þetta tímabil⁴⁷. Hins vegar geta orðið alvarleg snjóflóð hér á landi óháð meðalhita ársins og má þar



Mynd 4.8 Skipting snjóflóða á Íslandi niður á mánuði. Skástrik-aðar súlur sýna snjóflóð í október 1995⁴⁸.

nefna að árið 1995, sem var mannskæðasta snjóflóðaár Íslandssögunnar, er ekki meðal tíu köldustu ára síðustu aldar og að nokkuð slæmar snjóflóðahrinur urðu árin 2005 og 2007 þótt þessi ár hafi verið tiltölulega hlý. Einnig má nefna að veturinn 1998–1999 var verstí snjóflóðavetur í Ölpunum síðan 1951 þrátt fyrir hlýnandi veðurfar þar í meira en tvo áratugi.

Nánast öll snjóflóð á Íslandi falla á tímabilinu október til maí og flest skráð snjóflóð féllu á kaldasta tíma ársins, einkum í janúar, febrúar eða mars, eins og sjá má á mynd 4.8⁴⁸. Mannskæðasta snjóflóðahrina 20. aldar varð hins vegar í október 1995 þrátt fyrir að október sé að meðaltali meira en 4°C hlýrri en köldustu vetrarmánuðurnir. Enda þótt hlýnun sem vænta má á þessari öld muni líklega fækka snjóflóðum, sérstaklega utan köldustu vetrarmánaðanna, yrði snjóflóðahætta eftir sem áður viðvarandi yfir háveturinn. Af þessum sökum eru ekki forsendur til að ætla að hlýnandi veðurfar hafi úrslitaáhrif á snjóflóðahættu hér á landi á næstu áratugum.

Þynning jökla veldur farglosun á jarðskorpuna og þrýstingslækkun í jarðskorpunni undir jöklinum. Þetta lækkar bræðslumark bergs og eykur framleiðslu kviku. Áætlað hefur verið⁴⁹ að rýrnun Vatnajökuls auki þannig framleiðslu á bergkviku undir Íslandi um 10%. Til samانبurðar má geta þess að það tæki áætlaða framleiðsluaukningu um 30 ár að mynda álíka mikla kviku og kom upp á yfirborðið í eldgosinu í Gjalp árið 1996. Þó ekki sé hægt að gera ráð fyrir að öll þessi aukaframleiðsla skili sér í aukinni eldvirkni á yfirborði má gera

ráð fyrir fjölgun eldgosa eða umfangsmeiri gosum á Vatnajökulssvæðinu á næstu áratugum.

Jökulhlaup verða af völdum eldgosa undir jöklum og úr jökulstífluðum lónum við jökuljaðra og undir jöklum. Miklar breytingar á þykkt og útbreiðslu jökla geta augljóslega haft áhrif á jökulhlaup. Um þetta eru dæmi frá fyrri tíð en jökulhlaup undan Heinabergsjökli í Austur-Skaftafellssýslu hófust um 1898 þegar jökullinn þynntist svo að hlaup fóru að koma úr Vatnsdalslóni. Úr þeim dró mikið um 1940 þegar jökullinn var orðinn svo þunnur að hann gat ekki lengur stíflað upp jafnmikið vatn í lóninu og áður. Hlaup úr Hnútlóni í Kverká og áfram í Kreppu sýndu svipaða sögu, en þó urðu síðustu hlaupin þar mun sneggri vegna minni fyrirstöðu og með meira hámarksrennsli. Hlaup úr ýmsum jaðarlónum geta því breyst vegna jöklabreytinga í náninni framtíð eins og þau hafa reyndar gert á undanföllum öldum og áratugum. Er nauðsynlegt að meta þessa áhættu til framtíðar í ljósi loftslagsbreytinga, sbr. fyrrnefnda tilskipun ESB um áhættumat vegna flóða.

Rigninga- og leysingaflóð munu taka breytingum við breytt loftslag eins og áður er getið. Vorflóð koma fyrr og gætu orðið sneggri og meiri. Vetrar- og haustflóð, þar sem saman fer rigning og leysing, verða meiri samfara aukinni úrkomu og hita og mestu flóð gætu orðið víðar á landinu en nú er. Ágangur vegna íss og þrepahlaupa minnkar, en aftakaatburðir taka ekki endilega breytingum sbr. umræðuna um snjóflóð.

Með meiri framleiðni gróðurs, aukinni útbreiðslu skóga og minnkandi beit eykst hætta á sinu- og skógareldum. Minnkandi snjóhula auk breytinga á úrkomu að vori og sumri hafa einnig áhrif á áhættuna. Þegar er farið að huga að vöktun og eftirliti með hættu á skógareldum. Aukinn gróður mun hins vegar draga úr flóðum og áættu vegna þeirra.

4.6.2 Áhættustýring vegna loftslagsbreytinga

Í niðurstöðum vinnuhóps tvö hjá IPCC er hvatt til þess að áhættustýringu sé beitt við aðlögun og viðbrögð tengdum loftslagsbreytingum⁵⁰. Tilgangur áhættustýringar er að skilja betur þá ógn sem af náttúrunni getur stafað, meta líkindi náttúruhamfara og mögulegar afleiðingar þeirra. Einnig að ráðast í aðgerðir sem draga úr líkum á eða tjóni af völdum hamfara. Í hliðargrein 4A er almennt rætt um áhættustýringu og viðbrögð við náttúruhamförum og þessir þættir tengdir saman í s.k. viðlagahringrás.

Aðferðafræði áhættustýringar markar leið til aukins skilnings á þeim afleiðingum loftslagsbreytinga sem líklegar eru til að hafa markverð áhrif á samfélög og umhverfi og til að draga úr áhættu í tengslum við þær. Beita má sviðsmyndum líklegra loftslagsbreytinga til að greina aukna hættu á loftslagstengdri náttúruvá og eins geta sviðsmyndir komið að gagni við áhættugreiningu. Út frá slíkum upplýsingum geta stjórnvöld skipulagt forvarnir og viðbúnað. Forvarnaaðgerðir geta beinst að skipulagi eða landnýtingu til langs tíma, þar á meðal stýringu vatnsbúskapar eða beinna aðgerða á strand-svæðum. Bættar viðbúnaðaráætlanir og þekking fólks á vá og viðbrögðum við henni eru líka dæmi um forvarnaaðgerðir sem gagnast vel við breyttar aðstæður vegna loftslagsbreytinga.

Í umfjöllun um framtíðarsviðsmyndir er algengast að einblína í upphafi á þær breytingar sem kunna að verða á tíðni eða afli einstakra váflokka (svo sem snjóflóða, storma eða flóða af ýmsu tagi). Slíkt er að sjálfsögðu mjög mikilvægt og gagnlegt, en hér verður líka að benda á að einnig má líta á hnattrænar umhverfisbreytingar af mannavöldum sem heildarvá sem lýtur sömu lögmálum og undirflokkarnir. Almenn viðbrögð við þeirri vá eru því svipaðs eðlis og væri aðeins um einn váflokk að ræða.

Á undanförunum tveimur áratugum hafa Sameinuðu þjóðirnar leitt víðtækt alþjóðasamstarf um hvernig megi auka þekkingu á náttúruvá og finna leiðir til að draga úr áhættu vegna hennar. Fyrir starfinu fer skrifstofa SP International Strategy for Disaster Reduction⁵¹ (ISDR). Undanfarið hefur stofnunin látið loftslagsbreytingar til sín taka.

Árið 2005, 10 árum eftir jarðskjálftann í Kobe í Japan stóð ISDR fyrir ráðstefnu í Hyogo þar sem samþykkt var s.k. Hyogo bókun. Í þessari bókun eru aðildarþjóðir SP hvattar til þess að taka upp árangursmiðaða aðferðafræði til að draga úr áhættu með því að draga úr tjónnæmi fólks og byggða vegna náttúruhamfara. Aðferðafræðin byggist á fimm áhersluatriðum. Í fyrsta lagi að lagarammar, reglugerðir og starfshættir innan stjórnsýslunnar nái til heildstæðrar áhættustýringar vegna náttúruvá. Í öðru lagi að greining áhættuþátta, vöktunarferli og viðvörðunarkerfi séu í föstum skorðum. Í þriðja lagi að þekkingu á náttúruvá sé viðhaldið með skipulögðum hætti og að upplýsingum um áhættu kynntar þeim þjóðfélagshópum sem í hættu eru. Í fjórða lagi að beinum aðgerðum til að draga úr áhættu sé hrint í framkvæmd og í fimmta lagi að viðbúnaði sé sinnt svo viðbrögð við hamförum verði hröð og fúlla⁵¹.

Viða um lönd hefur einungis síðasta þættinum af þessum fimm (þ.e. neyðaraðstoð eftir hamfarir) verið sinnt svo vel sé. Hinir þættirnir fjórir leggja áherslu á að draga úr tjóni vegna náttúruhamfara frekar en að bregðast við þeim. Hér á landi vantar lítið upp á að öllum þáttum áhættustjórnunar varðandi snjóflóð sé sinnt⁵² og í fáeinum öðrum váflokkum hefur miðað í rétta átt. Sömuleiðis hafa fjárhagsleg viðbrögð við flestum tegundum bráðra hamfara verið vel mörkuð með starfsemi Viðlagatryggingar Íslands. Algennt er að áhættuviðmið séu illa skilgreind, en skilgreining þeirra er eitt lykilatriði áhættustýringar^{52,53}. Loftslagsbreytingar skapa margþætta ógn. Til að geta dregið úr þeirri ógn þarf að leggja fyrir þekkingu á því í hverju hún felst. Til þess þarf að taka skipulega á sérhverjum áhættuþætti sem talinn er upp í kaflanum hér að framan og samhengi þeirra á milli.

4A Almennt yfirlit um áhættustýringu vegna náttúruvár

Áhættustýringu má skipta í sex skref,

1. Náttúruvá sem veldur tjóni

Skilgreind er sú náttúruvá sem tjóni veldur. Náttúruvá er af ólíkum toga s.s. eldgos, jarðskjálftar, ofsaveður, flóð, skriðuföll, jökulhlaup o.fl. Gerð vákorta er algeng leið til greiningar á náttúruvá.

2. Áhrifasvæði náttúruvár

Á vákortum eru sýnd landfræðilega afmörkuð svæði þar sem áhrifa tiltekinnar náttúruvár gætir og við hvers konar tjóni er að búast. Greining áhrifasvæða miðar einnig að því að lágmarka áhættu og þar með mögulegt tjón, þ.e. mannskaða eða meiðsl, eignatjón eða umhverfisröskun.

3. Tjónmætti

Tjónmætti er stærð, afl eða styrkur náttúruvár. Þessar upplýsingar eru gjarnan gefnar sem líkindi og hafa áhrif á hversu öflugur tjónvaldurinn getur orðið. Meta þarf tjónmætti fyrir þá tegund náttúruvár sem skilgreind er í lið 1.

4. Tjónnæmi

Tjónnæmi (e. vulnerability) er það hlutfall tjóna mælt í prósentum sem yrði ef náttúruhamfarir af tilteknu tjónmætti ættu sér stað. Tjónið getur verið a) manntjón, b) slys, c) eignatjón eða d) samfélagslegt tjón s.s. röskun á innviðum þjóðfélagsins. Tjónnæmi er metið með reiknilíkönunum sem samband á milli tjónvaldsins eða tiltekinnar náttúruvár og þeirrar byggðar eða svæðis sem fyrir áhrifum verða. Dæmi um þetta eru tjónnæmisgreiningar fyrir ákveðnar húsgerðir og jarðskjálfta⁵⁴.

5. Forvarnir

Að lokinni áhættugreiningu er unnt að hefja markvissar mótvægisáðgerðir sem eru fyrirbyggjandi framkvæmdir, stefnumótandi ákvarðanir tengdar landnýtingu, byggingastaðlar, fræðsla og upplýsingar til almennings, og aðrar varnaraðgerðir.

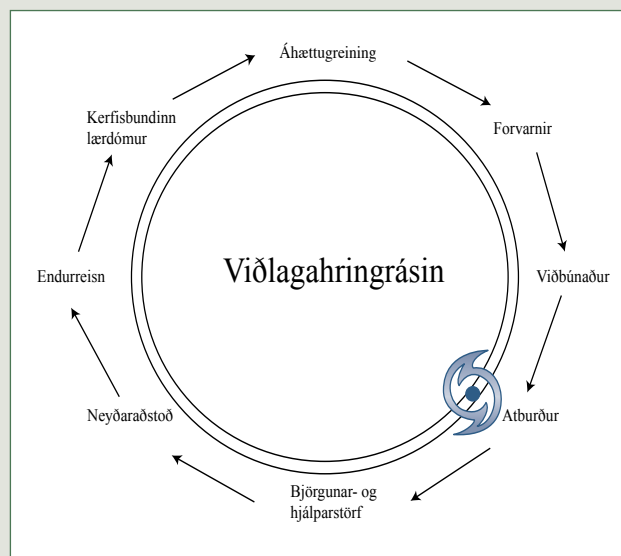
6. Viðbúnaður

Auk forvarnaraðgerða þarf skipulagðan viðbúnað til þess að bregðast við hamförum. Hér á landi hefur almannavarnadeild ríkislögreglustjóra það hlutverk með lögum að skipuleggja og gera ráðstafanir, í samvinnu við einstök ráðuneyti, undirstofnanir þeirra og sveitarfélög, sem miða að því að koma í

veg fyrir að almenningur verði fyrir tjóni af völdum náttúruhamfara. Hjálpar- og sjálfbóðaliðasamtök koma einnig að viðbúnaði á ýmsum stigum.

Viðlagahringrás

Áhættustýringu náttúruvár má setja fram í s.k. viðlagahringrás⁵⁵ (mynd 4.9) sem tengir áhættugreiningu, forvarnir og viðbúnað fyrir atburð við neyðarviðbrögð, endurreisnarstarf og endurskoðun í kjölfar atburðar. Um fyrri atriðin er fjallað hér að ofan en hér verður stuttlega fjallað um hina þættina. Neyðarviðbrögðin eru *björgunar- og hjálparstörf* strax í kjölfar hamfaranna, og einnig *neyðaraðstoð*, þ.e. tímabundnar lausnir vegna fæðis, klæða, húsnaðis, læknishjálpar o.s.frv. Í kjölfar þessara viðbragða tekur svo við *endurreisn samfélagsins*, þ.e. ákvarðanir og aðgerðir til að endurheimta eða bæta lífsskilyrði samfélags sem orðið hefur fyrir áfalli⁵⁵. Að lokum tekur við *kerfisbundið lærdómsferli* þar sem metið er hvernig undirbúningur og viðbrögð við hamförum reyndust, hvaða lærdóm megi draga af þeim og hvaða umbætur þurfi að gera. Án þessa síðasttalda þáttar er hættu á að lærdómur verði tilviljanakenndur og skili sér illa til samfélagsins.



Mynd 4.9 Viðlagahringrás⁵⁵.
(Mynd frá Sólveigu Þorvaldsdóttur).

Til mikilla bóta væri ef hér á landi yrðu teknir upp starfshættir (með tilheyrandi lagarömmum) sem styðjast við stefnumörkun ISDR í þeirri viðleitni að draga úr áhættu vegna náttúruvár. Eðlilega koma margir aðilar að þessum málaflokki hér á landi, en mikilvægt er að einn opinber aðili hafi ávallt heildarsýn og tryggi að fylgst sé með sérhverjum áhættuþætti, bendi á gót í þekkingu og tryggi að áhættuþættir falli ekki á milli stafs og hurðar þegar kemur að stofnunum ríkisins. Einnig myndi þessi aðili miðla lærdómi á milli þeirra sem sinna mismunandi áhættuþáttum og stuðla að aðgerðum sem miðla þekkingu um náttúruvá til þeirra sem hana þurfa að nota, s.s. skipulagsaðila, stefnumótenda, fyrirtækja, almennings og fleiri. Loks er nauðsynlegt að skipulegri vöktun á áhættuþáttum sé sinnt.

Upptaka starfshátta í líkingu við þá sem ISDR mælir með er verkefni sem krefst samstarfs stofnanna sem heyra undir ýmis ráðuneyti, auk þess sem tryggja verður aðkomu sveitarfélaga að ferlinu. Vísindanefnd um loftslagsbreytingar er ekki rétti farvegurinn til þess að fjalla um hvernig best sé að koma þessu verkefni fyrir í stjórnkerfinu. Lagt er til að settur verði á stofn sérstakur vinnuhópur sem geri tillögur um hvernig innleiða megji áhættustýringu vegna náttúruvár og loftslagsbreytinga.

Samantekt

- Sennilegt má telja að með hlýnandi veðurfari dragi úr tíðni snjóflóða, en þrátt fyrir það eru ekki forsendur til að ætla að hlýnandi veðurfar hafi úrslitaáhrif á snjóflóðaáttu hér á landi á næstu áratugum.
- Bráðnun og þynning Vatnajökuls eykur myndun bergkviku undir Íslandi og gera má ráð fyrir nokkurri fjölgun eldgosa eða umfangsmeiri gosum á næstu áratugum.
- Rigninga- og leysingafloð munu taka breytingum við hlýnandi veðurfar. Sums staðar er líklegt að flóð þessi aukist, t.d. frá jöklum.
- Markviss áhættustýring auðveldar aðlögun og viðbrögð tengdum loftslagsbreytingum.

4.7 Samfélagsmál (atvinnulíf, samgöngur, heilsufar, samgöngumál, skipulag)

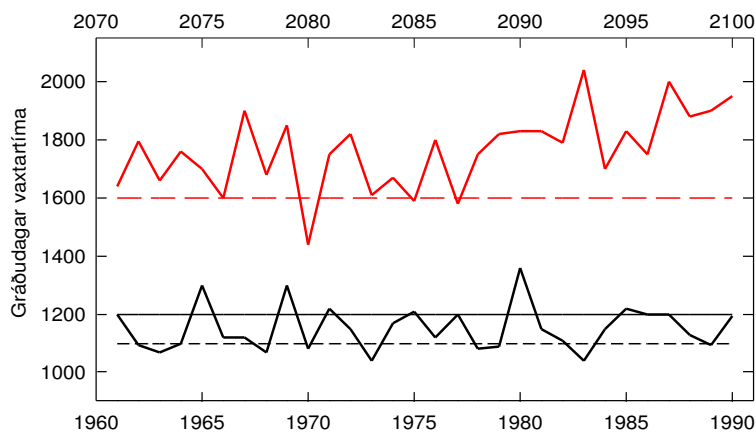
4.7.1 Landbúnaður

Eins og fram kom í kafla 1.8 getur afrakstur ræktarlands aukist sumstaðar utan hitabeltissvæða við hóflega hlýnun. Í nýlegu yfirliti³³ um áhrif væntanlegra loftslagsbreytinga á landbúnað á Íslandi er meginniðurstaðan sú að þær muni almennt leiða til eflingar landbúnaðar.

Matvælaframleiðsla og mannlíf jarðar er aðlagð þeim umhverfisaðstæðum sem ríkt hafa síðustu áratugi geta breytingar á þeim því orðið afdrifaríkar. Minni matvælaframleiðsla á ákveðnum svæðum getur valdið sveiflum í matvöruverði um allan heim þar til framleiðsla hefur aukist annars staðar. Áhrif þessara fyrir séðu auknu sveiflna í verði og framboði landbúnaðarvara eru áhyggjuefni, jafnt fyrir Íslendinga sem aðra. Áhrif þeirra á samfélög eru margslungin og því hefur verið spáð að stöðugleiki á heimsvísu geti minnkað við slíkar aðstæður. Þetta hefur m.a. leitt til þess að nú er rætt um nauðsyn þess að viðhalda hér öflugri matvælaframleiðslu sem hluta af hagvörnum landsins.

Spár um hlýnandi veðurfar ásamt auknum styrk CO₂ í andrúmslofti gefa til kynna uppskeruauka á öllum fódur- og matjurtum sem hér eru nú í ræktun⁵⁶. Nýting jurta sem nú eru á mörkum ræktunarsvæðisins, svo sem belgjurta, vetrarýgresis, vetrarrepju og fódurnæpna, mun verða öruggari. Nýjar fódurjurtir svo sem hafrar, hveiti og vetrarkorn munu eiga hér stóraukna möguleika (mynd 4.10). Nýjar nytjajurtir, svo sem ýmsar káltegundir, grasker, og asiur gætu einnig orðið auðræktaðar fyrir 2050. Búfjárræktin ætti að hagnast á betra fódri og styttri gjafatíma.

Skógrækt nýtur góðs af væntanlegum loftslagsbreytingum í auknum viðarvexti og bindingu kolefnis. Í nýlegri rannsókn⁵⁷ þar sem eðlisfræðilegt hermílikan af vaxtarferlum alaskaaspar var notað til að spá fyrir um áhrif hækkunar á hita og styrk CO₂ í lok aldarinnar kom fram að vöxtur myndi aukast um 26 eða 35% miðað við 2°C eða 4°C hækkun meðalhita. Hækkun styrks CO₂ mun auka vöxtinn um 11%, ein og sér, þó að hiti breyttist ekki.



Mynd 4.10 . Gráðudagar (margfeldi meðalhita vaxtartímabils og fjölda daga) 1961–1990 (svört breið lína; neðri x-ás) og framtíðarspá fyrir árabilið 2071–2100 (rauð breið lína; efri x-ás). Til viðmiðunar er fjöldi gráðudaga sem þarf til að bygg nái lágmarksþroska (svört brotalína) eða fullum þroska (svört heil lína). Rauð brotalína sýnir hversu marga daga hveiti þarf til að ná fullum þroska. (Mynd aðlögðuð úr grein eftir Harald Ólafsson ofl. ⁵⁶).

Tegundir úr norðanverða tempraða laufskógabeltinu, svo sem eik, askur, hlynur og beyki, sem fram til þessa hafa verið hér á jaðri þolsviðs síns, gætu átt erindi í ræktun á næstu áratugum⁵⁸. Í hefðbundnum landbúnaði og skógrækt eru helstu ógnir fólgnar í skaðvöldum, hugsanlegum vetrarskemmdum, illvirðrum og hækkun sjávarstöðu.

Samkvæmt greiningu³³ verður ekki séð að samkeppnisstaða íslensks landbúnaðar versni vegna hnattrænna breytinga á landbúnaði í kjölfar loftslagsbreytinga. Fyrir landbúnaðinn fela því breytingarnar almennt í sér jákvæð tækifæri, nokkrar ógnanir en ekki síst mikla áskorun.

4.7.2 Sjávarútvegur

Það er jafnvel enn vandasamara að meta hugsanlegar afleiðingar eða áhrif hlýnunar sjávar á sjávarútveg og efnahag Íslands á nýhafinni öld en hugsanleg áhrif á lífríkið sjálft því auk óvissunnar um viðbrögð hafstrauma og lífríkis, bætast hér ofan á óvissa í efnahagslegum og félagslegum forsendum. Í skýrslu sérfræðinga um áhrif loftslagsbreytinga á lífríki og efnahag á norðurslóð⁵⁹ er engu að síður gerð tilraun til að meta þessi áhrif.

Í efnahagslegu tilliti eru loftslagsáhrifin a.m.k. tvíþætt, þ.e. þau hafa áhrif á hversu mikið er hægt að veiða annars vegar; hins vegar fiskverð og kostnað við veiðar og vinnslu. Áhrifin á fiskmagnið sem veiða má, geta

verið háð stærð fiskstofnanna, breytt útbreiðsla þeirra og breytt aðgengi eða veiðanleiki þeirra. Áhrifin geta verið jákvæð eða neikvæð, allt eftir fiskstofni og svæði. Þrír möguleikar voru kannaðir í skýrslu sérfræðinganna^{60,61,62}, þ.e. „bjartsýn“ forsenda um 20% aukningu í fiskgengd á næstu 50 árum, „svartsýn“ forsenda um hægfara minnkun stofna um 10% á 50 árum, og „hrun“-sviðsmynd, þar sem um er að ræða 25% minnkun fiskaðgengis á 5 ára tímabili (gæti samsvarað hruni eins mikilvægs stofns eða nokkurra stofna). Ekki voru sérstaklega rannsakaðar markaðslegar forsendur eða forsendur breytts afurðaverðs.

Helstu niðurstöður voru þessar: Líklegustu forsendur um aukna fiskgengd næstu 50–100 árin af völdum loftslagsbreytinga, eru ekki talin munu hafa veruleg langtímaáhrif á verga þjóðarframleiðslu á Íslandi. Við snögga minnkun á fiskgengd, geta áhrifin á verga framleiðslu og hagvöxt verið veruleg til skamms tíma litið. Slíkar breytingar hefðu þó ekki meiri langtímaáhrif á þjóðarhag en hægfara breytingar.

Það er áhugavert að við óbreytt ástand sjávar hér við land, hefur verið leitt getum að því að með því að tvöfalda stofnstærð þorsksins, mætti auðveldlega auka langtíma afrakstur stofnsins um a.m.k. 20–30%. Þetta bendir til þess að öflug fiskveiðistjórnun gæti hæglega fært þjóðarbúinu meiri ábata til langs tíma litið en hinn að því er virðist frekar takmarkaði ávinningur af áætlaðri hlýnun á Íslandsmiðum.

Í ljósi fyrirsjánalegra mikilla breytinga í Norðurhöfum og áhrifa þeirra á útbreiðslu flökkustofna er mikilvægt að stjórnvöld stuðli að samstarfi við nágrannaríki um rannsóknir, skynsamlega stjórnun veiða og skiptingu afla úr flökkustofnum á komandi árum, svo tryggja megi sem best samkomulag um sjálfbæra nýtingu þeirra.

4.7.3 Samgöngur

Rannsóknir á afleiðingum loftslagbreytinga á vegakerfi ná ekki yfir mörg ár, en rannsóknir á þessu sviði eru á undirbúningsstigi, m.a. á vegum 7. rannsóknaráætlunar ESB. Nýleg skýrsla frá Vegagerðinni⁶³ rekur dæmi um líklegar afleiðingar loftslagbreytinga á vegakerfið. Á þeim vegum þar sem hækkandi vetrarhiti leiðir til aukinnar tíðni hitasveiflna um frostmark má gera ráð fyrir að þörf fyrir þungatakmörkanir aukist. Eins og kom fram í kafla 2.7.3 eru vísbendingar um að þetta sé nú þegar farið að gerast. Einnig geta jökulár breytt um farveg í kjölfar hopunar jökla og vatnsrennsli aukist undir sumum brúarmannvirkjum meðan önnur standa á þurru. Sérstaklega er horft til breytinga á vatnsföllum á Skeiðarársandi og Breiðamerkursandi í þessu sambandi. Venjuleg rigninga- og leysingaflóð munu taka breytingum við breytingar á úrkomu og hita. Eins verður að líkindum breyting á ágangi vegna íss og þrepa-hlaupa. Taka verður tillit til þessa við hönnun samgöngumannvirkja.

Bent hefur verið á að bráðnun íss á norður-heimskauts-svæðinu muni opna nýjar siglingaleiðir með hugsanlegum tækifærum fyrir íslenskt atvinnulíf⁶⁴.

4.7.4 Heilsufar

Möguleg áhrif loftslagbreytinga á heilsufar þjóðarinnar voru rædd nokkuð í fyrri skýrslu Vísindanefndarinnar²¹. Helstu áhættuþættir eru smitsjúkdómar og aukin tíðni ofnæmissjúkdóma. Síðari þátturinn tengist breytingum á gróðurfari og vaxandi magni frjókorna.

Hvað smitsjúkdóma varðar hefur Ísland til þessa verið laust við skordýr sem eru smitferjur á borð við m.a. moskítóflugur og vissa tegund af smámaurum *Ixodes ricinus* sem er að finna í Mið- og Norður- Evrópu. Hækkandi hiti mun breyta fínu skordýra hér. Ekki er þar með sagt að landnám slíkra skordýra leiði til út-

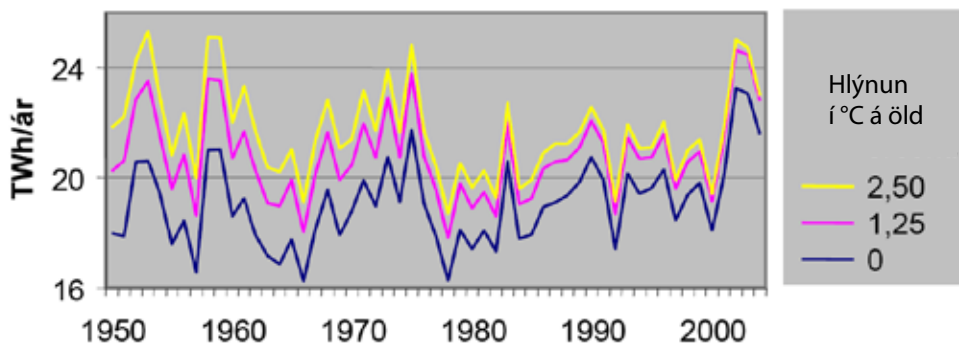
breiðslu á malaríu og beinbrunasóttar sem eru útbreiddir sjúkdómar á heimsvísu. Talið hefur verið að malaríusvæði jarðar stækki með hækkandi hita. Aðrir þættir en hlýnun andrúmsloftsins kunna að skipta þar meira máli. Má nefna ónæmi malaríu fyrir lyfjum og bresti í baráttu gegn moskítóflugunni. Rétt er að minnast þess að um næstsíðustu aldamót greindist malaría í Norður-Evrópu, jafnvel í Skandinavíu en hvarf þaðan þátt fyrir hlýnandi loftslag. Eins kunna efnahaglegar og félagslegar aðstæður ásamt hreinlætisaðstæðum að skipta mestu um útbreiðslu beinbrunasóttar.

Sjúkdómar á borð við veiruheilahimnubólgu og Borreliosis sem tengjast smámaurnum *Ixodes ricinus* hafa breiðst út í Norður Evrópu hugsanlega vegna loftslagsbreytinga. Nemi þessi smámaur land hér kunna slíkir sjúkdómar að festa hér rætur. Hin fábreytta fána villtra spendýra á Íslandi og lítill þéttleiki þeirra vinnur gegn viðkomu þessa maurs, en hann er háður slíkum milli-hýslum.

Dýrasjúkdómar og sjúkdómar sem eru sameiginlegir dýrum og mönnum (súnur) geta haft áhrif á heilsufar manna. Ætla má að skilyrði fyrir súnur verði hagstæðari vegna hækkandi hita og raka hér á landi auk fjölbreytilegra skordýralífs. Nú á dögum eru súnur einkum vandamál í matvælaíðnaði. Landbúnaði er ógnað af sýktu fóðri og mönnum er ógnað af sýktum dýrum, afurðum frá þeim og menguðu vatni. Helstu sýkingar sem tengst geta hækkandi hita eru salmonellu- og kampýlóbaktærsýkingar. Einnig má ætla að sýkingar af völdum sníkjudýra sem hafa áhrif á heilsu manna og dýra geti færst í vöxt á norðurslóðum.

Aukinn aðflutningur fólks frá fátækari löndum m.a. vegna afleiðinga loftslagsbreytinga getur aukið tíðni tiltekinna sjúkdóma hér á landi, þar á meðal berkla, HIV-sýkinga og sýkinga af völdum lifrabólgu B svo dæmi séu nefnd. Öflugar sóttvarnir og eftirlit geta spornað við útbeiðslu slíkra sjúkdóma hér á landi.

Ólíklegt er að heilsufarsleg áhrif loftslagsbreytinga hér á landi verði veruleg og miðað við núverandi styrk þjóðfélagsins og heilbrigðiskerfisins er ekkert sem bendir til annars en Íslendingar geti ráðið við þessi áhrif.



Mynd 4.11. Möguleg rennslisorka til virkjana á Íslandi byggt á mælingum og aðlögun vegna hlýnandi veðurs, annars vegar hlýnun um 1.25°C á 100 árum og hins vegar hlýnun um 2.5°C á 100 árum⁶². Bláa línan sýnir söguleg gögn, fjólubláa lína sýnir niðurstöður ef miðað er við að hlýni um 1.25°C á 100 árum og gula línan ef miðað er við hlýnun um 2.5°C á 100 árum¹⁷.

4.7.5 Hönnun mannvirkja á lágsvæðum.

Við hönnun mannvirkja í sjó þarf að taka tillit til gerðar mannvirkis, botngerðar, sjávardýpis, sjávarstöðu, öldu-áraunar og öldustefnu á mannvirkið. Auk þess þarf að taka mið af líftíma mannvirkis við val á endurkomutíma hönnunarálags. Líftími mannvirkis hefur áhrif á mannvirkjagerð. Líftími hafnarmannvirkja er yfirleitt miðaður við 40–50 ár. Þessi líftími hafnarmannvirkja gerir það að verkum að tekið er tillit til langtímabreytinga á sjávarstöðu við hönnun þeirra. Þegar er komið að viðhaldi og endurnýjun þessara mannvirkja eftir um það bil 35 til 50 ár eru hönnunarforsendur varðandi áraun og hæð endurskoðuð í takt við mælda og spáða sjávarborðshækkun. Þannig eru sjóvarnargarðar hannaðir fyrir áraun sem kemur á 20–40 ára fresti.

Líftími ýmissa bygginga er meiri en hafnarmannvirkja, líftími kjallara undir hús er áætlaður um 100 ár en líftími stærri bygginga getur verið hundruðir ára (dæmi um þetta er nýja tónlistarhúsið í Reykjavík). Þegar líftími mannvirkja er 100 ár eða meiri þarf að taka fullt tillit til væntanlegra sjávarstöðubreytinga við hönnun þeirra.

Upp úr árinu 1990 var farið að huga að hækkun sjávarborðs af völdum loftslagsbreytinga hér á landi. Í samvinnu við Vita- og Hafnamálastofnun ríkisins og Viðlagatryggingu Íslands gaf Skipulag ríkisins út skýrslur

um skipulag og byggingareglur á lágsvæðum^{65,66}. Þar er tekið saman yfirlit yfir ráðstafanir sem þjóðir sem búa á lágsvæðum hafa þróað, t.d. Danmörk og Holland. Jafnframt voru lögð drög að strandsvæðastjórnun sem síðan hefur verið unnið eftir á nokkrum lágsvæðum eins og í Vík í Mýrdal og við Jökulsárlón á Breiðamerkursandi. Miðað var við að hækkun sjávarborðs til ársins 2100 vegna loftslagsbreytinga yrði 0,66 m en einnig voru skoðaðir aðrir þættir s.s. landsig, vindáhlaðandi, loftþrýstingsbreytingar og brimbrot í óveðrum.

Í skýrslunni frá 1992 var lagt til að á höfuðborgarsvæðinu yrði gólfkóti⁶⁷ hækkaður á lágsvæðum sem lægju milli 50 til 200 m frá strandlínu eða væru á óvörðu svæði fjær strandlínu. Lagt var til að hækkunin yrði 0,66 m vegna hnattrænnar hækkunar yfirborðs sjávar og 0,15 m til að mæta landsigi. Einnig var lögð til 0,4 m viðbótarhækkun nærri strandlínunni (þ.e. 50–100 m frá ströndu) þar sem gera verður ráð fyrir áhrifum brimbrots.

Rætt var um líklega hækkun sjávar yfirborðs á 21. öld í kafla 4.5. Þar kom fram að 0,5 m hækkun á næstu öld er lágmarksviðmið. Einnig kom fram að landsig á höfuðborgarsvæðinu yrði á bilinu 0,2–0,4 m ef það héldist óbreytt til aldamóta. Þó ekki sé enn ástæða til þess að endurskoða viðmiðunarmörkin frá 1992 þarf að fylgjast vel með breytingum bæði á hnattrænni sjávarstöðu og lóðréttum hreyfingum lands. Mikilvægt er að tryggja sé í skipulagslögum að miðað sé við besta mat á líklegri

sjávaryfirborðshækkun þegar skipulagt er á lágsvæðum. Þetta má gera t.d. með því að setja inn í skipulags- og byggingalög ákvæði um að við skipulagningu slíkra svæða skuli haft samráð við tiltekinn opinberan fagadila.

4.7.6 Orkuframleiðsla og orkukerfi.

Þegar gerðar eru áætlanir um nýtingu vatnsafls er venjan að byggja á mældum tímaröðum rennslis sem síðan eru notaðar við vatnafræðilega líkanagerð til þess að meta rennsli til virkjunar. Við hefðbundna hönnun er gert ráð fyrir því að tölfræðilegir eiginleikar rennslisráðanna muni ekki breytast í framtíðinni og því sé hægt að leggja þær til grundvallar við hönnun fram í tímann. Þessi forsenda breytist þegar vatnafar tekur breytingum vegna breytinga á loftslagi. Því verður að leita leiða til þess að taka tilliti til áhrifa loftslagsbreytinga við nýtingu vatnsaflsins.

Eins og fram hefur komið áður er vatnafar breytilegt innan árs og frá ári til árs. Við nýtingu er nauðsynlegt að jafna rennsli ána með því að geyma hluta þess í miðlunarlónum. Reynt er að leita hagkvæmustu lausna þegar virkjun er hönnuð og ræðst sú hönnun mjög af eðlisþáttum rennslis og þeim aðstæðum sem ríkjá á virkjunarstað. Ef rennsliseinkenni breytast, til dæmis ef sumarrennsli eykst vegna aukinnar jöklaleysingar, eða ef dreifing rennslis innan ársins breytist hefur það bein áhrif á hönnun virkjana. Fyrir virkjanir í rekstri verður einnig breyting sem leitt getur til betri eða lakari arðsemi og ræðst það af breytingum á rennsliseiginleikum. Í fæstum tilfellum er þá hönnun virkjunar, sem byggir á sögulegum mælingum, ennþá hagkvæmasta fyrirkomulagið. Því meiri sem þessar breytingar eru, þeim mun meiri verða áhrifin og því meiri líkur eru á að virkjun víki frá hagkvæmasta fyrirkomulagi. Hér eru gríðarlegir hagsmunir í húfi. Í fyrsta lagi vegna þess að núverandi virkjanir eru að líkindum ekki vel hannaðar m.t.t. framtíðarrennslis. Það kallar á endurmat á hönnun og útfærslu virkjana. Í sumum tilfellum kann að reynast auðvelt að gera lagfæringar sem leiða til betri nýtingar. Í öðru lagi verður að taka tillit til framtíðarbreytinga við hönnun nýrra virkjana.

Sviðsmyndir frá verkefninu *Veður og orka*, sem lýst er í kafla 3 hafa verið notaðar til þess að meta framtíðarbreytingar á vatnsorku. Vatnsafl landsins mun aukast

tímabundið vegna þeirrar aukningar, sem spáð er í afrennsli. Heildarvatnsafl landsins var síðast metið 1981⁶⁸, en ef beitt er sömu aðferðafræði, reiknast vatnsafl tímabilsins 2071–2100 320 TWh/ári í samanburði við 220 TWh/ári á tímabilinu 1961–1990⁶⁹. Aukningin nemur 45% í reiknuðu vatnsafl. Þessi tala byggist á því að á 110 árum hlýni um tæpar 3°C. Þegar litið er til orkukerfisins fyrir árin 2010–2015 hefur verið reynt að meta líklegar breytingar á hita og beita þeim breytingum síðan á sögulegar tímarraðir um rennsli og fá þannig fram rennslisráðir til að meta breytingar í orkuvinnslugetu þess kerfis sem nú er í rekstri¹⁷ (mynd 4.11).

Það er ljóst af þessum reikningum að veruleg aukning verður í vatnsorku landsins með hlýnandi veðurfari. Einnig að núverandi orkukerfi gæti framleitt mun meiri orku í framtíðinni vegna aukningar í rennsli og breytinga á árstíðadreifingu þess. Því er brýnt að þróa aðferðafræði við ákvarðanir innan orkugeirans sem tekur fullt tillit til þeirra breytinga sem vænta má. Þessar breytingar eru að mestu leyti jákvæðar, a.m.k. næstu öld eða svo, meðan gengur á vatnsforða jöklanna. Líta þarf þó til þess að flóð kunna að aukast og aðstæður á virkjunarsvæðum að breytast með breyttu veðurfari sem kalla kann á aðgerðir og breyttar hönnunarforsendur.

Samantekt

- Uppskeruauki verður af öllum fóður- og matjurtum sem nú eru í ræktun.
- Nýjar trjátegundir gætu orðið heppilegar til nytjaræktunar, s.s. eik, askur, hlynur og beyki, en þessar tegundir úr norðanverða tempraða laufskógabeltinu hafa hingað til verið á jaðri þolsviðs síns hér á landi.
- Líklegustu forsendur um aukna fiskgengd næstu 50–100 árin af völdum loftslagsbreytinga, eru ekki taldar munu hafa veruleg langtímaáhrif á verga þjóðarframleiðslu. Skilvirk veiðistjórnun og samningar um skiptingu hámarksafla geta á hinn bóginn haft umtalsverð jákvæð áhrif á afkomu íslensks sjávarútvegs þegar á heildina er litið.
- Á vegum þar sem hækkandi vetrarhiti leiðir til tíðari

hitasveiflna um frostmark má gera ráð fyrir aukinni þörf fyrir þungatakmarkanir og þar með röskun samgangna og flutninga um þjóðvegakerfið.

- Heildarvatnsafl landsins mun aukast með hlýnandi veðurfari. Sama gildir um núverandi orkukerfi sem

mun skila umtalsvert meiri orku en nú er. Flóð munu taka breytingum og hafa áhrif á hönnun og rekstur orku- og samgöngumannvirkja.

- Ólíklegt er talið að heilsufarsleg áhrif loftslagsbreytinga hér á landi verði veruleg miðað við núverandi styrk þjóðfélagsins og heilbrigðiskerfisins.

Tilvísanir

- 1 Stern, N. 2007. The Stern Economics of Climate Change: The Stern Review. *Cambridge University Press*. Sjá sérstaklega umfjöllun í kafla 2.3 og viðbætum annars kafla.
- 2 Sjá vefsetur sjóðsins (www.adaptation-fund.org).
- 3 Sjá umfjöllun um áhrif loftslagsbreytinga á sjálfbæra þróun í kafla TS.5.4 í WGII-AR4.
- 4 Sjá t.d. umfjöllun í Björnsson, H., T. Jonsson, and T. Johannesson. 2005. Comment on “Iceland as a heat island” by D. H. Douglass et al., *Geophys. Res. Lett.*, 32, L24714 og einnig í Björnsson, H. Olason, E.O. Jonsson, T. and Henriksen, S. 2007. Analysis of a smooth seasonal cycle with daily resolution and degree day maps for Iceland. *Meteorolog. Zeitschrift*. 16, 057– 069.
- 5 Rætt er um nýliðnar breytingar á hafisþekju í kafla 4.4 í WG1-AR4.
- 6 Sjá umfjöllun í kafla 8.8.3 í WGI-AR4
- 7 Reynolds, R.W., N.A. Rayner, T.M. Smith, D.C. Stokes, and W. Wang, 2002: An Improved In Situ and Satellite SST Analysis for Climate. *J. Climate*. 15, 1609-1625.
- 8 Fallað er um breytingar á isflæði í kafla 4.6 í WGI-AR4. Nýlega umfjöllun um rannsóknir á Grænlandsjökli má finna í Witze, A. 2008. Loosing Greenland. *Nature*, doi:10.1038/452798a
- 9 Sigurðsson, O., Th. Thorsteinsson, S. M. Ágústsson og B. Einarsson. 2004. Afkoma Hofsjökuls 1997–2004. *Skýrsla OS-2004/029*, Orkustofnun, Reykjavík.
- 10 Björnsson, H., F. Pálsson and H. Haraldsson. 2002. Mass balance of Vatnajökull (1991–2001) and Langjökull (1996–2001), Iceland. *Jökull*, 51, 75–78.
- 11 Þorsteinn Þorsteinsson. 2008. Afkoma Hofsjökuls 2006–2007. *Greinargerð Thor-2008/001*. Vatnamælingar Orkustofnunar.
- 12 Jóhannesson, T. 1997. The response of two Icelandic glaciers to climate warming computed with a degree-day glacier mass-balance model coupled to a dynamic model. *J. Glaciol.*, 43(144), 321–327.
- 13 Guðmundsson, S., H. Björnsson, F. Pálsson and H. H. Haraldsson. 2003. Comparison of physical and regression models of summer ablation on ice caps in Iceland. *Rep. RH-15-2003*, Science Institute, University of Iceland, and National Power Company of Iceland, Reykjavík (skjal á <http://www.raunvis.hi.is/sg/emodels.pdf>, 19 April 2006).
- 14 Björnsson, H., G. Aðalgeirsdóttir, S. Guðmundsson, T. Jóhannesson, O. Sigurðsson and F. Pálsson. 2006. Climate change response of Vatnajökull, Hofsjökull and Langjökull ice caps, Iceland. *Proc. The European Conference of Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources*, Reykjavík, Iceland, June 5–6.
- 15 Aðalgeirsdóttir, G. 2003. Flow dynamics of the Vatnajökull ice cap, Iceland. *VAW/ETH Zürich, Mitteilungen* No. 181.
- 16 Aðalgeirsdóttir, G., G. H. Guðmundsson and H. Björnsson. 2005. The volume sensitivity of Vatnajökull ice cap, Iceland, to perturbations in equilibrium line altitude. *J. Geophys. Res.*, 110, F04001, doi: 10.1029/2005JF000289.
- 17 Tómas Jóhannesson o.fl. 2007. Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. *Report OS-2007/011*. Orkustofnun, Reykjavík.
- 18 Sjá umfjöllun um VO sviðsmyndirnar í kafla 3.
- 19 Jónsdóttir, J. F. 2008. A runoff map based on numerically simulated precipitation and a projection of future runoff in Iceland. *Hydrol. Sci. J.* 53,100-111.
- 20 Lesa má um sífrera á Íslandi í grein Bernd Etzelmüller, Herman Farbrót, Agust Guðmundsson, Ole Humlum, Ole Einar Tveit og Helgi Björnsson. 2007. The regional distribution of mountain permafrost in Iceland. *Permafrost and Periglac. Process*. 18: 185–199, og um áhrif loftslagsbreytinga má lesa í Farbrót, H., B. Etzelmüller, T. V. Schuler, A. Guðmundsson, T. Eiken, O. Humlum, and H. Björnsson. 2007. Thermal characteristics and

- impact of climate change on mountain permafrost in Iceland, *J. Geophys. Res.*, 112, F03S90, doi:10.1029/2006JF000541.
- 21 Umhverfissráðuneytið. 2000. Veðurfarsbreytingar og afleiðingar þeirra. Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar, Umhverfissráðuneytið Reykjavík.
 - 22 Hjalmar Vilhjálmsson og Alf Hákon Hoel. 2005. 13. Kaflí: Fisheries and Aquaculture, bls. 691–780 í ACIA, Arctic Climate Impact Assessment, Cambridge University Press.
 - 23 Jón Ólafsson. 2007. Sýrustig sjávar breytist. *Hafrannsóknastofnunin Fjölrit* 116, 29–32.
 - 24 CIESM, 2001. Gelatinous zooplankton outbreaks: theory and practice. *CIESM Workshop Series*, n°14. Monaco (www.ciesm.org/publications/Naples01.pdf).
 - 25 Purcell, J.E. 2005. Climate effects on formation of jellyfish and ctenophore blooms: a review. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 85:461–476.
 - 26 Edwards, M., Johns, D.G., Leterme, S.C., Svendsen, E., Richardson, A.J. 2006. Regional climate change and harmful algal blooms in the northeast Atlantic. *Limnology & Oceanography*, 51(2): 820–829.
 - 27 Hafrannsóknastofnunin. Upplýsingavefur um vöktun eiturbörunga: www.hafro.is/voktun.
 - 28 Christoph Wöll. 2008. Altitudinal tree limit of mountain birch (*Betula pubescens* Ehrh.) in Iceland and its relationship to temperature. *M.Sc. thesis. Dept. of Forest Sciences (Tharandt), Technical University of Dresden, Germany*.
 - 29 Þetta þýðir þó ekki að allt þetta svæði hafi verið vaxið birki-skógi við landnám, draga verður frá flatarmál votlendis sem þekur um 8% landsins í dag. Hallamýrar hafa þó að stórum hluta verið vaxnar birkikjarri.
 - 30 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.
 - 31 Rannveig Ólafsdóttir, P. Schlyter, and Hörður V. Haraldsson. 2001. Simulating Icelandic vegetation cover during the Holocene implications for long-term land degradation. *Geografiska Annaler* 83A: 203–215.
 - 32 Frieda Sjoukje Zuidhoff. 2002. Recent decay of a single palsa in relation to weather conditions between 1996 and 2000 in Laivadalen, northern Sweden. *Geog. Ann. A* 84,103–111.
 - 33 Bjarni E. Guðleifsson. 2004. Áhrif væntanlegra loftslagsbreytinga á landbúnað á Íslandi. *Rit Fræðafélags landbúnaðarins* 2004: 17–25.
 - 34 Hörður Kristinsson 2008. Fjallkrækill, fyrsta fórnarlamb hlýnandi loftslags á Íslandi? *Náttúrufræðingurinn* 76, 115–120.
 - 35 Huntley, B., Green, R. E., Collingham, Y. C. & Willis, S. C. 2007. A Climatic Atlas of European Breeding Birds. *Durham University, Royal Society for Protection of Birds*. Lynx Edicions, Barcelona.
 - 36 Sjá t.d. Rahmstorf, S. 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea level rise. *Science*, 315, 368–370.
 - 37 Sjá töflu 10.7 í kafla 10 í WGI-AR4.
 - 38 Árnadóttir, T., B. Lund, W. Jiang, H. Geirsson, P. Einarsson, T. Sigurdsson. 2008. Glacial rebound and plate spreading: results from the first countrywide GPS observations in Iceland, submitted to *Geophys. J. Int.*
 - 39 Sigmundsson, F., Pagli, C., Sturkell, E., Geirsson, H. Pilen, V. and Einarsson, P. 2005. Forecasting future uplift and crustal response around Vatnajökull ice cap due to ice unloading. Í G. Viggósson (ed) *Proceedings of the Second International Coastal Symposium at Hofn*.
 - 40 Árnadóttir, Th., W. Jiang, K.L. Feigl, H. Geirsson and E. Sturkell. 2006. Kinematic models of plate boundary deformation in southwest Iceland derived from GPS observations, *J. Geophys. Res.*, 111, B07402, doi:10.1029/2005JB003907.
 - 41 Hæðartölurnar eru miðaðar við hæðakerfi Sjómælinga Íslands, til að finna samsvarandi hæðatölur í hæðakerfi Reykjavík-urborgar þarf að draga 1.823m frá tölunum í töflunni.
 - 42 Við mat á hæstu sjávarstöðu á síðustu öld var stuðst við mat á hæstu sjávarstöðu á bæjunum Eiði og Bjargi á Seltjarnarnesi. Sjá nánar í Þorbergur Þorbergsson. 1980. Verkamannabústaðir við Eiðisgranda í Reykjavík. Sjávarhæð og grundun húsa. Greinagerð. *Verkfræðistofa Þorbergs Þorbergssonar*. Skúlagötu 63. Reykjavík. Fyrir sjávarhæð er hér notast við hæðakerfi Sjómælinga Íslands.
 - 43 Lýður Björnsson. 2006. Básendaflóðið 1799. *Vefnir rafrænt tímarit félags um 18 aldrar fræði*. (<http://vefnir.bok.hi.is/2006/Bas.pdf>, skoðað 10. maí 2008).
 - 44 Sjávarhæð er sem fyrr í hæðakerfi Sjómælinga Íslands. Talan sem gefin hér gefin (7m) miðast við mestu stórstraumsflóð, en óljóst er í heimildum hvert viðmiðið var. Hafi flóðhæðin verið miðuð við venjulega stórstraumsfjöru er flóðhæðin nokkru lægri en þó á 7. metra.
 - 45 Sjá mynd 3 bls. 14 í Red Cross/Red Crescent Climate Guide, Red Cross/Red Crescent Climate Centre, November 2007.
 - 46 Almannaþingir og áfallaþol íslensks samfélags. 2005. Skýrsla almannaþingar, sjá www.domsmalaraduneyti.is/media/erindi/Almannaþingir_og_afallatol_islensks_samfélags.pdf (skoðað 25 maí 2008).
 - 47 Tómas Jóhannesson, Þorsteinn Arnalds. 2001. Accidents and economic damage due to snow avalanches and landslides in Iceland. *Jökull*, 50, 81–94.
 - 48 Tómas Jóhannesson. 2003. Greining á tíðni snjóflóða í samfara við takmörkun á notkun húsa að vetrarlagi. *TöJ-2003-07, Veðurstofa Íslands*, Reykjavík.
 - 49 Pagli, C and F. Sigmundsson 2008. Will present day glacier retreat increase volcanic activity? Stress induced by recent glacier retreat and its effects on magmatism at the Vatnajökull ice Cap, Iceland. *Geophys. Res. Lett.* 35 L09304, doi:10.1029/2008GL033510
 - 50 Development of Risk-Management Frameworks, grein 2.2.6, WG II-AR4.
 - 51 Sjá Living with risk : A global review of disaster reduction initiatives. 2004. UN. *International Strategy for Disaster Reduction (ISDR)*. Genf, Sviss, sérstaklega síður 393–395 og skilgreiningar í Annex 1 síðu 3. Þessa bók og Hyogo bókunina (Hyogo Framework for Action 2005–2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters. 2007. *UNISDR/WCDR*) má finna á vefsetri ISDR (www.unisdr.org).
 - 52 Trausti Jónsson. 2002. Hættumat og hlutverk Veðurstofunnar í ljósi hættumatsramma Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar. *Greinargerð Veðurstofu Íslands* 02021.

- 53 WMO. 1999. Comprehensive risk assessment for natural hazards. *WMO/TD* No. 955.
- 54 Solveig Thorvaldsdóttir, Vulnerability Study of the South-Iceland Lowland, based on Data from the 2000 Earthquakes, FORESIGHT Project GOCE-CT-2003-511139, co-funded by the European Commission within the Framework Programme (2002–20006).
- 55 Sú útgáfa af viðlagahringrásinni sem hér birtist er unnin af Sólveigu Þorvaldsdóttir, sjá einnig United Nations International Strategy for Disaster Reduction (ISDR): Terminology–Basic Terms of Disaster Risk Reduction, <http://www.unisdr.org>.
- 56 Haraldur Ólafsson, Áslaug Helgadóttir, Aðalsteinn Sigurgeirsson, Jónatan Hermannsson, Ólafur Rögnvaldsson. 2007. Líkleg þróun veðurfars á Íslandi með tilliti til ræktunar. *Rit Fræðahings landbúnaðarins* 2007, 29–36.
- 57 Bergh, J., Freeman, M., Sigurdsson, Bjarni D., Kellomäki, S., Laitinen, K., Niinistö, S., Peltola, H. og Linder, S. 2003. Modelling the short-term effects change on the productivity of selected tree species in Nordic countries. *Forest Ecology and Management* 183: 327–340.
- 58 Aðalsteinn Sigurgeirsson og Ólafur Eggertsson. 2004. Áhrif hitabreytinga á skógrækt. *Rit Fræðahings landbúnaðarins* 2004: 39–45.
- 59 ACIA. 2005. Arctic Climate Impact Assessment, *Cambridge University Press*.
- 60 Hjálmar Vilhjálmsson og Alf Hákon Hoel. 2005. 13. Kaflí: Fisheries and Aquaculture, bls. 691–780 í ACIA, Arctic Climate Impact Assessment, *Cambridge University Press*.
- 61 Sveinn Agnarsson og Ragnar Árnason. 2003. The Role of Fishing Industry in the Icelandic Economy. An Historical Examination. *W03:08. Institute of Economic Studies*, University of Iceland.
- 62 Sveinn Agnarsson og Ragnar Árnason. 2005. Sjávarútvegur sem grunnatvinnuvegur á Íslandi. *Fjármálatíðindi* 52, 14–35.
- 63 Skúli Þórðarsson, 2008. Áhrif loftslagsbreytinga á rekstur og byggingu vega á Norðurlöndum. Skýrsla til Rannsóknasjóðs Vegagerðarinnar vegna vinnu í tækninefnd NVF41 á tímabilinu 2004–2008.
- 64 Þór Jakobsson og Björk Sigurgeirsdóttir (ritstj). 2006. Ísland í þjóðleið: siglingar á norðurslóð og tækifæri Íslands. *Háskólinn á Akureyri*.
- 65 Skipulag Ríkisins. 1992. Skipulags- og Byggingareglur á lágsvæðum þar sem hætta er á flóðum. Fjarhitun hf.
- 66 Vita- og Hafnamálstofnun. 1995. Skipulag ríkisins og Viðlagatrygging Íslands. Lágsvæði–2. Áfangi. Skipulags- og byggingarráðstafanir og sjóvarnir. Fjarhitun hf.
- 67 Gólfkóti er skilgreindur sem lægsta leyfilega gólfhæð á byggingarsvæðum.
- 68 Tómasson, H. 1981. Vatnsafl Íslands, mat á stærð orkulindar (Hydropower in Iceland, an estimate of the size of an energy resource). In: Orkuþing 81. Erindi flutt á Orkuþingi 9.–11. júní, 1981.
- 69 Jóna Finndís Jónsdóttir. 2007. Water resources in Iceland: Impacts of climate variability and climate change. *PhD Thesis, Lund University, Sweden*.

Inngangur

Vísindanefnd um loftslagsbreytingar var falið að skila skýrslu til umhverfisráðherra um líkleg áhrif loftslagsbreytinga á Íslandi á þessari öld. Til að inna þetta verk sem best af hendi taldi nefndin rétt að fjalla fyrst um umfang hnattrænna loftslagsbreytinga. Fyrsti kafli skýrslunnar fjallar því um niðurstöður fjórðu úttektar milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðana (IPCC). Í öðrum kafla er fjallað um breytingar á náttúrufari landsins sem þegar hafa átt sér stað. Í þriðja kafla er rætt um líklegt umfang loftslagsbreytinga á Íslandi á nýhafinni öld og byggir sú umfjöllun að verulegu leyti á niðurstöðum sömu loftslagslíkana og notuð voru í úttekt IPCC. Fjórði kafli fjallar svo um áhrif breytinganna á náttúrufar á Íslandi og á ýmsa innviði samfélagsins, s.s. frumatvinnuvegi, orkugeirann og samgöngur. Einnig er rætt um náttúruvá og um sjávarborðshækkun og áhrif hennar á skipulag lágsvæða. Það sem hér fylgir er stutt samantekt á helstu niðurstöðum þessara kafla. Honum lýkur með yfirliti um þætti sem huga þarf að sérstaklega vegna loftslagsbreytinga og yfirliti um æskilegar rannsóknir og vöktun sem tryggja þarf til að unnt sé að fylgjast betur með breytingum og afleiðingum þeirra.

Hnattrænar breytingar

Niðurstaða milliríkjanefndarinnar er að breytingar í lofthjúpnnum, hafi, jöklum og ís og lífríki beri óumdeilanleg merki um hlýnun jarðar.

Hnattræn hlýnun á síðustu öld var $0,7^{\circ}\text{C}$. Mjög líklegt er að aukning gróðurhúsalofttegunda vegna athafna mannkyns valdi megninu af þessari hlýnun.

Líkönun ber saman um að á næstu áratugum muni ársmeðalhiti jarðarinnar hækka til jafnaðar um $0,2^{\circ}\text{C}$ á áratug. Það fer eftir losun gróðurhúsalofttegunda hversu mikið hlýnar til loka aldarinnar, en ólíkar forsendur gera ráð fyrir hlýnun frá $1,5^{\circ}\text{C}$ til $4,5^{\circ}\text{C}$. Hlýnun verður meiri á meginlöndum en yfir hafsvæðum og mest á norðurhvara.

Hlýnunin mun hafa víðtæk áhrif á náttúruþætti: Hafísþekja og snjóhula minnka, jöklar hopa og afrennsli jökuláa breytist. Þó úrkoma aukist víða kunna þurrka-svæði að stækka.

Aukin tíðni þurrka og flóða mun sums staðar hafa neikvæð áhrif á ræktun og fæðuframleiðslu. Vatnsbirgðir í jöklum og snjóalögum munu minnka á 21. öldinni. Það mun hafa áhrif á vatnsframboð hjá um sjötta hluta mannkynsins.

Líkleg hækkun sjávaryfirborðs á öldinni liggur á bilinu 0,2 til 0,6 metrar, en óvarlegt er að útiloka meiri hækkun.

IPCC telur líklegt að á öldinni verði álag á mörg vistkerfi meira en þau ráða við. Aukinn styrkur koldíoxíð (CO_2) í lofthjúpnnum leiðir til súrnunar sjávar sem kann að hafa skaðlegar afleiðingar á kalkmyndandi lífverur sem eru mikilvægur hluti af vistkerfi hafsins.

Samfélög með lágar þjóðartekjur á mann eru sérstaklega viðkvæm gagnvart loftslagsbreytingum. Möguleikar þeirra til aðlögunar eru gjarnan takmarkaðir og þau eru oft háð loftslagstengdum auðlindum, svo sem staðbundnum vatns- og matarforða.

Breytingar eru merkjanlegar í náttúrufari Íslands

Lofslagsbreytingar frá síðasta jökulskeiði

Á Nútíma var hlýjast á Íslandi fyrir u.þ.b. 8000–7000 árum. Kólnunar verður vart fyrir um 6000 árum. Veðurfar virðist hafa verið tiltölulega hlýtt á fyrstu öldum Íslandsbyggðar, en þá tók við kuldaskið sem kennt er við Litlu Ísöldina sem náði hámarki milli 1750 og 1850. Það virðist hafa verið kaldasta tímabil hér á landi á Nútíma.

Breytingar á síðustu 100 árum

Veðurathuganir síðustu 170 árin sýna að kalt var á 19. öld og framan af 20. öldinni og ekki tók verulega að hlýna fyrr en eftir 1920. Hlýndaskeiðið sem þá hófst náði hámarki fyrir miðja öldina, en lauk með hafisár-unum um miðbik 7. áratugarins. Þá tók við kuldaskið sem varði fram á síðari hluta 9. áratugarins. Síðan þá hefur hlýnað verulega á Íslandi og síðustu árin hafa verið jafnhlý og best gerðist á fyrra hlýndaskeiði. Þegar á heildina er litið er hlýnunin á Íslandi frá því að mælingar hófust um 0,7°C á öld.

Úrkoma á Íslandi var í hámarki um og upp úr 1930, minnkaði síðan en hefur aftur aukist frá 1965. Sömu-leiðis var sjávarhiti í hámarki á árabílinu 1925 til 1965 en lækkaði síðan. Síðasta áratug hafa hiti og selta aukist í hafinu umhverfis landið.

Náttúrufar og samfélag á Íslandi er viðkvæmt fyrir hitabreytingum

Vatnafar

Merkja má ýmsar breytingar í náttúrufari landsins á undanförunum áratugum. Ekki hefur verið teljandi hafis við landið frá árinu 1979. Jöklar landsins sýna einnig greinileg áhrif hlýnunar, en frá aldamótum hafa allir þeir jöklar, sem ekki eru framhlaupsjöklar, hopað hratt. Vorleysingar í ám byrja heldur fyrr og vorflóðatoppar eru minni vegna þess að fyrr leysir eða snjósöfnun vetrarins er minni.

Lífriki sjávar

Á síðustu öld hafa sveiflur í sjávarhita og sjógerð sýnt mikil áhrif umhverfisþátta á frumframleiðni, afrakstur

og lífsskilyrði nytjastofna við Ísland. Meðalátumagn fyrir Norðurlandi að vori í hlýju árferði er um tvöfalt meira en í köldu árferði. Þorsklirfurek frá Íslandi til Grænlands ásamt almennri hlýnun í Norður-Atlantshafi upp úr 1920 er talið hafa skipt miklu varðandi stærð og veiðiþol íslenska þorskstofnsins fram yfir miðja síðustu öld, eða þar til hafiss gætti um miðjan sjöunda áratuginn. Norsk-íslenski síldarstofninn hrundi á seinni hluta 7. áratugar seinustu aldar í kjölfar mikilla veiða og þess að snöggkólnaði norðan- og austanlands og aðalfæða síldarinnar hér við land, rauðátustofninn, hrundi. Síldarstofnar hafa nú aftur náð fyrri stærð og hafa aukin hlýindi í Norður-Atlantshafi vafalítið flýtt fyrir þeim bata.

Greinilegra breytinga hefur orðið vart í útbreiðslu og stofnstærð nokkurra nytjafiska á Íslandsmiðum sem mjög líklega tengjast hlýnun í sjónum umhverfis landið frá því um 1996. Útbreiðsla botnfiska á norðurmörkum útbreiðslusvæðis þeirra hefur aukist til norðurs. Má þar nefna ýsu, lýsu, skötusel og ufsa, en loðnan, sem er kaldsjávarfiskur, hefur að því er virðist hopað fyrir hlýndunum á undanförunum árum. Á undanförunum árum hafa 26 áður óþekktar fisktegundir veiðst innan 200 sjómílna lögsögunnar. Nær allar þessar tegundir eiga sér meginheimkynni sunnar í Atlantshafi, en útbreiðsla margra þeirra virðist vera að aukast til norðurs.

Lífriki á landi

Áhrif hlýnunar á gróðurfar eru þegar umtalsverð. Aukning hefur orðið á gróðri á síðustu árum og áratugum og samtímis hafa skógarmörk birkis færst ofar í landið. A.m.k ein fjallaplanta sem fylgst hefur verið með, fjallkrækill, er talin á undanhaldi vegna hlýnunar.

Ein norræn sjófuglategund, haftyrdill, hætti varpi hér í lok 20. aldar, líklega vegna hlýnunar. Í heild hefur tíðni landnáms nýrra fuglategunda þó verið að aukast frá því um 1900. Varp ýmissa sjófugla hefur raskast mikið á síðustu árum sem líklega stafar af breyttu fæðuframboði í hafinu.

Breytingar hafa orðið á vatnalífi á undanförunum árum sem hafa bæði verið raktar til hækkandi vatnshita (t.d. meiri vaxtarhraði laxaseiða og fækkun bleikju) og til

breytinga í sjó (t.d. styttri dvalartími laxa í sjó og minnkandi hlutfall stórlaxa).

Atvinnulíf

Hlýnun liðinna ára hefur haft ýmis áhrif á atvinnulíf. Breytingar á útbreiðslu og stofnstærð nytjafiska hafa áhrif á sjávarútveg og þjóðarhag á þann veg að flestar mestu hagsveiflur á síðstu öld tengdust sveiflum í fiskistofnum eða afurðaverði. Aðstæður til kornræktar og skógræktar hafa batnað með hlýnandi loftslagi. Vegna aukins vatnsrennslis er vinnslugeta vatnsorku-kerfisins meiri en gert var ráð fyrir við hönnun þess. Hlýnun veldur því einnig að þungatakmörkanir á vegum hefjast nú fyrir og standa lengur en áður.

Sjávarborð

Mælingar sýna að meðalsjávarborð í Reykjavík sveiflast verulega á milli ára, en hefur farið hækkandi á undanfönum áratugum. Stór hluti skýringarinnar er landsig, en að teknu tilliti til þess fylgir sjávarborðshækkun í Reykjavík meðaltalshækkun heimshafanna.

Margþættir orsakavaldar

Ýmsar breytingar á liðnum árum er ekki hægt að rekja til hnattrænna loftslagsbreytinga. Margar veðurtengdar mæliraðir sýna t.d. áratugasveiflur en engar marktækar langtímabreytingar. Dæmi um slíka veðurþætti eru loftþrýstingur, skýjahula og vindáttir. Náttúrulegur breytileiki á Íslandi er almennt mikill, sérstaklega í hafinu umhverfis landið.

Erfitt er að skilja í sundur áhrif hlýnandi veðurfars á lífríki annars vegar, og áhrif breytinga sem samtímis hafa orðið á nýtingu þess, s.s. búfjárbætt og fiskveiðum, hins vegar. Breytingar á atvinnuháttum eru flóknar og oft erfitt að greina áhrif hlýnunar frá öðrum samverkandi þáttum.

Umfang og afleiðingar loftslagsbreytinga á Íslandi á næstu áratugum

Loftslagsspár

Umfang loftslagsbreytinga á öldinni var metið með því að skoða niðurstöður loftslagslíkana sem IPCC byggir á í fjórðu úttektinni, sem og niðurstöður annarra rannsóknaverkefna.

Áhrif loftslagsbreytinga á 21. öld eru dregin saman á mynd 5.1. Myndin sýnir einungis valin atriði og vísað er í kafla 3 og 4 fyrir ítarlegri umfjöllun.

Niðurstöður margra loftslagslíkana benda til þess að fram undir miðja öld muni hlýna um rúmlega 0,2 gráður á áratug á Íslandi. Um miðja öldina verður heildarhlýnunin 1°C miðað við árið 2008, en óvissumörk eru $\pm 1,1^\circ\text{C}$. Þótt óvissumörkin séu nokkur eru þó yfirgnæfandi líkur á hlýnun. Fyrir síðari hluta aldarinnar er hlýnunin mjög háð forsendum um losun gróðurhúsalofttegunda og liggur á bilinu 1,4 til 2,4°C með líklegri óvissu á bilinu 1,0 til 1,5°C.

Líklegast er að það hlýni mest að vetralagi en minnst á sumrin. Óvissa er mun meiri fyrir einstakar árstíðir en fyrir árið í heild sinni.

Þótt veðurfarslíkön geri ráð fyrir aukinni úrkomu ber þeim ekki saman um hversu mikil aukningin verður. Líklegast er að úrkoma aukist þegar á liður öldina. Að meðaltali er aukning úrkomu á bilinu 0,4% til 0,8% á áratug, eða 2% til 3% fyrir hverja gráðu sem hlýnar.

Úrkomudögum mun líklega fjölga og ákefð úrkomu aukast. Færri kuldaköst verða að vetri og snjóhula minnkar. Líklegt er að hitabylgjum að sumri fjölgi.

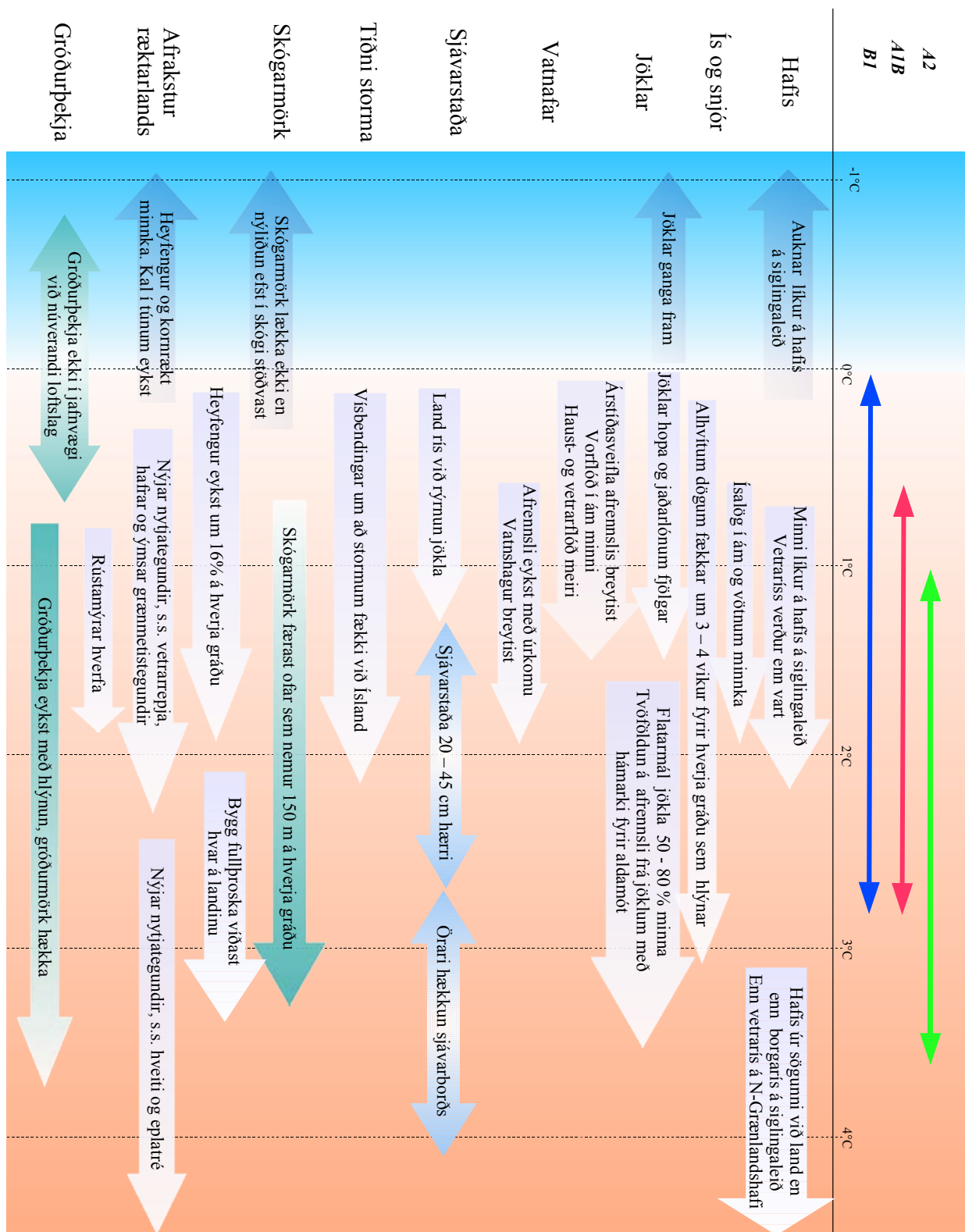
Vatnafar

Þess má vænta að jöklar hofi ört alla 21. öld og líklega rýrnar Langjökull örast stóru jöklanna. Haldi svo fram sem horfir verður hann með öllu horfinn um miðja 22. öld en Vatnajökull og Hofsjökull hafi þá hörfað upp á hæstu tinda.

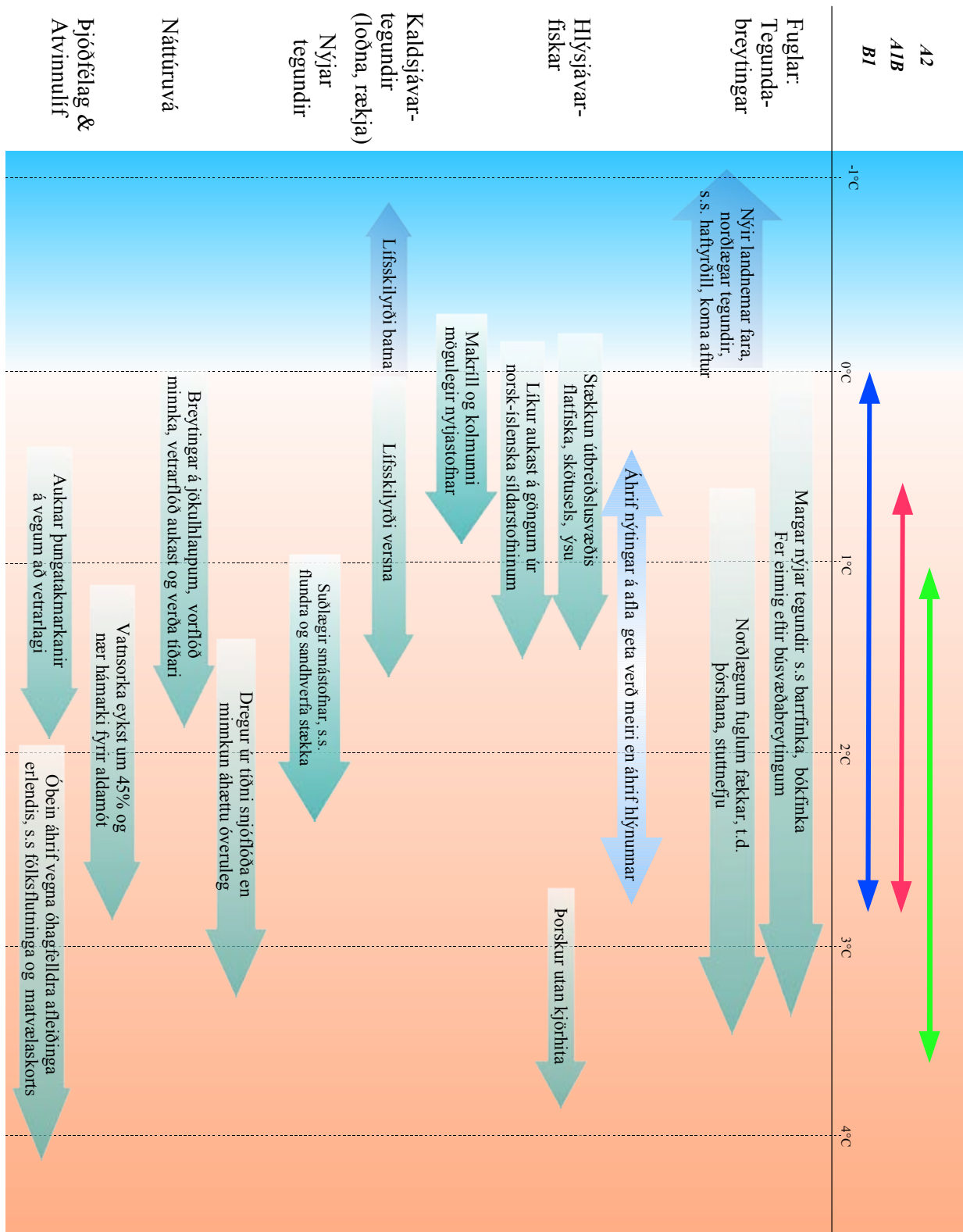
Afrennsli frá jöklunum mun aukast mjög á fyrri hluta 21. aldar en síðan minnka vegna stöðugar rýrnunar þeirra. Farvegir jökuláa breytast og jaðarlónum fjölga. Verulegt landris hlýst af farglosun þegar jöklar rýrna.

Breytingar í hafi

Líklegast er að það hlýni á hafsvæðinu umhverfis Ísland á öldinni. Hversu mikið hlýnar ræðst að nokkru af breytingum á lóðrétttri hringrás sjávar í Norður Atlantshafi, en einnig af breytingum á útbreiðslu hafiss norður af landinu. Líklegast er hafis minnki við Austur-Græn-



Mynd 5.1A Dæmi um mögulegar afleiðingar hitabreytinga til loka aldarinnar. Miðað er við breytingar frá núverandi veðurfar. Langlíklegast er að það hlýni til loka aldarinnar. Ólíklegt er að það hafi kólnað við lok aldarinnar, en áratuga-sveiflur í veðurfarinu geta valdið tímabundinni kólnun um allt að einni gráðu. Myndin er ekki tæmandi upptalning, og vísast í kafla 4 fyrir fyllri umfjöllun á þeim atriðum sem sýnd eru á myndinni.



Mynd 5.1B. Dæmi um mögulegar afleiðingar af hitabreytingum til loka aldarinnar. Sjá nánar myndatexta við mynd 5.1A.

land. Ólíklegt er að borgarísjökum fækki á hafinu norðan við Ísland á næstu áratugum.

Lífriki sjávar

Áhrif loftslagshlýnunar á lífríki sjávar ráðast m.a. af því hvernig straumakerfi, blöndunarferli og skil milli heitra og kaldra strauma bregðast við veðurfarsbreytingum. Almennit má þó ætla að hlýnun á Íslandsmiðum og nærliggjandi hafsvæðum sé ávisun á aukna framleiðni lífríkis í sjó, þ.m.t. fiskstofna við landið.

Við hóflega hlýnun má búast við aukningu botnfiska á norðurmörkum útbreiðslusvæðis síns s.s. ýsu, lýsu, skötusels og ufsa. Líklegt er að meira verði um kolmunna og makríl og líkur eru á að auknum göngum úr norsk-íslenska sildarstofninum inn á Íslandsmið. Hlýnun getur aftur á móti takmarkað útbreiðslusvæði og framleiðni norrænna tegunda s.s. loðnu, grálúðu og rækju, sem gæti haft neikvæð áhrif á fæðubúskap þorsks.

Svo virðist sem sveiflur í nýliðun og stofnstærð þorsks séu minni hér við land en bæði í norðvestanverðu og norðaustanverðu Atlantshafi. Þetta bendir til þess að þorskurinn sé á kjörsvæði sínu hér um slóðir. Við hlýnun eru þó líkur á að uppvaxtarsvæði þorsks stækki, m.a. vegna breyttra aðstæðna við strendur Grænlands og að lírfurek til Grænlands og Grænlandsgöngur verði tíðari.

Meiri hlýnun á heimskautssvæðinu en hér við land kann að hafa mikil óbein áhrif á lífríkið í sjónum við Ísland, þar sem ekki er ólíklegt að flökkustofnar eins og síld, loðna, og makríll breyti um göngur og stofnstærð riðlist þegar nýjar lendur opnast í N-Íshafi.

Lífriki á landi

Hlýnandi veðurfar mun almennt hafa jákvæð áhrif á gróðurþekju landsins og getu vistkerfa til að taka upp kolefni og binda það í gróðri og jarðvegi. Efri útbreiðslumörk plantna færast upp í landið og háfjallategundir geta látið undan síga. Breytingar á snjó- og svellalögum geta haft neikvæð áhrif á tiltekin gróðurlendi, s.s. snjóðældagróður og rústamýrar hálendisins. Einnig geta vistfræðilegir þættir, svo sem aukin skordýrabeit, dregið úr jákvæðum áhrifum hlýnunar. Aukin útbreiðsla náttúrulegra birkiskóga í kjölfar hlýn-

unar ásamt aukinni skógrækt mun stuðla að landnámi ýmissa spörfugla og annarra skógarfugla. Framrás skóga getur á hinn bóginn þrengt að búsvæðum mófuglategunda ef ekki verður samsvarandi aukning í útbreiðslu mólendis á kostnað auðna.

Samkvæmt spám er líklegt að hér verði of hlýtt í lok aldarinnar fyrir nokkrar norrænar fuglategundir s.s. þórshana og stuttnefju.

Náttúruvá

Enda þótt hlýnun sem vænta má á þessari öld muni líklega valda fækkun snjóflóða, verður snjóflóðahætta eftir sem áður fyrir hendi yfir háveturinn.

Þynning jökla veldur farglosun á jarðskorpuna sem eykur framleiðslu kviku og líkur á eldgosum á Vatna-jökulssvæðinu. Jökulhlaup geta orðið af völdum eldgosa og frá jökulstífluðum lónum. Hlaup úr ýmsum jaðarlónum geta einnig breyst í náinni framtíð.

Með meiri framleiðni gróðurs og aukinni útbreiðslu skóga eykst að öðru óbreyttu hætta á gróður- og skógarældum. Samdráttur í snjóhulu auk breytinga í úrkomu að vori og sumri hafa einnig áhrif á áhættuna.

Atvinnulíf

Hlýnandi veðurfar ásamt hækkandi styrk CO₂ í andrúmslofti eykur uppskeru á öllum fóður- og matjurtum sem nú eru í ræktun og eykur möguleika á ræktun jurta sem nú eru á mörkum ræktunarsvæða sinna. Skógrækt nýtur góðs af væntanlegum loftslagsbreytingum og mögulegt verður að rækta trjátegundir sem verið hafa á jaðri þolsviðs síns.

Helstu ógnir fyrir hefðbundinn landbúnað og skógrækt felast í aukinni ágengni meindýra og plöntusjúkdóma, hugsanlegum vetrarskemmdum, illviðrum og hækkun á sjávarstöðu.

Heildarvatnsafl landsins mun aukast sem hefur bæði áhrif á núverandi orkukerfi og á hönnun nýrra virkja-anna.

Almennt séð er líklegt að þær loftslagsbreytingar sem spáð er á þessari öld hafi jákvæð áhrif á framleiðni nytjastofna sjávar. Öflug fiskveiðistjórnun getur vegið þyngra til langs tíma lítið.

Líklegustu forsendur um aukna fiskgengd næstu 50–100 árin af völdum loftslagsbreytinga hafa líklega ekki veruleg langtímaáhrif á þjóðarhag. Skilvirk veiðistjórnun og samningar um skiptingu hámarksafla við breyttar aðstæður geta á hinn bóginn haft umtalsverð jákvæð áhrif á afkomu íslensks sjávarútvegs þegar á heildina er litið. Í því sambandi eru samningar við erlend ríki um nýtingu flökkustofna mikilvægir.

Hlýnun á heimskautasvæðunum kann að opna nýjar lendur fyrir flökkustofna (s.s. loðnu, síld og kolmuna) sem ganga nú á Íslandsmið. Slíkt kann að hafa mikil óbein áhrif á lífríkið hér við land.

Samgöngur

Hækkandi vetrarhiti getur aukið þörf á þungatakmörkunum í vegakerfinu, og rýrnun jökla getur aukið vatnsrennsli undir sumum brúarmannvirkjum meðan önnur standa á þurru.

Möguleg opnun siglingaleiða í Norður-íshafi getur falið í sér tækifæri fyrir íslenskt atvinnulíf.

Heilsufar

Heilsufarsleg áhrif loftslagsbreytinga tengjast bæði ofnæmissjúkdómum og smitsjúkdómum. Fyrri þátturinn tengist breytingum á gróðurfari og vaxandi magni frjókorna, en sá síðari hugsanlegum smitferjum. Dæmi um sýkingar sem tengst geta hlýnun eru salmonellu- og kampýlóbakteríusýkingar. Ólíklegt er að heilsufarsleg áhrif loftslagsbreytinga hér á landi verði veruleg miðað við núverandi styrk heilbrigðiskerfisins.

Sjávarborð

Líklegar breytingar á sjávarstöðu á þessari öld eru háðar hnattrænni hækkun sjávar og lóðréttum hreyfingum lands. Landris við suðausturströndina getur vegið upp sjávarborðshækkun, en landsig á suðvesturhluta landsins getur aukið við hana. IPCC metur hnattræna sjávarhækkun frá 0,2 til 0,6 m á öldinni, en veruleg óvissa er í þessu mati og ekki hægt að útiloka enn meiri hækkun.

Til að mæta hugsanlegri sjávaryfirborðshækkun og landsigi var árið 1992 lagt til að gólfkóti yrði hækkaður um 0.66 m vegna hnattrænnar hækkunar sjávarborðs og um 0.15 vegna landsigs. Ljóst er að ef hnattræn sjávar

aryfirborðshækkun verður meiri en þetta munu viðmiðunarreglurnar frá 1992 ekki duga á svæðum þar sem landsig er. Því er mikilvægt að vel sé fylgst með breytingum á sjávarstöðu og landsigi, og jafnframt spám um sjávarborðshækkun til lengri tíma. Einnig er mikilvægt að tryggt sé að skipulag byggðar á lágsvæðum sé miðað við besta mat á báðum þáttum.

Vöktun, rannsóknir og aðlögun

Hér að framan var stutt yfirlit um umfang og helstu afleiðingar loftslagsbreytinga á Íslandi á þessari öld. Þó spár um hlýnun séu nokkuð háðar forsendum um losun gróðurhúsalofttegunda, sérstaklega þegar liður á öldina þá er ljóst að umtalsverðar afleiðingar loftslagsbreytinga á Íslandi verða ekki umflúnar. Mikilvægt er að fylgst sé með breytingum á náttúrufari, auk þess sem mikilvægt er að hugað sé aðlögun vegna loftslagsbreytinga. Hér verða þessir þættir ræddir stuttlega.

Vöktun

Fyrirsjáanlegar loftslagsbreytingar auka þörf á vöktun og rannsóknum á ýmsum þáttum náttúrufars. Ljúka þarf öflun grunnupplýsinga um náttúrufar landsins og efla langtímavöktun á umhverfisþáttum og lífríki hafs og lands. Slík vöktun er ómissandi til þess að átta sig á breytingum um leið og þær eiga sér stað. Vöktun er langtímaverkefni sem ekki ber að fjármagna af samkeppnissjóðum og er mjög mikilvægt að stjórnvöld tryggi áframhald slíkra verkefna.

Meðal umhverfisþátta er brýnt að fylgst sé vel með breytingum á sjávarborðshæð, jökulfargi og lóðréttri hreyfingu lands. Mikilvægt er að viðhaldið sé öflugum veðurstöðvaneti fyrir vöktun á veðri og veðurtengdum þáttum, s.s. snjóhulu, og fylgjast þarf náið með hopun jökla og breytingum á afrennsli af landi.

Þar sem landið er á mörkum tveggja loftslagsbelta má búast við að svörun lífríkis við hlýnandi loftslagi verði hér hraðari og afdráttarlausari en víða annarsstaðar. Þetta gerir vöktun lífríkis hafs og lands enn brýnni en ella.

Tryggja þarf að stofnunum sé gert kleift að auka aðgengi að mæliniðurstöðum sem fást við langtímavöktun og að úrvinnsla slíkra upplýsinga hljóti forgang.

Rannsóknir

Nauðsynlegt er að halda uppi öflugum rannsóknum á loftslagi og skyldum greinum til þess að tryggja traustan kunnáttugrundvöll sem ákvarðanir stjórnvalda byggi á. Leggja ber sérstaka áherslu á að íslenskum vísindamönnum sé gert kleift að halda áfram virkri þátttöku í alþjóðlegum verkefnum á sviði loftslags- og náttúrfarsrannsókna.

Ýmsar nauðsynlegar rannsóknir á sviði loftslagsbreytinga falla betur að samkeppnissjóðum en langtíma vöktunarverkefni. Hér að neðan eru raktar nokkrar slíkar lykilspurningar sem mikilvægt er að samkeppnissjóðir veiti forgang þegar þeir móta rannsóknastefnu í loftslags- og náttúrfarsrannsóknum.

- Samspil lífvera og viðbrögð þeirra við væntanlegum loftslagsbreytingum. Auka þarf skilning á ýmsum þáttum sem þessu tengjast svo að bæta megi spár um áhrif loftslagsbreytinga á lífríki hafs og lands.
- Breytingar árstíðasveiflu og svæðisbundinn breytileiki. Líkönunum ber ekki saman um það hvernig árstíðasveifla lofthita og úrkomu mun breytast. Mikilvægt er að greint sé hver sé orsök þessa ósamræmis, og að samkvæmar niðurstöður fáiast um líklegar breytingar á árstíðasveiflu. Veðurlag landshluta á Íslandi er ólíkt, og breytingar t.d. í tíðni vindátta, hafa ólíkar afleiðingar í mismunandi landshlutum. Beita þarf reiknilíkönun með þétt reikninet til þess að hægt sé að kanna áhrif loftslagsbreytinga fyrir mismunandi landshluta.
- Framtíðarþróun hafhringrásar í Norður Atlantshafi. Óvissa um styrkbreytingar á lóðréttu hringrás hafsins eykur óvissu í hitaspám fyrir Ísland. Bættur skilningur á lóðréttu hringrásinni, og streymi hlýsjávar við landið mun gefa betri spár og fyllri mynd af væntanlegum breytingum.
- Til þess að unnt sé að meta áhrif mannvistar á umhverfið og bæta reiknilíkön er lykilatriði að þekkja og skilja náttúrulegar umhverfisbreytingar. Efla þarf rannsóknir á sögu umhverfisbreytinga þúsundir ára aftur í tímann.

- Rannsaka þarf breytingar á úrkomu, jöklum og vatnafari. Þróa þarf aðferðir við líkindagreiningu aftakaatburða.
- Efla þarf enn frekar rannsóknir á möguleikum og tækni til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda vegna bruna jarðefnaeldsneytis og notkun endurnýjanlegra orkugjafa. Jafnframt þarf að efla rannsóknir á möguleikum til mótvægisáðgerða til að draga verulega úr nettólosun gróðurhúsalofttegunda frá landinu.

Atriði sem huga þarf að varðandi aðlögun

Aðlögunar er þörf til þess að mæta afleiðingum loftslagsbreytinga. Hækkandi sjávarstaða og breytingar á afrennsli geta haft í för með sér aukna náttúruvá. Þó sumum þáttum þessa málaflokks sé mjög vel sinnt hér á landi er mikilvægt að beitt sé heilstæðri aðferðafræði til að takast á við áhættumat, forvarnir, viðbrögð við hamföllum og endurmat á áhættu í kjölfar hamfara.

Óhjákvæmilegt virðist að einum aðila sé falið að sinna heildstæðri stefnumótun í þessum málaflokki til að tryggja viðtækara samstarf, skýrari ábyrgð og samhæfða aðferðafræði. Sami aðili mundi sjá til þess að áhættuþættir féllu ekki á milli stafs og hurðar gagnvart stofnunum ríkisins. Lagt er til að settur sé á stofn sérstakur vinnuhópur sem geri tillögur um hvernig innleiða megi áhættustýringu vegna náttúruvá og loftslagsbreytinga.

Mikilvægt er að tryggt sé í skipulagslögum að miðað sé við besta mat á líklegri sjávarýfirborðshækkun þegar skipulagt er á lágsvæðum. Þetta má gera t.d. með því að setja inn í skipulags- og byggingalög ákvæði um að við skipulagningu slíkra svæða skuli haft samráð við ákveðna ríkisstofnun.

