

Veðurfarsbreytingar og afleiðingar þeirra

Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar



Efnisyfirlit

Inngangur	1
Samantekt milliríkjanefndar um loftslagsbreytingar	3
Veðurfarsbreytingar á Íslandi og hafsvæðinu umhverfis landið	11
Áhrif veðurfarsbreytinga á lífríkið	21
Áhrif á þjóðfélag og heilsufar	27
Samantekt	31
Helstu heimildir	33

Forsíðumyndin

Sólheimajökull í Mýrdalsjökli sýnir vel viðbrögð jökla við loftslagsbreytingum. Jökullinn hropaði um 1 km frá 1930 til 1969 af völdum hlýindanna 1925-1965 og gekk fram um 500 metra þegar kólna tók í veðri eftir 1965. Á síðustu árum hefur jökullinn tekið að hopa aftur vegna hlýnandi veðurfars og nemur hopið síðan 1995 um 100 metrum. Á ljósmyndinni má sjá jökulgarða og ýmis önnur ummerki framan við jökulsporðinn frá því þegar jökullinn stóð mörg hundruð metrum framar en nú.

Ljósmynd: Oddur Sigurðsson, 30. október 1985.

Inngangur

Bruni jarðefnaeldsneytis hefur leitt til mikillar losunar koltvíoxíðs út í andrúmsloftið frá upphafi iðnbyltingar seint á 18. öld. Uppsöfnun koltvíoxíðs og annarra gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu hefur þegar haft áhrif á geislunarbúskap jarðarinnar og haft merkjanleg áhrif í átt til hlýnunar. Gróðurhúsaáhrif eru náttúrulegt fyrirbæri í lofthjúpnun og án þeirra væri 21 til 33°C kaldara á jörðinni en nú er og meðalhiti á bilinu 6 til 18 gráða frost en ekki 15 gráða hiti. Þessi náttúrulegu áhrif eru þannig forsenda fyrir lífi á jörðinni í núverandi mynd. Spurningin, sem mannkynið stendur frammi fyrir, er hve mikil aukning verður á gróðurhúsaáhrifum af mannavöldum á næstu áratugum vegna losunar gróðurhúsalofttegunda og hvaða afleiðingar sú aukning kann að hafa.

Gera má ráð fyrir að styrkur koltvíoxíðs í andrúmsloftinu árið 2000 verði um 370 einingar¹ og hafi þá vaxið um 33% frá því fyrir iðnbyltingu en þá er hann talinn hafa verið um 280 einingar. Aukning annarra gróðurhúsalofttegunda jafngildir því að styrkur koltvíoxíðs hafi árið 2000 vaxið í um eða yfir 450 einingar sem svarar til yfir 50% aukningar. Talið er að hlýnað hafi um 0,6°C síðustu hundrað árin og svo virðist sem hraði hlýnunarinnar hafi aukist á síðustu 20 árum. Á næstu hundrað árum kann uppsöfnun koltvíoxíðs og annarra gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu að leiða til þess að gróðurhúsaáhrifin aukist svo mikið að það jafngildi um þreföldun á styrk koltvíoxíðs frá því fyrir iðnbyltingu og hlýnað geti um 2°C að meðaltali á jörðinni. Slík hlýnun á sér ekki hliðstæðu í loftslagssögu jarðar síðasta árþúsundið og mun hafa margvísleg áhrif ef til hennar kemur, meðal annars mun sjávarborð hækka, jöklar hopa og vatnafar breytast. Þetta hefur vakið mikla athygli almennings og ráðamanna. Fjöldi vísindamanna um allan heim tekur þátt í rannsóknum á veðurfarsbreytingum af mannavöldum og unnið er að milliríkjasamningum til þess að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda sem kunna að hafa veruleg áhrif á efnahagskerfi heimsins.

Þessi skýrsla fjallar um veðurfarsbreytingar af mannavöldum og afleiðingar þeirra fyrir íslenskt þjóðfélag.

Hún er unnin af vísindanefnd um loftslagsbreytingar sem sett var á stofn á vegum umhverfissráðuneytisins að frumkvæði stýrihóps um loftslagsbreytingar sem í sitja ráðuneytisstjórar átta ráðuneyta. Óskað var eftir því að vísindanefndin gerði grein fyrir helstu niðurstöðum milliríkjanefndar um loftslagsbreytingar (IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change) og legði mat á afleiðingar þeirra fyrir Ísland. Vísindanefndin hefur í þessari vinnu að mestu byggt á niðurstöðum IPCC frá árinu 1995² en hún hefur einnig kynnt sér niðurstöður rannsókna sem síðar hafa komið fram og liggja til grundvallar nýrri skýrslu sem IPCC vinnur nú að og lögð verður fyrir aðildarríki milliríkjanefndarinnar til samþykktar árið 2001.

Skýrslan er byggð þannig upp að 1. kafli er bein íslensk þýðing á samantekt úr skýrslu IPCC. Samantektin er birt hér í heild ásamt myndum úr skýrslu IPCC og öðrum heimildum. Þessi samantekt var samþykkt samhljóða á ársþingi IPCC árið 1995. Milliríkjanefnd um loftslagsbreytingar er alþjóðleg stofnun sem sett var á laggir af Alþjóðaveðurfræðistofnuninni (WMO) og Umhverfisstofnun Sameinuðu þjóðanna (UNEP). IPCC vinnur ekki að eigin rannsóknum en hefur það hlutverk að gefa yfirlit yfir það sem best er vitað hverju sinni og draga ályktanir á grundvelli vísindalegra rannsókna.

IPCC er farvegur vísindaráðgjafar til Rammasamnings Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar. Þing aðildarríkja samningsins beina spurningum til IPCC og óska eftir greinargerðum frá nefndinni. Efnisyfirlit og efnistöð eru samþykkt á ársþingum nefndarinnar þar sem fulltrúar allra aðildarríkja Sameinuðu þjóðanna hafa rétt til þátttöku.

Milliríkjanefndin byggir ráðgjöf sína að mestu á ritrýndum greinum í vísindaritum en einnig er tekið tillit til rannsókna sem birtar hafa verið sem skýrslur frá ýmsum rannsóknastofnunum. Þúsundir vísindamanna koma að starfi IPCC og eru flestir færustu vísindamenn samtímans á viðkomandi fagsviðum í þeirra hópi.

1 Styrkurinn er mældur í einingunni ppmv sem þýðir milljónustu hlutar rúmmáls.

2 IPCC. 1996. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. Sjá nánar um helstu heimildir þessarar skýrslu innan á aftari kápusíðu.

Í 2. kafla er fjallað um veðurfarsbreytingar á Íslandi og hafsvæðinu umhverfis Ísland. Þar er fjallað um veðurfar hér á landi og hugsanleg þróun þess á næstu áratugum rædd. Fjallað er um samspil veðurfarsbreytinga og ástands í hafinu við Ísland og gerð grein fyrir hugsanlegri hækkun sjávarborðs, auknum ágangi sjávar, breytingum á vatnafari, jöklum og náttúruvá.

Í 3. kafla beinist athyglin að lífríkinu og hugsanlegum áhrifum veðurfarsbreytinga á lífríki sjávar og nytjastofna í hafinu auk þess sem fjallað er um áhrif á gróðurfar og landbúnað.

Í 4. kafla er fjallað um áhrif á þjóðfélagslega þætti, heilsufar þjóðarinnar og hönnun mannvirkja.

Íslensku vísindanefndina um loftslagsbreytingar skipa:

Sigurður Guðmundsson, læknir, formaður,
Árný Sveinbjörnsdóttir, jarðfræðingur, varaformaður,
Gísli Viggósson, verkfræðingur,
Jóhann Sigurjónsson, sjávarlíffræðingur,
Jón Ólafsson, haffræðingur,
Stefán Ólafsson, þjóðfélagsfræðingur,
Tómas Jóhannesson, jarðeðlisfræðingur, og
Trausti Jónsson, veðurfræðingur.

Ritari nefndarinnar er Halldór Þorgeirsson, skrifstofustjóri í umhverfisráðuneytinu.

1. kafli

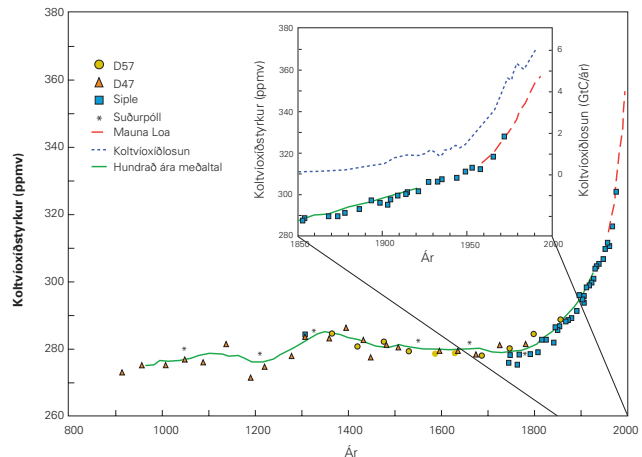
Samantekt milliríkjanefndar um loftslagsbreytingar

Skilningur á veðurfarsbreytingum¹ hefur aukist umtalsvert frá árinu 1990 þegar fyrsta skýrsla milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar kom út og fram hafa komið ný gögn og nýjar niðurstöður rannsókna.

Aukinn styrkur gróðurhúsalofttegunda

Styrkur gróðurhúsalofttegunda í andrúmslofti hefur aukist frá upphafi iðnbyltingar (þ.e. frá því um 1750). Það hefur leitt til breytinga á geislunarbúskap² andrúmsloftsins sem að öðru jöfnu hafa í för með sér hlýnun við yfirborð jarðar og leiða til annarra breytinga á veðurfari.

- Styrkur gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu, meðal annars koltvíoxíðs (CO_2), metans (CH_4) og tvíköfnunarefnisoxíðs (N_2O), hefur aukist umtalsvert frá upphafi iðnbyltingar, eða um 30%, 145% og 14% fyrir þessar lofttegundir í sömu röð talið (tölur frá árinu 1992). Þessa þróun má einkum rekja til manngregra athafna, sér í lagi til notkunar á jarðefnaeldsneyti, breytinga á landnýtingu og landbúnaðar.³
- Styrkur CO_2 , CH_4 og N_2O jókst hægt í byrjun tíunda áratugarins. Þetta virðist hafa verið náttúrulegt frávik og hefur ekki verið skýrt að fullu. Nýleg gögn benda hins vegar til þess að árleg aukning um miðjan áratuginn sé sambærileg við meðaltalsaukningu níunda áratugarins.
- Breytingar á geislunarbúskap af völdum gróðurhúsalofttegunda með langan líftíma í andrúmsloftinu (samtals $2,45 \text{ Wm}^{-2}$) stafa einkum af auknum styrk CO_2 ($1,56 \text{ Wm}^{-2}$), CH_4 ($0,47 \text{ Wm}^{-2}$) og N_2O ($0,14 \text{ Wm}^{-2}$) (tölur frá árinu 1992).



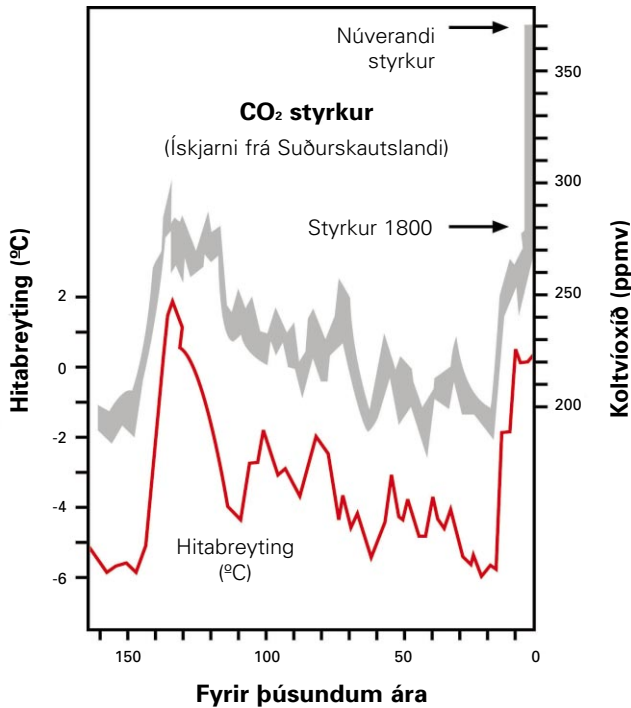
Mynd 1.1 Koltvíoxíðstyrkur í andrúmsloftinu síðustu þúsund árin samkvæmt mælingum á ískjörnum frá Suðurskautslandinu (D47, D57, Siple og Suðurrpöll) og frá Mauna Loa fjalli á Hawaii (síðan 1958). Úr skýrslu IPCC frá 1995.

- Margar gróðurhúsalofttegundir hafa langa viðdvöl í andrúmsloftinu (CO_2 og N_2O í áratugi eða aldir) og raska því geislunarbúskap í langan tíma.
- Beinar breytingar á geislunarbúskap af völdum kolflúorkolefna (CFC) og vetniskolflúorkolefna (HCFC) eru samanlagt $0,25 \text{ Wm}^{-2}$. Þessi efni valda hins vegar eyðingu ósonlagsins í heiðhvolfinu. Það dregur úr nettóáhrifum þessara efna um $0,1 \text{ Wm}^{-2}$ vegna þess að óson er einnig gróðurhúsalofttegund.
- Styrkur CFC eykst nú minna en áður og jafnvel ekkert. Þetta á ekki við HCFC. Búist er við að árið 2050 hafi styrkur bæði CFC og HCFC og

1 Hugtakið „veðurfarsbreytingar“ er notað af vinnuhópi I hjá IPCC um breytingar á veðurfari hvort sem þær stafa af náttúrulegum breytileika eða manngrellum athöfnum. Þetta er frábrugðið notkun hugtaksins í Rammasamningi Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar. Þar er átt við breytingar á veðurfari sem raktar eru beint eða óbeint til manngregra athafna sem breyta samsetningu andrúmslofts jarðar og eru viðbót við náttúrulegan breytileika veðurfars.

2 Einfaldur mælikvarði á mikilvægi röskunar á geislunarjafnvægi fyrir hugsanlegar breytingar á veðurfari (*radiative forcing*). Breyting á geislunarbúskap er mæld í wöttum á fermetra (Wm^{-2}).

3 Styrkur þessara lofttegunda hefur haldið áfram að vaxa síðan þetta var skrifað og var styrkur koltvíoxíðs í andrúmsloftinu kominn í um 370 ppmv árið 2000. Hann hefur því vaxið um 33% frá upphafi iðnbyltingar þegar hann er talinn hafa verið um 280 ppmv. Árið 2000 hafði styrkur metans vaxið um 150% og tvíköfnunarefnisoxíðs um 16% frá upphafi iðnbyltingar.



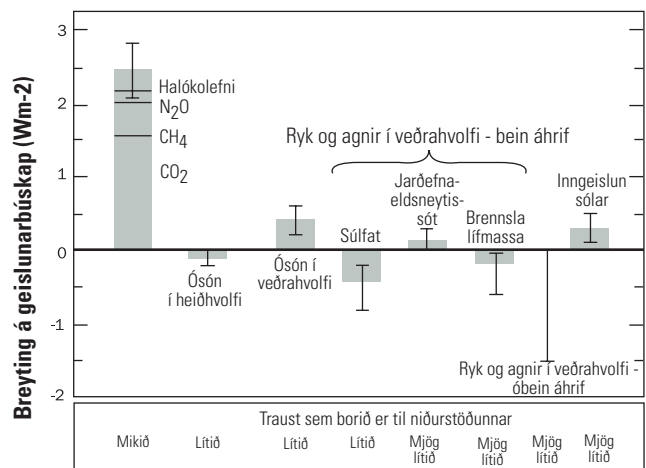
Mynd 1.2 Koltvíoxíðstyrkur í andrúmsloftinu og hita-sveiflur á jörðinni síðustu hundrað og sextíu þúsund árin samkvæmt mælingum á ískjörnum frá Suðurskautlandinu. Styrkur koltvíoxíðs síðan 1800 er einungis sýndur til samanburðar. Byggt á mynd frá NOAA í Bandaríkjunum.

eyðing ósons af þeirra völdum minnkað verulega vegna áhrifa Montrealbókunarinnar um takmörkun á losun ósoneyðandi efna og síðari lagfæringa og breytinga á henni.

- Nokkrar langlífir gróðurhúsalofttegundir (einkum vetnisflúorkolefni (HFC), sem er efni sem kemur í stað CFC efna, flúorkolefni (PFC) og sexflúorbrennisteinn (SF₆)) hafa nú lítil áhrif á geislunarbúskap jarðar. Áætluð aukning þeirra gæti hins vegar samsvarað nokkrum prósentum af heildarbreytingu á geislunarbúskap á 21. öldinni.
- Verði losun koltvíoxíðs í framtíðinni svipuð og nú (1994) leiðir hún til því sem næst stöðugar aukningar á styrk þess í andrúmsloftinu í að minnsta kosti tvær aldir. Þá yrði styrkurinn um 500 ppmv í lok 21. aldar. Það nálgast tvöföldun styrksins sem var við upphaf iðnbyltingar en þá var hann 280 ppmv.
- Líkön af hringrás kolefnis hafa verið notuð til þess að rannsaka með hvaða hætti hægt væri að

stöðva aukningu á styrk CO₂ í andrúmsloftinu og ná nýju jafnvægi við 450, 650 og 1000 ppmv. Niðurstöðurnar benda til þess að slíkt jafnvægi náist ekki nema losun CO₂ af mannavöldum í heiminum fari niður í losun ársins 1990 eftir um það bil 40, 140 eða 240 ár fyrir ofangreindan styrk CO₂ í sömu röð og í framhaldi af því talsvert niður fyrir losun ársins 1990.

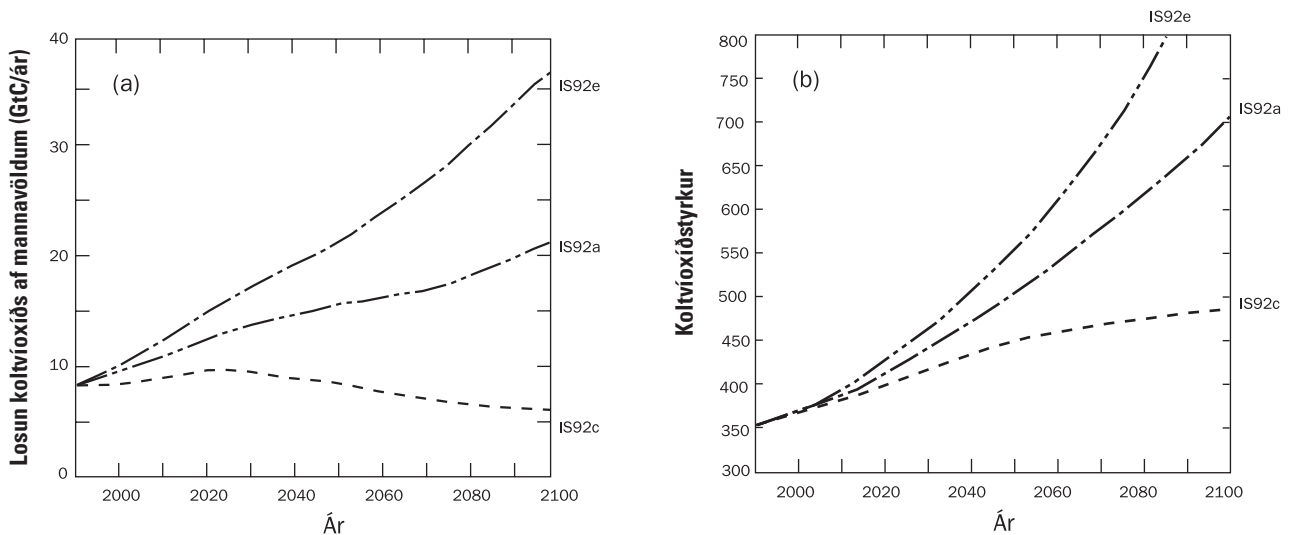
- Styrkur CO₂ mun hugsanlega hætta að aukast og nálgast ákveðið jafnvægi í framtíðinni. Sá jafnvægisstyrkur ræðst fremur af heildarlosun af mannavöldum fram að þeim tíma er jafnvægi næst heldur en af breytingum milli ára í losun á tímabilinu. Þetta þýðir að ef ná á tilteknum jafnvægisstyrk kallar meiri losun snemma á tímabilinu á minni losun síðar. Jafnvægi við 450, 650 og 1000 ppmv styrk CO₂ svarar til heildarlosunar af mannavöldum á tímabilinu 1991 til 2100 upp á 630 GtC⁴, 1030 GtC og 1410 GtC (um 15% í hverju tilviki). Til samanburðar er samsvarandi heildarlosun fyrir losunarsviðsmyndir IPCC IS92⁵ á bilinu 770 til 2190 GtC.
- Til þess að styrkur CH₄ og N₂O hætti að vaxa og nái jafnvægi þarf losun af mannavöldum að minnka um 8% fyrir CH₄ og um meira en 50% fyrir N₂O.



Mynd 1.3 Breytingar í geislunarbúskap af mannavöldum frá iðnbyltingu (ársmeðaltal á jörðinni) vegna vaxandi styrks gróðurhúsalofttegunda og ryks og annarra agna og vegna náttúrulegra breytinga í útgeislun sólar frá 1850. Til samanburðar er meðalinngeislun sólar um 342 Wm⁻². Úr skýrslu IPCC frá 1995.

4 1 GtC – 1 milljarður (10⁹) tonna af kolefni.

5 Sjá nánari umfjöllun um losunarsviðsmyndir IPCC á bls. 7 og áfram.



Mynd 1.4 (a) Hnattræn losun koltvíoxíðs af mannavöldum samkvæmt þremur sviðsmmyndum frá IPCC, þ.e. „öbreytt losun“ (IS92a), „mesta losun“ (IS92e) og „minnsta losun“ (IS92c). (b) Reiknuð aukning í styrk koltvíoxíðs fyrir þessar sömu sviðsmmyndir. Úr skýrslu IPCC frá 1995.

- Vísbendingar eru um að styrkur ósons í veðrahvolfinu hafi aukist af mannavöldum á norðurhveli jarðar frá upphafi iðnbýltingar og að þetta hafi leitt til breytinga í geislunarbúskap. Breyting þessi hefur enn ekki verið ákvörðuð nákvæmlega en áætlað er að hún sé um það bil $0,4 \text{ Wm}^{-2}$ (15% af breytingunni af völdum langlífra gróðurhúsalofttegunda). Athuganir síðasta áratugar sýna þó að dregið hefur verulega úr aukningunni eða hún stöðvast.

Ryk og agnir draga úr geislun

Ryk og aðrar agnir⁶ af mannavöldum í andrúmsloftinu draga úr geislun í átt til yfirborðs jarðar og breyta þannig geislunarbúskap.

- Ryk og aðrar agnir í veðrahvolfinu, sem verða til við brennslu jarðefnaeldsneytis, brennslu lífmassa og af ýmsum öðrum orsökum, hafa leitt til breytinga á geislunarbúskap sem nemur $-0,5 \text{ Wm}^{-2}$ að meðaltali á jörðinni. Agnirnar hafa hugsanlega einnig haft jafnmikil óbein áhrif á geislunarbúskapinn til viðbótar. Enda þótt geislunarbreytingarnar séu svæðisbundnar geta þær haft áhrif á veðurfar á stórum svæðum, meginlöndum og jafnvel á öllu norður- eða suðurhveli.

- Á ákveðnum svæðum geta áhrif ryks og annarra agna á geislunarbúskap verið svo mikil að þau vegi upp áhrif aukningar á styrk gróðurhúsalofttegunda.
- Gagnstætt langlífum gróðurhúsalofttegundum hefur ryk af mannavöldum mjög skamma viðdvöl í andrúmsloftinu. Aukning eða minnkun í losun ryks kemur fljótt fram í áhrifum á geislunarbúskap.

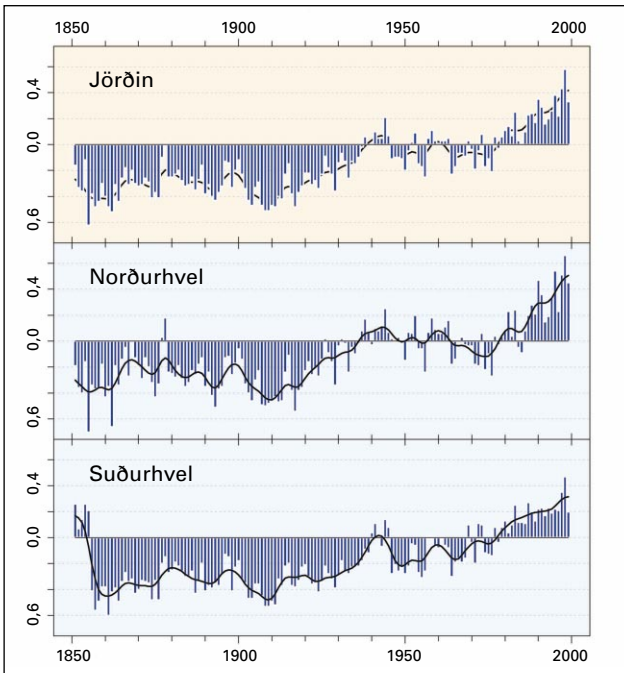
Veðurfar hefur breyst á síðustu 100 árum

Veður á hverjum stað getur verið afar breytilegt frá ári til árs. Greining veðurfræðilegra gagna og annarra upplýsinga, er taka til stórra svæða eða áratuga og enn lengri tímabila, leiðir í ljós að mikilvægar kerfisbundnar breytingar hafa átt sér stað.

- Meðalhiti við yfirborð jarðar hefur hækkað um u.þ.b. $0,3$ til $0,6^\circ\text{C}$ frá síðari hluta nítjándu aldar. Viðbótargögn, sem orðin eru aðgengileg frá árinu 1990 og frekari rannsóknir síðan þá, hafa ekki breytt þessu mati sem neinu nemur.⁷
- Undanfarin ár hafa verið með þeim hlýjstu frá árinu 1860, þ.e. frá því mælingar hófust, þrátt fyrir kólnun sem var afleiðing af eldgosinu í Pinatubo árið 1991.

⁶ „Ryk og aðrar agnir“ er hér notað sem þýðing á enska orðinu *aerosol* og einnig *aerosol precursors*. Þar er um að ræða örsmáar agnir sem svífa í andrúmsloftinu, bæði rykagnir og einnig vatnsdropa sem þéttast á svokölluðum þéttikjörnum sem geta verið örsmáar rykagnir eða dropar sem leysast í vatni, s.s. brennisteinssýrudropar.

⁷ Nýjar rannsóknir síðan skýrsla IPCC frá árinu 1995 kom út gefa til kynna að hlýnunin frá lokum nítjándu aldar sé $0,4$ - $0,8^\circ\text{C}$ að meðaltali yfir jörðina sem er heldur meira en samkvæmt skýrslunni frá 1995 (P. D. Jones o.fl. (1999), *Reviews of Geophysics*, 37, 173-199; P. D. Jones (1994), *Journal of Climate*, 7, 1794-1802. Gögn frá rannsóknastofnun bresku veðurstofunnar, Hadley Centre, og frá Alþjóðaveðurfræðistofnuninni WMO).



Mynd 1.5 Hitabreytingar á jörðinni, á norðurhveli og á suðurhveli frá 1850 til 1999. Gögn um sjávarhita úr D.E. Parker o.fl. (1995), *Climatic Change*, 31, frá landi úr P.D. Jones (1994), *Journal of Climate*, 7, með viðbótarupplýsingum fyrir síðustu ár frá rannsóknastofnun bresku veðurstofunnar, Hadley Centre, og frá Alþjóðaveðurfræðistofnuninni, WMO.

- Hiti yfir landi að nóttu til hefur yfirleitt hækkað meira en að deginum.
- Svæðisbundnar breytingar eru einnig greinilegar, t.d. hefur hlýnunar undanfarinna ára gætt mest á meginlöndum um miðbik norður- og suðurhvels að vetri til og á vorin. Á nokkrum svæðum hefur kólnað, t.d. á Norður-Atlantshafi.⁸ Úrkoma hefur aukist á landsvæðum nyrst á norðurhveli, einkum að vetri til.
- Sjávarborð hefur hækkað um 10-25 cm á undanförunum 100 árum, hugsanlega að miklu leyti sökum hækkanndi meðalhita á jörðinni.
- Ekki liggja fyrir nægileg gögn til þess að meta hvort kerfisbundnar breytingar hafi orðið á veðurfari eða óvenjulegu veðurfari í heiminum á tuttugustu öld. Augljósar vísbendingar eru um slíkar breytingar á ákveðnum svæðum jarðar (þ.e.

minna er um frost á nokkrum víðáttumiklum svæðum; hlutfall aftakaúrkomu af heildarúrkomu hefur vaxið í Bandaríkjunum að ríkjum Alaska og Hawaii frátöldum). Sumar þessara breytinga má túlka sem auknar veðurfarsveiflur en aðrar þannig að dregið hafi úr sveiflum.

- Viðvarandi hlýindi á Suður-Kyrrahafi frá árinu 1990 fram á mitt ár 1995 eru óvenjuleg þegar litið er til veðurfars síðustu 120 ára. Þessi hlýindi voru þáttur í veðurfarsveiflu sem kennd er við El Niño og veldur þurrkum og flóðum á ýmsum svæðum jarðarinnar.

Merkjanleg áhrif mannsins á veðurfar

Þegar á heildina er litið benda fyrirliggjandi gögn og niðurstöður rannsókna til þess að áhrif mannsins á veðurfar á jörðinni séu merkjanleg.

Áhrif mannsins á veðurfar koma til viðbótar náttúrulegum breytileika er stafar bæði af breytileika veðrakerfisins sjálfs og af ytri orsökum á borð við breytingar í geislun sólar og eldgosum. Með greiningu á breytingum og orsökum þeirra er gerð tilraun til þess að greina á milli áhrifa mannsins og náttúrulegra áhrifa. Greining á „ummerkjum um breytingu“ felst í því að sýna fram á að veðurfarsbreyting sé tölfræðilega afar óvenjuleg en engin orsök er tilgreind fyrir breytingunni. Greining á „orsök breytingar“ felst í að rekja breytingu til ákveðinnar orsakar, þar með talið að prófa ólíkar tilgátur.

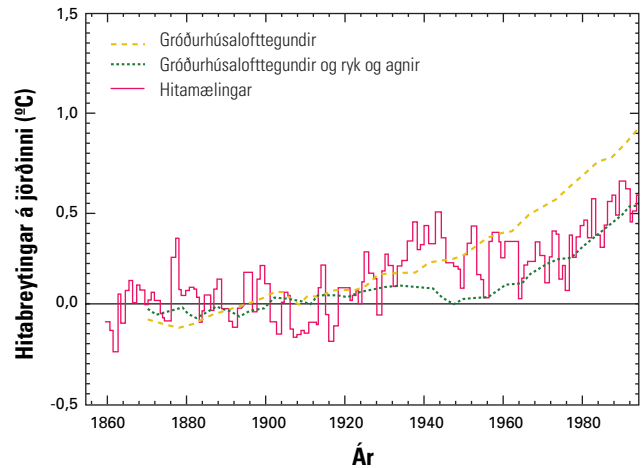
Frá útkomu IPCC-skýrslunnar árið 1990 hafa umtalsverðar framfarir átt sér stað við að greina á milli náttúrulegra áhrifa á veðurfar og áhrifa mannsins. Tillit er nú tekið til áhrifa súlfatagna á geislunarbúskap, auk gróðurhúsalofttegunda. Þetta leiddi til raunhæfara mats á áhrifum mannsins á geislunarbúskap jarðar. Það mat hefur síðan verið notað í veðurfarslíkönum til þess að reikna ýmsa eiginleika veðurfarsbreytinga af mannavöldum. Að auki hafa nýjar líkankeyrslur með líkönum, er taka bæði til andrúmslofts og hafs, veitt mikilvægar upplýsingar um náttúrulegan innri breytileika veðurfars yfir áratugi og aldir. Annað stórt framfaraskref var stigið þegar rannsóknir þróuðust frá því að meta meðaltal breyt-

⁸ Þegar þetta var skrifað (1995) hafði veður farið kólnandi á sumum hlutum Norður-Atlantshafs um nokkurra áratuga skeið. Þessi þróun hefur snúist við og virðist veður nú fara þar hlýnandi. Veðurfar á þessum svæðum er þó ekki orðið jafnhlýtt og á „hlýju árunum“ á milli 1930 og 1960 (sjá nánar á mynd 2.1).

inga yfir jörðina alla yfir í samanburð á dreifingu reiknaðra og mældra veðurfarsbreytinga í rúmi og tíma.

Mikilvægustu niðurstöður rannsókna á ummerkjum og orsökum veðurfarsbreytinga eru:

- Takmarkaðar óbeinar vísbendingar um veðurfar gefa til kynna að meðalhiti tuttugustu aldar sé að minnsta kosti jafnhár og á nokkurri annarri öld frá að minnsta kosti 1400. Gögn frá því fyrir 1400 eru of takmörkuð til þess að unnt sé að leggja ábyggilegt mat á meðalhita jarðar.
- Við greiningu á því hvort hlýnun á þessari öld sé tölfræðilega marktæk hefur verið stuðst við margs konar mat á náttúrulegum innri og ytri breytileika í veðurfari. Slíkt mat er unnið á grundvelli hefðbundinna veðurathugana, óbeinna gagna um fornveðurfar, einfaldra og flókinna veðurfarslíkana og tölfræðilíkana sem felld eru að veðurathugunum. Flestar leiða þessar rannsóknir í ljós marktæka breytingu og sýna að ólíklegt er að hlýnunin stafi einungis af náttúrulegum orsökum.
- Nýjar og trúverðugri niðurstöður um áhrif mannsins á veðurfar liggja nú fyrir úr rannsóknum sem byggja á greiningu veðurfarsbreytinga í rúmi og tíma. Í þessum rannsóknum eru reiknuð viðbrögð andrúmsloftsins við heildarbreytingum á geislunarbúskap af völdum gróðurhúsalofttegunda og súlfatagna borin saman við svæðisbundna, árstíðabundna og lóðrétt dreifingu hitabreytinga í andrúmsloftinu. Rannsóknirnar sýna að samsvörun milli reiknaðra og mældra breytinga eykst, eins og búist er við, eftir því sem ummerki breytinga af mannavöldum aukast. Enn fremur eru mjög litlar líkur á því að þessi samsvörun gæti orðið fyrir tilviljun af völdum náttúrulegs innri breytileika einvörðungu. Lóðrétt dreifing breytinga í andrúmsloftinu er enn fremur ekki í samræmi við geislunarbreytingar af völdum breytinga á inngeislun sólar eða vegna eldgosa.
- Erfitt er, enn sem komið er, að greina áhrif mannsins á veðurfar á jörðinni frá náttúrulegum breytingum á veðurfari. Þetta takmarkar möguleika okkar til þess að mæla slík áhrif. Einnig er óvissa um ýmis lykilatriði. Þeirra á meðal eru stærð og svæðisbundin dreifing náttúrulegra breytinga þegar til langs tíma er litið, tímaháðar



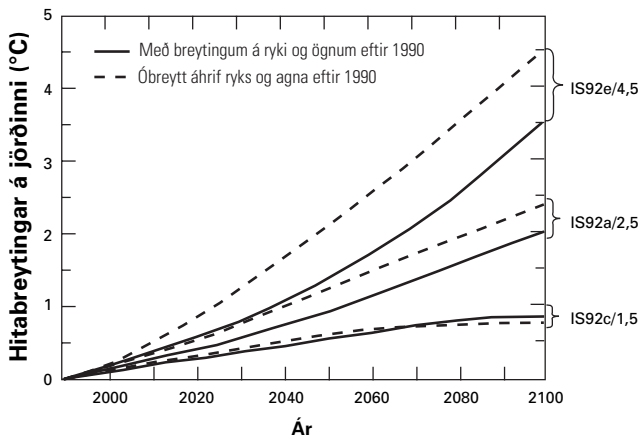
Mynd 1.6 Reiknuð hlýnun að meðaltali yfir jörðina frá 1860 til 1990, að teknu tilliti til breytinga í styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloftinu (slitinn ferill) og þegar einnig er tekið tillit til áhrifa ryks og annarra agna (heil-dreginn ferill), borin saman við hitamælingar. Úr skýrslu IPCC frá 1995.

og svæðisbundnar breytingar á geislunarbúskap af völdum gróðurhúsalofttegunda, ryks og agna og breytingar á yfirborðseiginleikum lands. Þegar á heildina er litið benda fyrirbyggjandi gögn og niðurstöður rannsókna engu að síður til þess að áhrif mannsins á veðurfar á jörðinni séu merkjanleg.

Búast má við að veðurfar haldi áfram að breytast

IPCC hefur skilgreint röð hugsanlegra sviðsmynda (scenarios), IS92a til f, fyrir losun gróðurhúsalofttegunda og ryks og annarra agna í framtíðinni og byggjast þær á tilteknum forsendum um fólksfjölgun og efnahagsvöxt, landnýtingu, tæknibreytingar, orkulindir og eldsneytissamsetningu á tímabilinu frá 1990 til 2100. Með skilningi á hringrás kolefnis á jörðinni og efnafræði andrúmsloftsins er unnt að nýta slíkar losunarsviðsmyndir til þess að framreikna styrk gróðurhúsalofttegunda og ryks í andrúmsloftinu og þar með breytingar af mannavöldum á geislunarbúskap jarðar. Veðurfarslíkön er síðan hægt að nota til þess að reikna hugsanlega þróun veðurfars í framtíðinni.

- Nýjustu veðurfarslíkön, er taka bæði til andrúmslofts og hafs, gefa raunhæfari mynd af veðurfari fyrr og nú en eldri líkön. Það hefur aukið tiltrú manna á notkun slíkra líkana til þess að reikna veðurfarsbreytingar fram í tímann. Enn ríkir óvissa um mikilvæg atriði en tekið hefur verið tillit til óvissunnar með því að nota breitt bil sviðs-



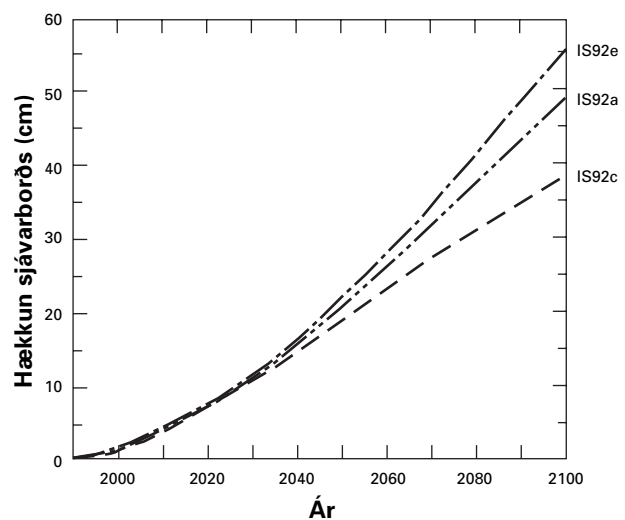
Mynd 1.7 Reiknuð hlýnun að meðaltali á jörðinni frá 1990 til 2100 miðað við þrjár sviðsmyndir fyrir losun gróðurhúsalofttegunda, þ.e. „óbreytt losun“ (IS92a), „mesta losun“ (IS92e) og „mínsta losun“ (IS92c) og mismunandi forsendur um næmi veðurfars gagnvart breytingum í geislunarþúska. Heildregnu ferlarnir miðast við að breytingar verði á áhrifum ryks og annarra agna eftir 1990 en slitnu ferlarnir gera ráð fyrir að áhrif ryks og annarra agna haldist óbreytt eftir 1990. Hlýnunin spannar breitt bil eftir því hvaða forsendur um losun og næmi veðurfars miðað er við. Úr skýrslu IPCC frá 1995.

mynda í framreikningi á meðalhita jarðar og breytingum á sjávarborði.

- Fyrir sviðsmyndina IS92a, sem liggur á miðju bilinu sem losunarsviðsmyndir IPCC spanna, reiknast mönnum með nýjustu líkönunum til að árið 2100 verði meðalhlýnun við yfirborð jarðar orðin um það bil 2°C miðað við árið 1990. Þá er miðað við „besta mat“ á næmi veðurfars⁹ gagnvart breytingum á geislunarþúska og tekið tillit til kælandi áhrifa ryks og annarra agna í andrúmsloftinu. Þessi áætlun er um þriðjung lágri en „besta mat“ IPCC frá árinu 1990. Ástæður lækkunarinnar eru fyrst og fremst minni losun (einkum á CO₂ og CFC efnum), kólnunaráhrif súlfatagna og endurbætur á líkönunum af hringrás kolefnis. Með því að nota minnstu losun IPCC-sviðsmyndanna (IS92c), „lágt“ gildi fyrir næmi veðurfars og að teknu tilliti til framtíðarbreytinga á styrk ryks og annarra agna verður framreiknuð hlýnun árið 2100 um 1°C. Hliðstæðir reikningar fyrir IPCC-sviðsmyndina, sem gefur mesta losun (IS92e) og „hátt“ gildi fyrir næmi veðurfars, leiða til um 3,5°C hlýnunar. Í öllum tilvikum yrði hlýnunin

líklega hraðari en nokkru sinni á undanförunum tíu þúsund árum. Hitabreytingar á árum og áratugum yrðu engu að síður talsvert breytilegar vegna náttúrulegs breytileika. Svæðisbundnar hitabreytingar kynnu að verða talsvert frábrugðnar meðaltalshlýnun á jörðinni allri. Sökum varmatregðu heimshafanna verða einungis 50-90% af hitabreytingunni, sem svarar til röskunar á geislunarþúska jarðarinnar, komin fram árið 2100. Hiti mun því halda áfram að hækka eftir 2100 jafnvel þótt jafnvægi í styrk gróðurhúsalofttegunda náist fyrir þann tíma.

- Gert er ráð fyrir hækkun sjávarborðs vegna lækkunar á meðaleðlisþyngd heimshafanna með vaxandi sjávarhita og sökum bráðnunar jökla og íss. Fyrir sviðsmyndina IS92a reiknast mönnum með nýjustu líkönunum til að árið 2100 verði sjávarborð orðið um 50 cm hærra en það er nú. Þá er miðað við „besta mat“ á næmi veðurfars gagnvart breytingum á geislunarþúska og á aukningu á leysingu jökla með hlýnun. Einnig er tekið tillit til kælandi áhrifa ryks og annarra agna í andrúmsloftinu. Þessi hækkun er um það bil 25% minni en „besta mat“ IPCC frá árinu 1990. Það stafar einkum af því að nú er gert ráð fyrir minni hlýnun.



Mynd 1.8 Reiknuð hækkun sjávarborðs frá 1990 til 2100 miðað við þrjár sviðsmyndir fyrir losun gróðurhúsalofttegunda, þ.e. „óbreytt losun“ (IS92a), „mesta losun“ (IS92e) og „mínsta losun“ (IS92c). Notað er gildið 2,5°C fyrir næmi veðurfars og reiknað er með leysingu jökla á miðju því bili sem sviðsmyndir af jöklaleysingu spanna. Úr skýrslu IPCC frá 1995.

9 Í skýrslum IPCC merkir hugtakið „næmi veðurfars“ yfirleitt langtímabreytingu á meðalyfirborðshita jarðar í kjölfar tvöföldunar á jafngildisstyrk CO₂ í andrúmslofti. Oft er þetta hugtak annars notað um langtímabreytingu á jafnvægisshita við yfirborð jarðar í kjölfar breytingar á geislunarþúska um eina geislunareiningu, °C/(W/m²).

Breytingin frá 1990 stafar einnig af endurbótum á veðurfars- og ísbráðnunarlíkönnum. Með því að nota minnstu losun IPCC-sviðsmyndanna (IS92c), „lág“ gildi fyrir næmi veðurfars og aukningu á leysingu með hækkandi hita og að teknu tilliti til framtíðarbreytinga á magni ryks og annarra agna verður framreiknuð hækkun sjávarborðs til ársins 2100 um 15 cm. Hliðstæðir reikningar fyrir IPCC-sviðsmyndina, sem gefur mesta losun (IS92e) og „há“ gildi fyrir næmi veðurfars og aukningu leysingar með hita, leiða til 95 cm hækkunar á sjávarborði til ársins 2100. Sjávarborð mun halda áfram að hækka eftir 2100 jafnvel þótt jafnvægi í styrk gróðurhúsalofttegunda náist fyrir þann tíma og það mun halda áfram að hækka jafnvel eftir að meðalhiti við yfirborð jarðar nær jafnvægi. Svæðisbundnar breytingar á sjávarborði kunna að verða frábrugðnar meðalhækkun heimshafanna vegna lóðréttra jarðskorpuhreyfinga og breytinga á hafstraumum.

- Tiltrú á framreikninga veðurfarslíkana, er taka bæði til andrúmslofts og hafs, er meiri þegar framreiknuð eru meðaltöl fyrir norður- eða suðurhvel eða fyrir heilu meginlöndin heldur en á niðurstöður fyrir minni svæði. Tiltrú á framreiknað hitafar er meiri en á reiknaðar breytingar á vatnsbúskap.
- Allar niðurstöður veðurfarslíkanreikninga, hvort heldur tekið er tillit til bæði aukins styrks gróðurhúsalofttegunda og kælandi áhrifa ryks og annarra agna í andrúmsloftinu eða aukins styrks gróðurhúsalofttegunda einvörðungu, eru samhljóða hvað varðar eftirfarandi þætti: Meiri hlýnun við yfirborð jarðar yfir landi en á höfunum að vetri til, mest hlýnun norðarlega á norðurhveli að vetrarlagi, lítil hlýnun við yfirborð yfir Norður-Íshafinu að sumri til, hringrás vatns á jörðinni eflist og úrkoma og jarðvegsraki vaxa að vetri til norðarlega á norðurhveli og sunnarlega á suðurhveli. Allar tengjast þessar breytingar ákveðnum, þekktum eðlisfræðilegum ferlum.
- Þessu til viðbótar sýna flestar niðurstöður líkanreikninga að það dregur úr lóðréttri hringrás¹⁰ Norður-Atlantshafsins og að hitamunur dags og nætur minnkar á stórum svæðum. Þessa þætti er

einnig unnt að skýra á grundvelli þekkra eðlisfræðilegra ferla.

- Bein og óbein áhrif ryks og annarra agna af mannavöldum hafa mjög mikil áhrif á niðurstöður líkanreikninga af veðurfarsbreytingum. Almenn breytast hiti og úrkoma minna ef áhrif ryks og agna eru tekin með í reikninginn, einkum um miðbik norðurhvels. Rétt er að taka fram að kælandi áhrif ryks og agna koma ekki einungis fram sem minni hlýnun til mótvægis við hlýnun af völdum gróðurhúsalofttegunda. Áhrif ryks og agna koma einnig fram í svæðisbundinni dreifingu veðurfarsbreytinga yfir meginlönd og úthöf, sérstaklega að sumarlagi. Til dæmis spá líkön, sem einungis taka tillit til áhrifa gróðurhúsalofttegunda, oftast aukinni úrkomu og auknum jarðvegsraka á sumarregntímasvæði Asíu. Líkön, sem taka tillit til áhrifa ryks og agna, benda hins vegar til þess að draga kunni úr úrkomu á regntímanum. Dreifing ryks og agna í rúmi og tíma er veigamikill áhrifaþáttur í svæðisbundnum framreikningum og eru slíkir reikningar því meiri óvissu undirornir en reikningar á veðurfarsbreytingum að meðaltali fyrir jörðina alla.
- Gert er ráð fyrir að almenn hlýnun leiði til þess að óvenjulega heitum dögum fjölgi og að óvenjulega köldum dögum fækki.
- Hærri hiti leiðir til örari hringrásar vatns á jörðinni. Gert er ráð fyrir að þetta leiði til alvarlegri þurrka eða flóða eða hvors tveggja á sumum svæðum jarðar og minni þurrka eða flóða á öðrum svæðum. Nokkur líkön benda til þess að úrkoma kunni að verða ákafari og getur það aukið úrkomu í stórrigningum. Núverandi þekking er ófullnægjandi til þess að segja til um það hvort breytingar verði á tíðni og landfræðilegri dreifingu fárviðra, t.d. hitabeltisfelliþylja.
- Viðvarandi og hröð loftslagsbreyting gæti raskað náttúrulegu jafnvægi dýra- og jurtategunda og jafnvel leitt til eyðingar skóga og breytt þannig upptöku og losun koltvíoxíðs. Óvíst er hversu miklar slíkar breytingar gætu orðið en talið er að þær gætu numið allt frá núlli og til 200 GtC á næstu einni til tveimur öldum, allt eftir hraða loftslagsbreytinganna.

10 Lóðrétta hringrás heimshafanna er oft nefnd hitaseltuhringrásin (*thermohaline circulation*).

Óvissuþættir eru margir

Margir þættir takmarka möguleika okkar til þess að segja fyrir um og greina veðurfarsbreytingar. Til þess að draga úr óvissu er einkum brýnt að halda áfram rannsóknum á nokkrum forgangssviðum. Þau helstu eru:

- Mat á losun og lífefnafræðilegri hringrás gróðurhúsalofttegunda, ryks og annarra agna í framtíðinni, framreikningar á styrk þessara efna og geislunareiginleikum þeirra.
- Lýsing veðurferla í veðurfarslíkönum, einkum lýsing á gagnvirkum ferlum sem tengjast skýjum, höfum, hafis og jarðargróðri, í þeim tilgangi að bæta reikninga á hraða og svæðisbundinni dreifingu veðurfarsbreytinga.
- Kerfisbundin söfnun gagna um langtímaveðurfarsbreytingar, bæði með beinum veðurmælingum og óbeinum vísbendingum um veðurfar. Þar má nefna geislun sólar, orkujafnvægisþætti and-

rúmsloftsins, hringrás vatns, ástand heimshafanna og breytingar á vistkerfum. Slík gögn eru notuð til þess að prófa líkön við mat á svæðisbundnum breytingum á veðurfari og við greiningu á ummerkjum og orsökum veðurfarsbreytinga.

Eðli málsins samkvæmt er erfitt að segja fyrir um óvæntar, miklar og hraðar loftslagsbreytingar sem kunna að verða í framtíðinni (svipaðar breytingar og vitað er að áður hafa orðið). Þetta felur í sér að loftslagsbreytingar framtíðarinnar kunna að hafa í för með sér óvænta atburði ekki síst vegna þess að veðrakerfi jarðar er í sjálfu sér ekki línulegt. Slíkum ólínulegum kerfum hættir til að bregðast við hröðum breytingum á aðstæðum með óvæntum hætti. Framfarir geta orðið í skilningi á þessu sviði með rannsóknum á ferlum, sem ekki eru línuleg, og á veðrakerfum jarðarinnar. Dæmi um viðbrögð, sem ekki eru línuleg, er hröð breyting á hringrás Norður-Atlantshafsins og gagnvirk ferli í tengslum við breytingar á vistkerfum jarðar.

2. kafli

Veðurfarsbreytingar á Íslandi og hafsvæðinu umhverfis landið

Loftslag á jörðinni einkennist af náttúrulegum sveiflum sem ná yfir mislög tímabil, allt frá veðrabreytingum á sama sólarhring til veðurfarsveifla sem taka milljónir ára. Breytingar, sem vara í árþúsundir eða lengri tíma, stafa af breytingum á útgeislun sólar, breytingum á stærð og legu meginlanda og úthafa af völdum landreks, tímaháðum breytingum á braut jarðar um sólu og halla jarðmöndulsins og breytingum í samsetningu og eiginleikum andrúmsloftsins. Veðurfarsbreytingar frá ári til árs ráðast að miklu leyti af tilviljanakenndum innri breytileika andrúmsloftsins. Breytingar á áratugum og öldum stafa hins vegar að stórum hluta af samspili lofthjúps og úthafa og einnig hugsanlega af mannavöldum eftir að komið var fram á 20. öld.

Eins og fram kemur í samantekt IPCC hér að fram- an er talið að vaxandi gróðurhúsaáhrif í lofthjúpi jarðar muni á næstu öld leiða til hlýnunar um alla jörðina og samkvæmt sumum rannsóknum er hlýn- unin þegar hafin. Sveiflur í veðurfari eru Íslendingum vel kunnar og má ýmislegt ráða af fyrri veðurfars- sveiflum um áhrif veðurfarsbreytinga sem kunna að verða í framtíðinni.

Hitasveiflur

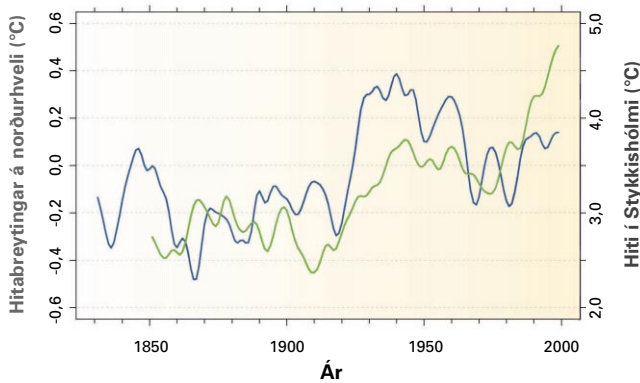
Skilyrði til búskapar á Íslandi hafa, eins og kunnugt er, verið mismunandi á hinum ýmsu tímabilum Ís- landssögunnar. Margt bendir til þess að komið hafi alllög tímabil þar sem meðalhiti áratuga var 1-1,5°C lægri en að meðaltali á hlýviðraskeiðinu 1931-1960. Svo virðist sem hérlendis hafi kólnað allnokkuð á 14. öld eftir heldur mildara veðurlag áður. Það kaldara tímabil, sem stóð með nokkrum hléum frá þeim tíma til loka 19. aldar, er oft kallað „litla ísöld“. Breytingar í veðurfari á Íslandi, frá því að mælingar hófust, hafa einnig verið miklar. Til dæmis var meðalhiti í Reykjavík 1931-1960 um 0,8°C hærri en á árabílinu 1961-1990 og 0,7°C hærri í Stykkishólmi. Þessar breytingar í hitafari eru minni en talið er að verða muni að meðaltali á jörðinni á næstu öld.

Jöklar, sem þekja um 10% Íslands, hafa einnig tekið miklum breytingum hér á landi síðan land byggðist. Þeir gengu yfirleitt fram á „litlu ísöldinni“ sem fyrr var nefnd en hafa hopt og þynnst mikið síðan þá. Margir þeirra hafa hopt um nokkra kílómetra og þynnst um tugi metra. Jöklabreytingar hafa áhrif á vatnafar og eru líklega þýðingarmesta ástæða breyt- inga í vatnafari á mörgum vatnasviðum hérlendis.

Hafís getur ráðið allmiklu um hitafar á stórum hluta landsins. Áhrif hans eru reyndar misjöfn eftir árstím- um og landsvæðum en ætíð til lækkunar meðalhita. Í miklum hafísvetrum verður Ísland eins konar skagi út úr Grænlandi og norðlægar vindáttir verða þá mun kaldari um land allt en annars. Þetta hefur að- eins gerst samtals í fáeina mánuði á þessari öld. Vor- og sumaráhrifin eru að jafnaði meira bundin við ströndina. Vor- og snemmsumarís hefur sett svip sinn á allmörg ár 20. aldar.

Áhrif hafstrauma

Hafstraumar ráða miklu um veðurfar hér á landi. Við Ísland mætir hlýr og selturíkur Atlantssjór, sem hingað berst með Golfstraumnum að sunnan, köld- um og seltulitlum pólsjó norðan úr Austur-Græn- landsstraumnum. Þetta ræður miklu um veðurfar hér á landi frá ári til árs. Til lengri tíma ræðst veðurfar af breytingum á djúpsjármyndun í Norður-Atlants- hafi og varmaflutningi til svæðisins með Golf- straumnum. Golfstraumurinn hefur þau áhrif að loftslag er milt hér á landi og í Vestur-Evrópu. Atl- antshafið gegnir þannig mikilvægu hlutverki í tilvist okkar Íslendinga, það vermir landið og lönd ná- granna okkar auk þess sem það færir okkur ríkulega uppskeru sjávarfangs. Atlantshafið er um þessar mundir eitt helsta viðfangsefni alþjóðlegra haf- og veðurfarsrannsókna og beinast mörg alþjóðleg rann- sóknarverkefni að því að auka skilning á eðli þess og hegðan. Þar getur margt óvænt komið upp. Segja má til dæmis að hafísvorin 1965-1971 hafi komið lands- mönnum að óvörum og með þeim urðu að ýmsu leyti kaflaskil í veðurfari hér á landi á 20. öld.



Mynd 2.1 Hitabreytingar á norðurhveli jarðar 1860-1999 (grænn ferill) og í Stykkishólmi 1823-1999 (blár ferill), sýndar sem keðjumeðaltal 15 ára. Bilið milli láréttu punktalínanna er $0,2^{\circ}\text{C}$ fyrir norðurhvelsferilinn en $0,5^{\circ}\text{C}$ fyrir Stykkishólmi. Gögn frá Veðurstofu Íslands og rannsóknastofnun bresku veðurstofunnar, Hadley Centre.

2.1. Veðurfar

Lega Íslands í miðju Norður-Atlantshafi ræður miklu um loftslag hér á landi. Náttúrulegar loftslagsbreytingar eru meiri á og í grennd við Norður-Atlantshaf en á flestum öðrum hafsvæðum á jörðinni, einkum er varðar tímabil sem eru lengri en 1-3 ár. Meðalhiti áratuga á Norður-Atlantshafi og í grennd við það hefur sveiflast um hátt í 2°C síðustu öldina en breytingin er fjarri því að vera jöfn og þétt hlýnun. Á áratugunum frá 1961 til 1990 kólnaði þannig verulega á svæðinu eftir mikla hlýnun á fyrri hluta aldarinnar. Á mynd 2.1 má sjá að hitasveiflur á Íslandi eru að mörgu leyti samstiga meðaltali norðurhvels þó mismunur komi allvíða fram, t.d. er kólnunin eftir 1960 mun meira áberandi á Íslandi. Athyglisvert er að hitabreytingar á Íslandi eru margfalt meiri en að meðaltali á öllu norðurhvelinu (athugið að lóðréttir mælikvarðar fyrir norðurhvelið og Stykkishólmi eru mismunandi á mynd 2.1). Kólnuninni á norðurhveli upp úr 1960 lauk nokkru fyrir 1980 og skömmu síðar á Íslandi. Síðan hefur hlýnað ört að meðaltali á norðurhvelinu og einnig nokkuð á Íslandi.

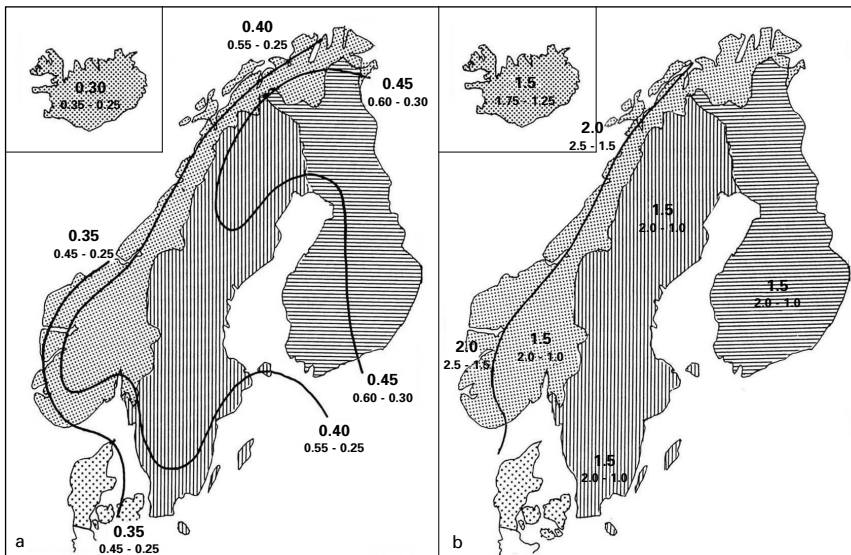
Það er ekki víst að hægt sé að rekja þá hlýnun, sem orðið hefur vart á síðustu árum, til aukinna gróðurhúsaáhrifa. Sambærilegar hitasveiflur hafa orðið áður án þess að hægt sé að rekja þær á ótvíræðan hátt til breytinga á gróðurhúsaáhrifum, t.d. á árunum 1920-1940. Milliríkjanefnd Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC) komst að þeirri niðurstöðu 1995 að þegar á heildina er litið bendi fyrirbyggjandi

gögn til þess að áhrifa mannsins á veðurfar sé farið að gæta eins og fram kemur í samantektinni hér að framan. Ljóst er að það hefur hlýnað frá því um miðja síðustu öld til okkar daga og er talið að sú hlýnun nemi $0,4-0,8^{\circ}\text{C}$ að meðaltali á jörðinni síðustu 100 árin. Þegar tekið er tillit til kælandi áhrifa ryks og annarra agna, sem rædd voru í samantektinni hér að framan, má segja að hlýnunin, sem orðið hefur síðustu 100 árin og sýnd er á mynd 2.1, sé ekki í ósamræmi við niðurstöður líkanreikninga á gróðurhúsaáhrifum. Hitt er einnig hugsanlegt en ekki eins líklegt að þessi hlýnun sé tilkomin vegna tilviljanakenndra breytinga í höfum og andrúmslofti og komi gróðurhúsaáhrifum ekkert við. Úr þessu fæst ekki skorið fyrr en hlýnar mun meira en sem nemur tilviljanakenndum hitasveiflum í veðurfari jarðar en þær eru umtalsverðar eins og mynd 2.1 ber með sér, ekki síst á norðurslóðum. Sé litið til síðustu 100-200 ára virðist sem hlýnun hér á landi sé svipuð og að meðaltali á jörðinni á sama tímabili en sveiflur í veðurfari héraðs sem og víða annars staðar eru mun meiri en að meðaltali á jörðinni eins og skýrt sést á mynd 2.1.

Sviðsmyndir

Hugmyndir um þróun veðurfars í framtíðinni eru oft settar fram sem svokallaðar sviðsmyndir (*scenario*) sem lýsa hugsanlegri framvindu að gefnum ákveðnum forsendum. Þó slíkar sviðsmyndir geti ekki talist spár í þeirri merkingu sem almennt er lögð í veðurspár þá fela þær í sér framtíðarsýn miðað við bestu þekkingu á hverjum tíma, að gefnum tilteknum forsendum um losun gróðurhúsalofttegunda og eiginleika lofthjúpsins. Í norrænu rannsóknarverkefni um áhrif loftslagsbreytinga á vatnafar á Norðurlöndum var á árunum 1993-1995 skilgreind slík sviðsmynd af hugsanlegri þróun hitafars og úrkomu á Norðurlöndum næstu hundrað árin miðað við vísbendingar úr líkanreikningum, að því gefnu að ekki verði grundvallarbreyting á losun CO_2 af mannavöldum (mynd 2.2). Sviðsmyndin gerir ráð fyrir u.þ.b. $0,3^{\circ}\text{C}$ hlýnun á áratug á Norður-Atlantshafi en heldur meiri hlýnun í Svíþjóð og Finnlandi. Úrkoma er talin munu aukast á haf- og strandsvæðum en þróun úrkomu er óvissari á meginlöndum þegar fjær dregur ströndinni.

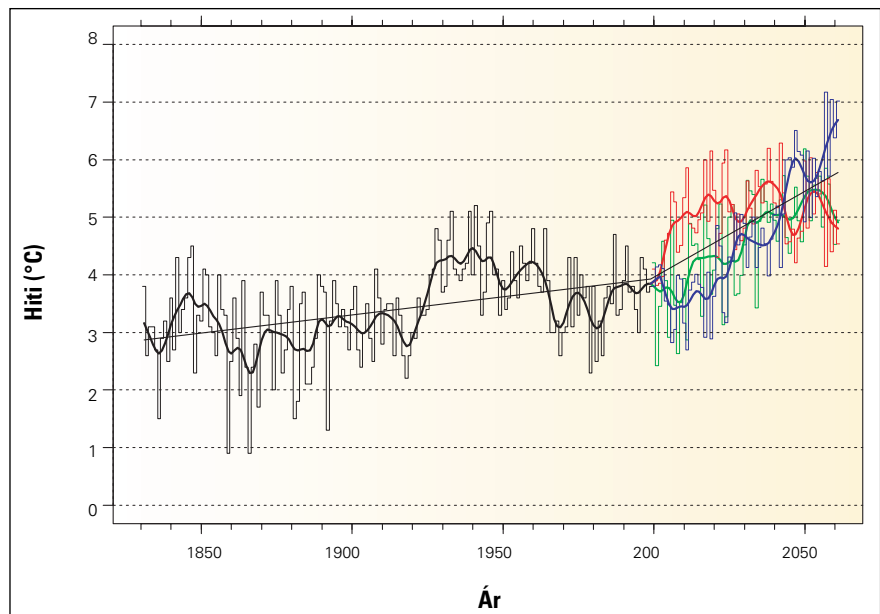
Í sviðsmyndum af lofslagsbreytingum er almennt gert ráð fyrir meiri hlýnun eftir því sem nær dregur póluum. Þegar norræna sviðsmyndin var skilgreind var talið líklegt að hlýnun á norðanverðu Norður-



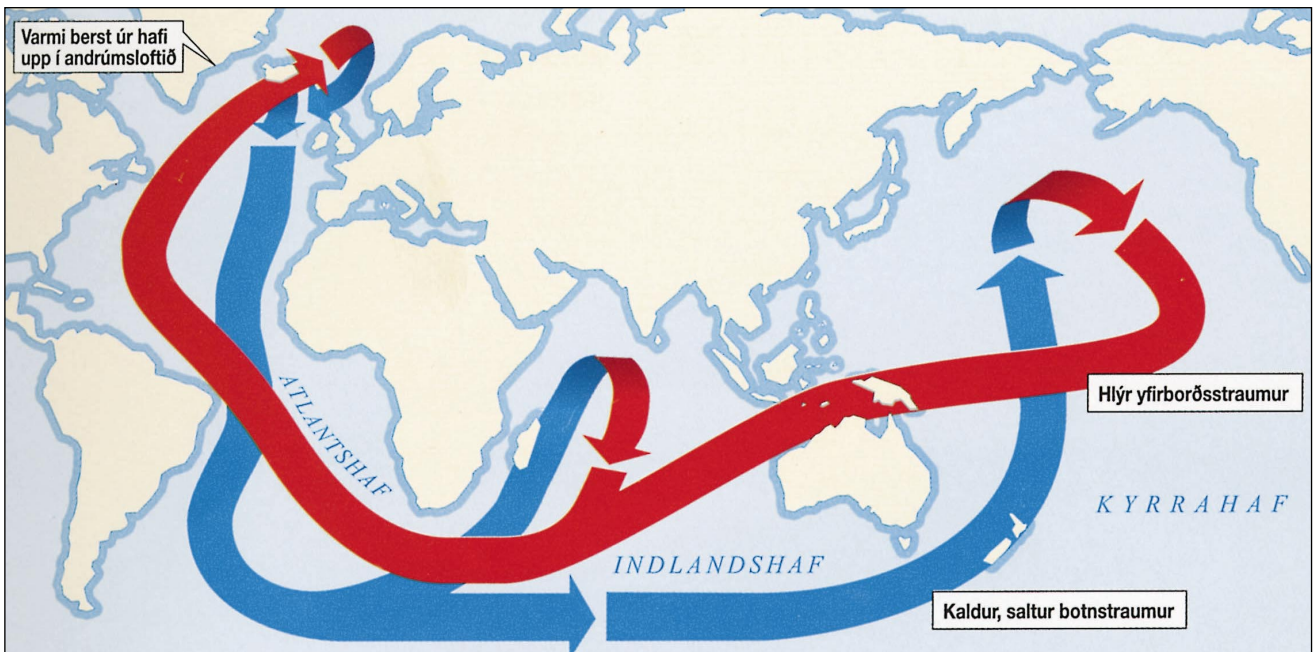
Mynd 2.2 Sviðsmynd af hugsanlegum breytingum á hita og úrkomu á Norður-Atlantshafi og næsta nágrenni. (a) Breytingar á meðalhita í °C á áratug frá meðalhita árunna 1961-1990. Sýndar eru bæði breytingar á meðalhita og einnig breytingar á sumar- og vetrarhita. (b) Breytingar á úrkomu í % á áratug frá meðalúrkomu árunna 1961-1990. Sýndar eru breytingar á ársúrkomu og úrkomu vetrar og sumars. Níðurstöður norræns rannsóknarverkefnis, sjá grein í *Climate Research*, 5, 1995.

Atlantshafi kynni að verða minni en á öðrum svæðum á sömu breiddargráðum jarðar vegna minni varmaflutnings með hafstraumum til hafsvæða í grennd við Ísland. Sviðsmyndin miðast af þessari ástæðu við að hlýnun á norðanverðu Norður-Atlantshafi verði nokkru minni en meðaltalið fyrir breiddargráðurnar sem sviðsmyndin nær til en nokkru meiri en meðaltalið fyrir jörðina alla. Norræna sviðsmyndin var í vinnslu um sama leyti og IPCC vann að skýrslunni sem kom út 1995. Hún tók því mið af sömu rannsóknarniðurstöðum og miðaði auk þess við endurskoðaðar forsendur IPCC um losun gróðurhúsalofttegunda í framtíðinni sem komu fram árið 1992 og leiddu til IS92-losunarsviðsmyndanna sem notaðar eru í samantektinni hér að framan. Nýir líkanreikningar, sem byggja á losunarsviðsmyndunum frá 1992, hafa almennt bent til þess að hlýnun á jörðinni allri verði minni en talið var í fyrstu skýrslu IPCC sem kom út árið 1990. Þeir hafa hins vegar ekki eytt óvissunni um hvort varmaflutningur með hafstraumum til norðanverðs Norður-Atlantshafs minnki af völdum loftslagsbreytinga eins og sumir fyrri líkanreikningar gáfu til kynna. Að athuguðu máli komst vísindanefndin að þeirri niðurstöðu að ekki væri ástæða að svo stöddu til þess að taka upp nýja sviðsmynd í stað þeirrar norrænu.

Áratugasveiflur í hitafari á Íslandi eru mun meiri en áætluð hlýnun af völdum gróðurhúsaáhrifa næstu 10-20 árin. Á mynd 2.3 eru sýndir nokkrir möguleikar varðandi þróun hitafars hér á landi fram yfir miðja 21. öld. Möguleikarnir eru fengnir með því að hliðra ákveðnum tímabilum í hitafarssögu síðustu 160 ára fram þannig að þau hefjist árið 2000 og bæta við þeirri hlýnun um 0,3°C á áratug sem norræna sviðsmyndin gerir ráð fyrir. Myndin sýnir að náttúrulegar sveiflur verða ráðandi í nánustu framtíð. Hlýnun á 10 ára tímabili getur orðið margföld á við meðaltal á jörðinni allri ef hlýnun vegna vaxandi gróðurhúsaáhrifa fer saman við hlýnandi veðurfar af náttúrulegum ástæðum. Einnig getur hlýnun hér á landi orðið



Mynd 2.3 Nokkrir möguleikar á þróun hitafars hér á landi fram yfir miðja næstu öld. Ferlarnir sýna samspil hlýnunar vegna vaxandi gróðurhúsaáhrifa og náttúrulegra sveiflna. Náttúrulegar sveiflur verða ráðandi a.m.k. næstu 10-20 árin, sjá nánar í texta. Unnið af Veðurstofu Íslands.



Mynd 2.4 Lóðrétta hringrás heimshafanna, „færibandið“. Úr grein í Náttúrufræðingnum, 64(1), 1994. Mynd: Kristinn Gardarsson.

óveruleg í 10-20 ár jafnvel þó veðurfar fari almennt hlýnandi á jörðinni ef í vændum er náttúruleg niðursveifla í hitafari á Norður-Atlantshafi.

Djúpsjávarmyndun

Líkanreikningar benda til að breytingar í lóðréttri hringrás heimshafanna séu ráðandi þáttur í þróun loftslags á Norður-Atlantshafi. Þessari hringrás má í grófum dráttum lýsa þannig að höf jarðar séu tengd með straumum sem knúnir eru af djúpsjávarmyndun í norðanverðu Norður-Atlantshafi. Djúpsjórinn myndast við það að saltur sjór af suðlægum uppruna kólnar þegar hann streymir norður á bóginn og gefur frá sér varma til andrúmsloftsins. Einnig verður sjórinn saltari þegar hafis myndast vegna þess að þá binst ferskt vatn í ísnum og selta eykst í sjónum nærri yfirborði. Kæling og aukin selta gera það að verkum að sjórinn nærri yfirborði verður eðlisþyngri en sjór sem undir er. Yfirborðssjórinn sekkur því og myndar djúpsjó.

Varmaflutningur hafsins til Norður-Atlantshafs á sér að miklu leyti (80-90%) stað vegna lóðréttrar hringrásar sem tengist djúpsjávarmynduninni. Lóðrétta hringrásin er mjög öflug og er talið að straumurinn sé hvorki meiri né minni en 15-20 milljónir rúmmetra á sekúndu sem er nokkur þúsund sinnum meira en rennsli allra áa sem renna til hafs á Íslandi. Mikil djúpsjávarmyndun á sér stað í norðurhluta

Norður-Atlantshafs. Djúpsjórinn streymir síðan suður allt Atlantshaf inn á Indlandshaf og síðan Kyrrahaf þar sem hann kemur aftur upp á yfirborðið. Veruleg djúpsjávarmyndun á sér einnig stað í suðurhöfum undan ströndum Suðurskautslandsins. Hringrás þessi, sem sýnd er á mynd 2.4, gengur meðal fræðimanna undir nafninu „færibandið“. Talið er að 6-8°C hlýrra sé en ella væri á stórum hluta norðanverðs Norður-Atlantshafs vegna varmaflutnings með færibandinu. Óvissan um áhrif loftslagsbreytinga á varmaflutning með hafstraumum til norðanverðs Norður-Atlantshafs, sem nefnd var hér að framan, lýtur að viðbrögðum færibandsins við hlýnandi loftslagi. Sumir líkanreikningar benda til þess að hlýnandi loftslag dragi úr styrk færibandsins sem leiðir til minni hlýnunar á hafsvæðum í grennd við Ísland en ella yrði. Aðrir reikningar benda ekki til þess að færibaldið bregðist við hlýnandi veðurfari með þessum hætti. Óvissa um þetta atriði hefur lítið minnkað frá því árið 1995. Ekki er líklegt að þetta skýrist fyrr en verulegar framfarir hafa orðið í reiknilíkönum af hafstraumum og samspili þeirra við lofthjúpin.

Sumir líkanreikningar gefa til kynna að grundvallaröskun kunnist að geta orðið á starfsemi færibandsins af völdum veðurfarsbreytinga. Rannsóknir á jökulís frá Grænlandi sýna að miklar og snöggar veðrasveiflur áttu sér stað á síðasta jökulskeiði sem lauk fyrir um tíu þúsund árum. Rannsóknir á hafsbotsseti

sýna einnig þessar sveiflur sem hafa verið skýrðar með röskun á færibandinu þannig að á köldum skeiðum hafi það veikst eða jafnvel stöðvast. Við það dregur úr varmaflutningi til Norður-Atlantshafssvæðisins og veður kólnar. Kuldakast af þessum toga sést einnig í ískjörnum úr Grænlandsjökli frá okkar hlýindaskeiði fyrir um átta þúsund árum en þá kólnaði skyndilega á Grænlandi um 3-6°C og hiti hélst lágur í ein 200 ár en þá hlýnaði jafn skyndilega á ný. Sökum mikilvægis varmaflutnings með hafinu fyrir veðurfar á Íslandi getur röskun á færibandinu valdið miklum breytingum í veðurfari hér á landi.

Flestir líkanreikningar af breytingum í loftslagi vegna vaxandi gróðurhúsaáhrifa taka einungis tillit til þekktra ferla í lofthjúpnnum og samspils lofthjúps og úthafa en ekki atriða eins og grundvallarröskunar í starfsemi „færibandsins“. Loftslagssagan sýnir okkur hins vegar að þættir af þessum toga, sem ekki eru enn skilgreindir í reiknilíkönunum, hafa verið ráðandi í loftslagssveiflum á mörgum tímiskeiðum jarðsögunnar. Þess vegna gefa líkanreikningar og sviðsmyndir einungis hugmyndir um þróun loftslags á jörðinni en útiloka ekki aðrar sveiflur sem geta bæði átt sér innri orsök í veðrakerfum og hafstraumum eða tengst mannlegum athöfnum með einhverjum hætti sem ekki er tekið tillit til í núverandi líkanreikningum.

Samandregnar niðurstöður

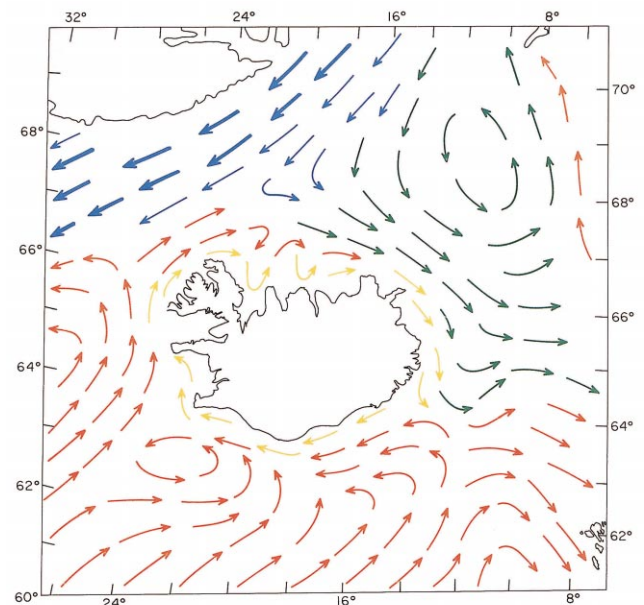
1. Veðurfar á Norður-Atlantshafi einkennist af miklum náttúrulegum sveiflum.
2. Hlýnað hefur um 0,4-0,8°C síðustu 100 árin, bæði að meðaltali á jörðinni og einnig á Norður-Atlantshafi. Líklegt er að hluti þessarar hlýnunar sé af mannavöldum.
3. Hlýnun hér á landi á næstu áratugum kann að verða um 0,3°C á áratug að jafnaði ef miðað er við ákveðnar sviðsmyndir af losun gróðurhúsalofttegunda og tilteknar forsendur um eðliseiginleika andrúmslofts og úthafa og tekið mið af staðsetningu Íslands. Hlýnun verður meiri að vetrarlagi en að sumarlagi. Úrkoma mun að öllum líkindum aukast.
4. Þessi hlýnun er ekki meiri en svo að náttúrulegar sveiflur verða ráðandi í þróun veðurfars á Íslandi a.m.k. næstu 10-20 árin.
5. Óvissa um þróun veðurfars er mikil vegna skorts á þekkingu um ýmis grundvallaratriði í viðbrögð-

um lofthjúps og úthafa við auknum gróðurhúsaáhrifum og vegna þess að losun gróðurhúsalofttegunda í framtíðinni er ekki þekkt. Þessi óvissa er meiri á Norður-Atlantshafssvæðinu en víðast annars staðar á jörðinni vegna óvissu um viðbrögð hafstrauma Norður-Atlantshafsins við hlýnun veðurfars á jörðinni. Hugsanlegt er að svo mikið dragi úr varmaflutningi með hafstraumum að hlýnun verði nánast engin í grennd við Ísland en einnig er mögulegt að hlýnunin verði mun meiri en 0,3°C á áratug.

6. Grundvallarröskun á hafstraumum Norður-Atlantshafsins og loftslagi í grennd við Ísland er hugsanleg en þarf ekki að tengjast vaxandi gróðurhúsaáhrifum. Ekki er hægt að segja til um líkur á slíkri röskun með núverandi þekkingu vísindamanna á samspili lofthjúpsins og úthafanna.

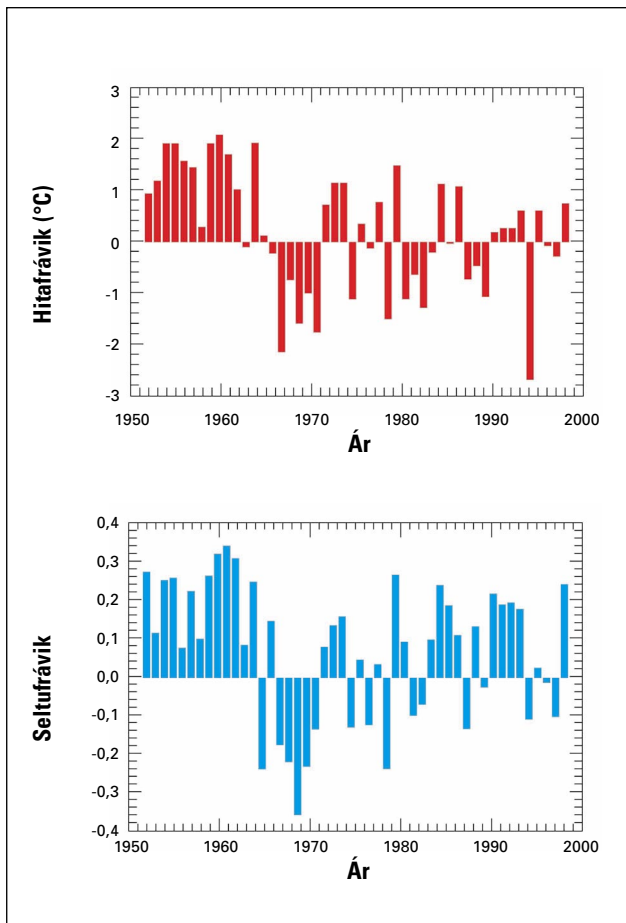
2.2. Náttúrulegar veðurfarsveiflur og ástand í hafinu við Ísland

Ísland er á mörkum hafstrauma úr norðri og suðri eins og sést á mynd 2.5. Sunnan úr hafi streymir að landinu hlýr og saltur Atlantssjór (hiti hærri en 5°C og selta meiri en 35).¹ Þessi sjór berst til norðurs vestan landsins og inn á norðurmið. Úr norðurhöfum streymir kaldur og seltulítt pólsjór í Austur-Græn-



Mynd 2.5 Yfirborðsstraumar í hafinu umhverfis Ísland. Rautt: Tiltölulega hlýr og saltur Atlantssjór. Blátt: Kaldur og seltulítt pólsjór. Grænt: Svalsjór. Gult: Strandsjór.

1 Selta er mæld í mælieiningu sem er nærri því að jafngilda g/kg.



Mynd 2.6 Hita- og seltufrávik í efstu 200 metrunum síðla vors árin 1952-1999 á sniði frá Siglunesi að 67°N.

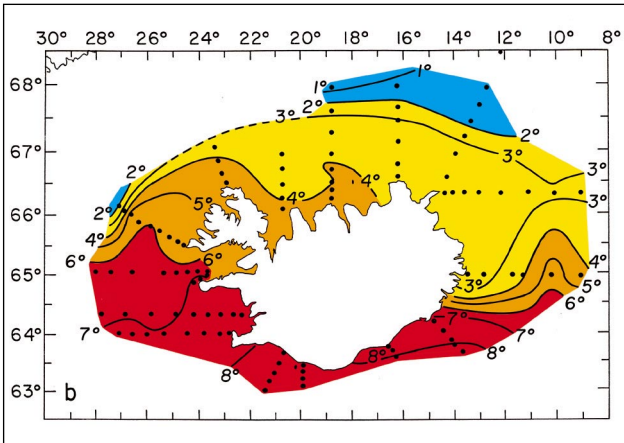
landsstraumnum (hiti frá -1,8 til 3°C á sumrin og selta minni en 34,3). Stundum berst pólsjór inn á norðvesturmið sérstaklega þegar suðvestlægir vindar eru langvarandi þar. Í Íslandshafi, milli Íslands og Jan Mayen, er svalsjór sem einnig er kaldur og saltari (selta á bilinu 34,5-34,8) en pólsjórinn sem stundum berst einnig þangað. Úr Íslandshafi streymir Austur-Íslandsstraumurinn með landgrunnsbrúninni suður með Austfjörðum og svo til austurs norðan Færeyja. Á grunnslóð við landið er strandsjór og strandstraumur. Helsta einkenni strandsjóvar er tiltölulega lítil selta vegna ferskvatnsrennslis af landi, enn fremur hitnar strandsjórinn meira á sumrin en sjór utar á landgrunninu.

Selta og hiti sjávar norður af landinu eru mjög breytileg eftir tíma og hafsvæðum. Þetta kemur mjög 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 hafa verið reiknuð fyrir hvert

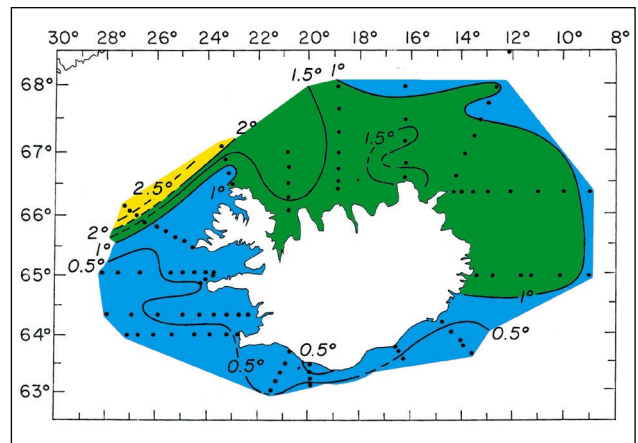
vor (mynd 2.6). Sveiflur í ástandi sjávar úti fyrir miðju Norðurlandi að vorlagi eru á myndinni sýndar sem frávik hita og seltu frá meðaltali árána 1961-1980. Á hafísárunum (1965-1971) var sjávarhiti lægri og selta minni en áður. Enn fremur virðist sem ástand sjávar hafi verið fremur óstöðugt eftir hafísárin. Árið 1979 var t.d. mjög kalt en árið eftir hlýtt og hagstætt. Flæði Atlantssjávar inn á norðurmið ber þangað varma og selturíkan sjó sem hefur áhrif á veðurfar á Norðurlandi. Jafnframt berast með straumnum næringsölt sem eru nauðsynleg svifþörungum. Aukin frumframleiðni þörungum fylgir því auknu flæði Atlantssjávar inn á norðurmið. Þessi áhrif koma einnig fram í ástandi loðnustofnsins gegnum stutta fæðukeðju: þörungar-áta-loðna (sjá nánar í 3. kafla).

Hafrannsóknastofnunin hefur mælt hita og seltu í yfirborði sjávar í grennd við Ísland fjórum sinnum á ári frá 1969. Á mynd 2.7 kemur fram að meðalhitinn að vorlagi er 4-5°C hærri út af Suðurlandi en undan Norðurlandi. Jafnframt eru nokkuð ljós tengslin við straumakerfið, einkum hlýja Atlantssjóinn sem teygir sig norður með Vestfjörðum og inn á norðurmið.

Ástand sjávar við landið er misjafnlega sveiflukennt. Af staðalfrávikum reiknaðs meðalhita má draga fram mynd af því hvar ástand við landið er tiltölulega stöðugt og hvar breytileikinn er meiri. Staðalfrávik reiknaðs meðalhita lýsir því hve mikið einstök mæld gildi, sem meðaltalið byggist á, eru frábrugðin meðaltalinu eins og sýnt er á mynd 2.8. Staðalfrávik meðalhita að vorlagi í yfirborði sjávar er mest í Grænlandssundi, eða meira en 2°C, sem kemur ekki á óvart því þar eru skörp skil milli kalda sjávarins í Austur-Grænlandstraumi og hlýja Atlantssjávarins sem streymir norður. Þessi skil hvika sífellt til í austur og vestur. Staðalfrávik er miklu minna (minna en 1°C) í Atlantssjónum við Suður- og Vesturland og djúpt út af Austur- og Norðausturlandi. Á öllu hafsvæðinu fyrir Norður- og Norðausturlandi er staðalfrávik tilfölslega hátt (1-2°C). Þetta er blöndunar- og átaksvæði milli hlýsjávar úr suðri og pólsjávar eða svalsjávar úr norðri eins og áður var rakið. Þar eru jafnframt uppeldisstöðvar margra mikilvægra fisktegunda. Þess má vænta að áhrif veðurfarsbreytinga á ástand sjávar hér við land verði mest á hafsvæðunum fyrir Norður- og Austurlandi þar sem náttúrulegar breytingar eru mestar en minni á öðrum svæðum þar sem ástand sjávar einkennist af stöðugleika. Mjög erfitt er hins vegar að segja fyrir um hvaða breytingar kunna að verða eins og áður hefur komið fram.



Mynd 2.7 Meðalhiti í yfirborði sjávar á tímabilinu 20. maí-10. júní árin 1969-1995.



Mynd 2.8 Staðalfrávik meðalhita í yfirborði sjávar á tímabilinu 20. maí-10. júní árin 1969-1995.

Samandregnar niðurstöður

1. Ísland er á mótum sjógerða sem berast að úr suðri og norðri og sveiflur í ástandi sjávar hafa verið miklar frá því að reglulegar mælingar hófust. Ekki er ástæða til annars en að telja sveiflurnar náttúruleg fyrirbrigði frekar en afleiðingar vaxandi gróðurhúsaáhrifa og hlýnunar vegna þeirra.
2. Líklegt er að vaxandi gróðurhúsaáhrif muni leiða til breytinga á aðstreymi sjávar úr norðri og suðri til hafsvæðanna í grennd við Ísland og að þeirra verði einkum vart á átakasvæði milli þessara strauma út af Norður- og Norðausturlandi.
3. Almennt má segja að aukin norðlæg áhrif leiði til minni frjósemi hafsvæðisins norður af landinu en aukin suðræn áhrif til meiri frjósemi.

2.3. Hækkun sjávarborðs og ágangur sjávar

Samskipti lands og sjávar eru flókin og breytingar örur, kyrrstaða er ekki til. Land rís og sígur og strönd gengur fram eða hopar. Það, sem hefur einkennt samspil lands og sjávar á jörðinni á þessari öld, er að yfirborð heimshafanna hefur verið að hækka. Þetta sýna mælingar á sjávarborði og hefur hækkunin á tuttugustu öld mælst frá 1,0-2,5 mm á ári, að meðaltali um 1,8 mm á ári. Þessa hækkun má aðallega rekja til þenslu sjávar með vaxandi sjávarhita og að hluta til bráðnunar jökla og íss. Þegar sjávarborð hækkar hopar sandströnd. Álag á strendur eykst stöðugt. Talið er að árið 1990 hafi 60% íbúa jarðar búið innan við 60 km frá strönd og að um 75% íbúa komi til með að búa á þessu svæði eftir 15-20 ár. Gífurlegt landbrot á sér stað við sandstrendur þar sem sandurinn myndar jafnan botnhalla langt út á landgrunnið. Við þessi skilyrði ganga sjávarflóð lengst á land. Að-

dýpi við ströndina hér á landi er yfirleitt svo mikið að hækkun flóðöldu af þessum sökum er takmörkuð en þessi skilyrði eru helst til staðar innst í fjörðum þar sem úthafsalda er lág. Flóðahætta er háð landhæð og landslagi en ekki síður sjávarföllum og sjólagi. Landbrot fer eftir sjávargangi og einnig jarðfræði og uppbyggingu jarðlaga á ströndinni, t.d. hvort þar er klöpp, stórgryti, mól, sandur eða moldarjarðvegur. Á Íslandi er fremur lítið um langar og samfelldar sandstrendur nema við suðurströndina og við strendur eru víða hraun eða klettur og landeyðing því hæð.

Um 74% landsmanna búa á strandsvæðum suðvesturhluta landsins, frá Vík í Mýrdal að Snæfellsnesi. Þar eru lágsvæði víða með ströndinni, sums staðar nokkuð langt inn í land. Jarðgrunnur undir þessari strandlengju er víðast hvar klöpp og addýpi mikið en sandur á stöku stað við ströndina. Á þessu svæði er munur flóðs og fjöru mestur á landinu (3-4 metrar). Utan þessa svæðis búa um 18% landsmanna á strandsvæðum. Þar tengist flóðahætta einkum kröppum lægðum sem valda vestanátt fyrir Vesturlandi og Vestfjörðum og djúpum lægðum og norðanáhlapi fyrir Norðurlandi. Sjávarfallamunur fyrir norðan og austan er mun minni (1,5-2 metrar) en á Suðvesturlandi.

Niðurstöður öldumælinga á Atlantshafi benda til þess að hæstu öldur hækki eftir því sem norðar dregur allt að 65° breiddargráðu. Mesta hækkun sjávarborðs við ströndina verður þegar djúpar lægðir koma upp að landinu samfara miklu brimi. Lágur loftþrýstingur veldur hækkun sjávarstöðu. Við hvert hPa, sem loftvog fellur niður fyrir meðalloftvægi, hækkar sjávarstaðan að jafnaði um 1 cm. Vindur, sem blæs af hafi, veldur hækkun sjávarborðs við strönd-

ina. Brim veldur síðan einnig hækkun sjávarborðs innan brimgarðsins. Mesta hætta á ágangi sjávar er þegar þessar aðstæður fara saman við stórstraumsflóð. Í aftakabrimi hækka þannig sjávarstaðan innan brimgarðsins mest og ná þá hærri öldur lengra á land áður en þær brotna. Í aftakaveðri getur sjávarborð hækkað um 40 til 80 cm vegna lækkunar á loftþrýstingi, um 20 til 40 cm vegna áhlaðanda vindsins og um 50 til 200 cm vegna grunnbrota. Þetta er hins vegar háð aðstæðum á hverjum stað.

Mælingar á sjávarborði hafa farið fram í Reykjavík-urhöfn síðan 1956. Samkvæmt þeim hækkaði sjávarborð á árunum 1956 til 1989 um 3,4 mm á ári í grennd við Reykjavík. Þar af nemur hækkun vegna áhrifa frá langtímasveiflum af stjarnfræðilegum toga um 1,0 mm á ári. Frávik einstakra ársmeðaltala getur verið allt að 11 mm og mesta ársfrávik á þessu tímabili er um 14 mm. Sjávarstaða ræðst einnig að hluta til af landrasi eða landsigi sem er mismunandi eftir landshlutum. Nýlega hófust mælingar á slíkum hreyfingum jarðskorpunnar á nokkrum stöðum á landinu. Þær takmörkuðu mælingar, sem til eru, benda til þess að nauðsynlegt sé að fylgjast náið með breytingum á sjávarborði og á landhæð hér á landi á næstu árum og áratugum.

Eins og fram kemur í samantekt IPCC um eðli og umfang veðurfarsbreytinga (sjá 1. kafla) er gert ráð fyrir að sjávarborð heimshafanna haldi áfram að hækka á næstu öldum. Miðað við „besta mat“ á ýmsum óvissuþáttum og sviðsmynd IS92a er áætlað að sjávarborð hækki um 50 cm fram að árinu 2100. Áætlað er að hækkunin nemi 21 cm á árunum 1990 til 2050 (3,5 mm á ári) og 29 cm á árunum 2050 til 2100 (5,8 mm á ári). Ekkert bendir til þess að hækkun sjávarborðs verði önnur hér við land en annars staðar.

Samandregnar niðurstöður

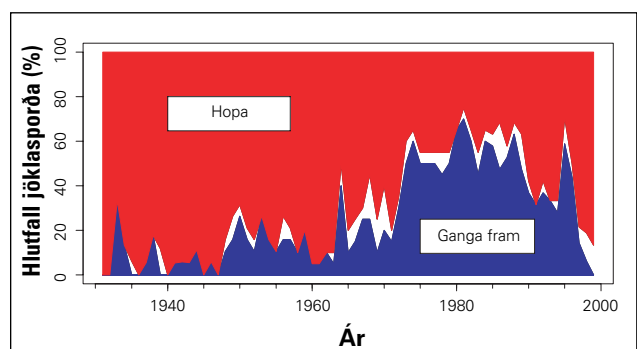
1. Niðurstöður langtímamælinga sýna að sjávarborð í Reykjavík hefur hækkað um 2,4 mm á ári að jafnaði á síðustu áratugum. Þessi breyting stafar ekki eingöngu af breytingum á meðalsjávarborði Norður-Atlantshafs í grennd við landið vegna þess að landris eða landsig kunna einnig að hafa haft áhrif á sjávarborð í Reykjavík á þessu tímabili.
2. Ef sjávarborð hér við land hækka jafnmikið og að meðaltali á jörðinni má gera ráð fyrir hækkunin geti numið um 50 cm til ársins 2100. Sjávarborð mun jafnframt breytast í framtíðinni af völdum

lóðréttra jarðskorpuhreyfinga sem eru mismunandi eftir landsvæðum.

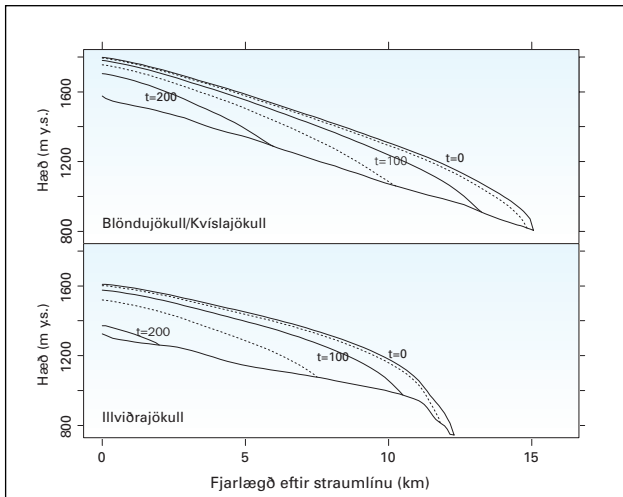
2.4. Vatnafar og jöklar

Áhrif loftslagsbreytinga á vatnafar geta annars vegar komið fram í breytingum á meðalafrennsli, t.d. vegna breytinga í úrkomu eða leysingar jökla, og hins vegar í breyttri árstíðasveiflu og flóðaháttum, t.d. meiri flóðum að haustlagi vegna ákafari úrkomu eða minni vorflóðum vegna minni vorleysinga. Að öðru jöfnu er talið að úrkoma aukist með hækkandi hita. Það stafar af því að hlýtt loft getur innihaldið miklu meiri vatnsgufu en kalt. Annars staðar á Norðurlöndum eru breytingar í uppgufun af völdum hlýnandi veðurs einnig mikilvægur þáttur í sambandi við gróðurhúsaáhrif og vatnafar. Áhrif breytinga í uppgufun skipta hins vegar ekki miklu máli fyrir flest vatnasvið á Íslandi samanborið við ætluð áhrif breytinga í úrkomu og jöklaleytingu.

Á Íslandi skipta jöklabreytingar einna mestu máli fyrir breytingar á vatnafari af völdum vaxandi gróðurhúsaáhrifa. Þó svo ætla megi að meiri úrkoma auki ákomu á jöklana að vetrarlagi er talið að hlýnunin af völdum vaxandi gróðurhúsaáhrifa vegi þyngra og leiði til þess að jöklar minnki og rennsli jökuláa vaxi af þeim sökum. Reyndar er talið að hlýnunin kunni að leiða til þess að mikill hluti jökla utan heimskautsvæða hverfi að mestu á næstu 100-200 árum. Jöklar á Íslandi hafa tekið miklum breytingum af völdum loftslagsbreytinga á þessari öld eins og fram kemur á mynd 2.9. Þeir hopuðu flestir hratt á hlýju árunum eftir 1930 en þá hófust reglulegar mælingar á jökulsporðum hér á landi. Í kjölfar kaldari ára eftir 1960 fóru margir þeirra hins vegar að ganga fram. Á síð-



Mynd 2.9 Árlagt blutfall íslenskra jökla sem gengu fram og hopuðu á árunum 1931 til 1999. Aðeins eru taldir með jöklar sem ekki eru framblaupsjöklar. Myndin sýnir gögn frá 10-20 jöklum fyrir flest árin. Gögn frá Jöklarannsóknafélagi Íslands og Oddi Sigurðssyni, Orkustofnun.

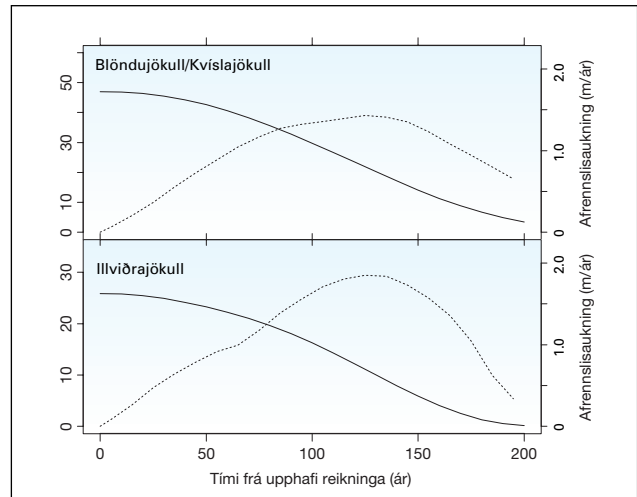


Mynd 2.10 Reiknuð áhrif loftslagsbreytinga á tvo skriðjökla í norðanverðum Hofsjökli skv. ákveðinni sviðsmýnd af breytingum í hita og úrkomu. Úr grein í *Journal of Glaciology*, 43 (144), 1997.

ustu árum hafa þeir aftur farið að hopa. Á mynd 2.10 eru sýnd reiknuð viðbrögð tveggja skriðjökla í norðanverðum Hofsjökli við loftslagssviðsmýndinni á mynd 2.2. Sjá má að jöklarnir hverfa að mestu á 200 árum. Á mynd 2.11 er sýnt hvernig vaxandi leysing eykur afrennsli vatnsfalla frá Hofsjökli. Afrennsli frá jöklinum vex alla næstu öld eftir því sem hlýnar en minnkar eftir það vegna þess að þá hefur flatarmál jökulsins minnkað svo mikið að það dregur úr heildarleysingu. Eftir 30 ár hefur afrennsli frá jöklinum vaxið um u.þ.b. 25% frá því sem nú er og um hátt í 75% þegar afrennslið er í hámarkinu eftir 100 til 150 ár. Meðalrennsli margra vatnsfalla hér á landi, þar sem áhrifa jökla gætir, getur samkvæmt reikningum af þessum toga aukist um 5-20% á næstu 30 árum vegna meiri jöklaleysingar og enn meira eftir það.² Rennsli annarra vatnsfalla, þar sem jöklar hafa ekki áhrif, kann hins vegar að aukast um nokkra hundradshluta á sama tímabili vegna aukinnar úrkomu.

Samandregnar niðurstöður

1. Rennsli vatnsfalla hér á landi eykst að öllum líkindum vegna aukinnar úrkomu og meiri jöklaleysingar. Mestra breytinga er að vænta í jökulám.
2. Meðalrennsli í mörgum ám kann að vaxa um 5-20% á næstu 30 árum.
3. Árstíðasveifla rennslis og flóð í ám breytast.
4. Jöklar hopa. Talið er að mikill hluti jökla utan heimskautasvæða hverfi að mestu á 100-200 árum.



Mynd 2.11 Reiknuð áhrif loftslagsbreytinga á jökulafrennsli frá Hofsjökli. Úr grein í *Journal of Glaciology*, 43 (144), 1997.

2.5. Náttúruvá

Óbein áhrif vaxandi gróðurhúsaáhrifa á snjóflóð, illviðri og jökulhlaup eru hugsanleg. Ekki er ósennilegt að með hlýnandi veðurfari dragi úr tíðni snjóflóða þó ekki sé beint samband milli meðalhita og snjóflóðahættu. Nefna má að tjón og slys af snjóflóðum virðast hafa verið minni hér á landi á hlýjasta hluta aldarinnar milli 1930 og 1960 en fyrir og eftir þetta tímabil. Hins vegar geta orðið alvarleg snjóflóð hér á landi óháð meðalhita ársins og má þar nefna að árið 1995, sem var mannskæðasta snjóflóðaár Íslandssögunnar, er ekki meðal 10 köldustu ára aldarinnar. Einnig má nefna að veturinn 1998/1999 var verstí snjóflóðavetur í Ölpunum síðan 1951 þrátt fyrir hlýnandi veðurfar þar í meira en tvo áratugi. Þannig eru ekki forsendur til að ætla að hlýnandi veðurfar hafi úrslitaáhrif á snjóflóðahættu hér á landi í framtíðinni.

Spurningar hafa komið upp varðandi breytingar á illviðratíðni af völdum vaxandi gróðurhúsaáhrifa en þar á svipað við og um snjóflóðahættuna að ekki eru forsendur til ályktana um það efni.

Jökulhlaup verða af völdum eldgosa undir jöklum og úr jökulstífluðum lönnum við jökuljaðra og undir jöklum. Miklar breytingar á þykkt og útbreiðslu jökla geta þannig augljóslega haft áhrif á jökulhlaup. Um þetta eru reyndar dæmi frá fyrri tíð en jökulhlaup undan Heinabergsjökli í Austur-Skaftafellssýslu

² Hlutfallsleg aukning í rennsli ána er minni en í afrennsli frá jöklinum vegna þess að jökulþáttur er einungis hluti af rennsli flestra vatnsfalla.

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. Vætanlega þarf að bíða langt fram á 21. öld eftir því að rýrnun Vatnajökuls og Mýrdalsjökuls af völdum vaxandi gróðurhúsaáhrifa verði svo mikil að verulegu máli skipti fyrir Grímsvatna- og Kötluhlaup. Hlaup úr ýmsum jaðarlónum geta hins vegar breyst vegna jöklabreytinga í náninni framtíð eins og

þau hafa reyndar gert á undanförunum öldum og áratugum. Slíkar breytingar munu hins vegar tæpast skipta miklu máli fyrir íslenskt samfélag þó þær kunni að verða áhugaverðar frá vísindalegum sjónarhóli.

Samandregnar niðurstöður

1. Ekki er að vænta grundvallarbreytinga á snjóflóðum, illviðratíðni eða jökulhlaupum hér á landi á næstu áratugum af völdum vaxandi gróðurhúsaáhrifa.

3. kafli

Áhrif veðurfarsbreytinga á lífríkið

3.1. Áhrif veðurfarsbreytinga á lífríki hafsins

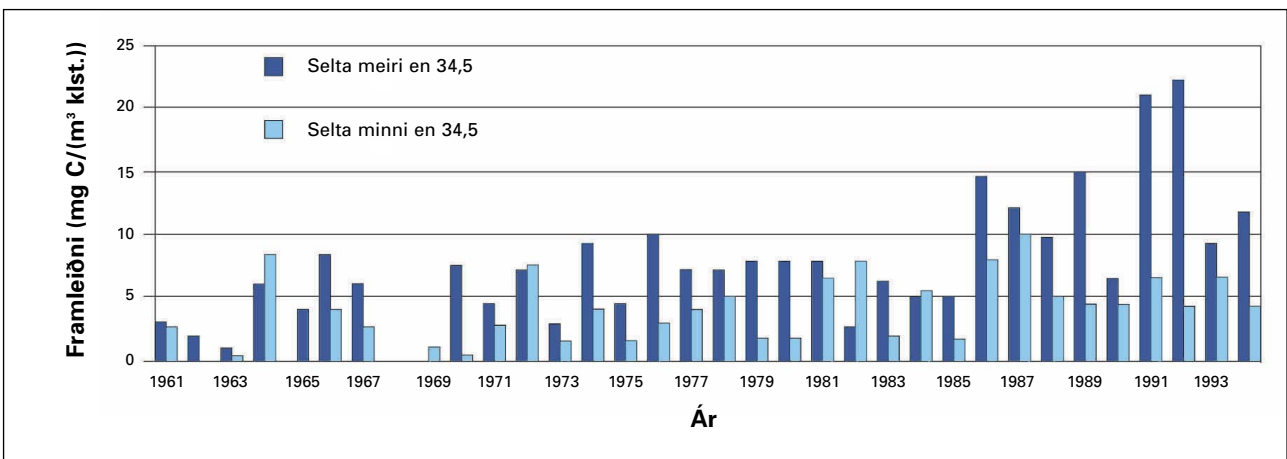
Sjávarhiti hefur stöðug og mikil áhrif á alla þætti lífvera og vistkerfis sjávar. Hann hefur til dæmis áhrif á útbreiðslu, hrygningu, atferli og afkomu lífvera svo og á fæðunám, bruna og vöxt.

Snemma á 20. öldinni urðu breytingar í sjávardýrafánunni við landið sem tengdust þeirri hlýnun sem varð í Norður-Atlantshafi upp úr 1920. Árni Friðriksson lýsti þeim breytingum og hvernig útbreiðslu- svæði og hrygningar- og fæðuslóð suðlægra tegunda hafði stækkað og færst norður á bóginn með auknum hlýindum. Þannig urðu margar suðlægar tegundir algengari og hrygningar þorsks, sem fram að 1920 var nánast einskorðuð við suðurströndina, varð vart allt í kringum landið. Enn fremur sýndu merkingar að þorskur, sem óx upp í kalda sjónum fyrir Norður- og Austurlandi, hafði vaxið mun hægar en sá fiskur sem dvaldi í hinum tiltölulega hlýja sjó fyrir suðurströndinni. Á hinn bóginn hafði hlýnunin þau áhrif að loðnan, sem er kaldsjávarfiskur, hætti hrygningargöngum sínum í hlýsjóinn fyrir sunnan land og hrygndi einungis fyrir norðan og austan land. Á kuldaárunum eftir 1965 breyttust göngur loðnunnar aftur og hún hóf á ný að hrygna við suðurströndina.

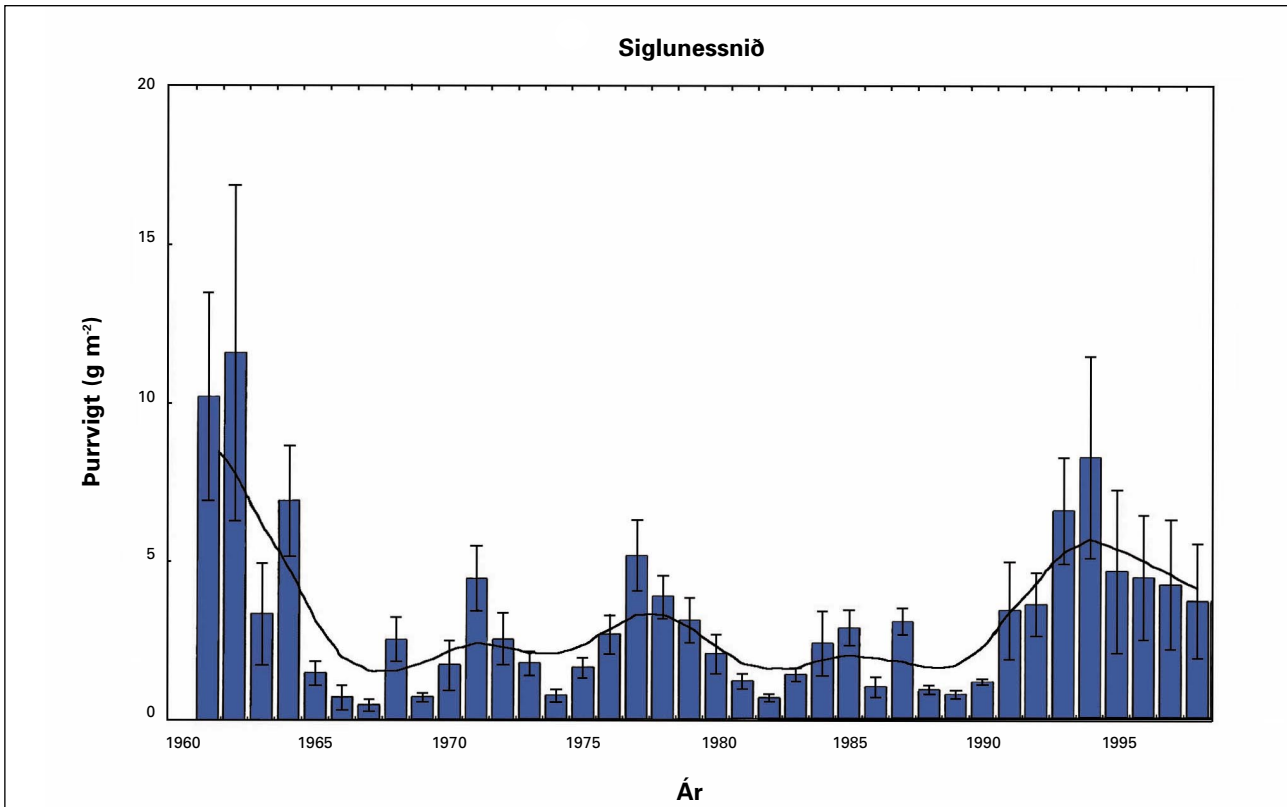
Hiti og selta sjávar hafa ekki einungis bein áhrif á lífverurnar. Í yfirborðslögum sjávar fer fram ljóstíllífur þörunga og við hana myndast þau lífrænu efni sem dýr þurfa til þess að geta vaxið og dafnað. Hiti og selta hafa áhrif á eðlisþyngd sjávar sem aftur hefur mikil áhrif á getu þörunga til þess að halda sér í birtu- og næringaríkum yfirborðslögum sjávar. Áhrif veðurfars á hita og seltu í sjónum, eða svokallað ástand sjávar, ræður því miklu um framvindu gróðurs og vaxtarskilyrði fyrir dýrin í sjónum, þar með talið nytjastofnana.

Um árabil hafa farið fram mælingar á vegum Haf-rannsóknastofnunarinnar á frumframleiðni (lífrænni bindingu kolefnis) í sjó að vorlagi og þar hefur aflag völdtak vitneskja um hvernig breytilegt ástand sjávar hefur áhrif á frumframleiðnina. Úti fyrir Norðurlandi benda niðurstöður til allt að tvisvar sinnum meiri ársframleiðni þörunga þegar þar ríkir hlýr Atlantssjór heldur en þegar þar er að finna kaldan pólsjó (mynd 3.1). Svipaða sögu er að segja um lífmassa dýrasvifs, meðalátumagn að vori í hlýju árferði er um helmingi meira en í köldu árferði (mynd 3.2).

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 orsakasam-

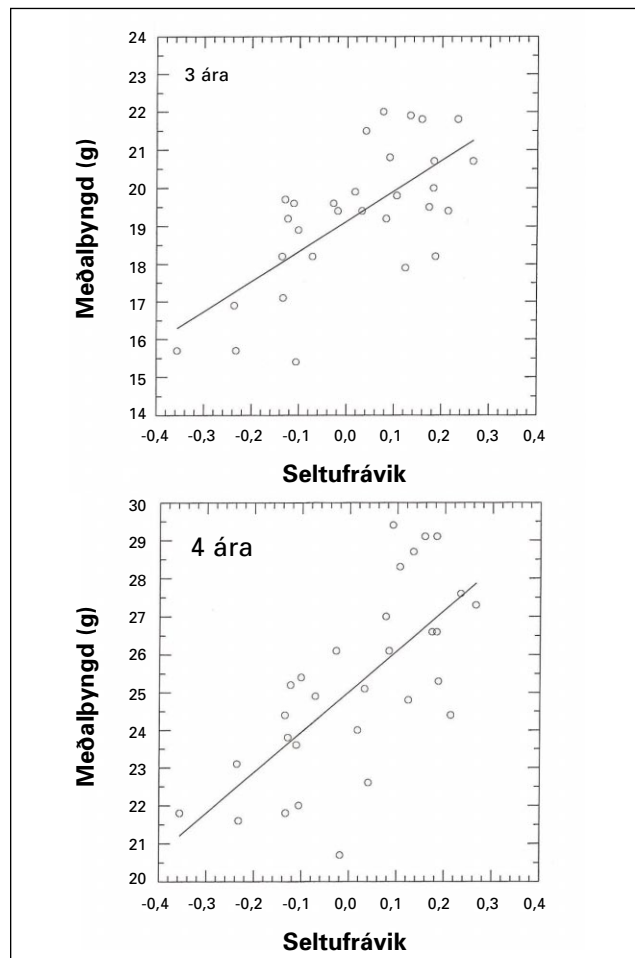


Mynd 3.1 Meðalfrumframleiðni ($\text{mg C}/(\text{m}^3 \text{klst.})$) við mismunandi seltu á landgrunninu norðaustanlands að vorlagi. Lítil selta endurspeglar yfirleitt kaldan sjó en mikil selta hlýjan sjó. Framleiðni er yfirleitt hærrí í selturíkum og hlýjum sjó.

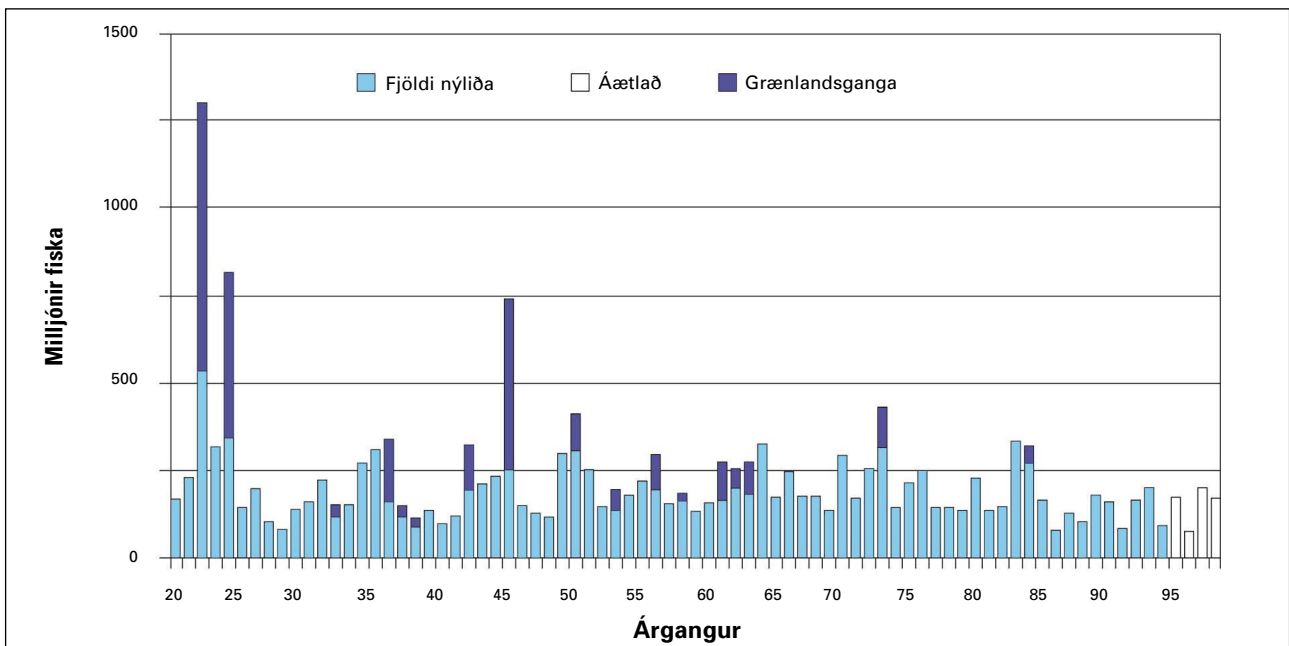


Mynd 3.2 Breytingar í átumagni (g þurrvigt/m²) að vetrarlagi á Siglunessniði. Súlnurnar sýna meðaltöl allra stöðva á sniðinu. Staðalskekkja er sýnd með lóðréttum strikum. Einnig er sýndur reiknaður ferill (7 ára keðjuméðaltöl) sem jafnar mikla óreglu einstakra ára (heildregin lína). Átummagn fyrir norðan land minnkaði mjög á köldu árunum á síðari hluta sjöunda áratugarins en síðan hafa skipst á hæðir og lögðir með um 7-10 ára millibil. Þegar reiknað er út meðalátummagn fyrir hlý ár og köld kemur í ljós að lífmassi átu er mun meiri á hlýjum árum en köldum.

hengið þetta: Hlýr Atlantssjór ber með sér næringarefni norður fyrir land og því veldur aukið innstreymi 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 að þar verður minni blöndun og því minna magn næringarefna í yfirborðslögum. Takmarkað magn næringarefna leiðir svo til minni frumframleiðni þörunga sem aftur hefur í för með sér minni fæðu fyrir dýrasvífið 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 Atlantssjávar á norðurmíð hafi þær afleiðingar að þangað berist minna af átu frá hafsvæðinu sunnan- og vestanlands. Beint eða óbeint er því líklegt að ástand sjávar á norðurmíðum ráði að verulegu leyti dýrasvífsmagni og afkomumöguleikum seiða og ungfisks



Mynd 3.3 Meðalþyngd þriggja og fjögurra ára loðnu að vetrarlagi er breytileg en tengist allnáúð seltufrávikum á Siglunessniði eins og þau mældust vorið á undan.



Mynd 3.4 Stærð þorskárganganna 1920-1998. Fjöldi við þriggja ára aldur í milljónum. Grænlandsgöngur voru mun algengari á hlýskeiðinu frá um 1920 og fram á miðjan sjöunda áratuginn en þrjá síðustu áratugi.

og uppsjávarfiska á uppeldisslóð fiskistofna norðanlands. Þetta kemur fram í ástandi loðnustofnsins gegnum stutta fæðukeðju: þörungar-áta-loðna. Meðalþyngd þriggja og fjögurra ára loðnu að vetrarlagi er breytileg en tengist allnáið seltufrávikum á Siglu-nessniði eins og þau mældust vorið á undan (mynd 3.3).

Öfugt við það, sem er á norðurmiðum og fyrir austan land, eru áhrif hlýs Golfstraumsins nokkuð stöðug um landið sunnan- og vestanvert. Engu að síður eru 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.

Sviptingar í ástandi sjávar og í lægstu þrepum fæðukeðjunnar í sjónum hafa sagt til sín í vexti og viðgangi nytjastofna og þar með komið við efnahag okkar Íslendinga. Þannig er talið að lítil frumframleiðni og síðan hrunið í átu fyrir norðan land í lok sjöunda áratugarins hafi átt sinn þátt í breyttum göngum og seinna hruni norsk-íslenska síldarstofnsins er hann gekk á norðurmið í ætisleit. Frekari vísendingar um náin tengsl dýrasvifs og nytjastofna fyrir norðan land koma í ljós þegar bornar eru saman breytingar á magni þess og stofnstærð loðnunnar. Skömmu eftir að síldarstofninn hrundi hófust veiðar á loðnu sem, eins og síldin, er uppsjávarfiskur og lifir nær eingöngu á dýrasvifi. Nær ekkert var vitað um

sveiflur í loðnustofninum áður en veiðar úr honum hófust en síðan höfum við orðið vitni að miklum og stundum skyndilegum breytingum á stofnstærðinni. Án efa eru þær að einhverju leyti tengdar veiðunum en eins og nefnt var hér að framan er líklegt að umhverfis- og átuskiyrði eigi einnig mikinn þátt í breytilegri nýliðun loðnunnar frá ári til árs.

Líkt og við Ísland urðu miklar breytingar á útbreiðslu þorsks við Grænland í upphafi 20. aldar. Þorskstofninn við Grænland er að verulegu leyti kominn til vegna lirlfureks frá Íslandi og með þeirri hlýnun, sem varð upp úr 1920, er talið að þetta rek hafi aukist verulega. Um aldamótin 1900 var þorskur sjaldséður við Grænland en upp úr 1920 var hann orðinn algengur bæði við Vestur- og Austur-Grænland. Rek þorsklirfa frá hrygningarstöðvum við Ísland til Grænlands stækkar uppeldissvæði þorsks af íslenskum uppruna. Þess vegna hafa veðurfar og fiskveiðar við Grænland áhrif á ástand þorskstofnsins við Ísland. Lirlfurek frá Íslandi til Grænlands og síðan göngur þess fisks á Íslandsmið við kynþroska er ásamt almennri hlýnun í Norður-Atlantshafi upp úr 1920 talið hafa skipt miklu varðandi stækkun íslenska þorskstofnsins á þriðja áratugnum. Göngur frá Grænlandi voru mun algengari á árunum fyrir 1970 en undanfarna áratugi þegar Grænlandsgöngur hafa einungis átt sér stað tvisvar, þ.e. árin 1980-1981 og 1990 er árgangur frá 1973 og 1984 gengu á Íslandsmið (mynd 3.4). Ástæða þessa er að hluta til lakara ástand íslenska þorskstofnsins á síðustu ára-

tugum og því minna lírfurek til Grænlands en þó ekki síður kólnun við Grænland sem varð upp úr miðjum sjöunda áratugnum. Bent hefur verið á að minna rek á þorsklirfum til Grænlands hin síðari ár kunni að tengjast breytingum í straumakerfinu fyrir vestan Ísland og í Irmingerhafi milli Íslands og Grænlands.

Af framansögðu má ljóst vera að veðurfarsbreytingar geta haft mikil áhrif á lífríki sjávar á Íslandsmiðum. Hver þau áhrif kunna hins vegar að verða er mjög erfitt að meta eða spá fyrir um. Það mun meðal annars ráðast af því hvernig straumakerfi, blöndunarferlar og skil milli heitra og kaldra strauma bregðast við veðurfarsbreytingum. 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 langgjöfulasti botnfiskstofninn á Íslandsmiðum, bæði að magni til og að 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 þrengjast um loðnustofn 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 kólnun á Íslandsmiðum frá því, sem við þekkjum á þessari öld, myndi hins vegar einskorða meginhrygningarsvæðin við suðurströndina og jafnframt loka fyrir mikilvægustu hrygningar- og uppeldisstöðvar á norðurmiðum. Það gæti leitt til uppgangs í rækjustofni og loðnustofni með óþekktum möguleikum þorsks á að nýta sér slíkar aðstæður.

Samandregnar niðurstöður

1. Á síðustu öld hafa sveiflur í sjávarhita og sjógerð sýnt mikil áhrif umhverfisþátta á plöntuframleiðslu, afrakstur og lífsskilyrði nytjastofna við Ísland.
2. Í ljósi þessa virðast áhrif hlýnunar sjávar og aukins flæðis næringarríks hlýsjávar norður fyrir land á uppeldisslóð margra fiskistofna leiða til aukins afraksturs þorskstofnsins og ef til vill fleiri botnfisktegunda. Hið sama á við um uppsjávarfiska, svo sem síld. Aðgengi þorsks að loðnu og rækju kynni hins vegar að versna nokkuð vegna breyttrar útbreiðslu og minni stofnstærðar þessara fæðudýra.
3. Veruleg kólnun í sjónum við Ísland gæti takmarkað stærð nytjastofnanna og útbreiðslusvæði þeirra.

3.2. Áhrif veðurfarsbreytinga á gróðurfar og landbúnað

Veðurfarsþættir hafa mikil áhrif á gróðurfar og lífskilyrði plantna. Þar skipta mestu hiti, úrkoma og vindafar. Hiti á vaxartíma hefur bein áhrif á vöxt plantna og óbein áhrif á framboð næringarefna vegna áhrifa á hringrás næringarefna í jarðvegi. Hiti utan vaxtartímans hefur umtalsverð óbein áhrif á vöxt vegna áhrifa á upphaf vaxtartíma og leysanleika næringarforða í jarðvegi.

Úrkoma hefur umtalsverð áhrif á vaxtarskilyrði, einkum á þeim svæðum þar sem jarðvegur er grunnur og sandborinn og vatnsheldni lítil. Vatnsmiðlun jarðvegsins er þá takmörkuð við örfáa daga. Svo er ástatt á stórum svæðum hér á landi, m.a. á miðhálandinu. Víða er úrkoma yfir vaxtartímann svo lítil að viðkomandi svæði eru þurrkasvæði, t.d. norðan Vatnajökuls.

Vindur hefur mikil áhrif á gróðurfar. Þau áhrif eru margþætt. Vindur hefur bein áhrif á vöxt plantna yfir vaxtartímann. Vindur getur enn fremur verkað óbeint á gróðurfar með áhrifum á snjóalög og jarðvegseyðingu. Gróður hefur aftur umtalsverð áhrif á vindhraða við yfirborð. Tré og runnar draga úr vindhraða og bæta þannig staðbundin gróðurskilyrði fyrir annan gróður.

Eins og þegar hefur komið fram er breytileiki í veðurfari hér á landi tiltölulega mikill miðað við önnur strand- og hafsvæði. Það leiðir til þess að töluverð reynsla hefur fengist af samspili veðurfarsþátta og uppskeru nytjaplantna. Rannsóknir á vegum Rannsóknastofnunar landbúnaðarins hafa leitt í ljós að hefyngur eykst að meðaltali um rúmlega 500 kg þurrefnis á hektara við hverja gráðu í meðalhita síðustu tólf mánaða fyrir slátt, eða um rúmlega 11%. Þessi áhrif eru meiri á kaldari svæðum landsins.

Vetrarhitinn hefur mikil áhrif á sprettu sumarið á eftir. Þetta gerir mögulegt að spá fyrir með töluverðri vissu að vori um uppskeru sumarsins. Á grundvelli þeirra upplýsinga geta bændur stillt af áburðargjöf til að veða á móti árssveiflu í uppskeru. Með þessari vitneskju og nýrri tækni við heyverkun, sem dregur úr áhrifum veðráttu á heygæði, hafa íslenskir bændur dregið úr beinum áhrifum veðurfars á hefyng. Samdráttur í sauðfjárframleiðslu hefur einnig dregið úr heypörf.

Kornrækt hefur færst í vöxt hér á landi meðal annars með tilkomu nýrra byggafbrigða. Hún hefur reynst hagkvæmur kostur á mörgum svæðum þótt Ísland sé á mörkum þess svæðis þar sem stunda má byggrækt með öryggi. Kornrækt er því sú grein jarðræktar sem væntanlega verður fyrir mestum áhrifum af breytingum á veðurfari. Kornþroski ræðst af samanlögðum hita yfir frostmarki á vaxtartíma sem nefnist gráðudagar. Nýtanlegt korn fæst eftir 1.110 gráðudaga, gullþroska eftir 1.230 gráðudaga og fullþroskað eftir u.þ.b. 1.350 gráðudaga. Vorkoman ræður mun meiru um þroskann en veðurfar að hausti.

Miðað við fjögurra mánaða vaxtartíma eykst kornuppskeru um 1 tonn þurrefnis á hektara við hverja gráðu sem meðalhiti hækkar. Þetta er um helmingi meira en bætist við heyuppskeru við hverja gráðu.

Vetrarhitinn hefur einnig mikil áhrif á kornuppskeru einkum vegna áhrifa á fyrsta mögulega sáningartíma. Miklum upplýsingum hefur verið safnað um vor-

komu á veðurathuganastöðvum á landinu. Greining á þessum gögnum bendir til þess að fyrir hverja gráðu, sem vetrarhitinn (nóvember-febrúar) hækkar, færast vorkoman fram um tvo daga meðan sama hækkun á vorhita (mars-apríl) flýtir vorkomunni um 6 daga að meðaltali á öllum athuganastöðvum. Þessi áhrif vorhitans eru meiri þar sem meðalhitinn er hærri.

Hiti er takmarkandi fyrir trjávöxt hér á landi. Það má því gera ráð fyrir að hlýnandi veðurfar leiði til aukins trjávaxtar þegar til lengri tíma er litið. Miklu skiptir hvenær á árinu hlýnunar gætir mest. Vetrarhlýindi geta til dæmis haft neikvæð áhrif á harðgerð kvæmi. Tré, sem aðlöguð eru meginlandsloftslagi, munu sýna mest viðbrögð við hækkun sumarhita, einkum ef mjög hlýjum dögum fjölga.

Hlýnandi veðurfar getur leitt til þess að plöntusjúkdómar og skaðvaldar í skógi verði meira vandamál. Dæmi um skaðvalda í skógi er sitkalús. Síðan hún kom til landsins hafa orðið sex stórir og tveir staðbundnir sitkalúsafaraldrar. Sitkalús leggst ekki í dvala yfir veturinn enda mjög frostþolin. Tilraunir á Rannsóknastöð Skógræktar ríkisins að Mógilsá hafa sýnt að 13-15 stiga frost þarf til þess að slá verulega á lúsinu. Sitkalúsafaraldrar eru því eingöngu eftir milda vetur. Það má því gera ráð fyrir að hún verði erfiðari í framtíðinni ef vetur verða mildari.

Plöntusjúkdómar eru margir tengdir veðurfari. Hlý og rök veðurskilyrði henta t.d. kartöflumyglunni. Slík skilyrði eru til staðar á Suðurlandi en sjaldan á Norðurlandi. Þegar myglan var sem útbreiddust hér á landi, á hlýindaskeiðinu 1925-1965, náði hún frá Snæfellsnesi suður og austur um til Reyðarfjarðar. Þótt sést hafi til myglunnar á Norðurlandi hefur hún aldrei valdið þar tjóni. Skýringin á því, hvers vegna myglan hvarf upp úr 1960, er að öllum líkindum kólnandi veðurfar. Það er þrennt sem þarf til að myglufaraldur verði: Myglusmit, veðurfar, sem magnar upp smitið, og kartöfluafríðni sem eru næm fyrir myglunni. Skortur á smiti virðist nokkrum sinnum hafa komið í veg fyrir myglufaraldur hér á landi þó veðurskilyrði hafi verið fyrir hendi. Rannsóknastofnun landbúnaðarins gefur nú út mygluspár á grundvelli veðurmælinga Veðurstofu Íslands í Þykkvabæ. Slík spá nýtist bændum við mat á nauðsyn úðunar.

Samandregnar niðurstöður

1. Áhrif hlýnandi veðurfars munu koma skýrar fram í magni og gæðum kornuppskeru en í hefyng.

2. Hlýnandi veðurfar getur leitt til þess að plöntu-
sjúkdómar og skaðvaldar í skógi verði vaxandi
vandamál.
3. Breytingar á úrkomu, vindafari og vetrarhita geta
haft umtalsverð áhrif á skilyrði til skógræktar hér
á landi.

4. kafli

Áhrif á þjóðfélag og heilsufar

Áhrif loftslagsbreytinga á þjóðfélagið

Erfitt er að meta þjóðfélagsleg áhrif veðurfarsbreytinga af mannavöldum. Bæði er umfang væntanlegra veðurfarsbreytinga óvissu og auk þess takast á jákvæð og neikvæð áhrif í mörgum tilvikum. Hér á landi getur hlýnun til dæmis aukið afrakstur gróðurlendis og þar með styrkt landbúnað. Hlýnun sjávar getur aukið fæðuframboð í hafinu og hugsanlega styrkt fiskistofna. Á hinn bóginn getur breytt skordýrafána valdið búsifjum í landbúnaði og haft neikvæð áhrif á heilsufar þjóðarinnar. Sá möguleiki er fyrir hendi að veðurfarsbreytingar leiði til breytinga á hafstraumum og þar með gengd fiskistofna sem – ef allt færi á allra versta veg – gæti grafið undan efnahag þjóðarinnar. Flestar spár um áhrif loftslagsbreytinga á lífsskilyrði þjóða gera þó heldur meira úr hlut neikvæðra áhrifa þegar á heildina er litið.

Í skýrslu IPCC, sem hér er höfð til hliðsjónar, eru leiddar líkur að ýmsum áhrifum sem vænta má. Ekki er hægt að segja fyrir með neinni nákvæmni hvert umfangið kunni að verða á einstökum sviðum. Mat á kostnaði vegna loftslagsbreytinganna gefur þó nokkra hugmynd um áhrifin.

Aukinn kostnaður fyrir þjóðfélagið

Að óbreyttu er ljóst að til að ná því markmiði að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda verða þjóðir heimsins, ekki hvað síst þær efnameiri, að grípa til margvíslegra aðgerða sem hafa í för með sér kostnað. Með Kyoto-bókuninni munu iðnríki skuldbinda sig til þess að minnka losun gróðurhúsalofttegunda um 5,2% niður fyrir losun árið 1990. Kostnaður, sem það getur haft í för með sér, getur komið fram sem hækkad verð fyrir vöru og þjónustu á markaði (t.d. til að greiða fyrir dýrari búnað og efni sem eru umhverfisvænni), hærri skattar (mengunarskattar

eða aðrir skattar til þess að fjármagna nauðsynlegar aðgerðir stjórnvalda) eða sem minnkandi hagvöxtur (meðal annars vegna aukinnar skattheimtu og vegna takmarkaðri tækifæra til ódýrrar nýtingar náttúruauðlinda). Kostnaðurinn getur fallið til vegna fræðslu og upplýsingamiðlunar, vegna beinna stjórnvaldsaðgerða, vegna tæknibreytinga í atvinnulífi og vegna þróunar nýrra umhverfisvænni framleiðslu- og umgengnishátta. Aðgerðir þurfa annars vegar að felast í því að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, með til dæmis breyttri orkunotkun, aukinni hreinsun útblásturs og breyttum umgengnisháttum í náttúrunni almennt. Hins vegar þurfa aðgerðir að miðast við aðlögun að breytingum sem fylgja hækkandi hita, svo sem vegna hækkunar sjávarborðs, veðurfarsbreytinga, gróðurfarsbreytinga, breytinga í lífríki o.fl.

Tilraunir til að leggja fjárhagslegt mat á ofangreindar tegundir aðgerða hafa leitt til mjög ólíkra niðurstaðna enda aðferðafræði og aðstæður, sem miðað er við, ólíkar. Algengt mat á heildarkostnaði vegna hækkunar meðalhita á jörðinni um 2-3°C er frá 1% til 5% af vergri landsframleiðslu (GDP) í iðnríkjunum. Í þróunarlöndum yrði að öðru jöfnu um hærri hlutfallskostnað að ræða vegna minni þjóðarframleiðslu á íbúa og meiri áhrifa veðurfarsbreytinga þar. Ástæða er þó til að ítreka að slíkar áætlanir eru mikilli óvissu háðar.¹ Í þeim er ekki gert ráð fyrir stórbrotnum áföllum í umhverfinu, svo sem af völdum verulegra breytinga á hafstraumum, en Ísland og mörg önnur eyríki eru sérstaklega viðkvæm fyrir slíku (breytt fiskgengd, aukinn ágangur sjávar á hafnarmannvirki og önnur mannvirki í sjávarbyggðum). Í þessu sambandi er rétt að benda á að hækkun sjávarborðs getur valdið stórfelldum vandamálum á láglandum eyjum og strandsvæðum í þriðja heiminum.

¹ Áætlanir um jaðarkostnað vegna viðbótarlosunar CO₂ eru frá 5 til 125 Bandaríkjadala á hvert tonn af kolefni (m.v. 1990), sjá Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change, Cambridge University Press, IPCC, 1996, bls. 11.

Þegar hugað er að auknum kostnaði er ástæða til að benda á að margt er hægt að gera til að ná árangri á þessu sviði án mikilla útgjalda. Sem dæmi um það má nefna að minni notkun og hagkvæmari nýting orku eru taldar geta leitt til 10-30% sparnaðar sem getur skilað sér í minnkandi losun gróðurhúsalofttegunda. Ýmsar aðgerðir til þess að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda, þar á meðal aðgerðir sem hafa nokkurn kostnað í för með sér, hafa viðbótarnotagildi, þ.e. þær eru gagnlegar að öðru leyti en því að draga úr losun. Í ljósi hinnar miklu óvissu um loftslagsbreytingar, sem uppsöfnun gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpunum kann að hafa í för með sér, er oft lögð meiri áhersla á aðgerðir af þessum toga en á kostnaðarsamar aðgerðir sem ekki hafa slík jákvæð hliðaráhrif. Slíkar aðgerðir eru nefndar „no-regret“ aðgerðir á ensku og nefna má þær „aðgerðir með viðbótarnotagildi“ á íslensku.

Aðrir þættir

Ofangreindar áætlanir um kostnað vegna loftslagsbreytinga taka ekki tillit til svokallaðra félagslegra og mannlegra kostnaðarþátta (*non-market factors*) sem stafa m.a. af breyttum lífsháttum, búferlaflutningum, breyttu heilsufari og breyttum lífs-gæðum.

Í hinu víða alþjóðlega samhengi verður auk þess að gera ráð fyrir því að aukinn þrýstingur verði á búferlaflutninga fólks frá svæðum, sem verða fyrir mestu tjóni, til svæða sem standa betur eða jafnvel teljast bjóða upp á betri búsetuskilyrði en áður var. Þetta síðastnefnda gæti átt við um Ísland og ýmis önnur norðlæg lönd.

4.1. Veðurfarsbreytingar og heilsufar

Eins og fram hefur komið er því spáð að meðalhiti á jörðinni geti hækkað um 1-3,5°C á næstu öld vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa. Þessi hitabreyting af mannavöldum er mun meiri en náttúrulegar breytingar sem orðið hafa á loftslagi síðustu þúsund árin. Gera má því ráð fyrir ýmsum breytingum á heilsufari og líðan þjóða heims. Spádómar í þessu efni eru þó mjög erfiðir og líklegt að áhrif á heilsufar á Íslandi verði með minna móti. Meðal þeirra þátta, sem ætla má að mestu ráði um áhrif veðurfarsbreytinga á heilsufar, eru:

1. Fátækt og skortur á viðbúnaði og tækniráðstöfunum af hennar völdum.

2. Lélegt næringarástand.
3. Einangrun með lélegum eða engum samgöngum.
4. Óhentug búseta, t.d. við strendur eða á litlum eyjum sem viðkvæmar eru fyrir hækkandi sjávarstöðu og ágangi sjávar.
5. Ósveigjanlegt þjóðfélag af menningarlegum eða trúarlegum ástæðum.

Af þessum þáttum er fjórði þátturinn sá eini sem snertir okkur Íslendinga beint. Ljóst er að hækki sjávarstaða um 50 cm vegna breytts loftslags getur það haft talsverð áhrif hér. Flest bendir til að hlýnun verði meiri á hærri breiddargráðum fjærst miðbaug og að úrkoma minnki enn frekar á þurrkasvæðum jarðarinnar en aukist annars staðar.

Helstu áhrif á heilsufar

Örðugt er að spá með vissu um áhrif þessara þátta á Íslandi. Húsnæði er yfirleitt gott, tæknileg úrræði traust, samgöngur góðar. Íslendingar standa því að þessu leyti betur að vígi en ýmsir aðrir.

Bein áhrif

Vegna svals loftslags og góðs húsakosts er ólíklegt að hækkandi hiti eða hitabylgjur muni hafa veruleg áhrif á heilsufar hér á landi. Líklegra er að loftslag hér verði mönnum blíðara hækki hiti að marki. Breytist veðurfar þannig að veður verði vályndari og stormar tíðari verður þó að gera ráð fyrir að slysum og dauðsföllum fjölgi í samræmi við það auk sálrænna áfalla.

Óbein áhrif

Líklegt er að helstu óbein áhrif hér á landi tengist annars vegar innflutningi matvæla vegna samdráttar í matvælaframleiðslu í öðrum löndum þar sem áhrif loftslagsbreytinga verða meiri en hér. Hins vegar aukist aðflutningur fólks frá fátækari löndum sem verr þolir loftslagsbreytingar. Slíkur aðflutningur getur aukið verulega tíðni tiltekinna sjúkdóma hér á landi, þar á meðal berkla, HIV-sýkinga og sýkinga af völdum lifrabólgu B svo einhver dæmi séu nefnd.

Sýkingar

Ólíklegt er að hiti hækki nægjanlega til að breyta fánu skordýra hér umtalsvert. Líkur benda til þess að malaríusvæði jarðar stækki með hækkandi hita. Þannig verði allt að 60% jarðarbúa í áhættuhópi malaríu í stað 45% nú. Rétt er að minnast þess að um síðustu aldamót mun malaría hafa greinst í Norður-Evrópu, jafnvel í Finnlandi. Mun líklegra er að meira

geti farið að bera á sjúkdómum sem nú eru þegar þekktir í Mið- og Norður-Evrópu. Má þar nefna veiruheilahimnubólgu, sem berst með ákveðnum maurum, og *Borreliosis* sem berst með smámaurnum *Ixodes ricinus*.

Mengun vatns gæti aukist bæði af völdum *E. coli* og *Giardia lamblia* og niðurgangssjúkdómar af þeirra völdum því orðið algengari.

Aðrir sjúkdómar

Ýmsum plöntugróm kann að fjölga og það getur síðan leitt til aukinnar tíðni ofnæmissjúkdóma á borð við asma og ofnæmiskvef.

Samandregnar niðurstöður

1. Gera má ráð fyrir aukinni tíðni ofnæmissjúkdóma vegna vaxandi magns frjókorna. Einnig má gera ráð fyrir að niðurgangssjúkdómar verði algengari vegna vaxandi útbreiðslu iðrasýkla í lækjum, ám og vötnum.
2. 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.

4.2. Áhrif á hönnun mannvirkja

Loftslagsbreytingar af mannavöldum breyta hönnunar- og rekstrarforsendum ýmissa mannvirkja. Víða erlendis má gera ráð fyrir að húshitunarkostnaður minnki og kostnaður við loftkælingu bygginga að sumarlagi aukist. Einnig geta hönnunarforsendur húshitunar- og kælikerfa bygginga breyst þannig að máli skipti á næstu áratugum. Hér á landi þarf ekki að gera ráð fyrir umtalsverðum áhrifum af þessum toga vegna svals loftslags og góðs húsakosts. Mikilvægustu breytingar á hönnunarforsendum mannvirkja hér á landi af völdum loftslagsbreytinga munu væntanlega tengjast breytingum í vatnafari og sjávarborði.

Breytingar í vatnafari hafa áhrif á hönnunarforsendur margra mannvirkja, svo sem vatnsaflsvirkjana og brúa. Eins og nefnt var í kafla 2.4 um vatnafar og jökla er gert ráð fyrir því að meðalrennsli margra vatnsfalla, þar sem áhrifa jökla gætir, vaxi um 5-20% á næstu 30 árum vegna aukinnar jöklaleysingar og enn meira eftir það. Þessi breyting, ef til hennar kemur, er umtalsverð og mun eiga sér stað á tímabili sem er skemmra en afskriftartími margra mannvirkja.

Álitamál er hversu mikið tillit er eðlilegt að taka til óvissra sviðsmynda af veðurfarspróun þegar teknar eru ákvarðanir um hönnun umfangsmikilla eða kostnaðarsamra mannvirkja. Stundum er talin ástæða til þess að búa í haginn með því að velja sveigjanlega hönnunarútfærslu, sem hægt er að laga að breytingum í framtíðinni með tiltölulega litlum kostnaði, eða útfærslu sem nýtist vel í breyttu loftslagi en er einnig til hagsbóta þó loftslag breytist ekki. Slík hönnun mannvirkja er í eðli sínu svipuð og „aðgerðir með viðbótarnotagildi“ til þess að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda sem nefndar voru hér að framan. Sem dæmi um slíka möguleika má nefna miðlunarlón eða stöðvarhús virkjana, sem auðvelt er að laga að auknu vatnsrennsli í ám, eða skógrækt til þess að draga úr útstreymi gróðurhúsalofttegunda.

Gert er ráð fyrir að sjávarborð hér við land hækki svipað og að meðaltali annars staðar á jörðinni, eða um u.þ.b. 50 cm fram til ársins 2100. Ekkert bendir til þess að öldufar breytist á næstu áratugum vegna veðurfarsbreytinga. Við hönnun mannvirkja nærri sjó þarf því að taka tillit til hærri sjávarstöðu og meira ölduálags sem hærri sjávarstöðu fylgir.

Stærstu mannvirki í og við sjó eru brimvarnargarðar og sjóvarnargarðar sem nú eru hannaðir fyrir mestu áraun sem verður á um 50 ára fresti. Með hækkun sjávarborðs verður vaxandi hættu á að þessir varnargarðar gefi sig með þeim afleiðingum að tjón verði í höfnum og á hafnarsvæðum og verulegt landbrot verði og tjón á mannvirkjum. Erfitt er að áætla hve stórfelld tjónin gætu orðið en kostnaður við tjón, sem varð hinn 9. janúar 1990, var 190 milljónir á verðlagi ársins 1994 og gefur vísbendingu um umfangið. Til viðbótar eðlilegum viðhalds- og endurnýjunarkostnaði þessara mannvirkja má gera ráð fyrir talsverðum kostnaðarauka árlega vegna aðlögunar að hækkandi sjávarborði.

Nauðsynlegt er að ákvæði séu í skipulags- og byggingalögum og/eða reglugerðum sem setja ákveðin skilyrði varðandi mannvirki á hafnarsvæðum og annars staðar á láglandi. Þegar skipuleggja þarf byggð á lágsvæðum og ákveða á lægstu gólfhæð húsa og lóða er talið rétt að miða við 100 ára tímabil, eða fram til ársins 2100. Kröfur um lágmarkshæð lóða og gólfa þurfa að vera í takt við spár um hækkun heimshafanna samkvæmt „besta mati“ IPCC-skýrslunnar. Bæta verður við þá lágmarkshæð, sem talin er þörf á í dag, um 0,5 m auk 0,15 m hækkunar vegna landsigs

og öryggisstuðuls, eða samtals 0,65 m, þar sem landsig á sér stað, en um 0,5 m þar sem landsig er ekki umtalsvert.

Tekið hefur verið tillit til hækkunar sjávarborðs af völdum loftslagsbreytinga í framtíðinni við hönnun hafnarmannvirkja á nokkrum stöðum hérlendis á síðustu árum.

Samandregnar niðurstöður

1. Mikilvægustu breytingar á hönnunarforsendum mannvirkja hér á landi af völdum loftslagsbreytinga tengjast breytingum í vatnafari og hækkun sjávarborðs. Beinar afleiðingar af völdum hlýnandi loftslags má ætla að skipti minna máli fyrir hönnun mannvirkja hérlendis.
2. Vaxandi rennsli vatnsfalla kann að hafa áhrif á hönnunarforsendur margra mannvirkja, svo sem vatnsaflsvirkjana og brúa.
3. Gert er ráð fyrir því að sjávarborð hér við land hækki í samræmi við spár um hækkun heimshafanna, eða um 50 cm á næstu hundrað árum. Taka þarf tillit til hærri sjávarstöðu og meiri hættu á sjávarflóðum af þeim sökum við skipulag byggðar á lágsvæðum og við byggingu hafnarmannvirkja.
4. Álitamál er hversu mikið tillit er eðlilegt að taka til óvissra sviðsmynda af veðurfarsþróun þegar teknar eru ákvarðanir um hönnun umfangsmikilla eða kostnaðarsamra mannvirkja. Þar, sem við á, getur verið ástæða til þess að búa í haginn fyrir breytingar með því að velja sveigjanlega hönnunarútfærslu, sem hægt er að laga að breytingum í framtíðinni með tiltölulega litlum tilkostnaði, eða útfærslu sem nýtist vel í breyttu loftslagi en er einnig til hagsbóta þó loftslag breytist ekki.

Samantekt

Bruni jarðfnaeldsneytis hefur leitt til mikillar losunar koltvíoxíðs út í umhverfið og hefur styrkur þess í andrúmsloftinu vaxið um 33% frá því fyrir iðnbyltingu seint á 18. öld. Miðað við áframhaldandi losun koltvíoxíðs og annarra gróðurhúsalofttegunda er gert ráð fyrir að meðalhiti á jörðinni hækki um 1-3,5°C á tuttugustu og fyrstu öldinni. Líklegasta hlýnunin er um það bil 2°C. Þessi hlýnun verður meiri og hraðari en dæmi eru um í loftslagssögu jarðar síðustu þúsund árin. Vegna varmatregðu heimshafanna munu einungis 50-90% af hitabreytingunni, sem svarar til röskunar á geislunarbúskap jarðarinnar, hafa komið fram eftir eina öld. Hiti mun því halda áfram að hækka eftir árið 2100 jafnvel þótt jafnvægi í styrk gróðurhúsalofttegunda náist fyrir þann tíma.

Hlýnað hefur um 0,4-0,8°C á síðustu 100 árum, bæði að meðaltali á jörðinni allri og einnig á Norður-Atlantshafssvæðinu. Líklegt er að hluti þessarar hlýnunar sé af mannavöldum. Svo virðist sem hraði hlýnunarinnar hafi aukist á síðustu 20 árum. Hlýnun hér á landi á næstu áratugum kann að verða um 0,3°C á áratug ef tekið er mið af staðsetningu Íslands og gengið út frá ákveðnum forsendum um losun gróðurhúsalofttegunda og eðliseiginleika andrúmslofts og úthafa. Hlýnun verður meiri að vetrarlagi en að sumarlagi. Úrkoma mun að öllum líkindum aukast.

Spár um loftslagsbreytingar á Íslandi eru erfiðar. Náttúrulegar breytingar í loftslagi eru meiri á Norður-Atlantshafi en á flestum öðrum hafsvæðum á jörðinni og sveiflur í hitafari héraðs frá einum áratugi til annars eru mun meiri en áætluð hlýnun af völdum gróðurhúsaáhrifa næstu áratugi. Slíkar náttúrulegar sveiflur geta bæst við hlýnun vegna gróðurhúsaáhrifa eða dregist frá henni eftir því hvort sveiflurnar fara saman eða ekki. Ef náttúrulegar sveiflur í veðurfari næstu áratuga hafa áhrif til kólnunar í grennd við Ísland er óvíst að meðalhækkun hita á jörðinni komi fram héraðs á næstu 10-20 árum. Ekki er hægt að útiloka kólnun af náttúrulegum ástæðum svipað og gerðist á árunum frá 1960-1980. Grundvallarröskun á hafstraumum Norður-Atlantshafsins og loftslagi í grennd við Ísland er hugsanleg en þarf ekki að tengjast vaxandi gróðurhúsaáhrifum. Ekki er hægt að segja til um líkur á slíkri röskun í ljósi núverandi þekkingar vísindamanna á starfsemi lofthjúps og úthafa.

Sjávarborð heimshafanna hefur hækkað um 10 til 25 cm á undanförunum 100 árum, þ.e. um 1-2,5 mm á ári. Þessa hækkun má einkum rekja til þenslu sjávar vegna hækkandi sjávarhita og að hluta til bráðnunar jökla og íss. Hækkun sjávarborðs við Ísland undanfarna hálfu öld hefur numið um 2,4 mm á ári samkvæmt mælingum við Reykjavík sem er svipað og meðaltalið á jörðinni. Hækki sjávarborð hér við land jafnmikið og meðalsjávarborð heimshafanna má gera ráð fyrir 15-95 cm hærri sjávarstöðu hér eftir 100 ár. Líklegasta hækkunin er um það bil 50 cm. Þessi breyting getur augljóslega haft áhrif á hafnarsvæði og byggð á lágsvæðum.

Jökla munu væntanlega hopa vegna hlýnandi veðurfars þó aukin úrkoma kunnist að bæta afkomu þeirra lítillaga. Talið er að mikill hluti jökla utan heimskautasvæða á jörðinni hverfi að mestu á 100-200 árum. Bráðnun jökla og aukin úrkoma getur haft veruleg áhrif á vatnafar héraðs, ekki síst vegna aukningar á rennsli jökuláa. Meðalrennsli margra vatnsfalla er talið geta vaxið um 5-20% á næstu 30 árum og kann það að hafa áhrif á nýtingu vatnsafls. Hlýnandi veðurfar mun einnig hafa áhrif á árstíðasveiflu rennslis og meiri hætta er á flóðum. Ekki eru forsendur til að ætla að hlýnandi veðurfar hafi úrslitaáhrif á snjóflóðahættu, illviðratíðni eða jökulhlaup héraðs.

Líklegt er að vaxandi gróðurhúsaáhrif muni leiða til breytinga á aðstreymi sjávar úr norðri og suðri til hafsvæðanna í grennd við Ísland og að þeirra verði einkum vart á átakasvæði milli þessara strauma út af Norður- og Norðausturlandi. Hlýnun sjávar og aukið flæði næringarríks hlýs sjávar norður fyrir land á uppeldisslóð margra fiskistofna gæti leitt til stækkunar þorsstofnsins og e.t.v. annarra botnfisksstofna. Hlýnun sjávar kann einnig að leiða til stækkunar á stofnum uppsjávarfiska á borð við síld. Hins vegar gæti aðgengi þorsks að loðnu og rækju minnkað vegna breyttrar útbreiðslu og minni stofna þessara fæðudýra. Grundvallarröskun á hafstraumum Norður-Atlantshafsins, sem nefnd var sem hugsanlegur möguleiki hér að framan, og kólnun sjávar hér við land í kjölfar hennar gæti á hinn bóginn haft alvarleg áhrif á stærð nytjastofna og útbreiðslusvæði þeirra.

Hlýnun loftslags hér á landi á næstu öld getur breytt gróðurfari og haft jákvæð áhrif á hefyng. Aðstæður til kornræktar munu batna. Líklegt er að breyting verði á dýralífi landsins og fjölbreytni þess vaxi við það að tegundum fjölgi.

Erfitt er að meta þjóðfélagsleg áhrif veðurfarsbreytinga hér á landi en þau gætu, þegar á heildina er litið, orðið jákvæð fyrir landbúnað og mögulega einnig fyrir sjávarútveg. Breytt skordýralíf gæti á hinn bóginn valdið búsifjum í landbúnaði. Á sama hátt er örðugt að spá fyrir um áhrif á heilsufar en vegna styrkra innviða íslensks þjóðfélags er ólíklegt að þau verði veruleg. Þó má búast við aukinni tíðni ofnæmissjúkdóma vegna vaxandi magns frjókorna. Einnig er mögulegt að tilteknir smitsjúkdómar á borð við nið-

urgangssjúkdóma verði algengari vegna vaxandi útbreiðslu iðrasýkla í lækjum, ám og vötnum.

Hlýnandi loftslag á jörðinni mun væntanlega valda verulegum breytingum á náttúrufarslegum aðstæðum á Íslandi á næstu öld. Erfiðara er að spá fyrir um afleiðingar vaxandi gróðurhúsaáhrifa hér á landi en víða annars staðar vegna mikilla náttúrulegra sveiflna í veðurfari. Innviðir þjóðfélagsins verða þó að teljast svo styrkir að tiltölulega auðvelt ætti að vera að takast á við þessar breytingar komi ekki til grundvallarröskunar á hafstraumum Norður-Atlantshafsins. Veðurfarsbreytingar kunna að hafa alvarlegri afleiðingar í öðrum löndum og getur það haft óbein áhrif hér á landi, til dæmis ýmis efnahagsleg áhrif. Erfitt eða ómögulegt er að segja fyrir um slík óbein áhrif á þessu stigi.

Hitafar norðurhvels jarðar síðustu þúsund árin

Þekking manna á hitafari norðurhvels jarðar á fyrri öldum hefur aukist verulega á síðustu árum. Mögulegt hefur orðið að greina hitabreytingar frá ári til árs síðustu þúsund árin með hjálp trjáhringa, kóralvaxtar, ískjarna og vatnaseta auk sögulegra gagna og langtímahitamælinga. Þetta hefur ekki verið hægt að gera fyrir suðurhvelið vegna skorts á fullnægjandi fornveðurvísunum. Hitaferlarnir, sem sýndir eru á baksíðu þessarar skýrslu (50 ára útjafnað frávik hita frá meðaltali árána 1961-1990), byggja á mismunandi gögnum sem háð eru landsvæðum og árstíðum á mismunandi hátt. Engu að síður benda allir ferlarnir til þess að 20. öldin hafi verið óvenju hlý miðað við síðustu eitt þúsund árin. Óvissa er meiri snemma á tímabilinu en síðar vegna gísna og ónákvæmari gagna (95% óvissumörk talin $\pm 0,3^\circ\text{C}$ fyrir tímabilið 1000-1500 en óviss-

an minnkar smám saman niður í $\pm 0,1^\circ\text{C}$ í upphafi 19. aldar fyrir ferla með 50 ára útjöfnun).

Á norðurhveli voru fyrstu 500 ár þúsaldarinnar tiltölulega mild en greinilega svalari en 20. öldin en 16., 17. og 19. öld voru kaldastar. Eftir því sem fleiri gögn bætast við úr hitabeltinu, Austur-Asíu og vestanverðri Norður-Ameríku hafa fornveðurfarsfræðingar endurskoðað mat sitt á veðurfari síðustu þúsund ára, sérstaklega varðandi meint hlýindaskeið á síðmiðöldum (*Medieval Warm Period* u.þ.b. 900-1200) og að minna leyti einnig til litlu ísaldar (*Little Ice Age* u.þ.b. 1550-1850). Hlýindaskeiðið var sennilega greinilegast við norðanvert Atlantshaf og í Evrópu þar sem gögnum um fornveðurlag var fyrst safnað. Í gögnum frá suðurhveli má vart greina þessi tvö tímabil í þeim fáu gagnaröðum sem til eru úr tempraða beltinu syðra og frá suðurheimskautssvæðinu.

Um myndina á baksíðu

Gögn: P. D. Jones, K. R. Briffa og T. J. Osborn, University of East Anglia, Bretlandi (The Holocene 8, 455-471 (1998)); M. E. Mann, University of Virginia, Bandaríkjunum, R. S. Bradley, University of Massachusetts, Bandaríkjunum, M. K. Hughes, University of Arizona, Bandaríkjunum (Geophysical Research Letters, 26, 6, 759 (1999)); K. R. Briffa (Quaternary Science Reviews, 19, 87-105 (2000)); rannsóknastofnun bresku veðurstofunnar, Hadley Centre; danska veðurstofan (DMI); Páll Bergþórsson (Hafsin, 333-345 (1969)); Sigfús Johnsen (persónulegar upplýsingar).

Frekari upplýsingar er að finna í fréttabréfi PAGES rannsóknarverkefnisins (7. bindi, nr. 1, mars 1999 sem einnig má nálgast á slóðinni <http://www.pages.unibe.ch>) og hjá

stofnuninni National Geophysical Data Center í Bandaríkjunum (<http://www.ngdc.noaa.gov>).

Hitaferrillinn, sem metinn er á grundvelli trjáhringa, hefur ekki sama lóðrétta kvarða og hinir tveir ferlarnir fyrir norðurhvel jarðar á efri hluta myndarinnar (ferlar sem merktir eru Jones o.fl. og Mann o.fl.). Hitinn, sem trjáhringirnir gefa vísbendingar um, á við norðlægar slóðir þar sem hitasveiflur eru meiri en að meðaltali fyrir allt norðurhvelið. Upprunalegi trjáhringaferrillinn frá K. R. Briffa er hér margfaldaður með 1/2,5 til þess að hann sveiflist á u.þ.b. sama bili og hinir ferlarnir tveir.

Hlýnunin, sem sýnd er með örvunum til hægri á myndinni, er $0,2^\circ\text{C}$ á áratug fyrir norðurhvelið (efri örin) og $0,3^\circ\text{C}$ fyrir Ísland (neðri örin).

Helstu heimildir

Rit gefin út af IPCC

IPCC. 1992. *Climate Change 1992. The supplementary report to the IPCC scientific assessment*. J. T. Houghton, B. A. Callander and S. K. Varney (ritstj.). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. 1994. *Climate Change 1994. Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B. A. Callander, E. F. Haites, N. Harris og K. Maskell (ritstj.). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. 1996. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg og K. Maskell (ritstj.). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. 1996. *Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. R. T. Watson, M. C. Zinyowera og R. H. Moss (ritstj.). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. 1996. *Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change*. J. Bruce, Hoesung Lee og E. Haites (ritstj.). Cambridge University Press, Cambridge.

IPCC. 1998. *The Regional Impacts of Climate Change. An Assessment of Vulnerability*. R. T. Watson, M. C. Zinyowera og R. H. Moss (ritstj.). Cambridge University Press, Cambridge.

Almenn umfjöllun fyrir almenning um loftslagsbreytingar af mannavöldum

J. T. Houghton. 1997. *Global Warming. The Complete Briefing*. Cambridge University Press, Cambridge.

Trausti Jónsson og Tómas Jóhannesson. 1994. Veðurhorfur á næstu öld. *Náttúrufræðingurinn*, 64(1), 13-29.

Nýleg samantekt um loftslagsbreytingar síðustu 150 ára

P. D. Jones, M. New, D. E. Parker, S. Martin og I. G. Rigor. 1999. Surface air temperature and its changes over the past 150 years. *Reviews of Geophysics*, 37(2), 173-199.

Ýmsar greinar

A. McMichael og A. Haines. 1997. Global climate change: the potential effect on health. *British Medical Journal*, 315, 805-809.

Anon. 1999a. Nytjastofnar sjávar 1998/1999. Aflahorfur fiskveiðiárið 1999/2000. State of marine stocks in Icelandic waters 1998/1999. Prospects for the Quota year 1999/2000. *Fjölrit Hafrannsóknastofnunarinnar nr. 72*. Reykjavík.

Anon. 1999b. Þættir úr vistfræði sjávar 1997 og 1998. Environmental conditions in Icelandic waters 1997 and 1998. *Fjölrit Hafrannsóknastofnunarinnar nr. 73*. Reykjavík.

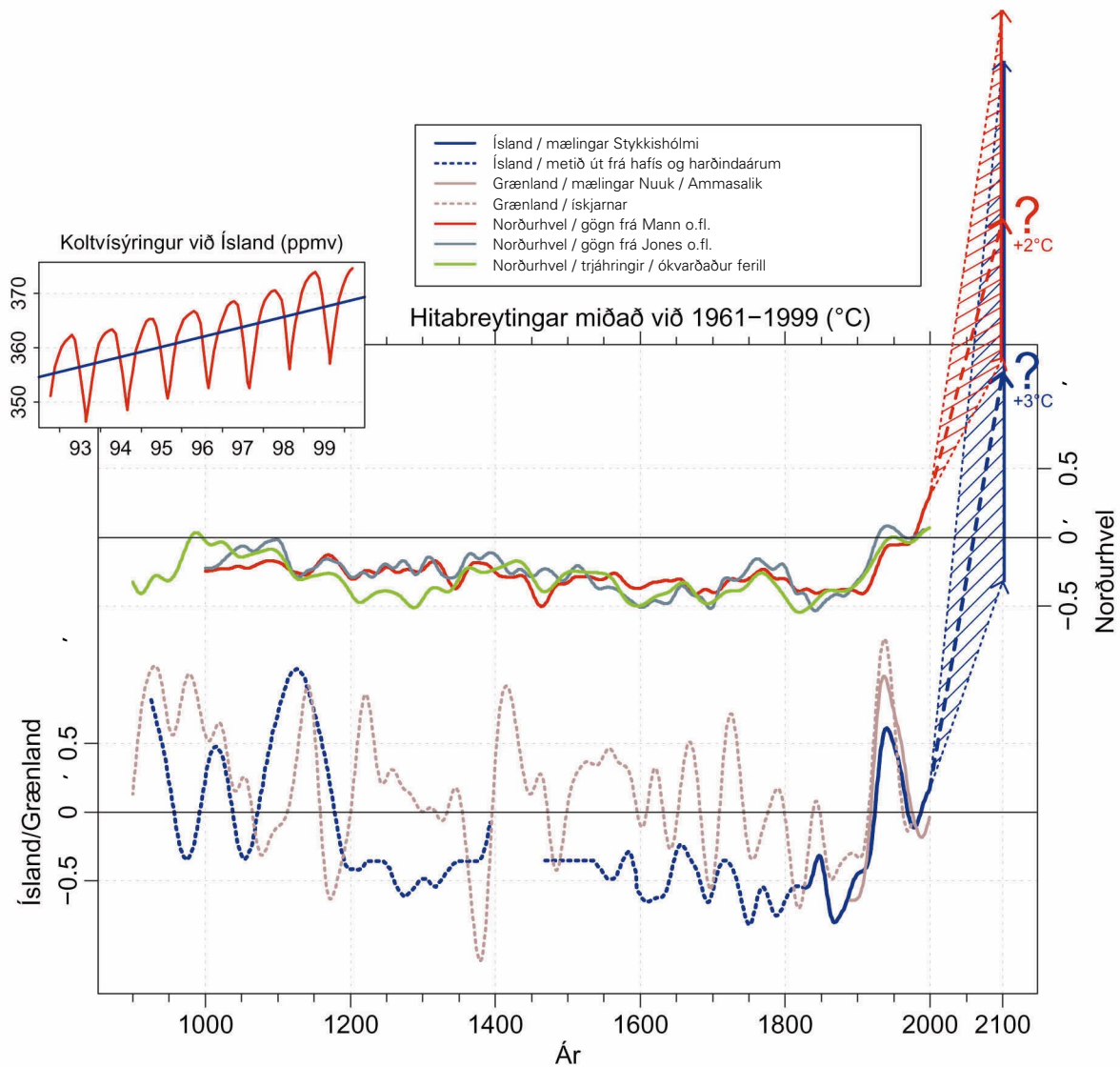
Hjálmar Vilhjálmsson. 1997. Climatic variations and some effects on the marine ecology of Icelandic and Greenland waters, in particular during the present century. *Rit Fiskideildar*, 15, 9-25.

Nils Roar Sælthun, Perttu Aittoniemi, Sten Bergström, Kristinn Einarsson, Tómas Jóhannesson, Göran Lindström, Per-Eric Ohlsson, Thorkild Thomsen, Bertil Vehviläinen og Knut Ola Aamodt. 1998. *Climate change impact on runoff and hydropower in the Nordic countries - Final report from the project „Climate change and energy production“*. TemaNord 1998:552, Nordic Council of Ministers, Kaupmannahöfn.

Sigfús A. Schopka. 1994. Fluctuations in the cod stock off Iceland during the twentieth century on relation to changes in the fisheries and environment. *ICES Journal of Marine Science*, 198, 175-193.

Tómas Jóhannesson, Trausti Jónsson, Erland Källén og Eigil Kaas. 1995. Climate change scenarios for the Nordic countries. *Climate Research*, 5, 181-195.

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, 13-13 May 1985*. E.J. Brill, Leiden, 456-476.



Hitafar á norðurhveli og við Ísland síðustu þúsund árin

Hitafar síðustu eitt þúsund ár hefur verið metið á grundvelli ýmissa gagna um fornveðurfar (trjáhringir, kór-
 alvöxtur, vatnaset, hafís, harðindaár o.fl.) ásamt sögulegum gögnum og löngum mæliröðum hita-
 mælinga (sjá nánar neðst á blaðsíðu 32). Myndin sýnir 50 ára útjafnað frávik hita frá meðaltali árunna
 1961-1990. Óvissa er meiri á fyrri hluta tímabilsins. Slitnar línur með örvm og skástrikaðir geirar lengst
 til hægri á myndinni sýna hugsanlega hlýnun á Íslandi, og að meðaltali á jörðinni, á næstu öld að gefnum
 ákveðnum forsendum sem nánar er lýst í skýrslunni. Hlýnunin er ekki eiginleg spá heldur er verið að geta
 sér til um þróun veðurfars út frá ákveðnum forsendum um losun gróðurhúsalofttegunda og viðbrögð loft-
 hjúpsins við henni. Gert er ráð fyrir að bilið sem hlýnun í nágrenni Íslands spannar sé hlutfallslega jafnstórt
 og fyrir meðaltal jarðarinnar. Í bilinu, sem hlýnunin fyrir Ísland spannar, er ekki gert ráð fyrir breytingum á
 hafstraumum Norður-Atlantshafs en þær gætu leitt til þess að hlýnun yrði minni en myndin sýnir.