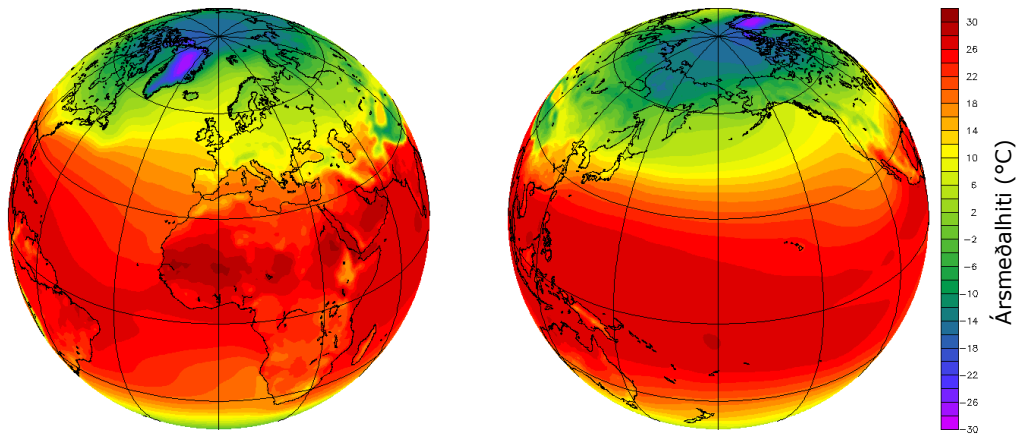


## 4 Veðurfarsbreytingar á Íslandi

### Samantekt

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



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

## 4.1 Veðurfar á Íslandi

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

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

Mynd 4.1 sýnir, rétt eins og Þorvaldur bendir á, að mun hlýrra er á hafsvæðinu umhverfis Ísland en almennt á breiddarstigi landsins. Þessi vik eru mun meiri á Norður-Atlantshafi en á Norður-Kyrrahafi þar sem jafnhitalínurnar liggja frekar samsíða breiddargráðum. Mynd 4.3 sýnir hvernig hitinn á hverjum stað vikur frá meðalhita breiddargráðunnar. Myndin sýnir greinilega að á stóru svæði í norðanverðu Norður-Atlantshafi er mun hlýrra en annars staðar á sömu

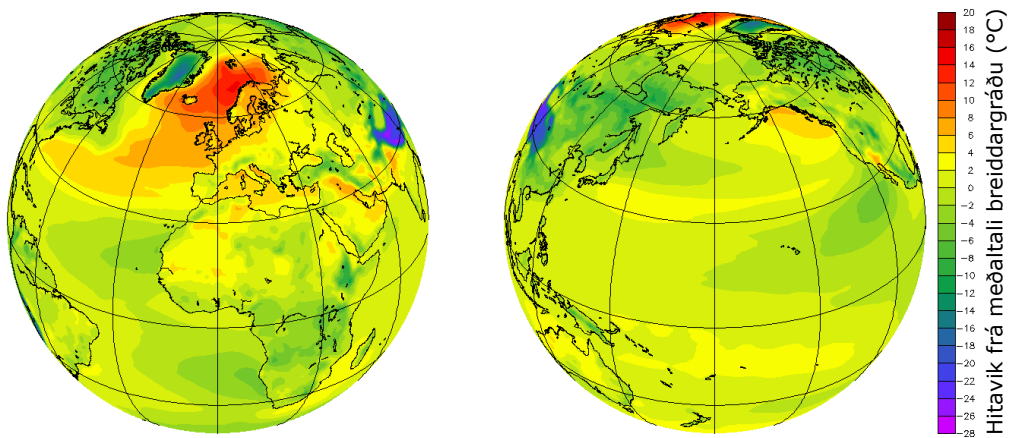
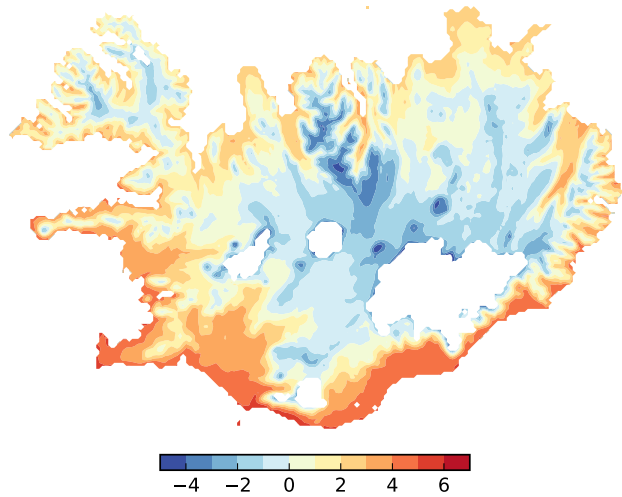
breiddargráðu. Mestu hitavikin sem sjást á kortunum eru á svæðinu umhverfis Ísland og í átt til Noregs og Svalbarða, og algjöru hámarki er náð út af strönd Norður-Noregs.

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

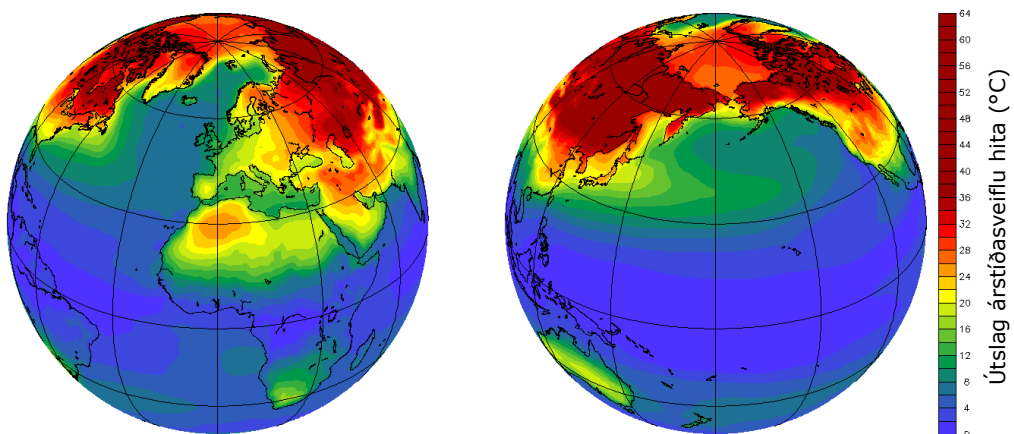
Mynd 4.4 sýnir að árstíðasveiflan á Íslandi er lítil í samanburði við það sem gerist á meginlöndunum og á norðurheimsskautssvæðinu. Mynd 4.5 sýnir þetta nánar fyrir 15 veðurstöðvar á Íslandi. Myndin sýnir meðalárstíðasveiflu hita<sup>3</sup> fyrir tímabilið 1981–2010 og er veðurstöðvunum raðað réttisælis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

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

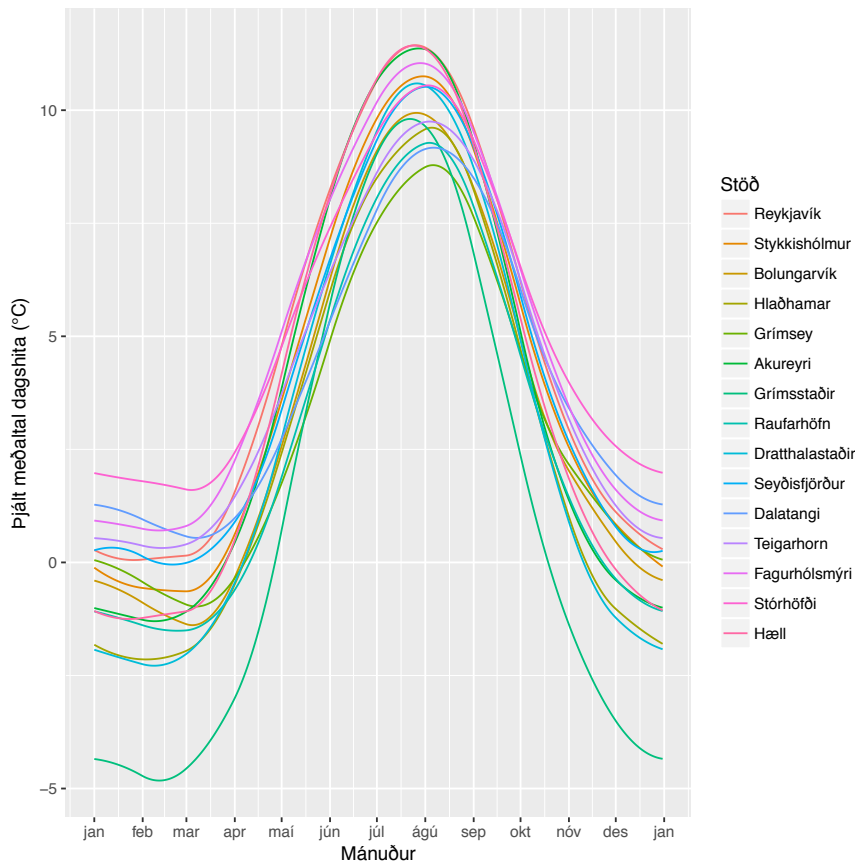
Mynd 4.2 Ársmeðalhiti (°C) áráanna 1981–2010 á Íslandi. Myndin byggist á gögnum frá íslensku endurgreiningunni (sjá nánar hliðargrein 4A Endurgreiningar).



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



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



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

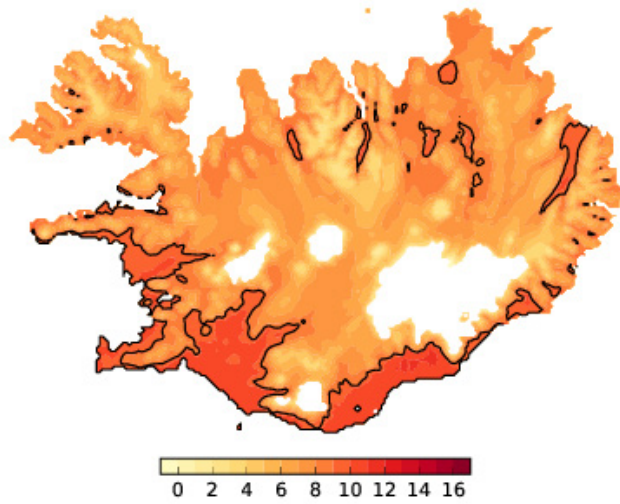
mismunandi kerfi við að flokka veðurfar ólíkra svæða á jörðinni en í því kerfi sem fellur best saman við gróðurbelti jarðar (sk. Köppenflokkun) skilur 10°C meðalhiti hlýjasta mánaðar milli kaldtempraðs- og heimskaualoftslags. Mynd 4.6 sýnir niðurstöður endurgreiningar fyrir sumarhita (júní til ágúst)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

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

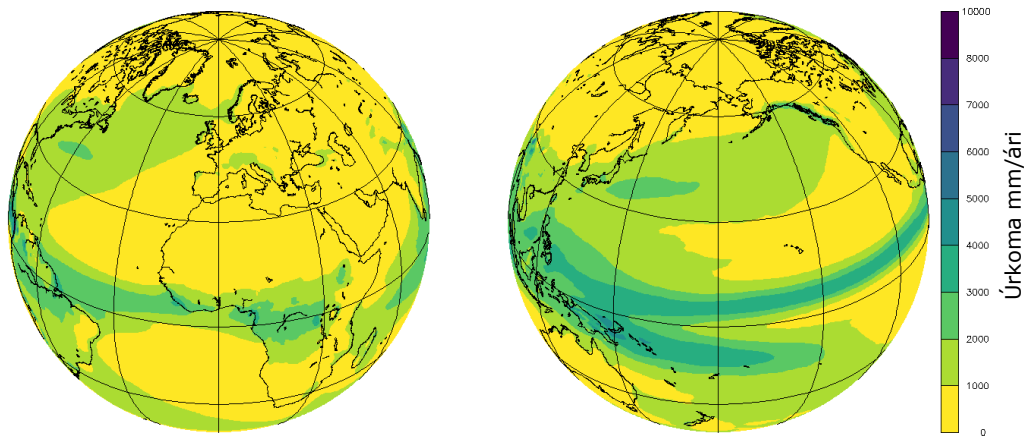
Annað einkenni úthafsloftslags er að þar er úrkoma meiri en yfir meginlöndum. Almenn er úrkoman mest

í hitabeltinu en utan þess eru viðfeðm úrkomusvæði yfir úthöfunum og teygja þau sig m.a. norður til Íslands, en þar er úrkoman á bilinu 500–1500 mm á ári (mynd 4.7).

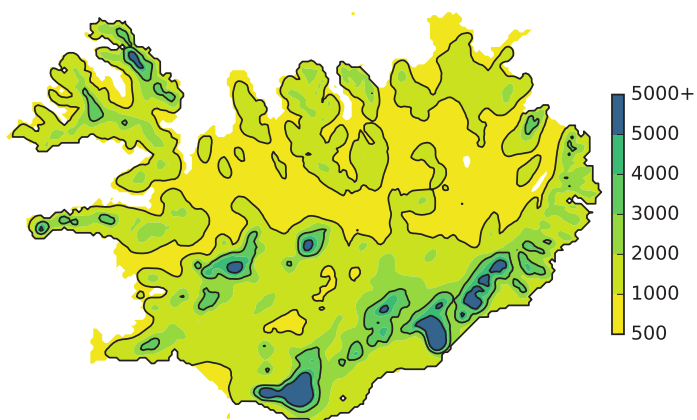
Í upphafsgrein loftslagskaflans í Lýsingu Íslands notar Þorvaldur Thoroddsen orðið *eyjaloft* til að lýsa veðurlagi á Íslandi. Eitt einkenni loftslags á eyjum er að þar rignir gjarnan meira en á hafsvæðinu umhverfis þær. Þegar rakt sjávarloftið fer yfir fjöll kólnar það, rakinn þéttist og getur fallið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



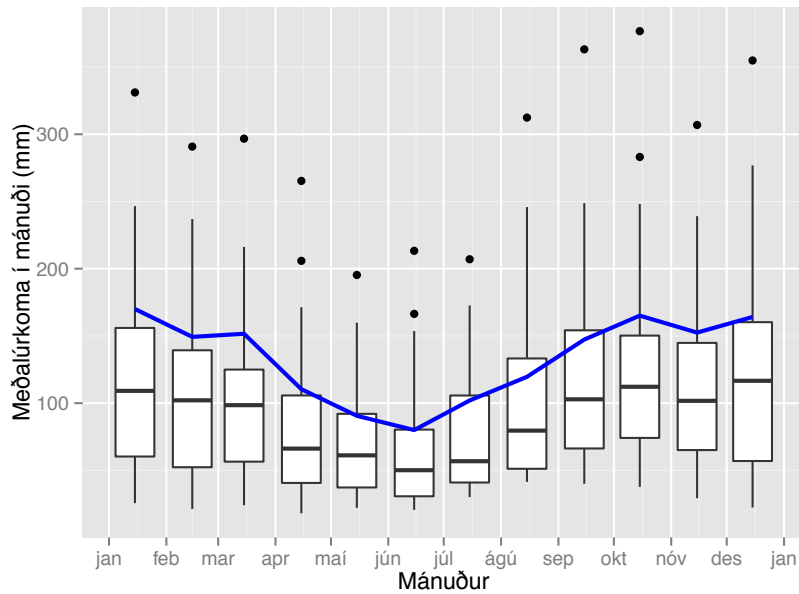
Mynd 4.6 Sumarhiti (°C júní til ágúst) árána 1981–2010. Svarta línan afmarkar 10°C meðalhita í júlímánuði. Myndin byggist á gögnum frá íslensku endurgreiningunni (sjá nánar hliðargrein 4A Endurgreiningar).



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



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



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

úrkomu fyrir árin 1971–2000 sýnir sambærilega dreifingu<sup>6</sup>.

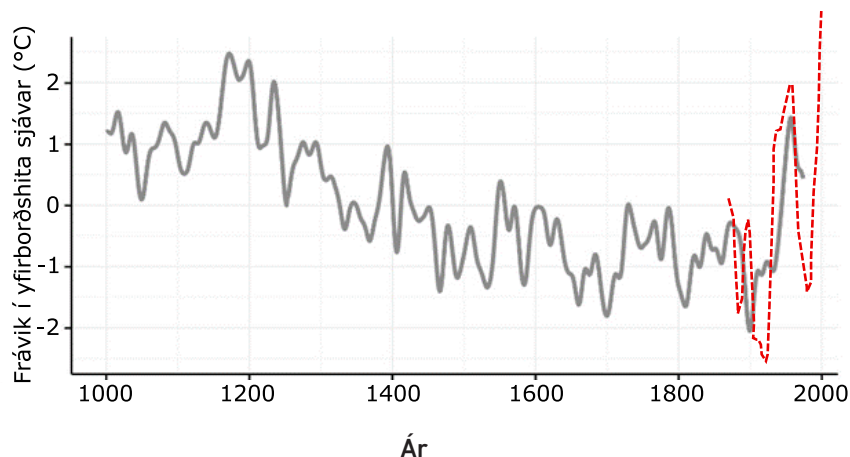
Úrkoma á Íslandi er meiri að vetri til en að sumri og er munurinn milli mestu og minnstu mánaðarúrkomu allt að tvöfaldur. Mynd 4.9 sýnir kassarit<sup>7</sup> af árstíðasveiflu úrkomu á 32 veðurstöðvum á láglandi og í endurgreiningu Veðurstofu Íslands (heildregin lína). Bæði stöðvagögn og endurgreining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

## 4.2 Breytingar á veðurfari á Íslandi frá öndverðu

Náttúrulegar sveiflur einkenna veðurfars sögu jarðar. Loftslag bregst við margs konar breytingum á ytri áhrifaþáttum, s.s. eldgosum, inngæislu sólar, reglubundnum breytingum í afstöðu jarðar og sólar (Milankovitchsveiflur), legu meginlanda, auk breytinga á efnasamsetningu andrúmsloftsins. Þessar breytingar

gerast mishratt og taka allt frá örfáum árum upp í margar milljónir ára. Heimildir um náttúrulegar veðurfars sveiflur jarðsögunnar má finna í fornloftslagsgögnum svo sem í set- og ískjörnum. Óbeinar mælingar á svokölluðum veðurvísam í setkjörnum (t.d. plöntuleifum, þykkt setlaga, efnafræðilegum mælingum) eru notaðar til að meta hita, sjávarseltu, gróðurfar og aðrar umhverfisbreytur á þeim tíma sem setlagið myndaðist. Sambærilegar rannsóknir má gera á ískjörnum og trjáhringjum. Með víðtækum samanburði ólíkra tegunda veðurvísam og keyrslum loftslagslíkana næst fram betri skilningur á þeim ferlum sem hafa valdið breytingum á veðurfari gegnum jarðsöguna. Nauðsynlegt er að þekkja vel þessa sögu til að hægt sé að meta hversu næmt loftslagskerfið er fyrir breytingum á ytri þáttum, hversu mikið af núverandi breytingum eigi sér náttúrulegar skýringar og ekki síst til þess að bregða ljósi sögunnar á núverandi breytingar.

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



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

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

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

#### 4.2.1 Nútími – Loftslagsbreytingar á Íslandi/Norður-Atlantshafi

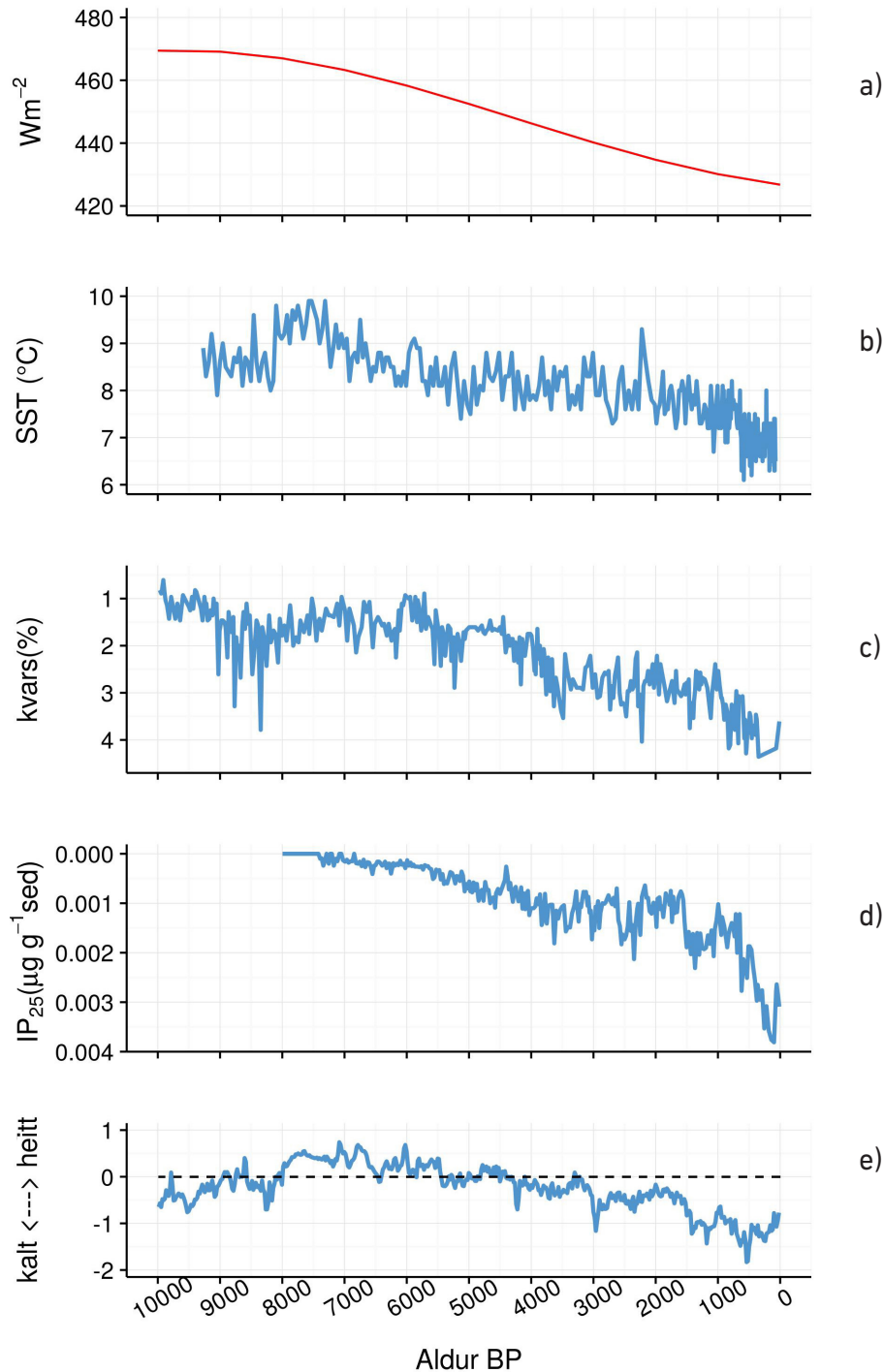
Setkjarnar hafa verið teknir úr fjölda stöðuvatna víðs vegar um landið<sup>t.d. 9,10,11,12,13</sup> og sjávarsetkjarnar af landgrunni Íslands<sup>t.d.14,15,16,17,18</sup>. Því er komin ágæt mynd af loftslagssögu Íslands á *nútíma*. Almenn hafa íslensku gögnin mjög góða upplausn en setmyndunarhraði hér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

Þótt meginrættir loftslagssögu Íslands og nágrennis á *nútíma* séu óbreyttir frá síðustu skýrslu gefa nýjar rannsóknir nákvæmari mynd af umfangi náttúrulegra sveiflna, stærð atburða og tímasetningu þeirra, auk þess

sem bæst hefur við í þekkingu á undirliggjandi ferlum og áhrifaþáttum. Undanfarið hefur verið unnið að því að þetta mælingar og fá nákvæmari aldursgreiningar, sérstaklega fyrir síðustu þrjú þúsund árin.

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

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



Mynd 4.11 a) Inngeislun sólar í júlímánuði við  $65^{\circ}N$  (sjá tilvísun 33). b) Yfirborðshiti sjávar (SST) að sumarlági metinn út frá kísilþörungum úr sjávarsetskjarna MD99-2275, sem tekinn var af norðanverðu landgrunni Íslands (sjá tilvísun 18). c) Magn ísrekens efnis í kjarna MD99-2269, sem tekinn var við Húnaflóa, gefur vísbendingar um hafisútbreiðslu (sjá tilvísun 40). Athugið að lóðrétti ásin er öfugur, en hærra gildi þýðir meiri hafis. d) Hafisferill metinn með greiningu lífmassa, IP<sub>25</sub>, sem finna má í sjávarsetskjarnanum MD99-2269 sem tekinn var við Húnaflóa (sjá tilvísun 30). Lóðrétti ásin er öfugur en hærri IP<sub>25</sub> gildi gefa vísbendingar um meiri hafis. e) Samsettur stöðuvatnaferill sem sýnir breytingar á sumarlága/loftslága. Ferillinn er byggður á nokkrum veðurvísnum úr stöðuvatnaseti frá Haukadalsvatni og Hvítárvatni (sjá tilvísun 9). Langtímabreytingar í gögnunum fylgja breytingum á inngeislun sólar að sumarlága á norðurhveli. Myndin sýnir gott samræmi á milli stöðuvatnaferilsins, sjávarhita og hafisgagna. Hljásti tími nútíma kemur fram fyrir um 6-8 þúsund árum. Hægfara kólnun kemur fram í gögnunum frá því fyrir um 5500 árum síðan og merki um hafis koma fram á þeim tíma. Litla ísöld ~1300–1900 AD markar kaldasta tíma nútíma. Tímakvarði myndarinnar er í árum BP sem sýnir ár fyrir 1950.



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

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

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

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

Hljásti tími *nútíma* á Íslandi (bæði á landi og sjó) kemur þó fram seinna eða fyrir um 6–8 þúsund árum<sup>9,13,14,17,18</sup>. Talið er að þessi seinkun hafi stafað af streymi bræðsluvatns frá ísbreiðum meginlandanna sem hafði áhrif á hafstrauma, dró úr innflæði á hlýjum söltum sjó sem leiddi til kaldara og óstöðugra

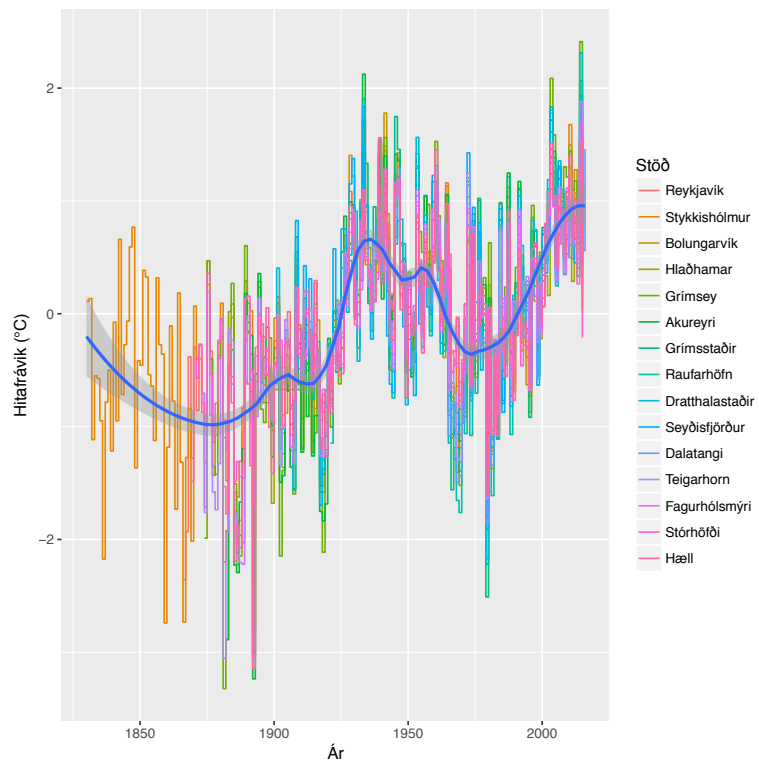
veðurfars<sup>36,37</sup>. Á hlýjasta skeiði *nútíma* er talið sennilegt að Langjökull hafi ekki verið til staðar<sup>19,38</sup> og að hiti hafi verið um 3°C hærri en á viðmiðunartímabilinu 1961–1990<sup>19</sup>. Með breytingum í tegundaflóru götunga og kísilþörungum í sjávarsetskjörnum má sjá að áhrif Irmingerstraumsins, sem ber hlýjan og saltan sjó að ströndum Íslands, hafi verið í hámarki á þessum tíma<sup>14,15,17</sup>.

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

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

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

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



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

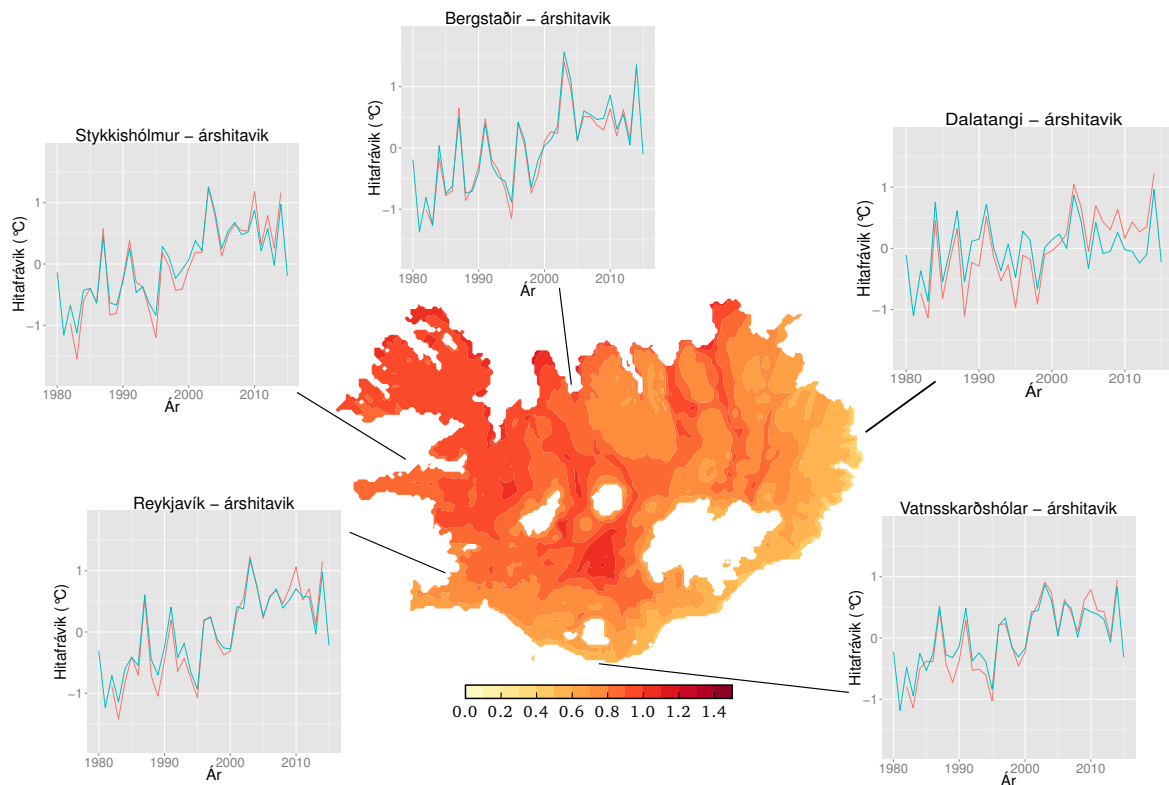
Vel er þekkt að veðurfarsbreytingar á norðurslóðum á nútíma eru mun umfangsmeiri en hnattrænar breytingar. Þessi mögnun er einkum tengd flökti á hafísþekju og skyldum ferlum<sup>36</sup>. Samkvæmt líkanreikningum var á hlýjasta skeiði nútíma á Íslandi um 3°C hlýrra en á árabílinu 1961–1990 en um 1°C kaldara á kaldasta skeiði litlu ísaldar<sup>38</sup>. Þetta mat gefur

því 4.0°C útslag hitabreytinga á nútíma<sup>38</sup>. Í samanburði er mat Marcott o.fl.<sup>35</sup> á meðalhitabreytingum á jörðinni á nútíma um 0.7°C og eru breytingarnar því töluvert meiri á Íslandi.

### 4.3 Veðurfar á Íslandi á tíma samfelldra mælinga

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

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



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

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

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

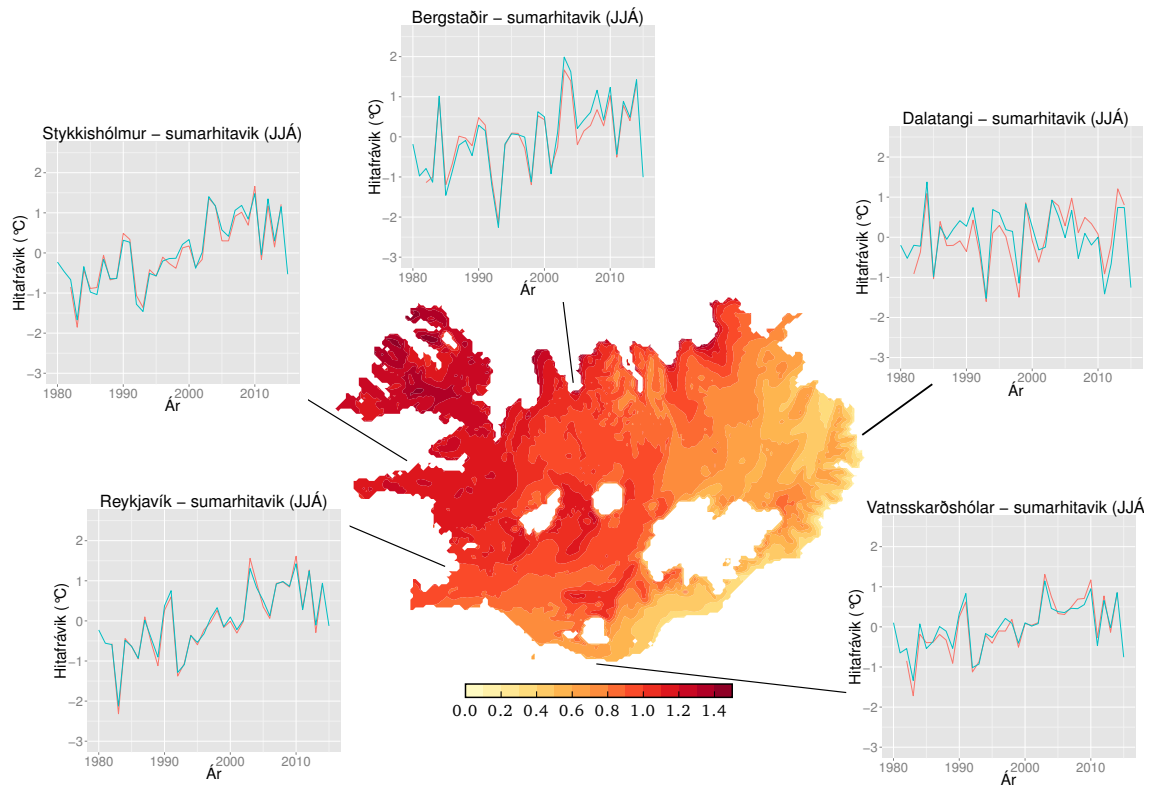
Kortið sýnir að hlýnunin er meiri vestan- og norðvestantil á landinu, en minnst á landinu austanverðu. Línuritin frá stöðvunum sýna einnig að hlýnunin var einna áköfust um aldamótin.

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

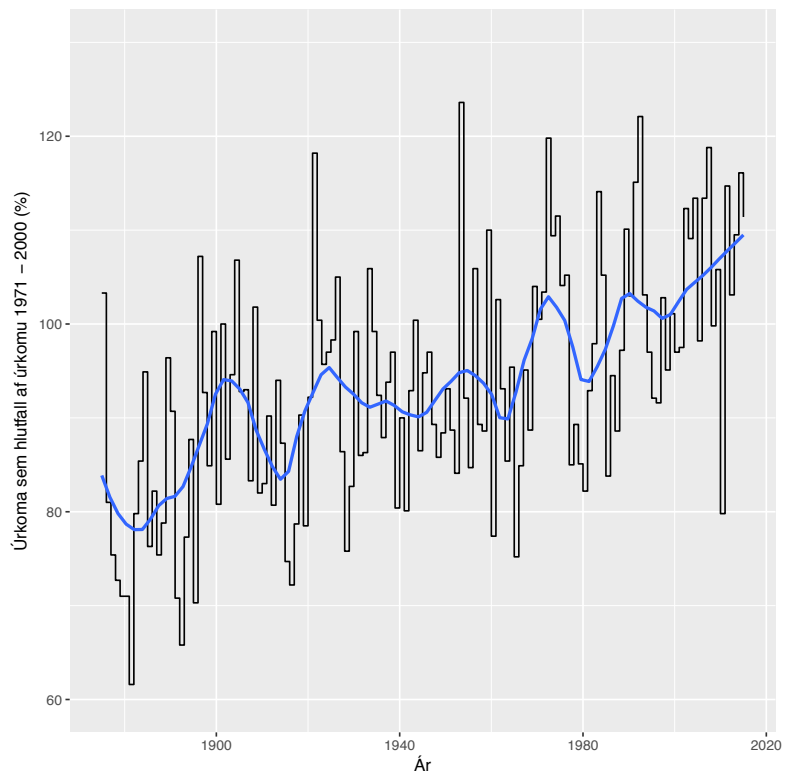
sýna ekki að hlýnun að sumarlagi hafi verið ákafari um aldamótin.

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

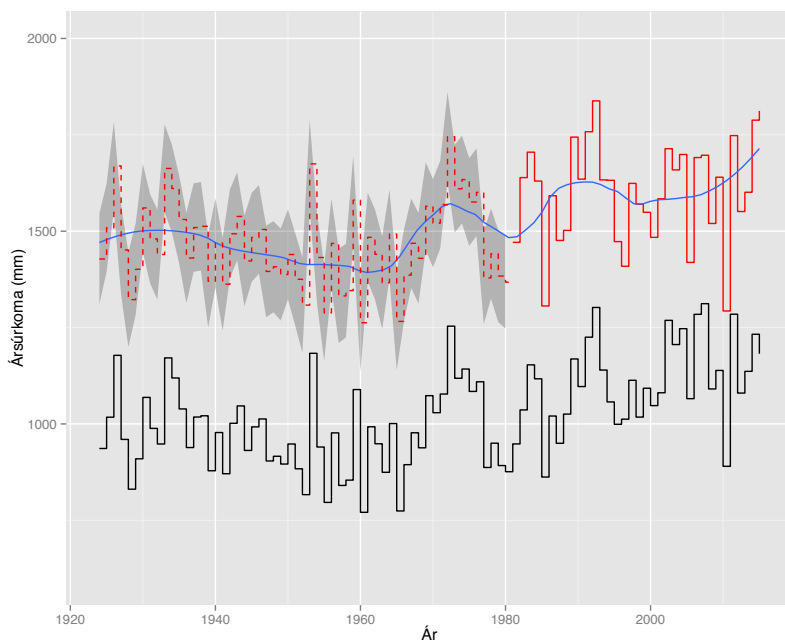
Samfelldar úrkomumælingar á Íslandi eru til frá því á miðri 19. öld. Þó að net mælistöðva hafi framan af verið gisið má nota þær til þess að leggja mat á úrkomuþróun á síðustu 160 árum. Mynd 4.15 sýnir hlutfallsbreytingar í úrkomu frá 1857. Hlutfallsleg úrkoma hvers mánaðar, miðað við tímabilið 1971–2000,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



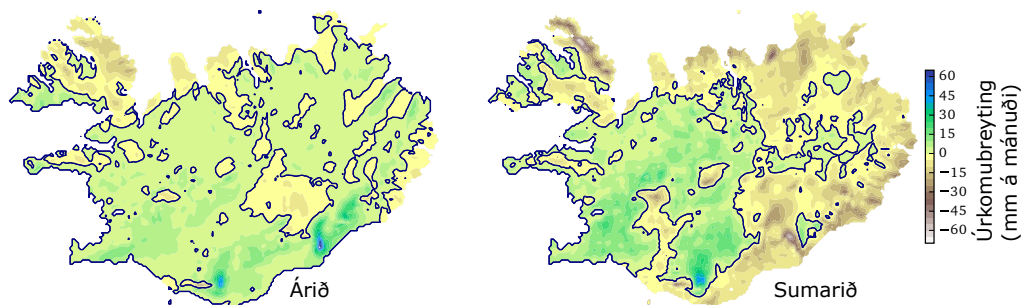
Mynd 4.14 Hlýnun að sumarlagi á Íslandi síðustu áratugi. Sambærilegt við mynd 4.13 nema hér eru einungis notuð gögn fyrir sumarmánuðina (júní til ágúst).



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



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



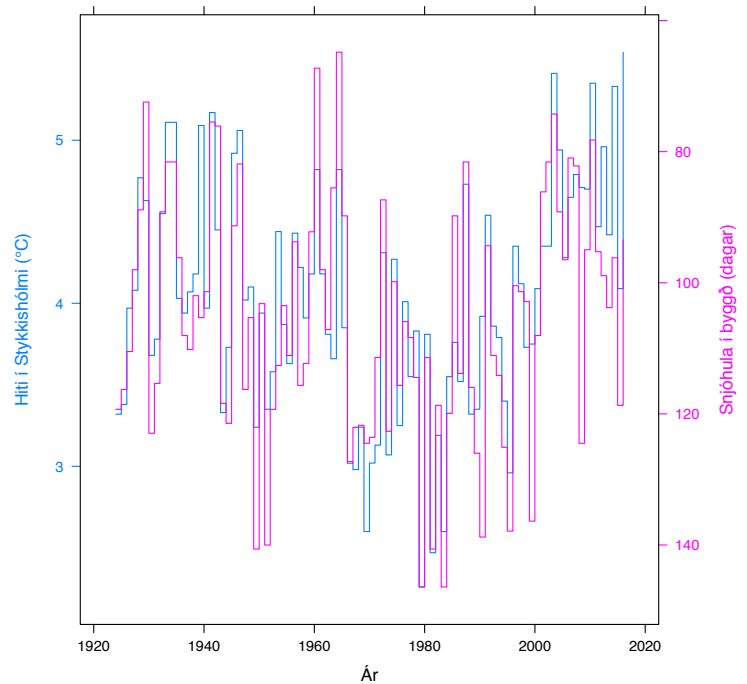
Mynd 4.17. Breytingar á úrkomu (mm/mánuði) milli tímabilsins 1985–1999 og tímabilsins 2000–2014. Byggt á íslensku endurgreiningunni. Kortið vinstra megin sýnir niðurstöður fyrir árið í heild sinni en hægra megin eru niðurstöður fyrir sumarmánuðina (júní til ágúst).

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

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

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

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



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

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

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

#### 4.4 Sviðsmyndir og CMIP5 líkön

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

##### 4.4.1 Úrvinnsla fyrir Ísland og nærliggjandi hafsvæði

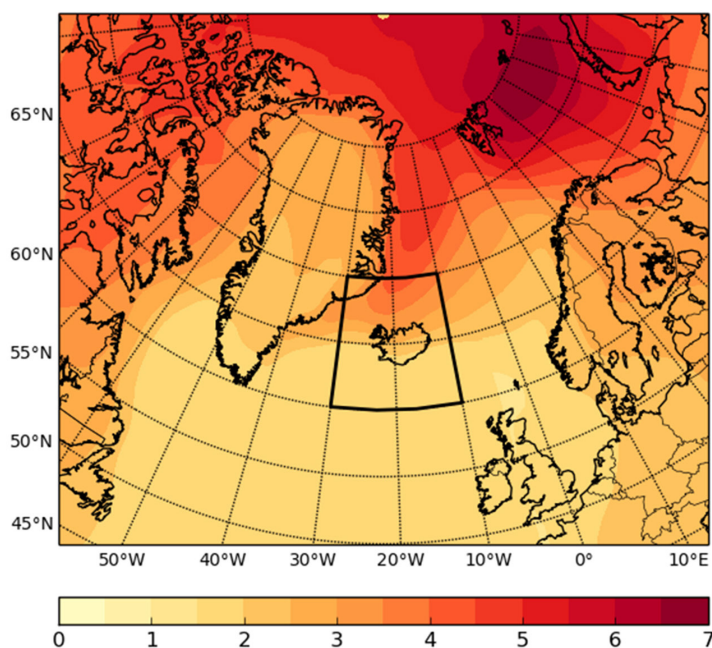
Eins og í fyrri skýrslu vísindanefndar voru skoðaðar breytingar í reit sem þekur Ísland og nærliggjandi svæði og reiturinn sem afmarkast af 60°–70°N og 10°–30°V skoðaður sérstaklega (mynd 4.19). Til þæginda verður þessi reitur hér að neðan kallaður Íslandsreiturinn. Í næstu greinum verða raktar niðurstöður

## 4A Endurgreiningar

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

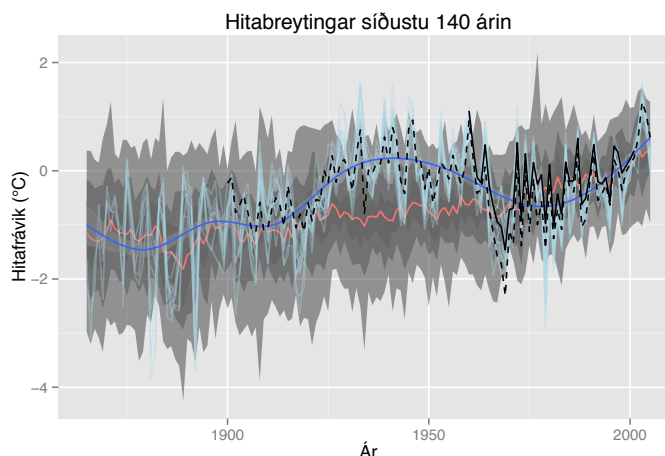
Sú endurgreining ECMWF sem er mest notuð hér er sk. ERA Interim greining, en hún nær frá 1979 en þá urðu gervihnattagögn nægilega góð til að hægt væri að nota þau í greiningum. ERA Interim er hnattræn greining og hentar vel til að skoða þróun lofthjúpsins á stórum kvarða. Möskvastærð reikninetts er hins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

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



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

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



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

#### 4.4.2 Loftslagslíkön og hitabreytingar í Íslandsreitnum síðustu 140 árin

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

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

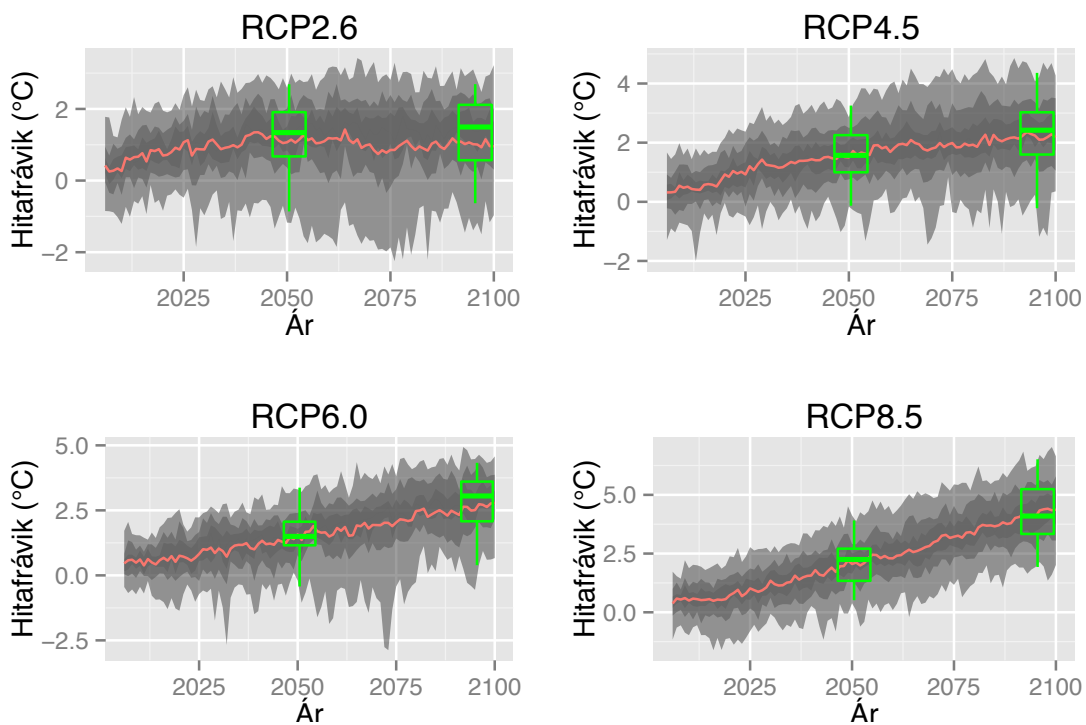
stórra eldgosa og hlýnunar vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa.

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

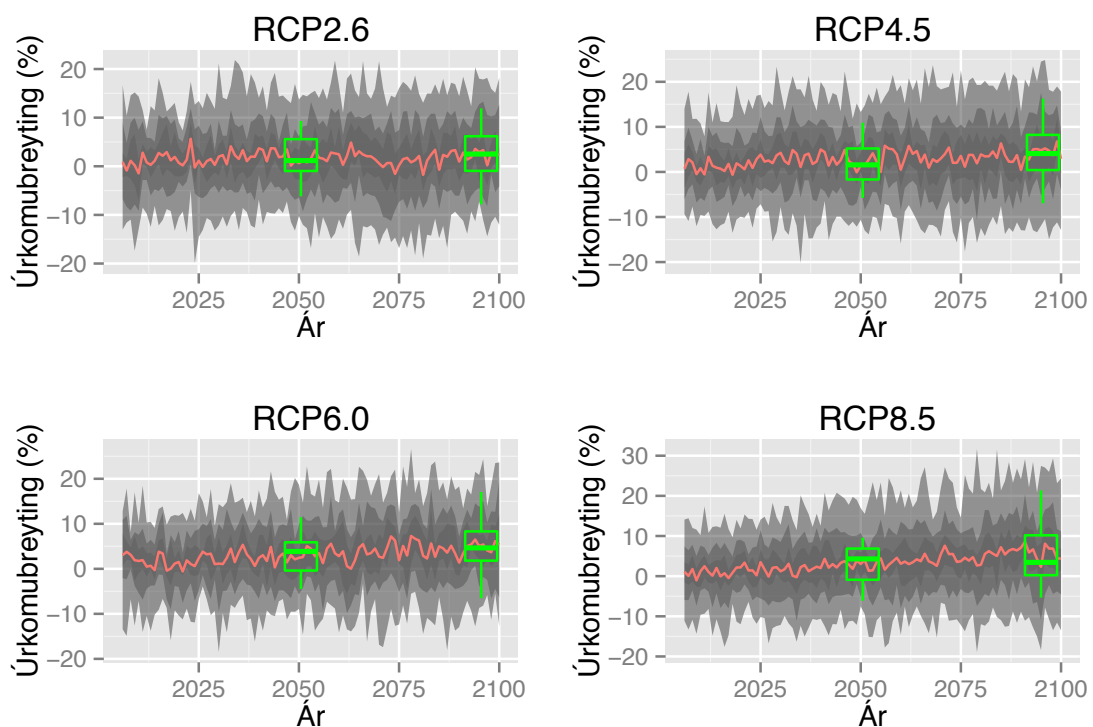
Mynd 4.20 sýnir niðurstöður 42 loftslagslíkana fyrir hitafarsbreytingar í Íslandsreitnum síðustu 140 árin. Í samræmi við 5. matsskýrslu IPCC eru öll frávik miðuð við tímabilið 1986–2005. Meðaltal líkananna er sýnt sem rauð lína, en dreifing niðurstaðna umhverfis meðaltalið er sýnd með borðum sem afmarka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

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





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



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

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

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

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

#### 4.4.3 Hita- og úrkomubreytingar í framtíðarsviðsmyndum

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

#### 4.4.4 Tölur sem sýna samanburð sviðsmynda

Upplýsingarnar sem fram koma í kassaritunum eru dregnar saman í töflunum hér á eftir. Hver tafla sýnir hlutfallsmörk (5%, 25%, 50%, 75% og 95%) hita- eða úrkomubreytinga við miðbik aldarinnar eða aldarlok. Til útskýringar sýna dálkarnir þau mörk þar sem

tiltekin hlutföll líkana eru „jafnköld eða kaldari“ (tölur 4.1 og 4.2) eða „jafnþurr eða þurrari“ (tölur 4.3 og 4.4). Þannig er hlýnun í helmingi líkana minni eða jöfn þeim gildum sem sýnd eru í 50% dálkinum í töflum 4.1 og 4.2 og úrkomuaukningin í helmingi líkana er minni eða jöfn þeim gildum sem sýnd eru í 50% dálkum í töflum 4.3 og 4.4.

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

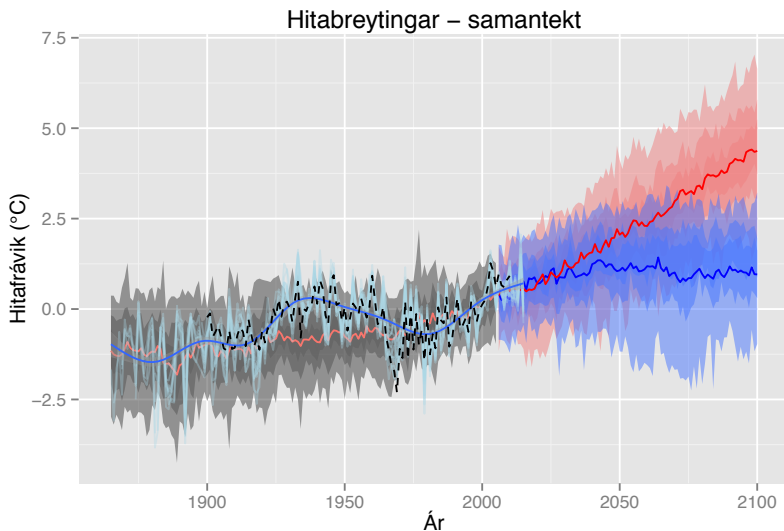
Tafla 4.1 Hitafarsbreytingar (°C) í Íslandsreitnum frá meðaltali árána 1986–2005 til 2046–2055.

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

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

Sambærilegar tölur má finna í þriðja kafla V2008. Þar er þó notast við útreikninga frá CMIP3 verkefningu sem byggjast á eldri sviðsmyndum um aukingu geislunarálags<sup>51</sup> og öðrum loftslagslíkönunum<sup>52</sup>. Samanburður<sup>53</sup> á þeim sviðsmyndum þar sem þróun geislunarálags er hvað líkust<sup>54</sup> sýnir að framreiknuð hlýnun í CMIP5 líkönunum er aðeins meiri en í V2008, og óvissubilið stærra<sup>55</sup>.

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



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

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

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

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

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

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

Tölur 4.3 og 4.4 sýna breytingar á úrkomu í Íslandsreitnum fyrir CMIP5 líkönin. Álíka samanburð má gera á framreiknuðum úrkomubreytingum og gert var fyrir hlýnun. Sá samanburður sýnir að úrkoma

eykst minna í CMIP5 en í niðurstöðum CMIP3 sem fjallað var um í fyrri skýrslu<sup>58</sup>. Hins vegar eru óvissumörk ríflig og erfitt að draga ályktanir hvað úrkomubreytingar varðar um mun á eldri niðurstöðum og þeim sem kynnt eru hér.

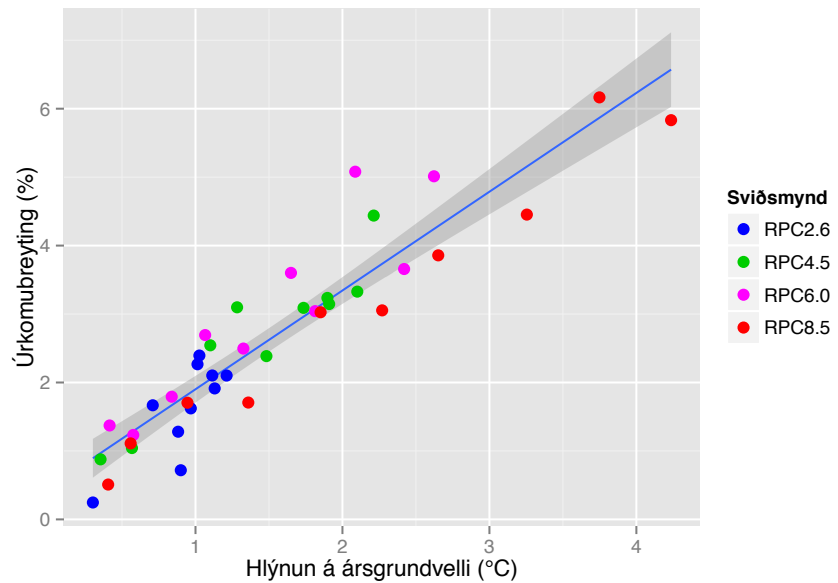
#### 4.4.5 Samantekt á breytingum ársmeðaltala hita og úrkomu.

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

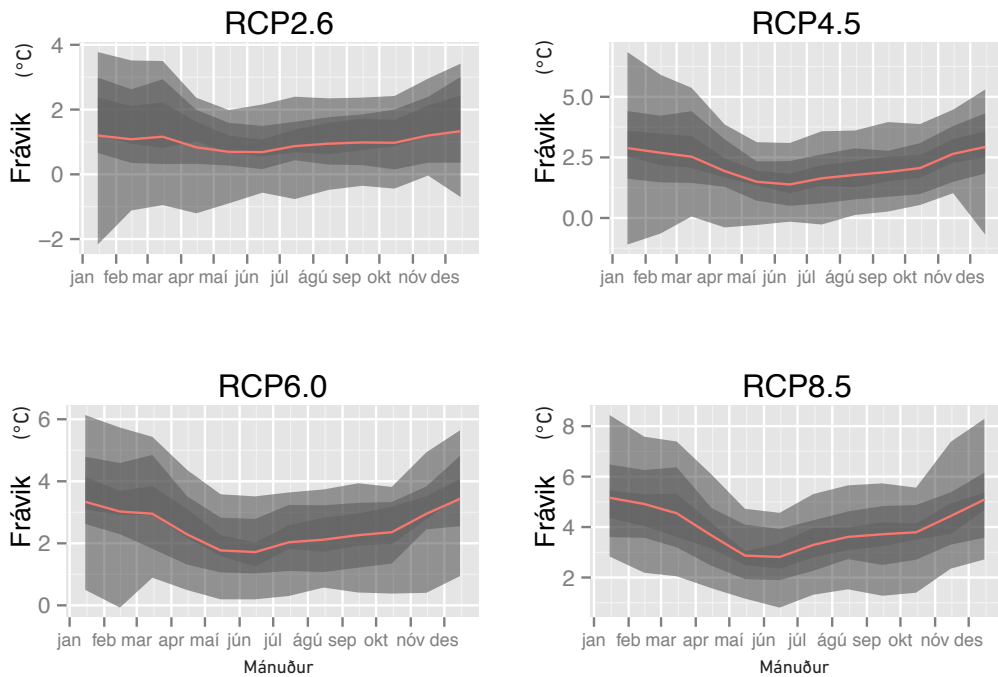
Mynd 4.23 sýnir álíka samantekt, en að auki eru sýndar niðurstöður sviðsmynda RCP8.5 (rauðskyggt) og RCP2.6 (bláskyggt). Sem fyrr eru niðurstöður ERA20C endurgreiningarinnar teiknaðar inn og veðurstöðvarnar sýndar sem ljósbláar línur.

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

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



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



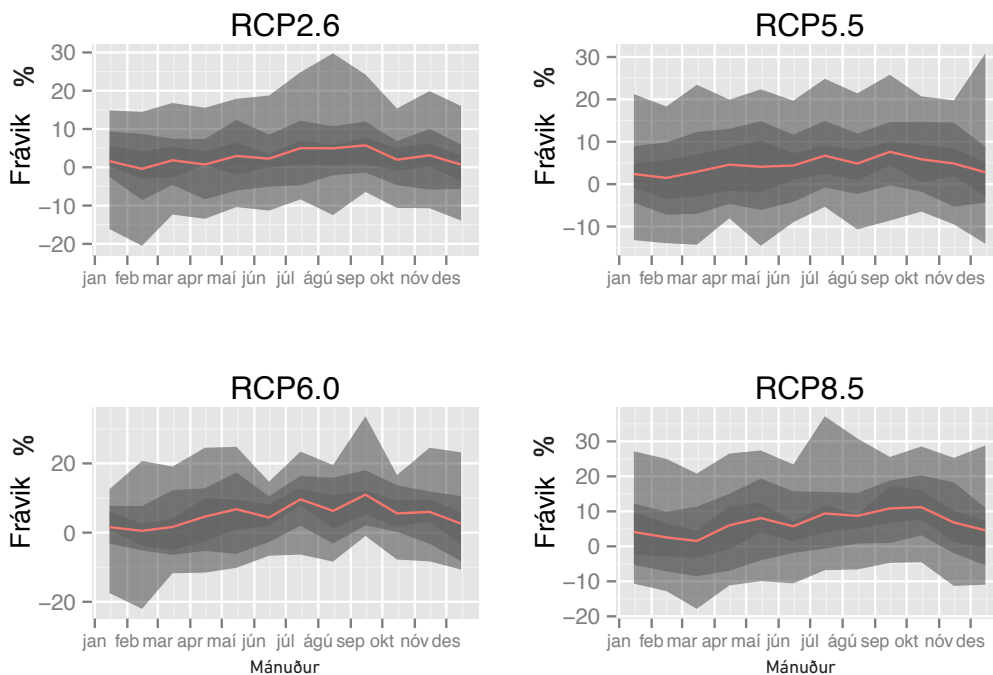
Mynd 4.25 Breytingar á árstíðasveiflu hita (°C) í sviðsmyndum RCP2.6–RCP8.5. Sýndar eru breytingar frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.

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

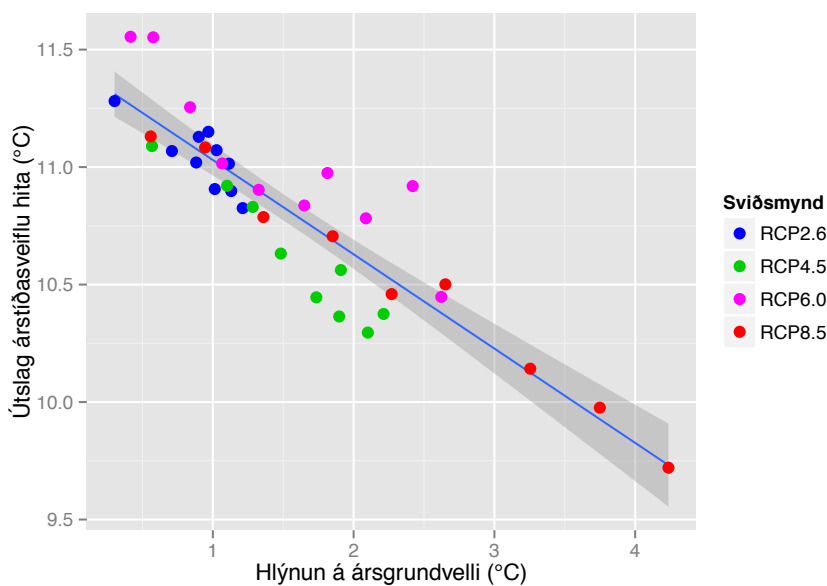
fram eru úrkomubreytingar mun sveiflukenndari en breytingar í hitafari og því meiri óvissa um þessa niðurstöðu.

#### 4.4.6 Breytingar á árstíðasveiflu

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



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



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

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

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

sumarlagi, og næmi munurinn um helmingi af hlýnun á ársgrundvelli.

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

## 4B Hafís á norðurslóðum

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

Í skýrslu IPCC frá 2013 er fjallað um hafísútbreiðslu eins og rakið er í kafla 3. Síðan skýrslan kom út hefur hafísútbreiðsla á norðurhveli haldið áfram að dragast saman. Mynd 4.28 sýnir mælingar á stærð hafísbreiðunnar frá upphafi gervihnattaaldrar<sup>59</sup> og eru allar tölur í milljónum ferkílómetra. Myndin sýnir árstíðasveiflu útbreiðslunnar og er hámarkið yfirleitt náð í mars, en lágmarkið í september. Á myndinni sýna bláar línur mælingar í upphafi tímabilsins en brúnar línur mælingar á síðustu árum. Upp úr 1980 var árshámark útbreiðslu um 16.5 milljón km<sup>2</sup> og árslágmarkið rúmlega 7 milljón km<sup>2</sup>. Síðustu ár hefur hámarkið fallið í um 14.5 milljón km<sup>2</sup> en lágmarkið hefur fallið enn meira. Minnst útbreiðsla varð haustið 2012, 3.4 milljón

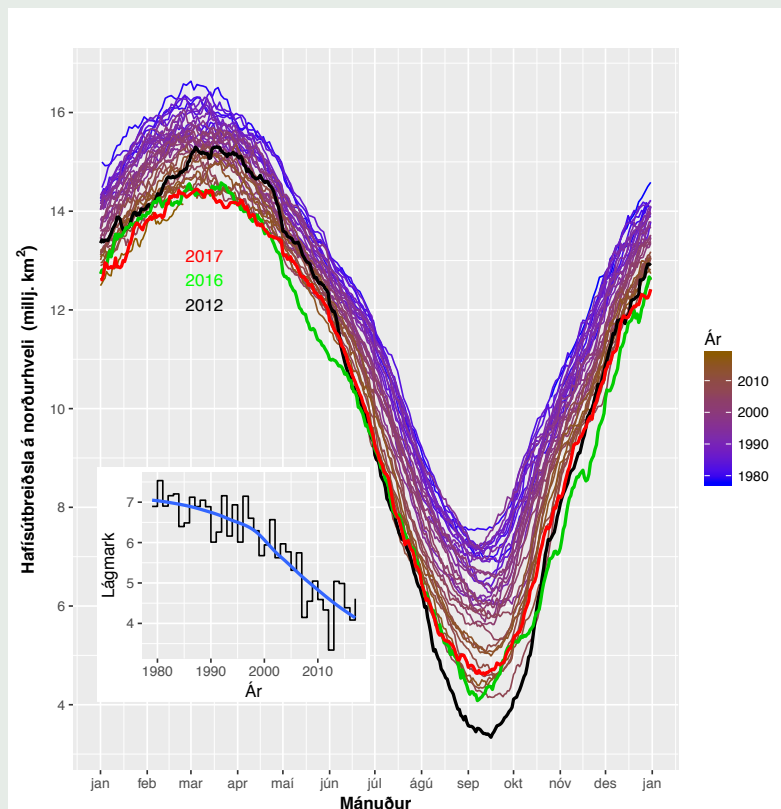
km<sup>2</sup>, en árin 2007 og 2016 var árslágmarkið um 4.1 km<sup>2</sup>. Árin 2012, 2016 og 2017 eru merkt sérstaklega inn á myndina. Innskotsmynd sýnir hvernig árslágmarkið hefur fallið frá upphafi mælinga og útjafnaður ferill sýnir að samdrátturinn varð ákafari í lok síðustu aldar.

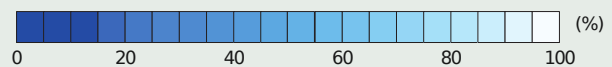
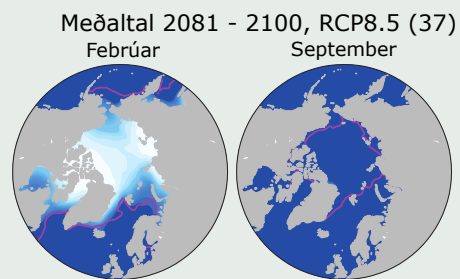
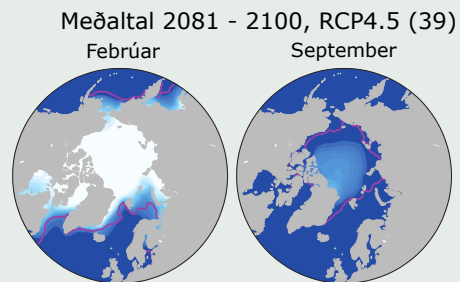
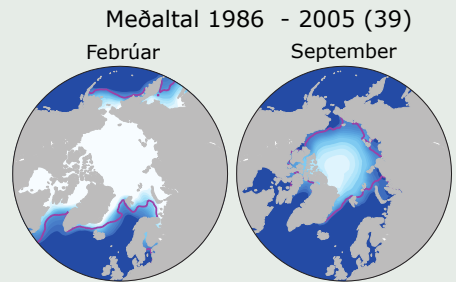
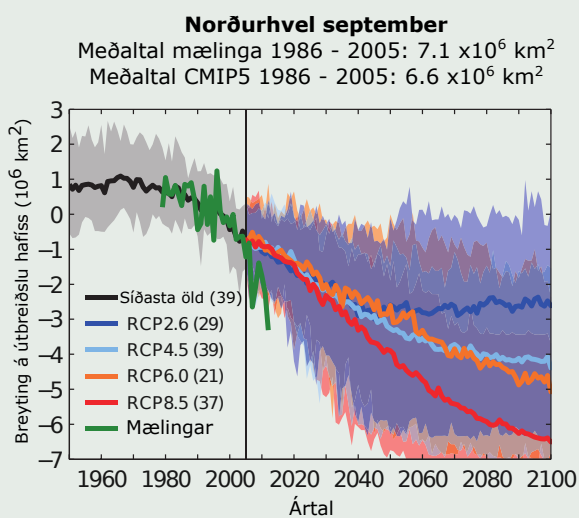
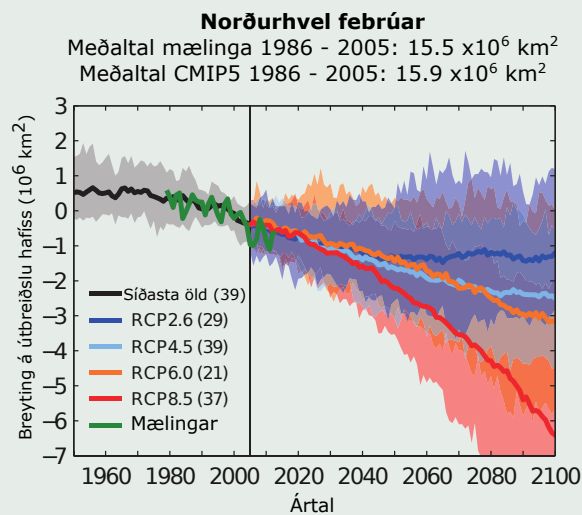
Mynd 4.29 sýnir reikniniðurstöður CMIP5 líkana auk mælinga. Myndin til vinstri sýnir febrúarmánuð þegar útbreiðslan er sem mest en tími lágmarksútbreiðslu í september er sýndur á myndinni til hægri. Á tímabilinu fyrir 2005 ná líkönin sæmilega að herma útbreiðslu íssins, en verr eftir það. Sérstaklega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

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

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

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





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

2081–2100 fyrir sviðsmyndir RCP4.5 og RCP8.5. Rauða línan sýnir raunverulega útbreiðslu á tímabilinu 1986–2005. Hvað hafsvæðið norðan við Ísland varðar er ljóst að líkónin ofmátu hafismagn að vetri til fyrir 1986–2005. Þrátt fyrir að framfarir hafi orðið í hafislíkönunum frá 2007 eru enn verulegar skekkjur í

Mynd 4.30 Meðalþéttleiki hafiss í reikniniðurstöðum CMIP5 líkana fyrir tímabilin 1986–2005 og 2081–2100 fyrir sviðsmyndir RCP4.5 og RCP8.5. Tölur innan sviga sýna fjölda líkana fyrir hverja sviðsmynd. Reikniniðurstöður voru brúaðar á  $1^\circ \times 1^\circ$  net og meðaltal reiknað og niðurstöður teiknaðar fyrir 15% þéttleika eða meira. Findregin ljósrauð lína sýnir hvar 15% mörkin lágu samkvæmt mælingum fyrir tímabilið 1986–2005 (byggt á mynd 12.28 í IPCC, 2013).

niðurstöðum þeirra, a.m.k. fyrir Norður Grænlandshaf að vetri. Sem fyrr ber líkönun þó saman um að á síðari hluta aldarinnar muni hafis nánast hverfa síðsumars úr Norður-Grænlandshafi en minnkun vetrarissins verði ekki jafn áberandi, en þó merkjanleg.

## 4.5 Niðurstöður loftslagslíkana með hærri upplausn

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

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

Fyrsta rannsóknin sem bar saman niðurstöður ólíkra háupplausnarlíkana fyrir Ísland notaði þrjú líkön, þar af tvö líkön frá ENSEMBLES verkefnum, þar sem jaðarinn lá vestan við landið<sup>62</sup>. Niðurstöður þessara líkana voru bornar saman innbyrðis og einnig við niðurstöður hnattrænna líkana. Úrkoma og hitafar reyndist trúverðugra í háupplausnarlíkönunum og því meir sem upplausn líkansins var finni. Hlýnun í þessum líkönum var um 0.2–0.4°C á áratug fram að miðbiki aldarinnar en hlýnun á hafsvæðum umhverfis landið var minni, eða 0.15–0.3°C á áratug. Á sama tímabili jókst úrkoma um u.þ.b. 1% á áratug, en úrkomuaukning í háupplausnarlíkönunum var í heildina

sambærileg við niðurstöður hnattrænu líkananna. Niðurstöður bentu þó til þess að aukningin yrði meiri yfir landi en hafi.

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

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

### 4.5.1 Niðurvörðun á CORDEX líkönunum

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

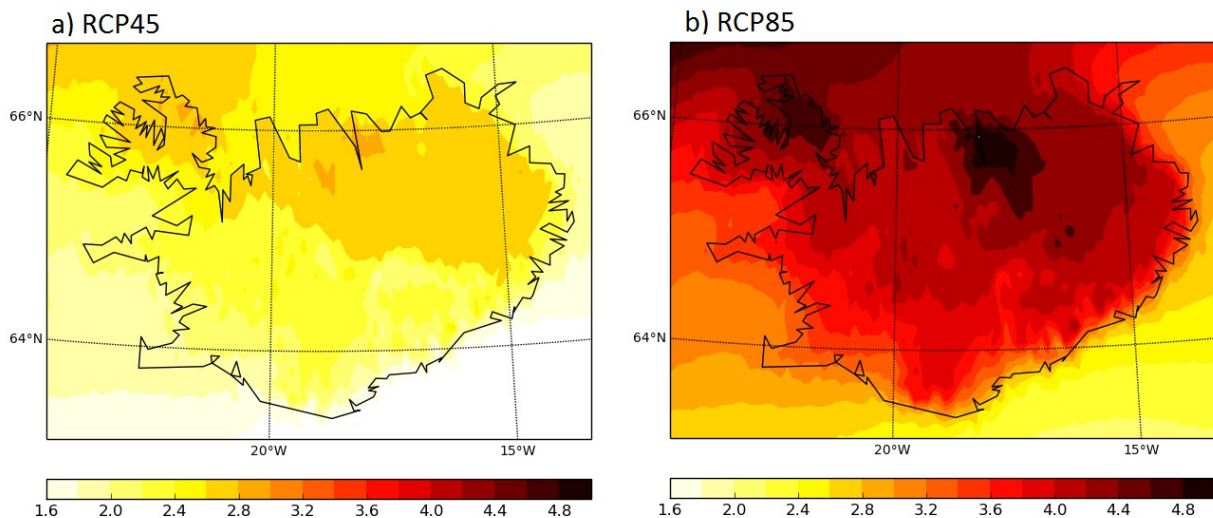
Hlýnunin er auðvitað meiri í sviðsmynd RCP8.5 en RCP4.5 en ef litið er til allrar aldarinnar er hún ívið meiri í RCA4 líkaninu og einnig í niðurstöðum sem byggjast á innlagsgögnum úr HADGEM2.

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



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

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

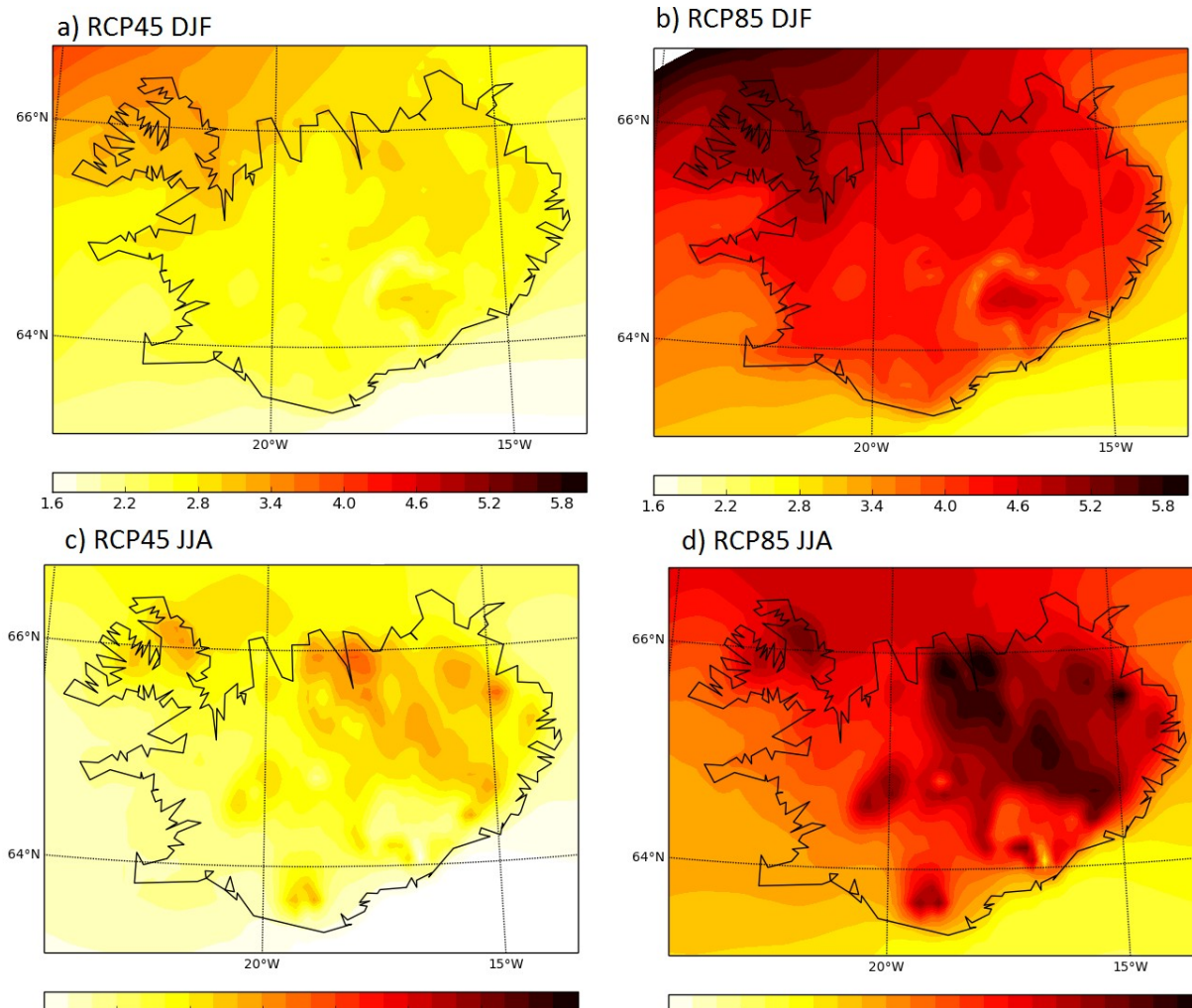


Mynd 4.31 Hlýnun (°C) frá tímabilinu 1981–2000 til 2081–2100 fyrir hvora sviðsmynd í töflu 4.13. Hvor mynd um sig er meðaltal fjögurra samsetninga af háupplausnarlíkani og hnattrænu líkani. Sjá nánar heimild 64.

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

Meiri hlýnun norðanlands þarfnast nokkurrar umræðu, því hún gæti verið kerfisbundin skekkja í reikniniðurstöðum. Flest loftslagslíkön sýna meiri

hlýnun á heimskautasvæðum norðursins en sunnar á hnettinum og er talið að það sé trúverðug niðurstaða. Mynd 4.19 sýnir meðaltal allra CMIP5 líkana fyrir sviðsmynd RCP4.5 og þar sést greinilega að það hlýnar meira á svæði meðfram austurströnd Grænlands. Þetta er nokkuð dæmigerð niðurstaða CMIP5 líkana og endurspeglar samdrátt hafisþekju á N-Grænlandshafi. Það getur hins vegar valdið kerfisbundinni skekkju að í

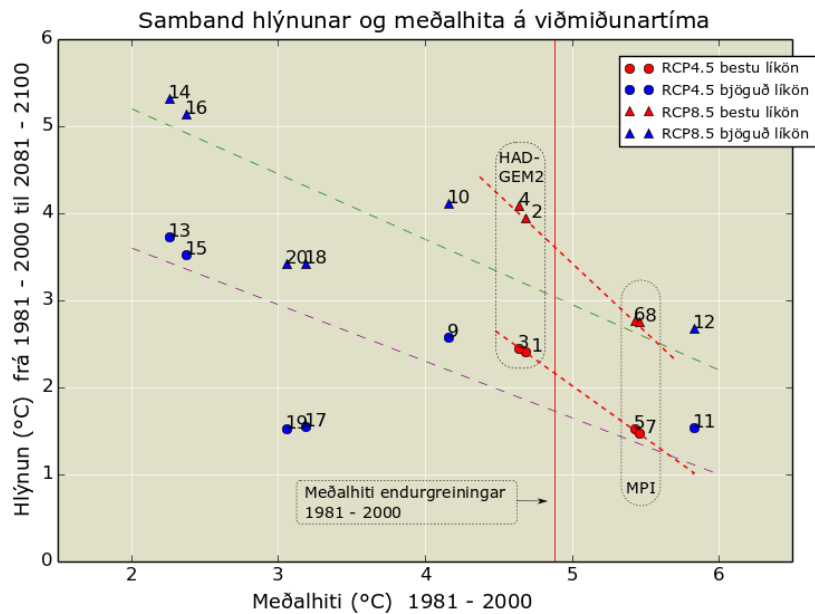


Mynd 4.32 Hlýnun (°C) yfir háveturinn (DJF) og hásumarið (JJA) frá tímabilinu 1981–2000 til 2081–2100 fyrir hvora sviðsmynd í töflu 4.13. Hvor mynd um sig er meðaltal fjögurra samsetninga af háupplausnarlíkani og hnattrænu líkani. Sjá nánar heimild 64.

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

Mynd 4.33 sýnir samband meðalhita líkana á viðmiðunartíma og þess hversu mikið hlýnar. Rauðu tákni sýna líkönin í töflu 4.13 og á myndinni sést að í

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



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

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

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

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

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

Mynd 4.14 sýnir hlutfallslegan fjölda sumardaga þar

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

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

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

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

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

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

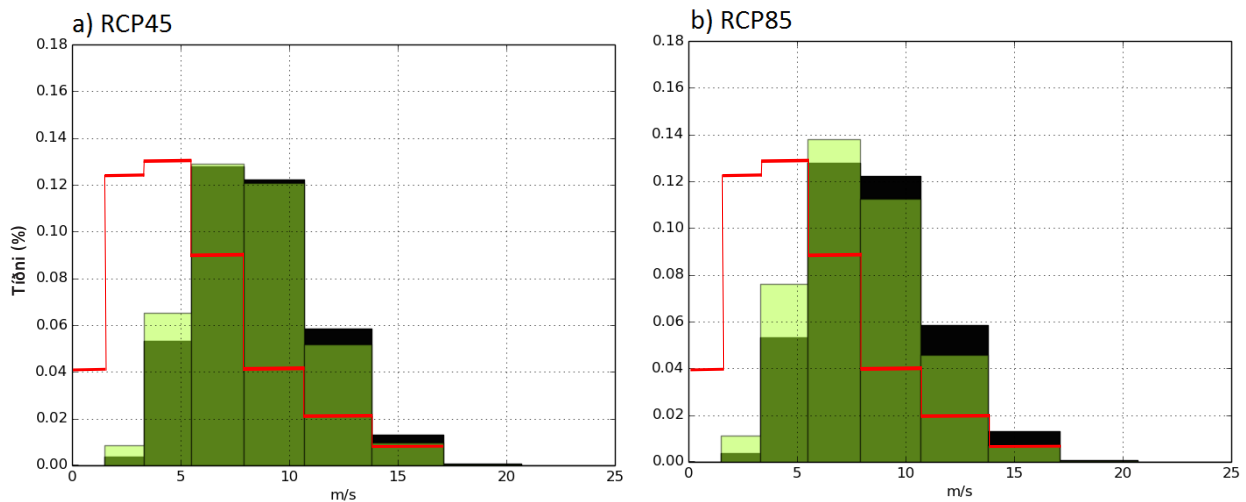
Úrkomubreytingar eru ekki ekki jafn eindregnar og hitabreytingar. Í öllum keyrslum RCA4 líkansins jókst úrkoma í sviðsmyndareikningum allstaðar á landinu, en í niðurstöðum reikninga með CCLM líkaninu dró úr úrkomu, sérstaklega austan til á landinu. Þetta ósamræmi gerir erfitt að túlka niðurstöður varðandi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

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

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

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

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



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

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

Í báðum sviðsmyndum eykst tíðni hægviðris (kuls, golu) og stinningsgolu en það dregur úr tíðni meiri vinds (kalda, stinningskalda, allhvass og hvassviðris). Samanburður við vindhraðamælingar í Reykjavík á

viðmiðunartímabilinu sýna að líkönin vanmeta tíðni andvara, kuls og golu, en ofmeta tíðni meiri vinds<sup>68</sup>. Með þeim fyrirvara að líkönin sýna of mikinn vind benda niðurstöðurnar til þess að frekar dragi úr vindhraða á öldinni. Hér mætti einnig hafa í huga að breytingar á gróðurfari munu mjög líklega draga úr vindi yfir landi. Ekki er þó ljóst hvort dregur úr tíðni verstu óveðra. Þegar kemur að óveðrum er áreiðanleiki CORDEX reikninga ekki nægur til að traustar niðurstöður fáiast um breytingar á óveðratíðni. Nánar er fjallað um óveðratíðni í grein 12.1.1.

## 4C Hafhringrás í Norður-Atlantshafi og loftslagsbreytingar

### Lóðréttá hringrásin (AMOC)

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

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

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

Ekki er talið líklegt að miklar breytingar verði á ríkjandi vindáttum við Norður-Atlantshaf á komandi öld og því er ekki líklegt að verulegar breytingar verði í láréttu yfirborðshringrásinni. Með hlýnandi sjó og breytingum á seltu yfirborðslaga kunna hins vegar að verða breytingar á lóðréttu hringrásinni. Hún virðist

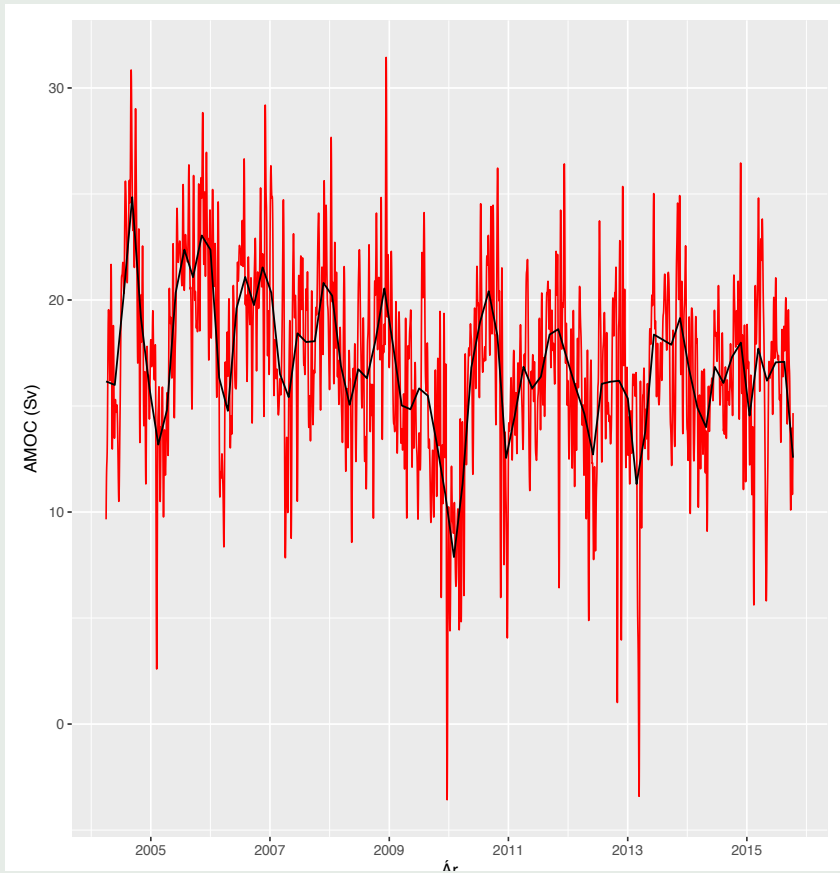
viðkvæm fyrir þeim breytileika úrkomu og ísbráðunar sem gert er ráð fyrir á næstu áratugum. Líklegt er að á síðasta jökulskeiði hafi þessi hringrás raskast verulega, en um nokkurt skeið hefur verið ljóst að veðurfarsveiflur þá urðu samfara breytingum á hafhringrás.

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

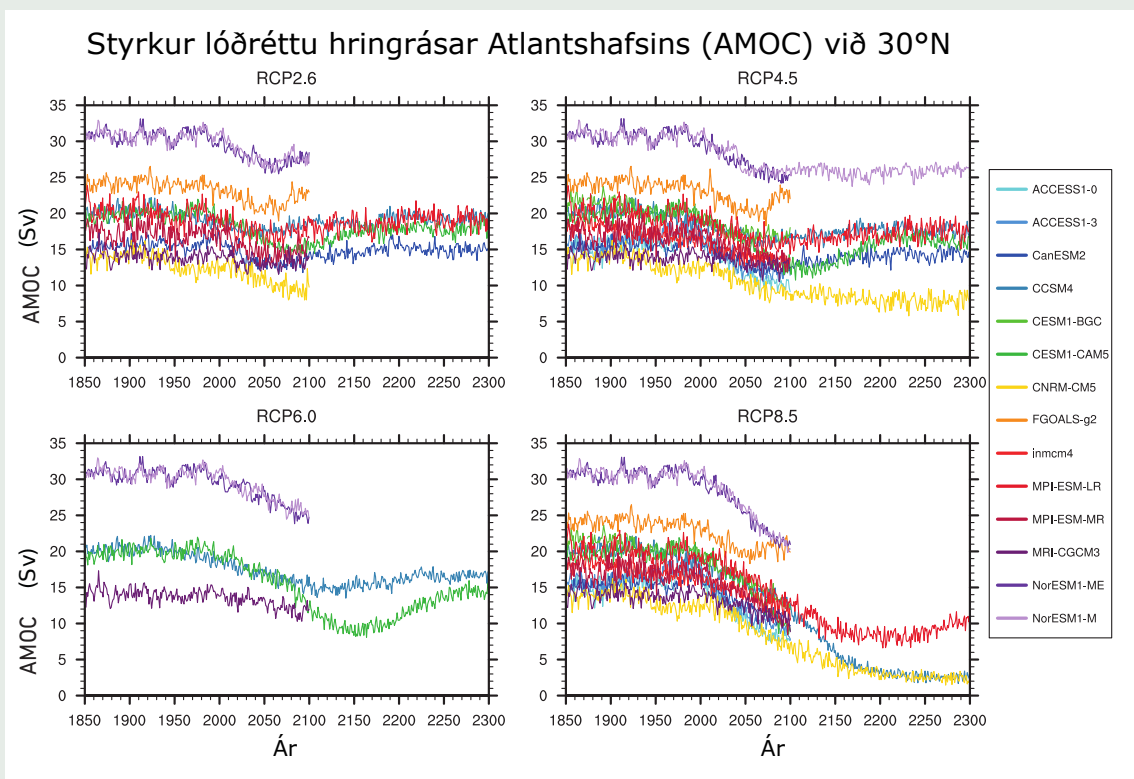
Mynd 4.35 sýnir mælingar á styrk AMOC frá 2004 til 2015. Myndin sýnir streymi yfirborðssjávar til norðurs yfir 26°N<sup>70</sup>. Að meðaltali er flæðið<sup>71</sup> 17 Sv en verulegar sveiflur eru í því, bæði innan árs og milli ára. Sýnt hefur verið fram á að samdráttur á styrk AMOC á tímabilinu 2004–2012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

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

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

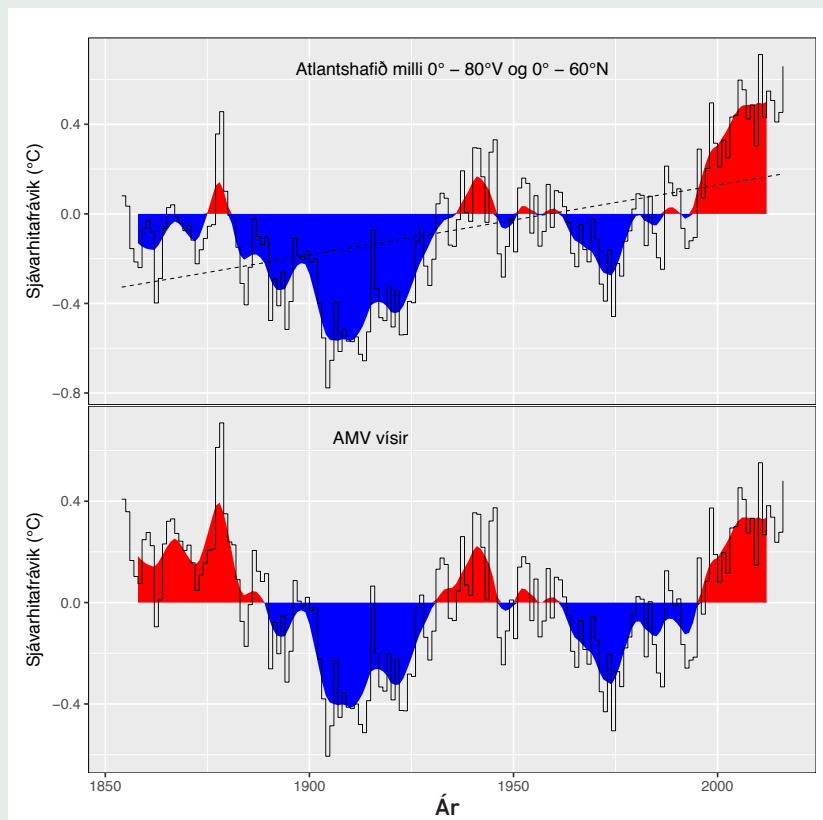


Mynd 4.35 Styrkur AMOC hringrásarinnar (Sv) frá 2004–2015. Myndin sýnir niðurstöður mælinga í sniði í Norður-Atlantshafi við 26°N (sjá nánar tilvísun 70).



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

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



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

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

### Áratugabreytileiki í lofti og hafi (AMV)

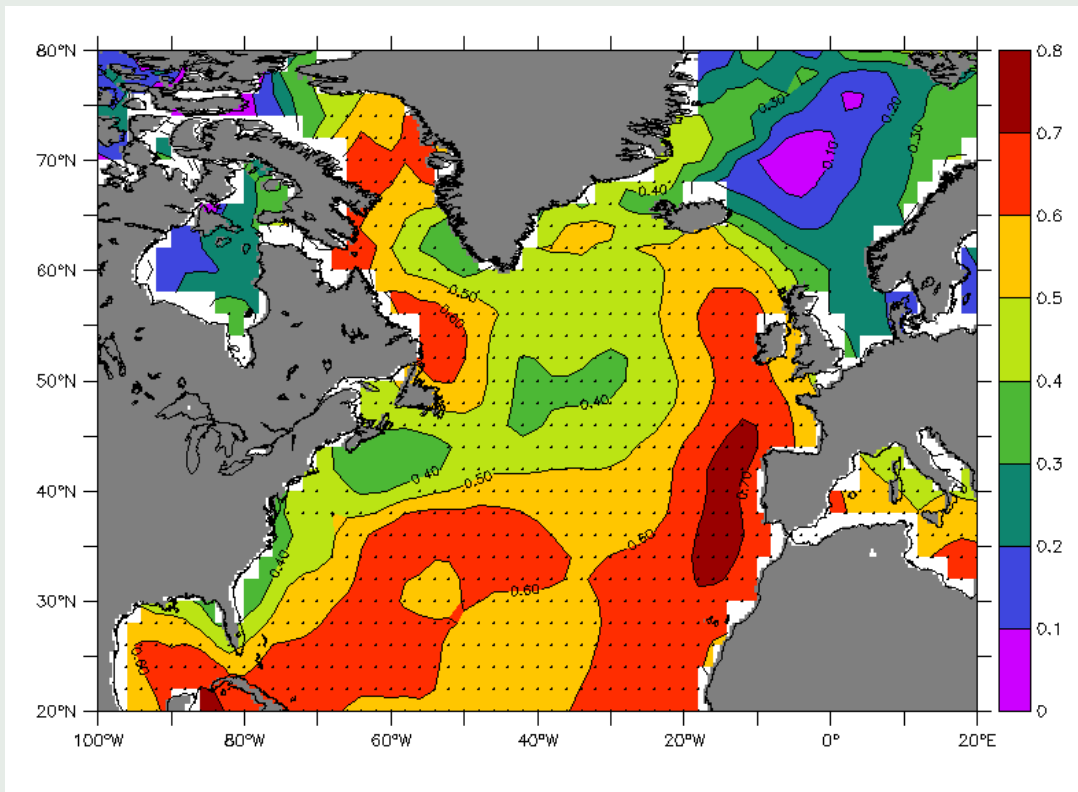
Sú sveifla í lofthjúpunum á Norður-Atlantshafssvæðinu sem mest ber á í gögnum er kölluð Norður-Atlantshafssveiflan (NAO) en hún lýsir tilviljanakenndum breytileika í mun á styrk Íslandslægðarinnar og Azoreyjahæðarinnar. Á Íslandi hefur þessi sveifla takmörkuð áhrif á hita, en áhrifa hennar gætir í úrkomu. Þessi breytileiki er þó aðallega milli ára, langtíma-breytileika gætir hins vegar í sjávarhita og er gjarnan

lýst með sk. AMV vísitölu<sup>77,78</sup>. Mynd 4.37 sýnir AMV vísitölu fyrir tímabilið 1854 til 2016 og þar sést að á síðari hluta 19. aldar kólnaði N-Atlantshaf, það hlýnaði síðan á fyrri hluta 20. aldar og kólnaði svo aftur. Síðustu áratugi hefur farið hlýnandi á ný. Gagnaröðin er stutt en útjafnaði ferillinn (sem er hinn eiginlegi AMV vísir) sýnir sveiflur sem taka um 70 ár að ganga yfir. Þessi sveifla er þó ekki með vel skilgreindan sveiflutíma, og fornveðurfarsrannsóknir<sup>79</sup> sýna að sveiflurnar geta tekið 55–70 ár og auk þess geta komið tímabil þar sem sveiflunnar verður ekki vart<sup>80</sup>.

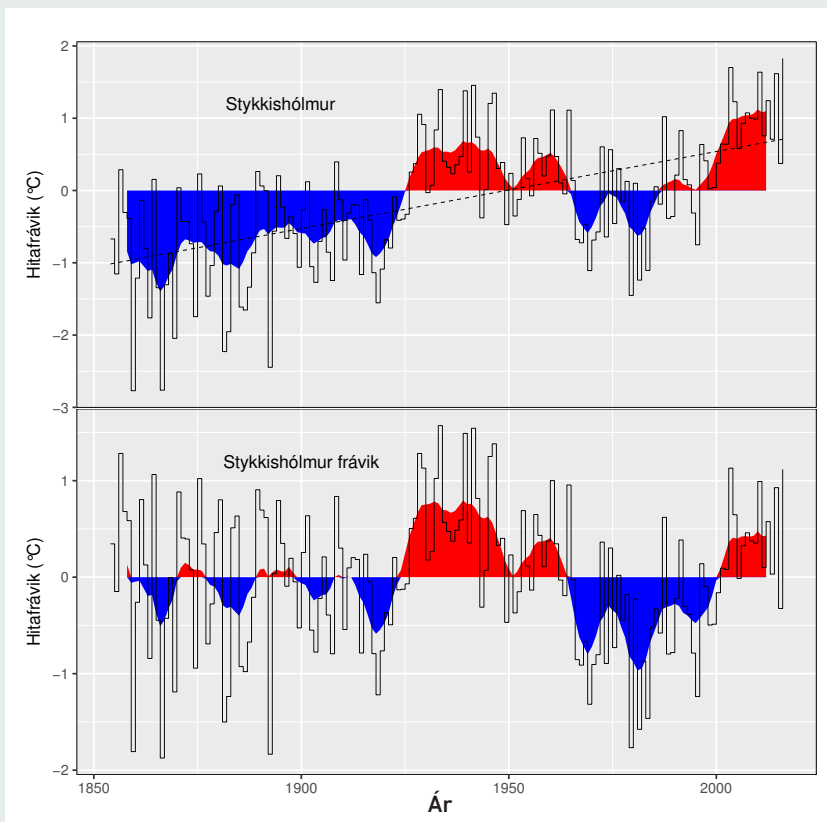
Mynd 4.38 sýnir á korti fylgni sjávarhita og AMV vísitölnnar. Punktarnir á myndinni afmarka það svæði þar sem fylgnin er marktæk<sup>81</sup> og það nær yfir megnið af Norður-Atlantshafi, en þó ekki norður fyrir Ísland. Fylgnin er mest sunnan- og austantil á hafsvæðinu, og er mest ríflega 0.7 á takmörkuðu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

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

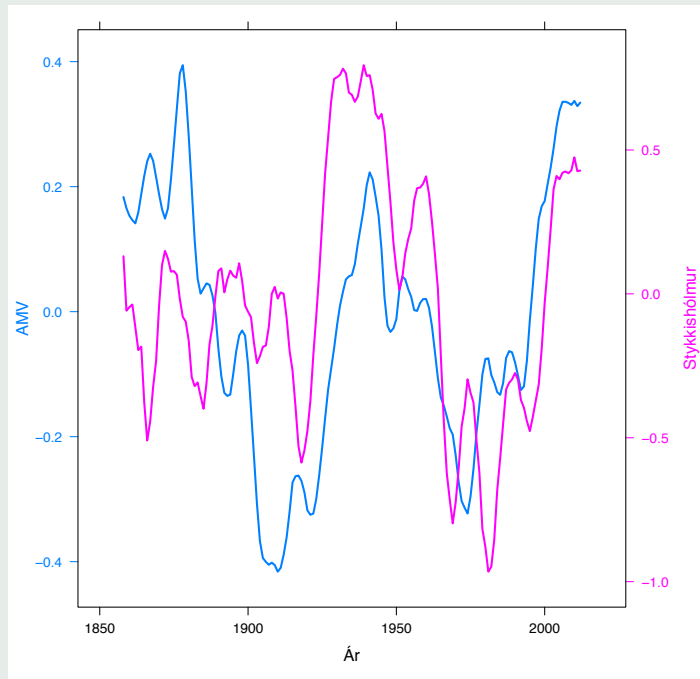




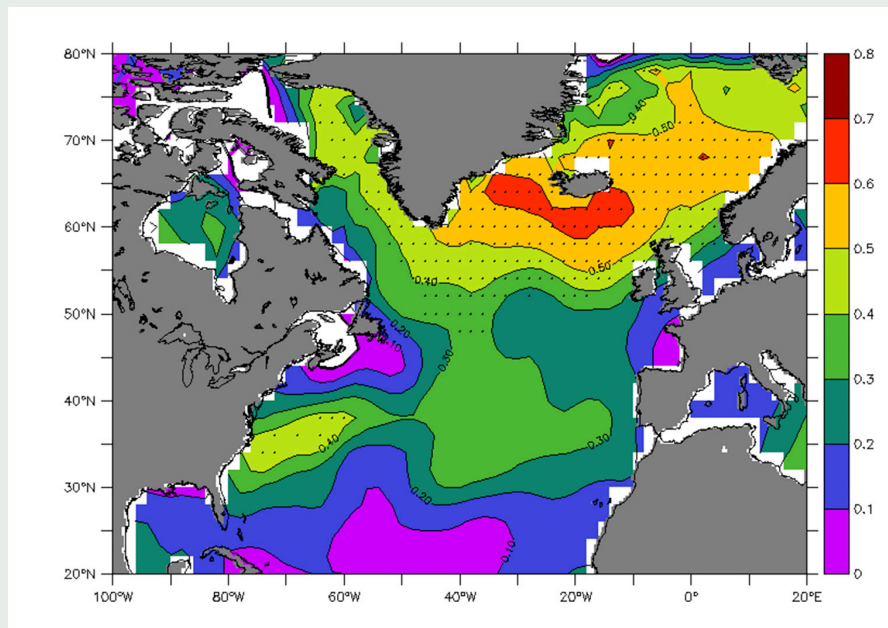
Mynd 4.38 Fylgni AMV-vísis og sjávarhita. Punktarnir sýna hvar fylgnin er martæk.



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



Mynd 4.40 Samanburður á vísitölum AMV og Stykkishólms. Tölur á báðum ásum eru hitavik ( $^{\circ}\text{C}$ ), en kvarðarnir misgleiðir.



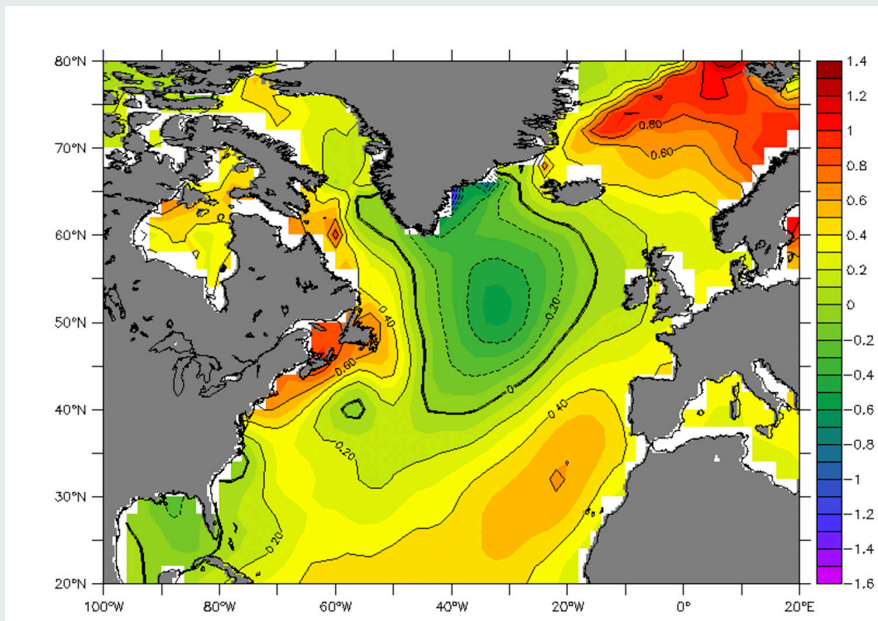
Mynd 4.41 Fylgni vísitölu fyrir Stykkishólms og sjávarhita. Punktarnir sýna hvar fylgnin er marktæk.

sumri til í Norður-Ameríku og Evrópu, veðurfar á norðurheimskaútssvæðinu og tíðni öflugra fellibylja á Atlantshafi<sup>83</sup>. Þessara áhrifa gætir í veðurvísu (s.s trjáhringjum, samsætum og þykkt ársлага í ískjörnum)<sup>84</sup> og því hægt að leggja mat á þessar sveiflur síðustu árfúsundir. Auk þessa hefur AMV verið tengd veðurfarsveiflum utan Atlantshafsins.

Milliríkjanefndin bendir á að fornveðurfarsrannsóknir og líkanreikningar sýni að AMV-breytileiki sé nokkuð stöðugur eiginleiki veðurfars á Norður-Atlantshafssvæðinu, og ekki sé ástæða til að ætla að verulegar breytingar verði á eðli þessara áratugalöngu sveiflna á

öldinni. Því er eðlilegt að gera ráð fyrir að núverandi AMV-hlýndatíma ljúki að lokum, en tilraunir til að spá því hvenær það gerist<sup>85</sup> hafa ekki skilað umtalsverðum árangri. Tekið er fram í skýrslu milliríkjanefndar að áhrif AMV á breytileika veðurfars á sumum svæðum verði líklega á næstu áratugum a.m.k. álíka stór og áhrif loftslagsbreytinga af mannavöldum<sup>86</sup>.

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



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

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

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

### Langtímahneigð og síðustu ár

Sjávarhitagögn ná ekki nema til miðbiks 19. aldar og skekkjur í þeim eru mestar fyrstu áratugin. Í heildina hefur Norður-Atlantshafið hlýnað á tímabilinu, en hlýnunin er mismunandi og hluti þess kólnaði. Mynd 4.42 sýnir kort af leitni bestu línu hitabreytinga á tímabilinu 1854–2016. Myndin sýnir að suður af Grænlandi er svæði þar sem ekkert hlýnaði á tímabilinu og teygir það svæði sig langleiðina til Íslands, og vel inn á það svæði þar sem sjávarhiti hefur marktæk áhrif á

langtímabreytingar í Stykkishólmi. Á þessu svæði er umtalsverður breytileiki milli áratuga og suma áratugi hefur þess orðið vart að sjávarhiti fari langt undir meðaltal. Á síðustu árum hefur slíkur „kuldablettur“ sést á þessu hafsvæði, og hafa verið vangaveltur um að hann megi rekja til þess að hægt hafi á AMOC hringrásinni<sup>87</sup>, og sé það m.a. tengt hafisbráðnun<sup>88</sup>, breytingum í AMOC og AMV<sup>89</sup> og óviðrasömum og köldum vetrum<sup>90</sup>. Í ljósi þess breytileika sem er í hafinu á þessu svæði er ótímabært að draga stórar ályktanir af hitavikum síðustu ára.

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

## Umræða

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

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

Á hafsvæðinu umhverfis landið er mun hlýrra en búast mætti við vegna hnattstöðu, og má rekja það að hluta til hafstrauma sem flytja hlýsjó að landinu. Rannsóknir á fornveðurfari sýna að breytingar á ástandi

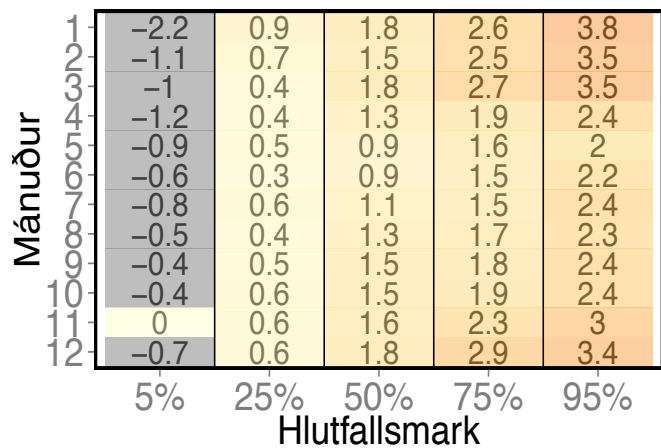
sjávar sunnan og norðan við landið geta haft veruleg áhrif á veðurfar hér á landi, og mikil fylgni er milli breytinga á hitafari í Stykkishólmi og breytinga í sjávarhita umhverfis landið. Ekki er líklegt að náttúrulegur breytileiki á öldinni verði mjög ólíkur því sem verið hefur og því líklegt að veðurfar á Íslandi muni áfram sveiflast í samræmi við breytingar í hafinu umhverfis landið. Þó ekki sé líklegt að stórfelldar breytingar verði á hringrás sjávar í Norður-Atlantshafi, gætu slíkar breytingar dregið úr hlýnun hér við land, eða jafnvel valdið tímabundinni kólnun.

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

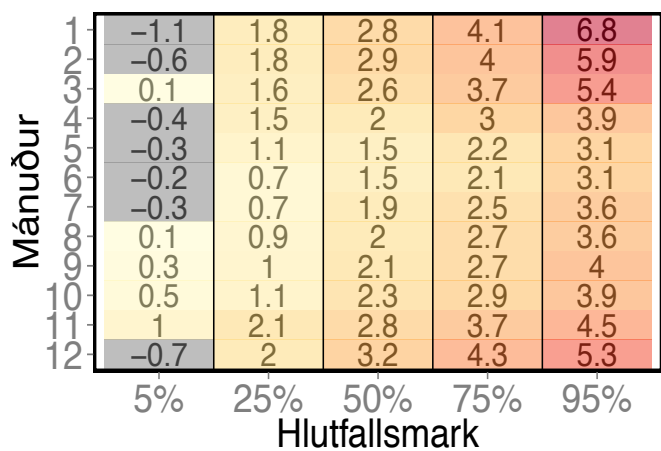
Sterkt samband er milli hitafars og snjóhulu og að jafnaði styttest tími snjóhulu í byggð um rúmar 3 vikur fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Í síðustu skýrslu vísindanefndar er bent á að fari meðalhiti á láglandi yfir 7°C þá verði snjór óverulegur og hækki hiti um meira en 3°C þá verði snjóhula í fjöllum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

Viðauki: Tölur með hita- og úrkomubreytingum

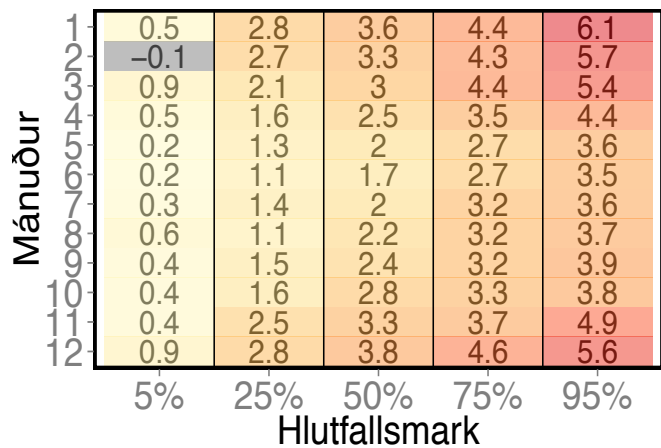
Tafla 4.5 Hlýnun hvers mánaðar (°C) í sviðsmynd RCP2.6 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.



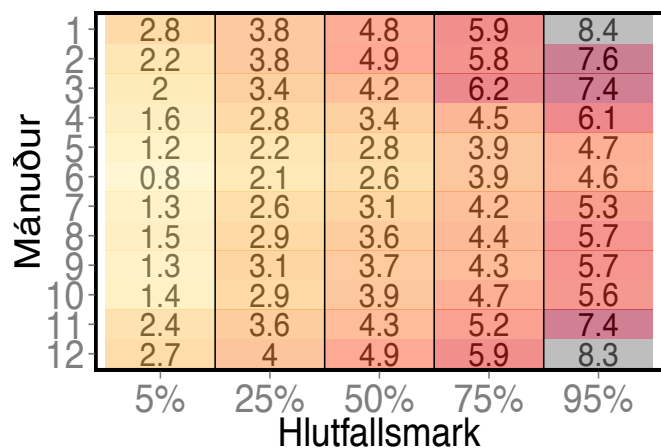
Tafla 4.6 Hlýnun hvers mánaðar (°C) í sviðsmynd RCP4.5 frá tímabilinu 1986–2005 til tímabilsins 2081–2100.



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



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



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

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

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

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

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

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

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

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

## Tilvísanir

- 1 Sjá s. 327 í Porvaldur Thoroddsen *Lýsing Íslands*, 2. bindi, 2. útg, Hið íslenska bókmenntafélag, Kaupmannahöfn 1911. Sambærilega fullyrðingu en annað orðalag má finna í 1. útg. frá 1881.
- 2 Myndin byggist á niðurstöðum úr ERA Interim endurgreiningunni. Nánar má lesa um endurgreiningar og íslensku endurgreininguna í hliðargrein 4A Endurgreiningar.
- 3 Fjallað er um útreikning meðalárstíðasveiflu í Björnsson, H. o.fl. 2007. Analysis of a smooth seasonal cycle with daily resolution and degree day maps for Iceland: H Björnsson, EO Olason, T Jónsson, S Henriksen Meteorologische Zeitschrift, 16, 57-69.
- 4 Sjá nánar bls 38–39 og kort á bls 75 í Markús Einarsson. 1979. Veðurfar á Íslandi, Iðunn, Reykjavík.
- 5 Sjá nánar H Björnsson, T Jonsson, SS Gylfadóttir, EO Olason 2007. Mapping the annual cycle of temperature in Iceland Meteorologische Zeitschrift, 16:45:56.
- 6 Sjá nánar Crochet, P., T. Jóhannesson, T. Jónsson, O. Sigurðsson, H. Björnsson, F. Pálsson og I. Barstad 2007: Estimating the spatial distribution of precipitation in Iceland using a linear model of orographic precipitation. *J. of Hydrometeorol.*, 8(6) 1285-1306.
- 7 Kassarit sýna dreifingu gagna. Helmingur gagnanna (frá 25% hlutfallstölu að 75%) liggja innan kassans. Þverstrikið í kassanum sýnir miðgildið. Lóðréttu línurnar ná til útgilda séu þær ekki fjær kassanum en sem nemur 150% af hæð hans. Punktarnir eru gildi sem falla utan þessa.
- 8 Sjá athugasemd 3 í kafla 3.
- 9 Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Larsen, D.J. og Ólafsdóttir, S. 2013. Abrupt Holocene climate transitions in the northern North Atlantic region recorded by synchronized lacustrine records in Iceland. *Quaternary Science Reviews* 70, 48-62.
- 10 Langdon P.G., Caseldine, C.J., Croudace, I.W., Jarvis, S., Wastegård, S., og Crawford, T.C. 2011. A chironomid-based reconstruction of summer temperatures in NW Iceland since AD 1650. *Quaternary Research* 75, 451–460.
- 11 Larsen, D.J., Miller, G.H., Geirsdóttir, Á. og Thordarson, T. 2011. A 3000-year varved record of glacier activity and climate change from the proglacial lake Hvítárvatn, Iceland. *Quaternary Science Reviews* 30, 2715-2731.
- 12 Striberger, J., Björck, S., Holmgren, S. og Hamerlík, L. 2012. The sediments of Lake Lögurinn – A unique proxy record of Holocene glacial meltwater variability in eastern Iceland. *Quaternary Science Reviews* 38, 76-88.
- 13 Blair, C.L., Geirsdóttir, Á. og Miller, G.H. 2015. A high-resolution multi-proxy lake record of Holocene environmental change in southern Iceland. *Journal of Quaternary Science* 30, 281–292.
- 14 Ran, L., Jiang, H., Knudsen, K. L. og Eiríksson, J. 2008. A high-resolution Holocene diatom record on the North Icelandic shelf. *Boreas* 37, 399–413.
- 15 Knudsen, K. L., Søndergaard, M. K. B., Eiríksson, J. og Jiang, H. 2008. Holocene thermal maximum off North Iceland: Evidence from benthic and planktonic foraminifera in the 8600-5200 cal year BP timeslice. *Marine Micropalaeontology* 67, 120-142.
- 16 Sicre, M.-A., Hall, I., Mignot, J., Khodri, M., Ezah, U., Truong, M.-X., Eiríksson, J. og Knudsen, K.-L., 2011. Sea surface temperature variability in the subpolar Atlantic over the last two millennia. *Paleoceanography* 26, doi:10.1029/2011PA002169.
- 17 Ólafsdóttir, S., Jennings, A.E., Geirsdóttir, Á og Miller, G.H. 2010. Holocene variability of the North Atlantic Irminger Current on the south- and northwest shelf of Iceland. *Marine Micropaleontology* 77, 101-118.
- 18 Jiang, H., Muscheler, R., Björck, S., Seidenkrantz, M-S, Olsen, J., Sha, L., Sjolte, J., Eiríksson, J., Ran, L., Knudsen, K-L. og Knudsen, M.F. 2015. Solar forcing of Holocene summer sea-surface temperatures in the northern North Atlantic. *Geology* 43, 203-206.
- 19 Larsen, D.J., Miller, G.H., Geirsdóttir, Á. og Ólafsdóttir, S. 2012. Non-linear Holocene climate evolution in the North Atlantic: a high-resolution, multi-proxy record of glacier activity and environmental change from Hvítárvatn, Central Iceland. *Quaternary Science Reviews* 39, 14-25.
- 20 Wanamaker, A. D., Heinemeier, J., Scourse, J. D., Richardson, C. A., Butler, P. G., Eiríksson, J. og Knudsen, K. L. 2008. Very long-lived mollusks confirm 17th century AD tephra-based radiocarbon reservoir ages for North Icelandic shelf waters. *Radiocarbon* 50 (3), 399-412.
- 21 Wanamaker, A. D., Butler, P.G., Scourse, J.D., Heinemeier, J., Eiríksson, J., Knudsen, K.L. og Richardson, C.A. 2012. Surface changes in the North Atlantic meridional overturning circulation during the last millennium. *Nature Communications* 3: 899, doi:10.1038/ncomms1901.
- 22 Butler, P.G., Wanamaker, A.D., Scourse, J.D., Richardson, C.A. og Reynolds, D.J. 2013. Variability of marine climate on the North Icelandic Shelf in a 1357-year proxy archive based on growth increments in the bivalve *Arctica islandica*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 373, 141–151.
- 23 Reynolds, D.J., Scourse, J.D., Halloran, P.R., Nederbragt, A.J., Wanamaker, A.D., Butler, P.G., Richardson, C.A., Heinemeier, J., Eiríksson, J., Knudsen, K.L. og Hall, I.R. 2016. Annually resolved North Atlantic marine climate over the last millennium. *Nature Communications* 7: 13502, doi:10.1038/ncomms13502.
- 24 Knudsen, K.L., Eiríksson, J. og Bartels-Jónsdóttir, H.B. 2012. Oceanographic changes through the last millennium off North Iceland: Temperature and salinity reconstructions based on foraminifera and stable isotopes. *Marine Micropaleontology* (84-85) 54–73.
- 25 Ran, L., Jiang, H., Knudsen, K. L. og Eiríksson, J. 2011. Diatom-based reconstruction of palaeoceanographic changes on the North Icelandic shelf during the last millennium. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 302 (1-2), 109-119, doi:10.1016/j.palaeo.2010.02.001. Sjá einnig: Greta B Kristjánsdóttir, M., Moros, J. T., Andrews, A. E., Jennings. 2016. Holocene Mg/Ca, alkenones,

- and light stable isotope measurements on the outer North Iceland shelf (MD99-2269): A comparison with other multi-proxy data and sub-division of the Holocene. *The Holocene* 2016, 27 (1), 52 – 62. doi.org/10.1177/0959683616652703.
- 26 Cunningham, L. K., Austin, W.E.N., Knudsen, K.L., Eiríksson, J., Scourse, J.D., Wanamaker, A.D., Butler, P.G., Cage, A.G., Richter, T., Husum, K., Hald, M., Andersson, C., Zorita, E., Linderholm, H.W., Gunnarson, B.E., Sicre, M.-A., Sejrup, H.P., Jiang, H. og Wilson, R. JS. 2013. Reconstructions of surface ocean conditions from the northeast Atlantic and Nordic seas during the last millennium. *The Holocene* 23, 921-935.
- 27 Ólafsdóttir, S., Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Stoner, J.S. og Channell, J.E.T. 2013. Synchronizing Holocene lacustrine and marine sediment records using paleomagnetic secular variation. *Geology* 41, 535-538.
- 28 Miller, G.H., Geirsdóttir, Á., Zhong, Y., Larsen, D.J., Otto-Bliesner, B.L., Holland, M.M., Bailey, D.A., Refsnider, K.A., Lehman, S.J., Southon, J.R., Anderson, C., Björnsson, H. og Thordarson, T. 2012. Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks. *Geophysical Research Letters* 39, L02708, doi:10.1029/2011GL050168.
- 29 Belt, S.T. og Müller, J. 2013. The Arctic sea ice biomarker IP25: a review of current understanding, recommendations for future research and applications in palaeo sea ice reconstruction. *Quaternary Science Reviews* 79, 9-25.
- 30 Cabedo-Sanz, P., Belt, S.T., Jennings, A.E., Andrews, J.T. og Geirsdóttir, Á. 2016. Variability in drift ice export from the Arctic Ocean to the North Icelandic Shelf over the last 8000 years: A multi-proxy evaluation. *Quaternary Science Reviews* 146, 99-115.
- 31 Massé, G., Rowland, S.J., Sicre, M.-A., Jacob, J., Jansen, E. og Simon T. Belt, S.T. 2008. Abrupt climate changes for Iceland during the last millennium: Evidence from high resolution sea ice reconstructions. *Earth and Planetary Science Letters* 269, 565-569.
- 32 Ogilvie, A.E.J. og Jónsson, T. 2001. "Little Ice Age" research: a perspective from Iceland. *Climate Change* 48, 9-52.
- 33 Berger, A., og Loutre, M.F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews* 10, 297-317.
- 34 Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Gose, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M. og Widmann, M. 2008. Mid- to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science Reviews* 27, 1791-1828.
- 35 Marcott, S.A., Shakun, J.D., Clark, P.U. og Mix, A.C. 2013. A Reconstruction of Regional and Global Temperature for the Past 11,300 Years. *Science* 339, 1198-1201.
- 36 Kaufman, D.S. og 29 aðrir. 2004. Holocene thermal maximum in the western Arctic (0-180°W). *Quaternary Science Reviews* 23, 529-560.
- 37 Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Axford, Y. og Ólafsdóttir, S. 2009. Holocene and latest Pleistocene climate and glacier fluctuations in Iceland. *Quaternary Science Reviews* 28, 2107-2118.
- 38 Flowers, G.E., Björnsson, H., Geirsdóttir, Á., Miller, G.H., Black, J.L. og Clarked, G.K.C. 2008. Holocene climate conditions and glacier variation in central Iceland from physical modelling and empirical evidence. *Quaternary Science Reviews* 27, 797-813.
- 39 Wanner, H., Solomina, O., Grosjean, M., Ritz, S.P. og Jetel, M. 2011. Structure and origin of Holocene cold events. *Quaternary Science Reviews* 30, 3109-3123.
- 40 Moros, M., Andrews, J.T., Eberl, D.D. og Jansen, E. 2006. Holocene history of drift ice in the northern North Atlantic: Evidence for different spatial and temporal modes. *Palaeoceanography* 21, PA2017.
- 41 Knudsen, K. L., Eiríksson, J., Jiang, H. og Jónsdóttir, I. 2009. Palaeoceanography and climate changes off North Iceland during the last millennium: comparison of foraminifera, diatoms and ice-rafted debris with instrumental and documentary data. *Journal of Quaternary Science* 24, 457-468.
- 42 Eiríksson, J., Knudsen, K. L., Larsen, G., Olsen, J., Heinemeier, J., Bartels-Jónsdóttir, H. B., Jiang, H., Ran, L., og Símonarson, L. A. 2011. Coupling of palaeoceanographic shifts and changes in marine reservoir ages off North Iceland through the last millennium. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 302, 95-108.
- 43 Ogilvie, A. E. J. 1992. Documentary evidence for changes in the climate of Iceland, A. D. 1500 to 1800. Í R.S. Bradley & P. D. Jones. *Climate since A.D. 1500*. Routledge. London & New York, 92-117.
- 44 Jennings, A.E. Hagen, S., Harðardóttir, J., Stein, R., Ogilvie, A.E.J. og Jónsdóttir, I. 2001. Oceanographic change and terrestrial human impacts in a post A.D. 1400 sediment record from the southwest Iceland shelf. *Climatic Change* 48, 83-100.
- 45 Snjóhula er metin á öllum mönnum veðurstöðum og flokkuð í alaut (0%), flekkótt (50%) og alhvítt (100%). Meðaltal mánaðar er síðan reiknað frá þessum hlutföllum, sem og landsmeðaltal. Hér er dagafjöldi reiknaður með því að nota jafngildisdaga, þ.e. ef mánaðarmeðtal snjóhulu á stöð er 50% er það jafngilt alhvíttri jörð í 15 daga.
- 46 Helstu heimildir þessarar greinar eru: Uppala, S.M., P.W. Kallberg, A.J. Simmons, ofl. 2005. The ERA-40 Reanalysis. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 131, 612, 2961-3012. Dee D. P. o.fl. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 553-597, April 2011 A Poli, P. o.fl. 2015. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the 20th century. *J. of Climate*, 29. 4083-4097. Nikolai Nawri, Bolli Pálmason, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson og Sigurður Þorsteinsson. 2017. The ICRA-2016 Atmospheric reanalysis project for Iceland. Veðurstofa Íslands report VÍ-2017-005.
- 47 Rekja má upphaf þessara fræða til greinar sem Páll Bergþórsson, síðar Veðurstofustjóri og Bo R. Döös birtu árið 1955 (Bergthorsson P. & B. Döös, 1955: Numerical weather map analysis. *Tellus*, 7, 329-340.)
- 48 Hér er sérstaklega vísað til endurgreininga sem Reiknistofa í Veðurfræði gerði innan verkefnisins Loftslag og orkukerfi (LOKS), sjá nánar í Ólafur Rögnvaldsson, Hálfán Ágústsson og Haraldur Ólafsson 2011. Aflræn niðurvörðun veðurs innan LOKS verkefnisins. Rit Reiknistofu í veðurfræði. Reykjavík.



- 49 Coupled Model Intercomparison Project Phase 5. Sjá Taylor, K. E., R. J. Stouffer & G. A. Meehl. 2012. A summary of the CMIP5 experiment design. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 485–498.
- 50 Sjá nánar í hliðargrein 3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5.
- 51 Niðurstöður V2008 byggðu á niðurstöðum CMIP3 verkefnisins og sk. SRES sviðsmynda (B1, A1B og A2). Í þessum eldri sviðsmyndum jókst geislunarálag minnst í B1 en mest í A2, og því var hlýnin minnst í B1 en mest í A2. Þó RCP-sviðsmyndirnar frá CMIP5 séu ólíkar SRES sviðsmyndunum lætur nærri að fram til ársins 2100 sé aukning geislunarálags í RCP4.5 sambærileg við aukninguna í B1, og að A2 sé sambærileg við RCP8.5. Munurinn á CMIP5 og CMIP3 verkefnunum er þó ekki einungis að CMIP5 noti RCP sviðsmyndir um aukningu geislunarálags en CMIP3 noti SRES, heldur skiptir einnig máli að framþróun loftslagslíkana á þeim árum sem liðu milli CMIP3 og CMIP5 verkefnanna hefur gert líkónin flóknari. Loks má hafa í huga að mun fleiri stofnanir tóku þátt í CMIP5 verkefninu en CMIP3.
- 52 Knutti R. & Sedlacek J. 2012. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change* 3, 369–373.
- 53 Þegar niðurstöður V2008 eru bornar saman við töflur 4.1 til 4.4 er vert að hafa í huga að viðmiðunartíminn er ekki sá sami. Í V2008 var hlýnun reiknuð frá meðaltali líkana fyrir tímabilið 2001–2016 en hér er gætt samræmis við fimmtu matsskýrslu IPCC og tímabilið 1986–2005 notað. Mismunur þessa viðmiðunartíma fyrir hitabreytingar er 0.39°C, 0.42°C, 0.44°C og 0.45°C í sviðsmyndum RCP2.6 til RCP8.5. Fyrir úrkomubreytingar er munur sömu tímabila 0.6%, 0.9%, 1.3% og 0.6% fyrir RCP2.6 til RCP8.5. Ekki er leiðrétt sérstaklega fyrir því í samanburðinum sem hér er gerður, en þetta gerir CMIP5 líkónin enn hlýrri og þurrari í samanburði við CMIP3 líkónin.
- 54 Sjá kafla 12.3 í skýrslu IPCC 2013. Sjá heimild 2 í kafla 3.
- 55 Í sviðsmynd B1 var hlýnun í Íslandsreitnum frá 2001–2016 til loka aldarinnar metin sem 1.4 [0–2.9]°C en í RCP4.5 er hlýnun miðað við sama tímabil 2.0 [-0.66–3.94]°C. Hlýnun í þessari sviðsmynd er því að jafnaði meiri en í eldri sviðsmynd (B1) en einnig er óvissubilið breiðara. Fyrir A2 og RCP8.5 er hlýnunin miðuð við 2001–2016 2.4 [1.0–3.6]°C og 3.65 [1.48–6.07]°C. Aftur hlýnar meira í nýju sviðsmyndunum og óvissubilið er breiðara.
- 56 Sjá kafla 12.4.9 í skýrslu vinnuhóps 1.
- 57 Sjá 4C Hafhringrás í Norður-Atlantshafi og loftslagsbreytingar.
- 58 Hvað úrkomubreytingar varðar var breyting í B1 milli tímabilanna 2001–2016 til 2081–2100 metin sem 4.0 [-0.8 til 9.6] % í V2008 en í RCP4.5 fæst fyrir sama tímabil úrkomubreyting upp á 1.91 [-8.43 til 11.31] %. Í A2 sviðsmyndinni var úrkomubreyting metin sem 6.8 [-1.9 til 18.6] % í V2008 en í RCP8.5 fæst hér fyrir sama tímabil 2.53 [-6.27 til 20.8]%. Þó að úrkoma aukist minna í CMIP5 líkónunum þá eru óvissumörkin mjög rífleg og erfitt að draga ályktanir um mun CMIP3 og CMIP5 hvað úrkomubreytingar varðar.
- 59 Fetterer, F., K. Knowles, W. Meier, M. Savoie & A. K. Windnagel. 2016. Uppfært daglega. Sea Ice Index, Version 2.1. Boulder, Colorado USA. NSIDC: National Snow and Ice Data Center. doi: dx.doi.org/10.7265/N5736NV7.
- 60 van der Linden P. & J.F.B. Mitchell (ritstj.). 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Center, FitzRoy Road, Exeter, EX1 3PB, UK. 160 bls.
- 61 Giorgi, F. & Gutowski, W. J., 2015. Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 40: 467-90.
- 62 Nikolai Nawri og Halldór Björnsson, 2010. Surface Air Temperature and Precipitation Trends for Iceland in the 21st Century, Veðurstofa Íslands 2010-05.
- 63 Ólafur Rögnvaldsson, Hálfán Ágústsson og Haraldur Ólafsson. 2011. Afhræn niðurráðgjafin innan LOKS verkefnisins. Rit Reiknistofu í Veðurfræði.
- 64 Monique Gosseling, 2017. CORDEX Climate Trends for Iceland in the 21st Century. Veðurstofa Íslands, VI-2017-009.
- 65 Háupplausnarlíkónin voru RCA4 frá sænsku veðurstofunni og evrópska CCLM líkanið. Hnatrænu líkónin voru HADGEM2 líkanið frá bresku veðurstofunni og MPI líkanið frá Max Plank stofnuninni í Hamborg. Sjá nánar heimild 64 og vefsvæðið [www.cordex.org](http://www.cordex.org)
- 66 Bracegirdle, T.J. & D.B. Stephenson, 2013. On the Robustness of Emergent Constraints Used in Multimodel Climate Change Projections of Arctic Warming. *J. Climate*, 26, 669–678, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00537.1.
- 67 Mynd 4.33 er aðlöguð frá heimild 64 en mat á áhrifum kerfisbundinnar skekkju fylgir aðferðafræði sem lýst er í heimild 66.
- 68 Vindhraðamælingar í Reykjavík kunna að vera bjagaðar á hluta þessa tímabils. Bjögunin hefði þó aukið vind og því bætt samanburð við loftslagslíkónin.
- 69 AMOC er skammstöfun fyrir Atlantic Meridional Overturning Circulation.
- 70 Mynd 4.35 sýnir uppfærðan hluta myndar 2 í heimild 72 og byggst á gögnum frá sk. RAPID verkefni en þau eru aðgengileg á vefsvæðinu [www.rapid.ac.uk](http://www.rapid.ac.uk). Sjá nánar McCarthy, G.D.; Smeed, D.A.; Johns, W.E.; Frajka-Williams, E.; Moat, B.I.; Rayner, Darren.; Baringer, M.O.; Meinen, C.S.; Collins, J.; Bryden, H.L. 2015. Measuring the Atlantic Meridional Overturning Circulation at 26°N. *Progress in Oceanography*, 130. 91-111. 10.1016/j.pocean.2014.10.006.
- 71 Styrkur hafstrauma er mældur í milljón rúmmetrum á sekúndu og er sú eining nefnd Sverdrup (Sv).
- 72 Smeed, D. A., McCarthy, G., Cunningham, S. A., Frajka-Williams, E., Rayner, D., Johns, W. E., Meinen, C. S., Baringer, M. O., Moat, B. I., Duchez, A. & Bryden, H. L., 2014. Observed decline of the Atlantic Meridional Overturning Circulation 2004 to 2012. *Ocean Sci.*, 10, 28-38, doi: 10.5194/osd-10-29-2014.
- 73 Roberts, C. D., L. Jackson & D. McNeall. 2014. Is the 2004–2012 reduction of the Atlantic meridional overturning circulation significant?. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 3204–3210, doi:10.1002/2014GL059473.
- 74 Gerard D. McCarthy, G.D., Haigh, I. Hirschi J., Grist J.P. & Smeed, D:A. 2015. Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations. *Nature*. 521(7553). doi:10.1038/nature14491.

- 75 Með því að skoða þróun til ársins 2300 er litið lengra fram á við en almennt í þessum kafla. Enn má minna á að þessum sviðsmyndum er ætlað að spanna róf mögulegrar losunar gróðurhúsalofttegunda – en þær eru ekki spá um losun. Þegar litið er margar aldir fram á við er óljóst hvort þær ná að spanna róf losunar og ber því að taka niðurstöðum með þeim fyrirvara.
- 76 Nánari umfjöllun um viðbrögð AMOC við hlýnun má finna í kafla 12.4.7.2 og 12.5.52 í IPCC 2013; sjá tilvitnun 24 í kafla 3.
- 77 AMV er skammstöfun á Atlantic Multidecadal Variability, sem mætti útleggja sem fjöl-áratuga breytileika í Atlantshafi. Þessi breytileiki hefur líka verið kallaðu fjölárátuga sveifla, á ensku Atlantic Multidecadal Oscillation, og skammstafað AMO. Þessi síðari nafngift hefur þann ókost að vera mjög lík AMOC og einnig gefur orðið sveifla ranglega til kynna að um ákveðna sveiflutíðni sé að ræða.
- 78 Algengasta leiðin til að skilgreina þessa vísitölu er að reikna meðaltal yfirborðshita í Norður-Atlantshafi og fjarlægja áhrif hnattrænnar hlýnunar með því að reikna frávik frá bestu línu gegnum safnið. Vísitalan er síðan útjafnað meðaltal frávikanna. Ýmsar útgáfur eru af því við hvaða lengdar- og breiddargráður er miðað og hvernig útjöfnuðu gildin eru reiknuð og hvernig áhrif hnattrænnar hlýnunar eru fjarlægð. Hér er byggt á Enfield 2001 en notuð sjávarhitafrávik (miðað við 1854 – 2016) úr ERSSTv5 gagnasafninu, meðaltalið reiknað fyrir svæðið 0° – 80°V og 0° – 60°N og 9 punkta þríhyrningssía með hálfmættisvið rúmlega 10 ár. Sjá Enfield, D. B., Mestas-Nunes, A. M., Trimble, P.J., 2001. The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophys. Res. Lett.* 28:10, p. 2077–2080 doi:// 10.1029/2000GL012745 og Huang, B., Peter W. Thorne, o.fl. 2017. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature version 5 (ERSSTv5), Upgrades, validations, and intercomparisons. *J. Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-16-0836.1.
- 79 Knudsen, M. F., Seidenkrantz, M.-S., Jacobsen, B. H. & Kuijpers, A. 2011. Tracking the Atlantic Multidecadal Oscillation through the last 8,000 years, *Nat. Comm.*, 2, 178, doi:10.1038/ncomms1186.
- 80 Zanchettin, D., Rubino, A. & Jungclaus, J. H. 2010. Intermittent multidecadal-to-centennial fluctuations dominate global temperature evolution over the last millennium, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L14702, doi:10.1029/2010GL043717.
- 81 AMV vísitalan sýnir verulega sjálffylgni og sem taka þarf tillit til þegar metið er hvort fylgnin við sjávarhitann sé marktækt frábrugðin núlli. Það var gert með aðferð Ebisuzaki 1997 og fylgnin metin fyrir alla netpunkta ERSSTv5 í Atlantshafi. Yfirleitt þurfti fylgnin að vera hærri en 0.4 til að vera marktæk, en út af austurströnd Norður Ameríku dugði það þó ekki til. Sjá nánar Ebisuzaki, W. 1997. A method to estimate the statistical significance of a correlation when the data are serially correlated, *J. Climate*, 10, 2147-2153.
- 82 Misserisvindakerfi eru einnig þekkt undir alþjóðlega heitinu *Monsoon*.
- 83 Sjá grein 14.7.6 í Christensen, J.H., K. Krishna Kumar, E. Aldrian, S.-I. An, I.F.A. Cavalcanti, M. de Castro, W. Dong, P. Goswami, A. Hall, J.K. Kanyanga, A. Kitoh, J. Kossin, N.-C. Lau, J. Renwick, D.B. Stephenson, S.-P. Xie & T. Zhou 2013. Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. Í skýrslu IPCC 2013; sjá heimild 2 í kafla 3.
- 84 Wang, Jianglin, Yang, Bao, Ljungqvist, Fredrik Charpentier, Luterbacher, Jürg, Osborn, Timothy J., Briffa, Keith R. & Zorita, Eduardo. 2017 Internal and external forcing of multidecadal Atlantic climate variability over the past 1,200 years. *Nature Geoscience*, 10 (7). 512–517 doi://10.1038/ngeo2962
- 85 N.S. Keenlyside, M. Latif, J. Jungclaus, L. Kornblueh & E. Roeckner, 2008. Advancing decadal-scale climate prediction in the North Atlantic sector, *Nature*, 453, bls. 84-88. dx.doi.org/10.1038/nature06921.
- 86 Sjá grein 14.7.7 í heimild 83 hér að ofan.
- 87 Rahmstorf, S., Box, J., Feulner, G., Mann, M., Robinson, A., Rutherford, S., Schaffernicht, E. 2015. Exceptional twentieth-Century slowdown in Atlantic Ocean overturning circulation. *Nature Climate Change*.
- 88 Sévellec, F., Fedorov A. V. & Liu W. 2017, Arctic sea-ice decline weakens the Atlantic Meridional Overturning Circulation *Nature Climate Change* 7, 604–610 2017 doi:10.1038/nclimate3353.
- 89 McCarthy, Gerard D.; Haigh, Ivan D.; Hirschi, Joël J.-M.; Grist, Jeremy P.; Smeed, David A. 2015 Ocean impact on decadal Atlantic climate variability revealed by sea-level observations. *Nature*, 521 (7553). 508-510.10.1038/nature14491.
- 90 de Jong, M. F. & L. de Steur. 2016. Strong winter cooling over the Irminger Sea in winter 2014–2015, exceptional deep convection, and the emergence of anomalously low SST, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 7106–7113, doi:10.1002/2016GL069596.
- 91 Dickson, R.R., Meincke, J., Malmberg, S.A. & Lee, A.J., 1988. The “great salinity anomaly” in the northern North Atlantic 1968–1982. *Progress in Oceanography*, 20(2), pp.103-151.
- 92 Belkin, I.M., Levitus, S., Antonov, J. & Malmberg, S.A., 1998. “Great salinity anomalies” in the North Atlantic. *Progress in Oceanography*, 41(1), pp.1-68.
- 93 Manucharyan, G.E. & Spall, M.A., 2016. Wind-driven freshwater buildup and release in the Beaufort Gyre constrained by mesoscale eddies. *Geophysical Research Letters*, 43(1), pp.273-282.
- 94 Proshutinsky, A., Dukhovskoy, D., Timmermans, M.L., Krishfield, R. & Bamber, J.L.. 2015. Arctic circulation regimes. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 373(2052), p.20140160.
- 95 Þetta má reikna úr töflu 14.1 í heimild 83 í kafla 3 og kortum AI.12 – AI.15 í viðaukaskýrslu milliríkjanefndar (heimild 2 í kafla 3).