

3 Hnattrænar loftslagsbreytingar

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

Þessa staðhæfingu má finna í upphafi fimmtu úttektarskýrslu Millirikjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC¹), frá árinu 2013². IPCC gefur á nokkurra ára fresti út úttektarskýrslur þar sem vísindaleg þekking á loftslagsbreytingum er dregin saman.

Verkinu er skipt niður á þrjá vinnuhópa og skoðar sá

fyrsti orsakir og umfang loftslagsbreytinga. Annar hópurinn skoðar afleiðingar þeirra fyrir náttúru og samfélag og til hvaða úrræða megi grípa til þess að að-lagast breytingunum. Þriðji hópurinn skoðar síðan hvernig hægt sé að draga úr losun gróðurhúsaloft-tegunda.

Ítarlega var fjallað um niðurstöður fjórðu úttektarskýrslu IPCC frá árinu 2007 í fyrsta kafla skýrslu Vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá árinu 2008³ (í þeim köflum sem hér fylgja er oft vitnað til fyrri skýrslu sem V2008). Hér verður stuttlega fjallað um fimmtu matsskýrsluna, niðurstöður vinnuhópa 1 og 2 og þar sem ástæða þykir til eru upplýsingar skýrslu IPCC uppfærðar með nýrri gögnum.

3A Kvarðað orðalag

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

Eftirfarandi tafla sýnir merkingu orða sem notuð eru fyrir staðhæfingar þar sem hægt er að leggja mat á líkindi.

Orðalag	Líkindi
Nánast öruggt	99–100%
Mjög líklegt	90–100%
Líklegt	66–100%
Óráðið	33–66%
Ólíklegt	0–33%
Mjög ólíklegt	0–10%
Afskaplega ólíklegt	0–1%

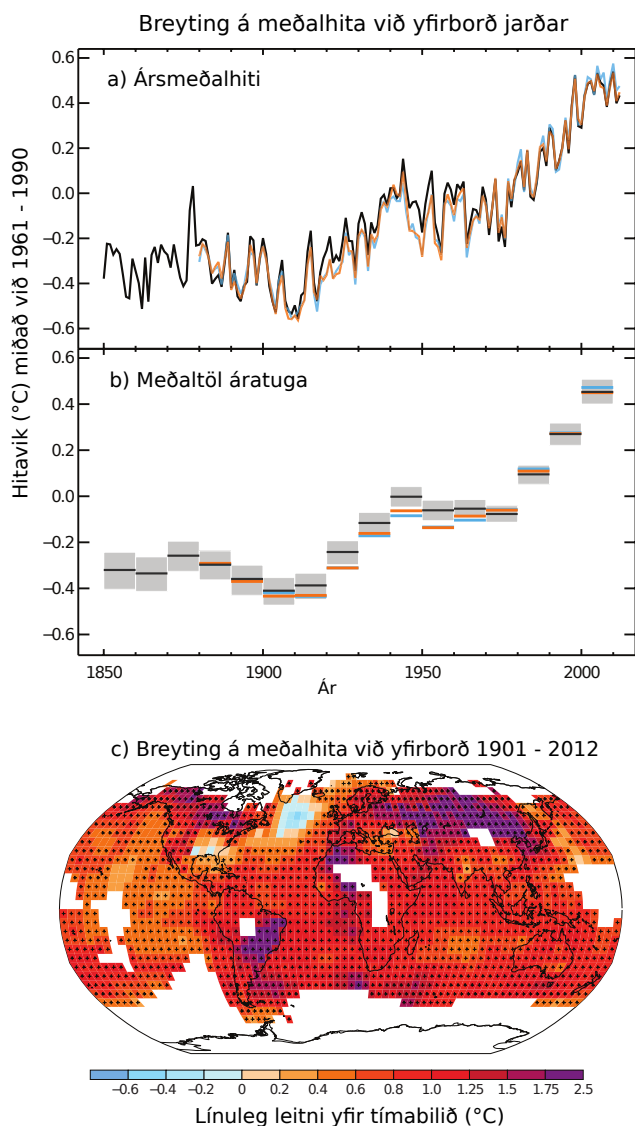
Hvað vísbendingar (evidence) varðar er notað orðalagið: *Takmarkaðar*, *miðlungs* eða *traustar* (limited, medium & robust) eftir því hversu eindregnar þær eru.

Hversu sammála vísindamenn eru um niðurstöður er táknað með þremur stigum: *litt sammála*, *í meðallagi sammála* og *mjög sammála* (low, medium and high agreement).

Vissa (confidence) hefur eftirfarandi fimm stig: *mjög lítil*, *lítil*, *miðlungs*, *mikil* og *mjög mikil* (very low, low, medium, high, very high confidence).

Stærðir eru oft gefnar upp með 90% öryggisbili. Þannig þýðir 0.5 [0.4–0.6] að 0.5 sé líklegasta gildi, en 90% vissa sé fyrir því að rétt mat liggi á bilinu 0.4 til 0.6.

Tafla 3.1 Kvarðað orðalag sem notað er í skýrslum Millirikjanefndar.



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

3.1 Lofthjúpurinn

Sérhver síðustu þriggja áratuga er hlýrri en allir fyrri áratugir síðan samfelldar mælingar hófust upp úr 1850, og er fyrsti áratugur 21. aldar sá hlýjasti þeirra. Gögn um fornveðurfar benda til þess að á norðurhveli sé tímabilið 1983–2012 mjög líklega⁴ hlýjasta 30 ára tímabil síðustu 800 ára (mikil vissa) og líklega hlýjasta 30 ára tímabil síðustu 1400 ára (miðlungs vissa).

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

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

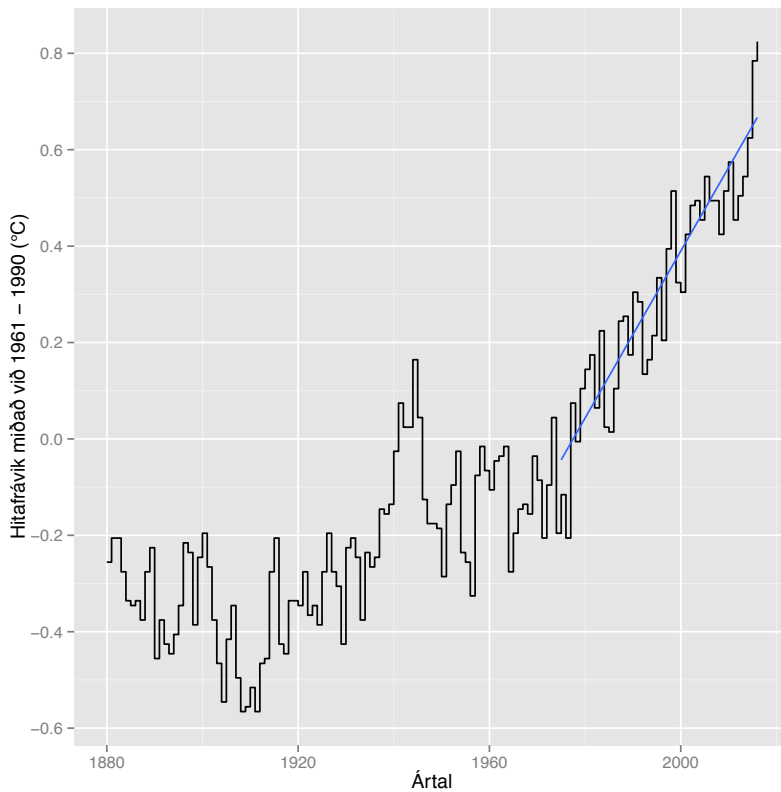
Það er nánast öruggt að veðrahvolfið hefur hlýnað síðan um miðbik 20. aldar og samfara því kólnaði í heiðhvolfinu. Á norðurhveli er, utan hitabeltissvæða, miðlungsvissa fyrir þessum hitabreytingum með hæð og einnig því hversu hratt hlýnaði en lítil vissa annars staðar.

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

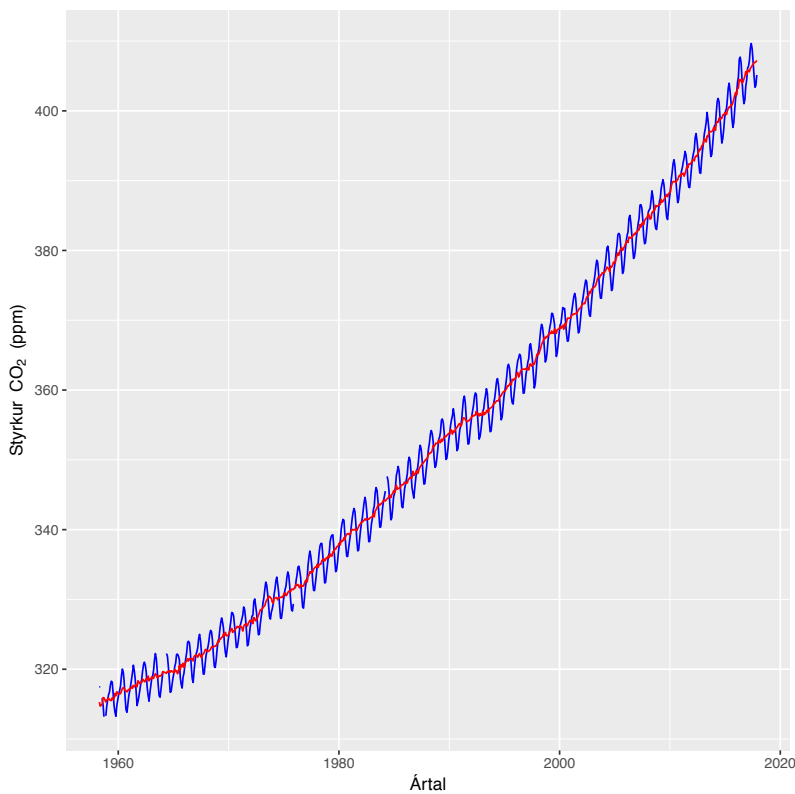
Til og með 2016 voru 9 af 10 hlýjstu árum frá upphafi samfelldra mælinga á 21. öld, eina árið frá 20. öldinni var El Niño árið 1998 í 8. sæti. Áhrifa El Niño gætti einnig árin 2015 og 2016. Þau ár voru mun hlýrri en áður voru dæmi um (mynd 3.2)⁵.

Nýlegar rannsóknir benda til þess að frá miðbiki 8. áratugs síðustu aldar hafi tölfræðilega marktæk hlýnun numið um 0.17–0.19°C á áratug og sveiflur yfir styttri tímabil víki ekki marktækt frá því⁶. Komi ekki til verulega breytinga á losun gróðurhúsalofttegunda er líklegast að hlýnun jarðar haldi áfram með svipuðum hraða en að skammtímasveiflur ýmist dragi úr eða auki við hlýnunina.

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



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



Mynd 3.3 Styrkur CO₂ í lofthjúpunum mældur á Mauna Loa á Hawaii. Bláa línan sýnir mánaðargildi, rauða línan sýnir reiknaðan ársferil. Mælingar ná frá marsmánuði 1958 til loka árs 2017. Mæliröðin frá Mauna Loa er lengsta samfellda röðin, en samhljóða niðurstöður hafa fengist víðs vegar um heim. (Gögn frá bandarísku haf- og veðurfræðistofnuninni NOAA.)

nóttum hafi fjölgað. Líklegt er að hitabylgjum hafi fjölgað í stórum hluta Evrópu, Asíu og Ástralíu. Landsvæði þar sem aftakaúrkoma er nú tíðari eru líklega fleiri en svæði þar sem aftakaúrkoma er nú fátíðari. Breytingar eru ekki þær sömu allstaðar en mest víska er

um breytingar í Norður-Ameríku þar sem líklegt er að aftakaúrhelli hafi orðið tíðari.

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

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

Styrkur koldíoxíðs í loftþjúpnum eykst um rúmlega 2 ppm á ári⁷ og útslag árstíðasveiflu er rúmlega 6 ppm. Þegar skýrsla Milliríkjanevndar kom út árið 2013 var styrkur CO₂ í lofti á mælistöðinni á Mauna Loa tæplega 400 ppm en hann var um 315 ppm þegar mælingar hófust árið 1958. Á þeim árum sem liðin eru síðan skýrslan kom út hefur styrkurinn aukist og frá árinu 2015 hefur styrkurinn aldrei farið undir 400 ppm (mynd 3.3)⁸.

3.2 Hafíð

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

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

Af viðbættri varmaorku er meira en 60% geymd í efri lögum sjávar (0–700 m) en um 30% í neðri lögum. Það er *líklegt* að varmainnihald í efstu lögum sjávar hafi aukist um 17 [15–19] x 10²² J á tímabilinu 1971–2010.

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

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

3.3 Freðhvolfið

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

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

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

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

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

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

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

um 28 þúsund km³ þegar mest er í apríl en 11.5 þúsund km³ þegar minnst er í september. Samdráttur í rúmmáli er á þessu tímabili um 3100 ± 1000 km³ á áratug⁹.

Það er *mjög líklegt* að hafísútbreiðsla umhverfis Suðurskautslandið hafi aukist um 1.2–1.8% á áratug frá 1979 til 2012. Það er *mikil vissa* fyrir því að breytingar eru mismunandi milli svæða umhverfis Suðurskautslandið, sums staðar hefur útbreiðslan aukist, annars staðar hefur hafísþekjan dregist saman. Næstu þrjú ár eftir að skýrsla IPCC kom út dróst hafísútbreiðslan saman, m.a. vegna óvenjulegra illviðra í suðurhöfum¹⁰.

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

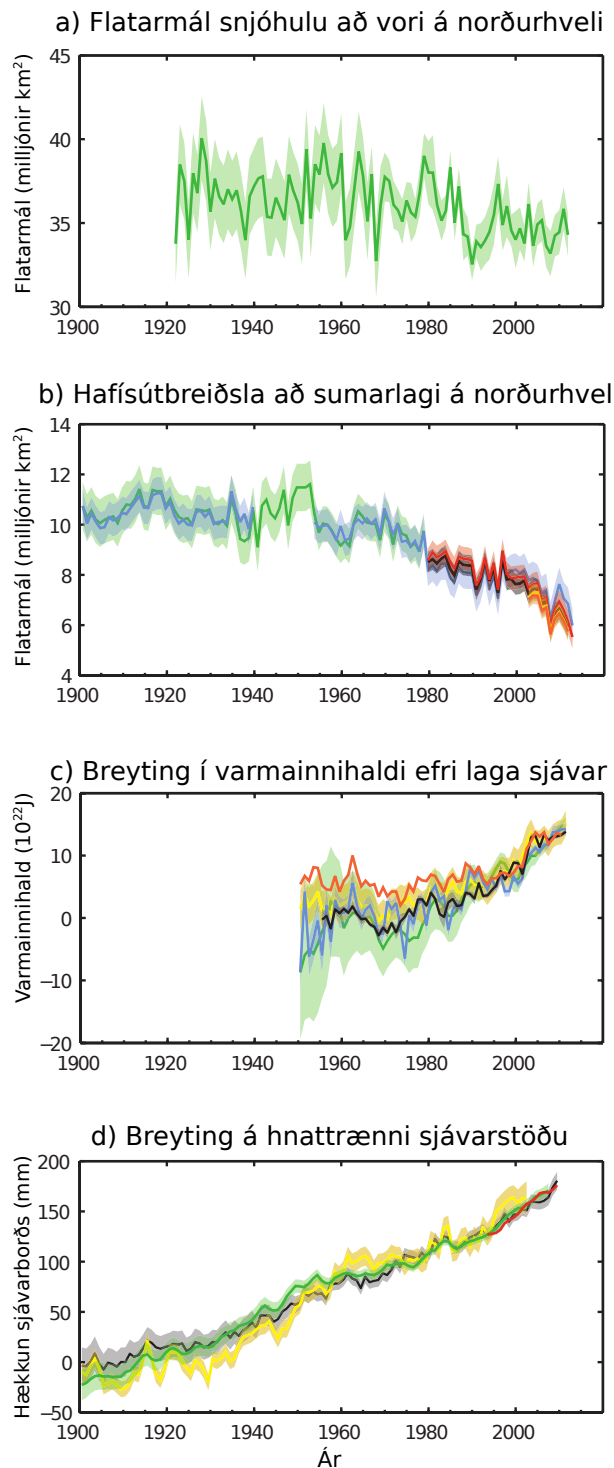
Það er *mikil vissa* fyrir því að hiti í sífrera hafi hækkad frá því upp úr 1980 þó að hækkunin sé mismunandi eftir svæðum. Í Rússlandi hefur útbreiðsla sífrera marktækt minnkað og hann þynnst frá 1975 til 2005 (*miðlungsvissa*).

3.4 Sjávarstaða

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

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

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



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

(*miðlungsvissa*). Mikil víska er fyrir því að á síðasta hlýskeyði hafi sjávarstaðan ekki verið yfir 10 m hærra en hún er nú.

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

3.5 Kolefni og önnur lífræn jarðefni

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

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

Á tímabilinu 1750 til 2011 var heildarlosun af mannavöldum 454 [460–630] PgC en uppsöfnun í lofthjúpnum nemur 240 [230–250] PgC. Við þetta jókst styrkur CO_2 í lofthjúpnum frá 278 [273–283] ppm árið 1750 í 390.5 ppm árið 2011. Frá þeim tíma hefur styrkur CO_2 í lofthjúpnum að jafnaði aukist um rúmlega 2.5 ppm á ári og var um 407 ppm í lok ársins 2017¹¹.

Heildarlosuninni má skipta niður í 365 [335–395] PgC vegna bruna jarðefnaeldsneytis og sementsframleiðslu og 180 [100–260] PgC vegna skógareyðingar og annarra breytinga á landnotkun¹².

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

Nýleg samantekt á losun kolefnis af mannavöldum og upptöku í náttúrunni leiddi í ljós að á tímabilinu 2006–2015 var losun vegna bruna jarðefnaeldsneytis um 9.3 ± 0.5 PgC á ári, en losun vegna landnotkunar var 1.0 ± 0.5 PgC á ári. Á sama tíma söfnuðust 4.5 ± 0.1 PgC á ári fyrir í lofthjúpnum (sem jók styrk CO_2),

vistkerfi á landi tóku upp 3.1 ± 0.9 PgC á ári og hafið gleypst 2.6 ± 0.5 PgC á ári¹³. Á þessum áratug var hafið því að gleypa um 25% af losun CO_2 , sem aftur hefur leitt til aukningar á sýrustigi hafsins.

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

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

3.6 Áhrif á lífkerfi og samfélög

Loftslagsbreytingar hafa á liðnum áratugum haft áhrif á náttúru og samfélög á öllum meginlöndum og um öll heimsins höf. Áhrif loftslagsbreytinga koma greinilegast fram og eru víðtækust í náttúruferli. Sumar samfélagsbreytingar má rekja til loftslagsbreytinga að meira eða minna leyti¹⁴.

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

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

Fjöldi rannsóknna, frá ólíkum svæðum og á mörgum nytjategundum, sýnir að loftslagsbreytingar hafa oftast neikvæð áhrif á jarðrækt en jákvæð (*mikil víska*).

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

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

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

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

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

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

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

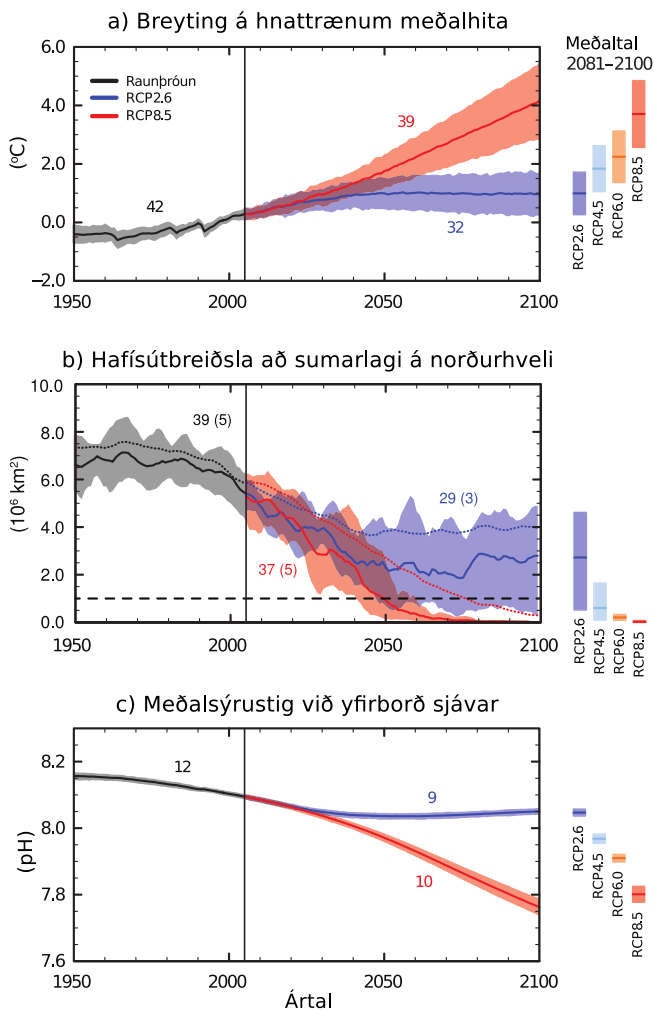
Vopnuð átök gera samfélög berskjaldaðri gagnvart áhrifum loftslagsbreytinga (*miðlungs-vísendingar, mjög sammála*) og draga úr getu til aðlögunar með því að valda tjóni á innviðum, náttúru- og félagsauði og draga úr tækifærum til þess að nýta lífsbjargir.

3.7 Aðlögun og umhverfi ákvarðanatöku

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

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

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



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

stjórnsýslustigum og tekið tillit til loftslagsbreytinga í víðu samhengi.

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

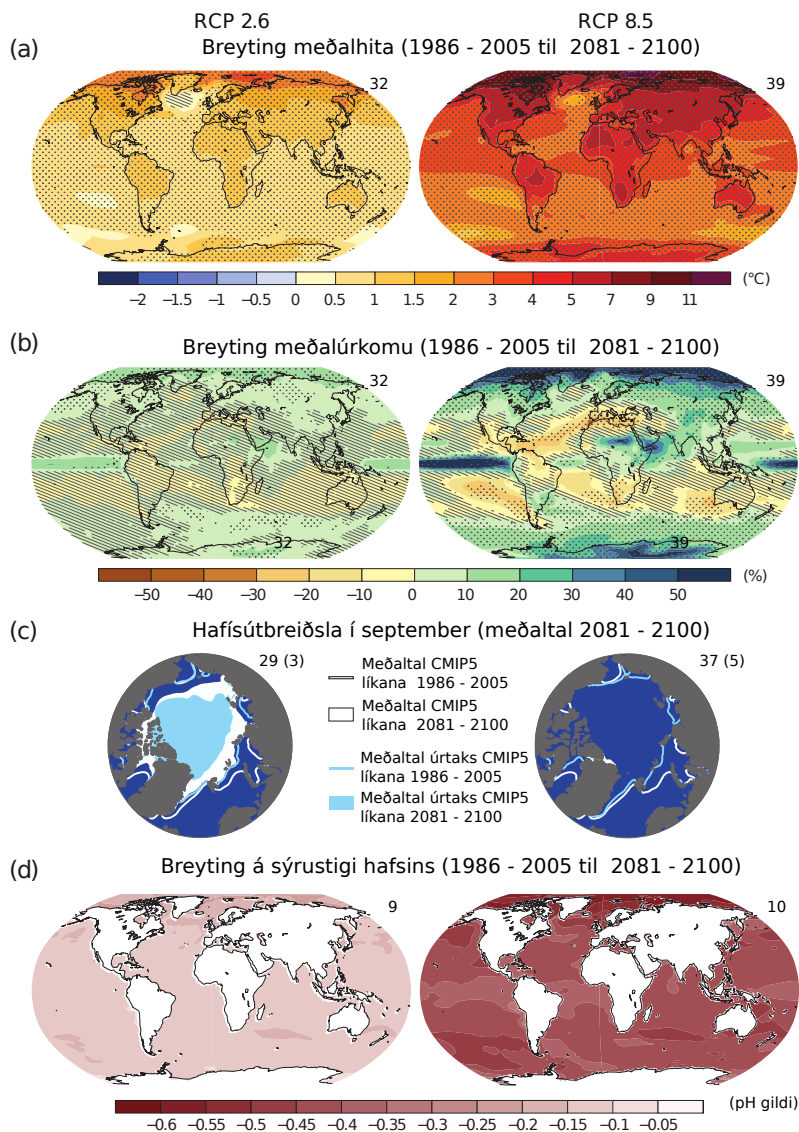
Ákvarðanir um aðlögun og aðrar aðgerðir í loftslagsmálum sem teknar verða í nálægri framtíð munu hafa áhrif á það hvernig áhætta tengd loftslagsbreytingum mun þróast á öldinni (*mikil vissa*).

Óvissa um framtíðarþróun tjónnæmis, áraunar¹⁵ og það hvernig samtengd félags- og náttúruleg kerfi svara álagi er veruleg (*mikil vissa*). Þetta kallar á víðfeðma skoðun á menningartengdum og félagshagfræðilegum þáttum við mat á framtíðarþróun áhættu. Dæmi um slíka þætti eru verðmætadreifing innan samfélaga, aðgengi að þekkingu, atvinnumöguleikar, fólksflutningar og aðrir lýðfræðilegir þættir, einnig félagsleg gildi, stjórnarfar og stofnanarammi til að leysa úr ágreiningsmálum. Á alþjóðavísu hafa viðskipti og samstarf ríkja einnig áhrif á svæðisbundna áhættu vegna loftslagsbreytinga.

3.8 Líklegar breytingar á nýhafinni öld

Miðlungsvissa er um að á fyrsta þriðjungi þessarar aldar verði hlýnun við yfirborð jarðar líklega á bilinu 0.3 til 0.7°C miðað við meðaltal árunna 1986–2005. Mat á hlýnun til aldarloka er á bilinu 0.3 til 4.8°C og fer mjög eftir því hvaða sviðsmynd¹⁶ um losun á þessari öld er notuð (mynd 3.5). Til loka aldarinnar munu meginlönd hlýna meira en úthöfin, og hlýnunin verður áköfust á heimskautasvæðum norðursins (mynd 3.6a).

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



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

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

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

Mynd 3.6b sýnir líklega landfræðilega dreifingu úrkomubreytinga til loka aldarinnar. Líklegt er að sama landfræðilega dreifing verði á úrkomubreytingum næstu áratuga, þó að umfangið verði minna. Náttúrulegur breytileiki úrkomu verður þó áfram verulegur¹⁷. Líklegt er að samfara hnattrænni hlýnun verði aftakaúrkoma mjög víða ákafari og tíðari.

Mjög líklegt er að ENSO (El Nino/La Nina-sveiflan) verði áfram ríkjandi sveifla í veðurfari. Vegna breytinga

á loftraka er líklegt að úrkomubreytingar tengdar ENSO muni aukast.

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

Hlýnun sjávar verður mest í hitabeltinu og á nærliggjandi svæðum. Mjög líklegt er að draga muni úr lóðréttri hringrás Atlantshafsins (AMOC), um 11 [1–24]% í þeirri sviðsmynd¹⁶ þar sem minnst hlýnar (RCP2.6), en 34 [12–54]% í sviðsmyndinni þar sem mest hlýnar (RCP8.5). Líklegt er að sveiflur í styrk AMOC verði umtalsverðar, en það er mjög ólíklegt að þessi hringrás breytist snögglega og varanlega. Ekki er hægt að útiloka hraðar breytingar eftir 2100. Nánar er fjallað um lóðrétta hringrás hafsins í hliðargrein í kafla 4 (sjá 4C Hafshringrás í Norður–Atlantshafi og loftslagsbreytingar).

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

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

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

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

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

Við framreikninga á líklegri sjávarstöðuhækkun byggði IPCC á gögnum frá CMIP5 líkönunum, jökla-líkönunum, auk tölfræðilegrar úrvinnslu á þeim. Á þeim tíma sem skýrslan kom út var talið ólíklegt að sjávar-

borðshækkun yrði meiri en greint er frá hér að ofan, nema til kæmi ákaft massatap frá ísbreiðunni á Suður-skautslandinu þar sem hún kelfir í sjó fram. Nánar er fjallað um þróun síðustu ára í hliðargrein um rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna (sjá hliðargrein 3D Rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna).

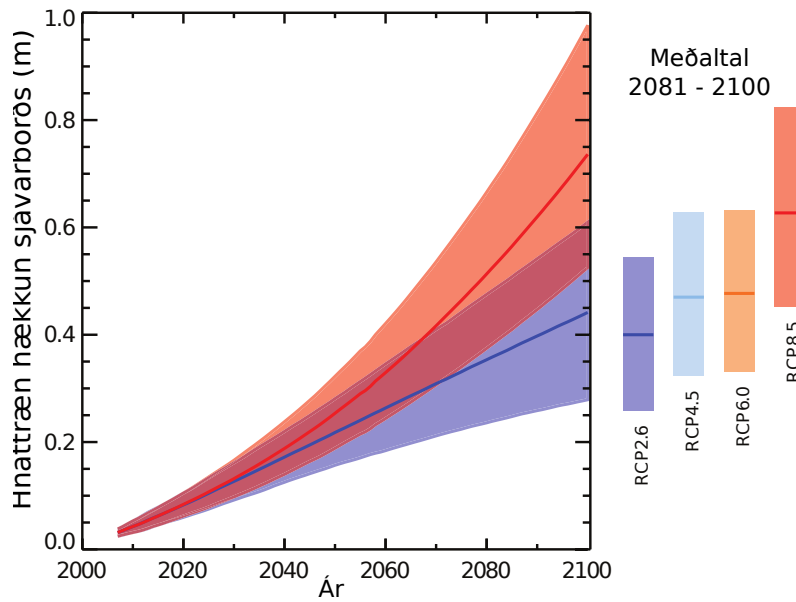
Sjávarstöðubreytingar verða ekki einsleitar. Við lok 21. aldar er mjög líklegt að sjávarborðshækkun nái til meira en 95% flatarmáls heimshafanna. Viðast hvar verður breytingin nærri því sem gerist hnattrænt. Talið er að á um 70% af strandsvæðum heimsins víki staðbundin breyting ekki meira en 20% frá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

3.9 Lykiláhættuþættir, áhyggjuefni og aðlögunargeta

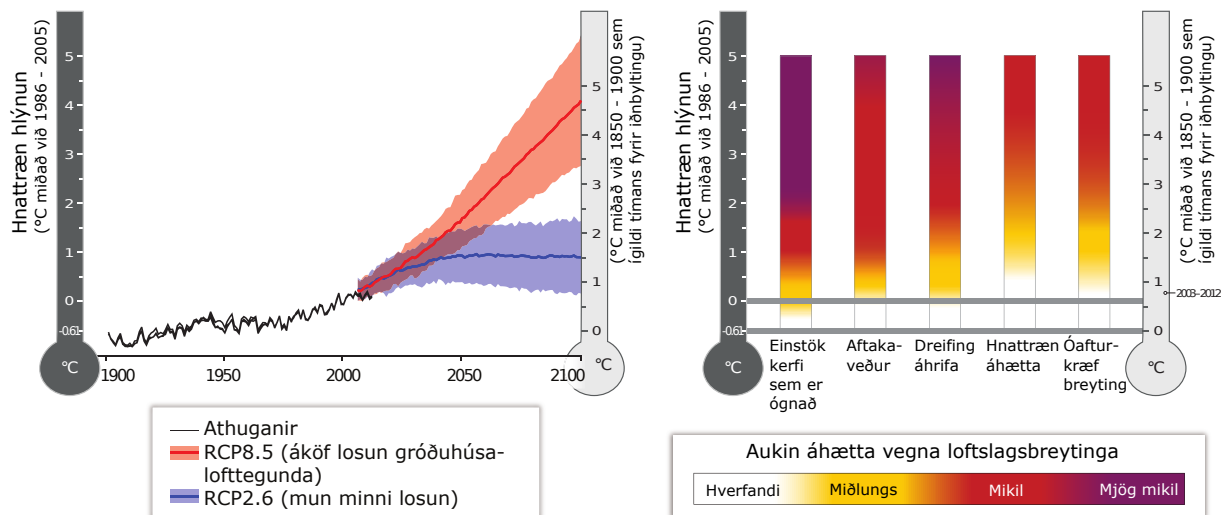
Árið 1992 samþykktu aðildarþjóðir Sameinuðu þjóðanna (Sp) Rammasamning um loftslagsbreytingar¹⁹. Þar skuldbundu aðildarþjóðir sig til að halda styrk gróðurhúsalofttegunda í lofthjúpunum innan þeirra marka að

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

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



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



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

hættuleg röskun á loftslagi myndi ekki eiga sér stað. Tekið hefur verið saman yfirlit um lykiláhættuþætti, sem líta má á sem alvarlegustu afleiðingar. Matið er byggt á því hversu líklegir áhættuþættirnir eru, umfangi þeirra, því tjóni sem þeir geta valdið, hvort afleiðingar séu afturkræfar, hvort um langtímahættu sé að ræða, hvort tjónnæmi og áraun sé varanleg og hvort takmarkaðir möguleikar séu á að aðlagast afleiðingum. Lykiláhættuþættir tengjast fimm flokkum áhyggjuefna²⁰, sem upphaflega voru settir fram í þriðju úttekt Milliríkjanefndar árið 2001, og marka afleiðingar og tjón fyrir vistkerfi, þjóðfélög, efnahagsgeira og svæði²¹. Flokkarnir eru sýndir í töflu 3.2 og mynd 3.8 sýnir samband hlýnunar²² og áhættu þeim tengda.

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

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

staklega í strandveiðisamfélögum í hitabeltinu og á norðurheimskautssvæðinu (ÁE 1, 2 og 4).

8. Hætta á verulegu tjóni á ferskvatnsvistkerfum og öðrum vistkerfum á landi og jafnframt á tegundaþækkun og minni náttúrugæðum (ÁE 1, 3 og 4).

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

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

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

3.10 Þróun losunar gróðurhúsalofttegunda og Parísarsamkomulagið

Á fundi í París í desember 2015 náðu aðildarþjóðir Sp samkomulagi²³ um að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda svo hlýnun frá iðnbyltingu yrði vel undir 2°C, en jafnframt skyldi leitast við að takmarka hlýnunina við 1.5°C. Þetta samkomulag er kallað Parísarsamkomulagið.

Í skýrslu IPCC frá 2013 var lagt mat á það hversu líklegt væri að hlýnun innan hveirrar sviðsmyndar færi yfir sett mörk²⁴ sem valin voru 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 og

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

Í öðrum dálki töflu 3.3 er einnig sýnd líkleg hlýnun frá iðnbyltingu, staðalfrávik og óvissumörk²⁵, fyrir hverja sviðsmynd. *Líklegt* er talið að hlýnunin liggi innan 5–95% markanna fyrir hverja sviðsmynd. Samkvæmt töflunni er *líklegt* að það hlýni meira en 1.5°C fyrir allar sviðsmyndir nema RCP2.6, og *líklegt* að hlýnunin verði meiri en 2°C í sviðsmyndum RCP6.0 og RCP8.5. Í sviðsmynd RCP4.5 er líklegra en ekki að það hlýni meira en 2°C. Hvað Parísarsamninginn varðar er því ljóst að einungis losun í samræmi við sviðsmynd RCP2.6 á góða möguleika á að uppfylla markmið samningsins við að halda hlýnun jarðar innan við 2°C en ef leitast á við að takmarka hlýnunina við 1.5°C þarf að draga meira úr losun.

Þessar niðurstöður fara nokkuð eftir jafnvægisvörum líkana, þ.e. hversu mikið hlýnar ef styrkur CO₂ í lofthjúpnnum tvöfaldast. Í CMIP5 líkönum er þessi svörun á bilinu 2.0–4.5°C en sé byggt á rannsóknum á fornveðurfari, áhrifum stórgosa og hlýnun síðustu aldar telur IPCC að jafnvægisvörurnin sé *líklega* á bilinu 1.5–4.5°C²⁶. Sé raunverulegt gildi lægra en niðurstöður CMIP5 líkananna gefa til kynna þá er einnig mögulegt

að RCP4.5 nái að uppfylla a.m.k. 2°C takmarkið²⁷. Í þessu samhengi er þó mikilvægt að hafa í huga að súrnun sjávar mun halda áfram ef losun er í samræmi við sviðsmyndir RCP4.5–RCP8.5, sjá nánar umfjöllun í kafla 6.

Í aðdraganda Parísarsamkomulagsins sendu aðildarþjóðir Sp inn yfirlýsingar um það hversu mikið þær hygðust draga úr losun á næstu áratugum. Ljóst er að heildarárhif þessara loforða munu ekki ná að uppfylla markmið samkomulagsins²⁸. Yfirlýsingarnar ná flestar einungis til 2030 en ef gert er ráð fyrir álíka metnaði aðildarþjóða næstu áratugi eftir þá verður hlýnunin á bilinu 2.6–3.2°C. Í þessu tilviki færi losun þá nærri því sem lýst er í sviðsmynd RCP4.5.

Önnur leið til að skoða hversu mikið þarf að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda er að miða við heildarlosun vegna bruna jarðefnaeldsneytis frá upphafi iðnbyltingar²⁹. Frá 1870 til 2016 var heildarlosun CO₂ vegna bruna jarðefnaeldsneytis og breytinga á landnotkun um 2100 GtCO₂. Ef miðað er við 66% líkur á að halda hnattrænni hlýnun innan 2°C má ekki brenna meira en 2900 GtCO₂ sem þýðir að bruni jarðefnaeldsneytis má ekki fara yfir 800 GtCO₂ á næstu áratugum³⁰. Á tímabilinu 2006–2015 var heildarlosun CO₂ vegna bruna jarðefnaeldsneytis og breytinga á landnotkun um 37.6 GtCO₂ á ári sem þýðir að ef ekki verður dregið úr losun gróðurhúsalofttegunda mun kolefniskvótinn klárast á rúmum tveimur áratugum. Þó að veruleg óvissa sé í ofangreindum tölum³¹, sem og á jafnvægisvörum, er ljóst að ef uppfylla á Parísarmarkmiðin eru ekki margir áratugir til stefnu.

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

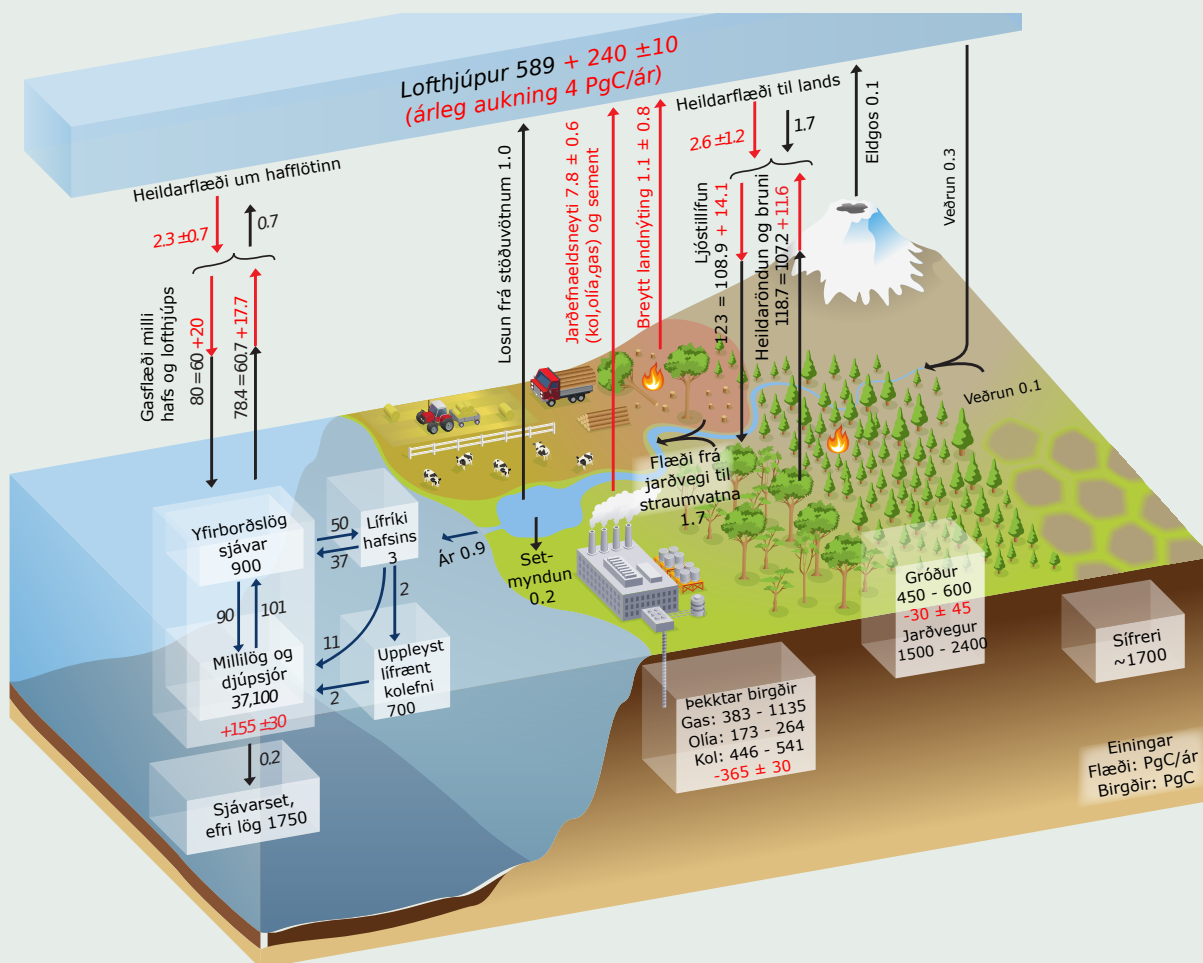
Tafla 3.3 Hlýnun frá iðnbyltingu fyrir tímabilið 2081–2100 í CMIP5 líkönum. Fyrir hverja sviðsmynd eru sýnd meðaltöl líkananna ± staðalfrávik, auk 5% og 95% vikmarka innan sviga. Einnig er sýndur hlutfallslegur fjöldi CMIP5 líkana sem sýna meiri hlýnun en 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 og 4.0°C (byggt á töflu 12.3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

3B Kolefnisjöfnuður Íslands

Stærsti þátturinn í kolefnisjöfnuði hvers lands er yfirleitt hin náttúrulega hringrás CO₂ milli andrúmslofts, gróðurs og jarðvegs. Á heimsvísu er áætlað að landmassi jarðar hafi árlega tekið upp 123 PgC á ári með ljóstillifun gróðurs og losað á móti um 118.7 PgC með öndun á tímabilinu 2000–2009. Það jafngildir árlegri nettóuppsöfnun um 2.6 PgC í gróðri og jarðvegi annars staðar en þar sem virk jarðvegs- og skógareyðing á sér stað og að 1.7 PgC hafi borist til sjávar með árvatni (mynd 3.9). Til samanburðar var árleg losun manna á sama tímabili með bruna jarðefnaeldsneytis 7.8 PgC og 1.1 PgC með skógar- og jarðvegseyðingu, sem var 6.6% og 0.9% af því CO₂ sem losnaði með öndun frá plöntum og jarðvegi árlega. Þrátt fyrir að þessar árlegu hlutfallsstærðir í auknu flæði CO₂, með bruna

jarðefnaeldsneytis og breytingu á landnýtingu, virðist ekki mjög stórar við fyrstu sýn, þá hafa þær stöðugt aukið það magn CO₂ sem er í hringrás og þar með valdið síhækkandi styrk CO₂ í andrúmslofti, en hann hefur hækkað úr 278 ppm CO₂ um 1750 upp í um 407 ppm árið 2017 (sjá grein 3.5).

Árið 2012 kom út bók um kolefnishringrás Íslands³³, en í henni var í fyrsta sinn reynt að gefa yfirlit um bæði lífræn og ólífræn ferli sem tengjast kolefnishringrás landsins, líkt og gert var fyrir alla jörðina á mynd 3.9. Með leyfi höfundar er hér endurgerð lykilmýnd úr bókinni sem tekur saman öll þessi ferli og bætt við ýmsum nýjum upplýsingum sem komið hafa fram eftir að bókina kom út 2012. Fyrir kolefnisbúskap Íslands er heppileg eining milljón tonn CO₂ en 1 PgC samsvarar 3664 milljón tonnum CO₂.

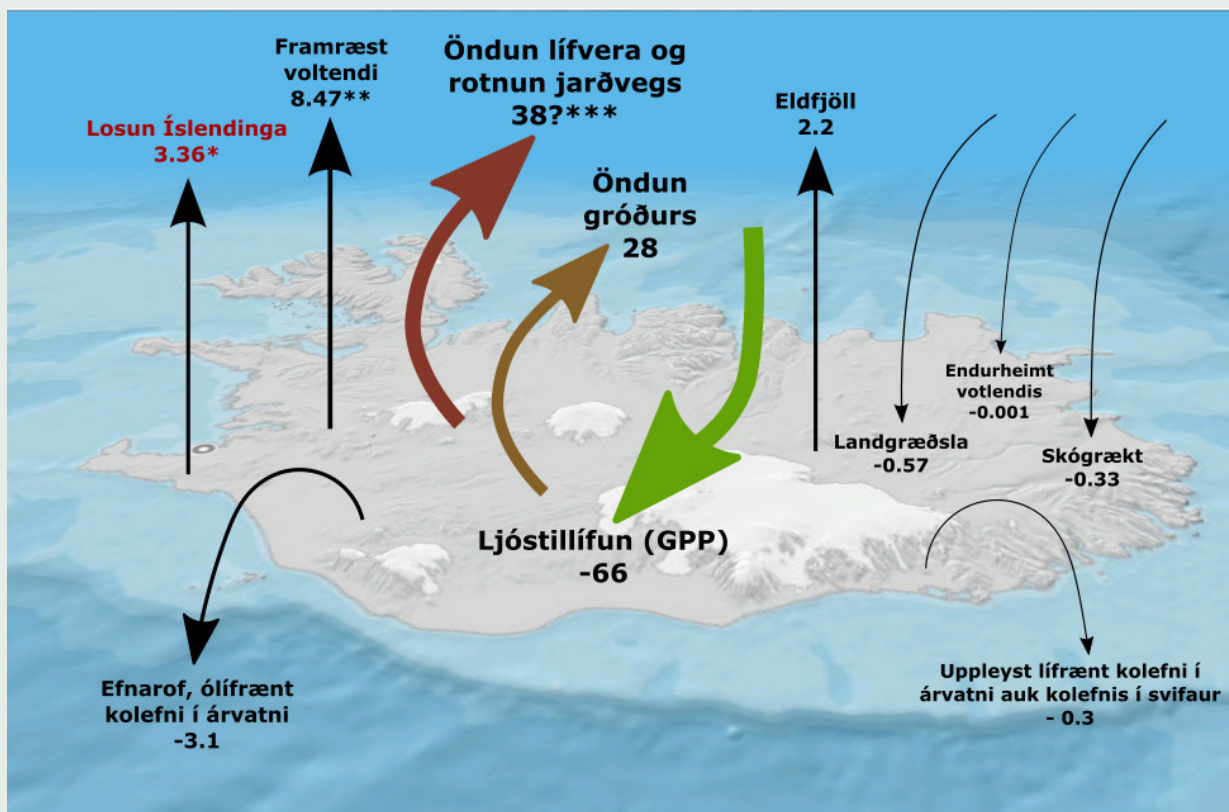


Mynd 3.9 Einfölduð mynd af kolefnishringrás jarðar 2000–2009. Tölur standa fyrir magn kolefnis (kolefnisforða) í PgC (1 PgC = 10¹⁵ g C) og flæði kolefnis í PgC á ári. Svartar tölur og örvar tákna ástandið fyrir iðnhyltingu, en rauðar tölur og örvar tákna flæði C á árunum 2000–2009; þ.e. breytingu vegna áhrifa mannsins eftir 1750. (Heimild: IPCC (2013), sjá tilvísun 32 mynd 6.1.)

Kolefnishringrás Íslands (mynd 3.10) lítur um margt líkt út og fyrir jörðina alla. Þar er stærsti liðurinn öndun frá plöntum, dýrum (örverum) og jarðvegi, eða 66 milljónir tonna. Til viðbótar er áætluð árleg CO₂ losun alls framræsts votlendis um 8.5 milljónir tonna, en hún er áætluð út frá kortlögðu flatarmáli alls framræsts lands og alþjóðlegum losunarstuðlum fyrir N-Evrópu³⁴. Eldvirkni losar að jafnaði um 2,2 milljónir tonna CO₂ á hverju ári og losun manna frá iðnaði, orkuvinnslu, landbúnaði, úrgangi og efnanotkun í byggingum, samgöngum o.fl. nam alls um 3.4 milljónum tonna. Alls er því áætlað að um 80 milljónir tonna af CO₂ losni

að jafnaði frá Íslandi á hverju ári, og um 18% þeirrar losunar stafi af beinni eða óbeinni (vegna landnýtingar) losun manna.

Mynd 3.10 sýnir að árleg upptaka gróins lands með ljóstillífun er um 66 milljónir tonna hérlendis. Við þá tölu bætist svo árleg binding með skógrækt, landgræðslu og endurheimt votlendis, sem nam um 0,9 af milljónum tonna CO₂ árið 2015, og efnaveðrun (efnarof) ólífræns CO₂ og flutningur lífræns C með árvatni til sjávar, sem nam samtals um 3.4 milljónum tonna árið 2006. Árleg upptaka nemur alls um 70.3 milljónum tonna af CO₂, en um 1.3% hennar er með



Mynd 3.10 Einfölduð mynd af kolefnishringrás Íslands á síðasta áratug. Tölur standa fyrir flæði kolefnis í milljónum tonna CO₂ á ári. Jákvæðar tölur sýna losun frá landi til andrúmslofts en neikvæðar sýna upptöku CO₂ úr andrúmslofti og umbreytingu þess í ýmis önnur efnasambönd. Tölur um losun Íslendinga, losun frá framræstu votlendi og upptöku með skógrækt, landgræðslu og endurheimt votlendis eru fyrir árið 2015 (sjá heimild 34), en aðrar tölur eru áætlaðar fyrir árið 2006 og voru fengnar frá heimild 33.

* Losun CO₂ af mannavöldum frá Íslandi var 3.36 milljón tonn CO₂ árið 2015³⁴, en alls var heildarlosun af mannavöldum 4.54 milljóna tonn CO₂-ígilda, þegar öðrum gróðurhúsalofttegundum hafði verið bætt við. Þessar tölur taka ekki til losunar vegna breytinga á landnýtingu (framræslu votlendis o.fl.). Að auki eru alþjóðaflug og siglingar ekki taldar með.

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

*** Hvað kolefnisjöfnuð Íslands varðar er mest óvissa á þessum þætti. Að hluta skarast hann einnig við það magn CO₂ sem áætlað er að losni árlega frá framræstu votlendi.

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

Munurinn á þessum tveimur stóru tölum í flæði CO₂ um yfirborð landsins (útflæði 80 milljónir tonna og innflæði 70.3 milljónir tonna) er áætlaður kolefnisjöfnuður Íslands á síðasta áratug. Sú tala nemur um +9.7 milljónum tonna CO₂ sem er árleg nettó losun landsins og það magn sem berst frá Íslandi og stuðlar að hækkandi styrk CO₂ í andrúmslofti (mynd 3.3) og súrnun hafsins (sjá kafla 6). Þetta er heldur lægri tala en sem talin er fram til Loftslagssamnings Sameinuðu þjóðanna, en þar var hún áætluð um +14.8 milljón tonn CO₂-jafngilda árið 2015³⁴. Ástæðan er annars vegar að á mynd 3.10 er einungis tekið tillit til upptöku og losunar CO₂, en ekki annarra gróðurhúsalofttegunda, og hins vegar tekur kolefnisbókhald Íslands til Loftslagssamningsins ekki tillit til losunar frá eldfjöllum eða upptöku CO₂ vegna efnaveðrunar landsins.

Pó að metan (CH₄) sé vissulega kolefnissamband, þá er flæði þess til og frá Íslandi sleppt á mynd 3.10. Losun metans til andrúmslofts verður einkum frá óröskuðu mýrlendi og frá jörturdýrum. Nýjar rannsóknir á íslenskum graslandum og skógum sýna hins vegar að metan er bundið úr andrúmslofti í þurrlandisjarðvegi hérlandis³⁷. Þrátt fyrir að hraði bindingarinnar sé ekki hár, þá má ætla að hann verði á stórum hlutum gróins þurrlandis hérlandis og því nokkuð óvíst hvernig jöfnuður metans er í raun.

Áhugavert er að bera kolefnisbúskap hér á landi saman við upptöku sjávar á hafsvæðum nærri landinu. Eins og kemur fram í kafla 6 veldur þessi upptaka súrnun hafsins, en í kaflanum kemur einnig fram að Norður-Atlantshaf er afar mikilvægt í þessu sambandi, því á hverju ári tekur það til sín miklu meira CO₂ en það lætur frá sér. Íslandshaf, norður af landinu, er um 406 þúsund ferkílómetrar og mikið er til af gögnum úr rannsóknum Hafrannsóknastofnunar á koldíoxíði í Íslandshafi. Sé heildar-kolefnisjöfnuður landsins, +9.7 milljónir tonna af CO₂ á ári, borinn saman við nettó upptöku yfirborðssjávar í Íslandshafi, fæst að kolefnisjöfnuðurinn jafngildir CO₂ upptöku á 49 þúsund km² hafsvæði í Íslandshafi. Til samanburðar má hafa í huga að flatarmál Íslands er tvöfalt stærra, eða um 103

þúsund km². Þess ber að gæta að kolefnisjöfnuður landsins er að mestu vegna athafna manna á landinu en upptaka hafsins tengist ástandi lofthjúps jarðar.

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

3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5

Í 5. matskýrslu IPCC (2013) eru loftslagslíkön úr CMIP5 verkefninu notuð til þess að leggja mat á hlýnun jarðar að gefnum fjórum sviðsmyndum um losun gróðurhúsalofttegunda³⁸. Aukning gróðurhúsalofttegunda breytir afdrifum varmageislunar í lofthjúpnun. Mælikvarði á þetta er geislunarálag sem er aukning varmageislunar í átt að yfirborði jarðar mælt í W/m². Geislunarálag eykst mismikið í þessum fjórum sviðsmyndum og draga þær nafn sitt af álaginu í lok 21. aldar. Þannig eykst geislunarálag frá iðnbyltingu um 8.5 W/m² í sviðsmynd RCP8.5 en um 2.6 W/m² í sviðsmynd RCP2.6. Einnig var til samanburðar reiknuð „söguleg“ sviðsmynd þar sem þróun geislunarálags var í samræmi við ætlaða þróun frá iðnbyltingu til okkar daga. Í CMIP5 verkefninu voru mörg loftslagslíkön notuð til að reikna þróun loftslags við hverja sviðsmynd³⁹ og er fjöldi þeirra sýndur í töflu 3.4.

Sviðsmynd	Geislunarálag W/m ²	Fjöldi
Söguleg	Raunþróun	42
RCP2.6	2.6	32
RCP4.5	4.5	42
RCP6.0	6.0	25
RCP8.5	8.5	39

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

Sviðsmyndirnar eru ekki spá um losun, en þess er vænst að þær nái að spanna heildarlosun gróðurhúsalofttegunda á 21. öldinni. Til að kanna áhrif þess að draga úr losun eftir 2100 voru sviðsmyndirnar einnig framlengdar til ársins 2500, en ekki er fjallað um þær niðurstöður í þessum kafla⁴⁰. Í greinum 3.10, 4.4 og 6.7 eru sviðsmyndirnar ræddar með hliðsjón af niðurstöðum Parísarsamkomulagsins.

3D Rýrnun jökla og hækkun á sjávarborði heimshafanna

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

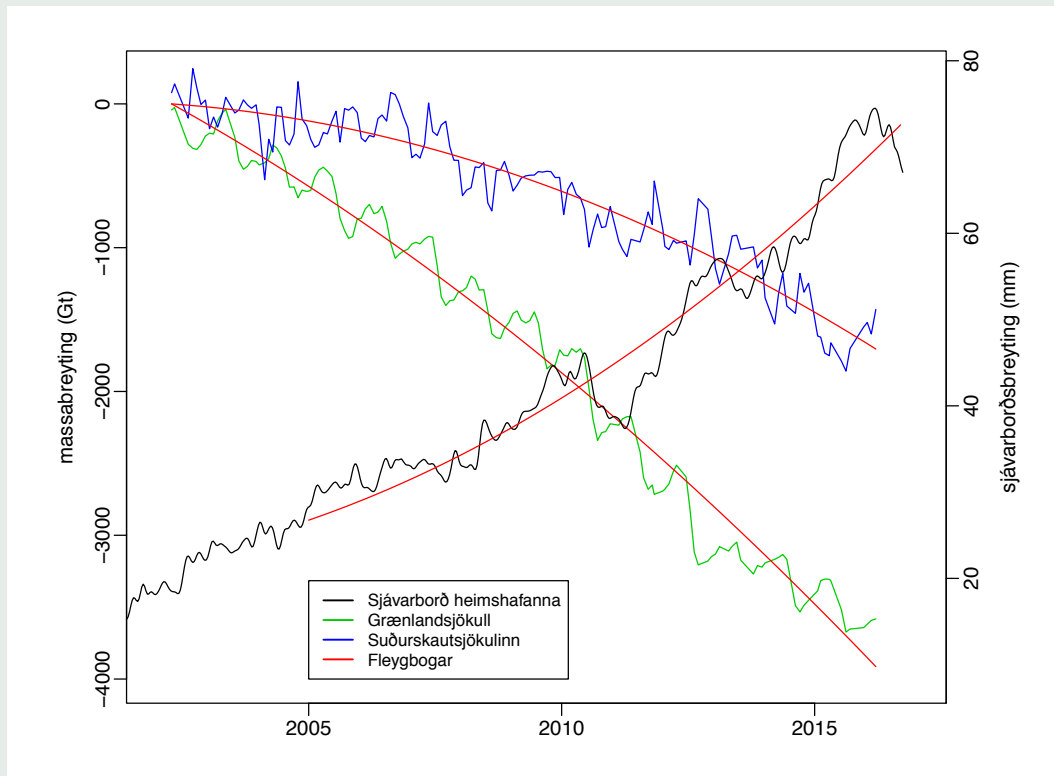
Þó hafði verið ljóst frá því um 1980 að ísbreiða vesturhluta Suðurskautslandsins liggur að miklu leyti á undirlagi sem er undir sjávarmáli og jöklar þar tóku líklega miklum breytingum milli jökulskeiða og hlýskeiða ísaldar. Hlýnun af mannavöldum kynni að hafa í för með sér miklar breytingar á jöklum á þessu svæði ef marka mætti vísbendingar úr jarðsögunni og ákveðnar jöklafræðilegar röksemdir hnigu í sömu átt⁴¹. Vestanvert Suðurskautslandið ber ís sem samsvarar um 8 m hækkun á sjávarborði heimshafanna.

Bylting hefur orðið á mælingum á afkomu jökla á síðustu einum til tveimur áratugum. Nú gera gervihnattamælingar, einkum þyngdarmælingar GRACE gervihnatta NASA og þýsku geimferðastofnunarinnar DLR, kleift að leggja allnákvæmt mat á breytingar á heildarmassa íss á heimskautasvæðum og reyndar á ýmsum minni svæðum jarðar þar sem jökla er að finna⁴². Mynd 3.11 sýnir massatap ísbreiða Suðurskautslandsins og Grænlands síðan 2002⁴³. Einnig eru á sömu mynd sýndar breytingar á meðalsjávarborði heimshafanna. Sjá má að rýrnun heimskautajöklanna hefur vaxið hröðum skrefum síðan báðir jöklarnir voru nærri jafnvægi í upphafi aldarinnar. Meðalrýrnun Grænlandsjökuls á tímabilinu 2002–2016 mælist 281 Gt/ár en Suðurskautsjökulsins 122 Gt/ár, samtals 403 Gt/ár, sem samsvarar rúmlega 1 mm hækkun á meðalsjávarborði heimshafanna á ári, sem er talsvert meira en samanlagt framlag jökla utan heimskautasvæða til hækkunar sjávarborðs á svipuðu

tímabili (0,65 mm/ár fyrir tímabilið 2002–2014)⁴⁴. Massabreytingin í upphafi tímabilsins árið 2002 var um 195 Gt/ár fyrir Grænland og einungis um 25 Gt/ár fyrir Suðurskautslandið, samtals 220 Gt/ár, en árið 2016 hafði rýrnunin hert á sér í 367 Gt/ár fyrir Grænland og 220 Gt/ár fyrir Suðurskautslandið, samtals 587 Gt/ár. Það samsvarar tæplega 2 mm hækkun sjávarborðs á ári (óvissa í þessum tölum flestum er á bilinu 10–20%). Hraði rýrnunarinnar hefur þannig tvöfaldast fyrir Grænland og áttfaldast fyrir Suðurskautslandið á tímabilinu 2002–2016.

Mælingar á hraða ísskriðs og lækkun á yfirborði jöklanna sýna að mestu breytingarnar eiga sér stað á nokkrum afmörkuðum svæðum nærri ströndinni þar sem skriðjöklar kelfa í sjó fram. Á Grænlandi er einkum um að ræða Ilulissatjökul á vesturströndinni og nokkra aðra jökla, en á Suðurskautslandinu eru breytingarnar hraðastar á skriðjöklum við Amundsenflóa á vesturströndinni^{43,45}. Mælingar sýna hraða hörfun jökulsporða á þessum slóðum, sem nemur tugum km á nokkrum stöðum það sem af er þessari öld, og hafðypið þar sem jöklarnir kelfa í sjó fram vex víða eftir því sem þeir hörfa, sérstaklega við fyrrnefndan Amundsenflóa. Fyrirliggjandi gögn benda til þess að hraðfara og óafturkræf hörfun og þynning hluta vestanverðs Suðurskautsjökulsins kunni að vera hafin⁴⁶ og muni ekki stöðvast eða ganga til baka þótt andrúmsloftið hætti að hlýna. Ekki er unnt að segja til um það með jöklafræðilegum líkanreikningum hversu hröð þessi þróun verður á næstu áratugum vegna óvissu um eðli kelfingar, ísskriðs og fleiri jökla- og haffræðilegra þátta.

Mynd 3.11 sýnir einnig að hækkun á sjávarborði heimshafanna hefur hert verulega á sér á síðustu árum. Meðaltalshækkunin var $3.4 \pm 0,4$ mm/ár á tímabilinu 1993–2016 sem gervihnattamælingar spanna⁴⁷ en hækkaði í 5–6 mm/ár á árunum 2016 og 2017 ef litið er til tölfraðilegrar aðfelli sem jafnar út breytingar milli ára (sjá rauða ferilinn á myndinni). Mun meiri óvissa er um hraða hækkunarinnar yfir fárra ára tímabil en tímabil sem spanna nokkra áratugi. Ljóst er að hækkun sjávarborðsins það sem af er þessari öld hefur hert mik- ið á sér frá meðaltali 20. aldar sem var um 1.8 mm/ár. Nýlega voru nákvæmar mælingar á breytingum í þyngdarsviði jarðar greindar. Sýna þær að grunnvatn hefur safnast verulega upp á nokkrum svæðum jarðar. Á síðari árum hefur það vegið á móti vaxandi massatapi



Mynd 3.11 Breytingar á massa ísbreiða Suðurskautslandsins og Grænlands á tímabilinu 2002–2016 skv. mælingum GRACE gervihnatta og hækkun á meðalsjávarborði heimshafanna síðan árið 2002⁴³. Sjávarborðsferillinn hefur verið leiðréttur fyrir löðréttum jarðskorpuhreyfingum (GIA) og áhrif árstíðasveiflu verið numin burt. Rauðar bogadregnar línur sýna fleygboga sem felldir hafa verið að mælingunum með aðferð minnstu kvaðrata. Fleygbogana má nota til þess að meta hraða rýrnunar ísbreiðanna í Gt/ári og hraða sjávarborðshækkunarinnar í mm/ár á mismunandi tímum.

heimskautajöklanna⁴⁸. Dragi úr uppsöfnun vatns á landi mun massatap jöklanna koma að fullu fram og sjávarborðshækkunin herða enn meira á sér. Eins og með massatap jöklanna er erfitt að meta með líkanreikningum hvernig sjávarborðið kann að þróast á næstu áratugum vegna óvissu um framlag jöklanna. Ýmsar þjóðir hafa af þessum sökum lagt fram spár um hækkun sjávarborðs með breiðu óvissubili til þess að

endurspegla þessa stöðu og hafa m.a. Hollendingar lagt fram þá spá að sjávarborð í Norðursjó kunni að hækka um 0.65–1.3 m á yfirstandandi öld^{43,49}. Hér á landi eru aðstæður aðrar eins og nánar er rætt í grein 5.3 og líklegt að sjávarborð hér við land hækki minna en að meðaltali yfir heimshöfin vegna breytinga á þyngdarsviði sem að hlýst af nálægð við Grænland.

Tilvísanir

- 1 Millirikjanefndin er betur þekkt af enskri skammstöfun heitis hennar, Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC, og er sú skammstöfun notuð í þessari skýrslu.
- 2 Greinar 3.1 –3.5 og 3.8 byggjast á IPCC 2013. Summary for Policymakers í skýrslunni Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex & P.M. Midgley (ritstj.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA.
- 3 Halldór Björnsson, Árný E. Sveinbjörnsdóttir, Anna K. Daníelsdóttir, Árni Snorrason, Bjarni D. Sigurðsson, Einar Sveinbjörnsson, Gísli Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Snorri Baldursson, Sólveig Þorvaldsdóttir og Trausti Jónsson 2008. Hnatrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar. Umhverfissráðuneytið. Í þeim köflum sem hér fylgja er oft vitnað til fyrri skýrslu sem V2008.
- 4 Í úttektarskýrslum Millirikjanefndar er notað visst kvarðað orðalag til þess að tilgreina líkur á tilekinni atburðarás eða niðurstöðu. Slik orð eru skáletruð í textanum. Sjá nánar hliðargrein 3A Kvarðað orðalag.
- 5 Myndin byggist á gögnum frá bandarísku haf- og veðurfræðistofnuninni, NOAA National Centers for Environmental Information, State of the Climate: Global Climate Report for June 2017 (from www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/201706). Greiningarnar byggjast á aðferðum sem lýst er í Peterson, T.C. & R.S. Vose 1997. An Overview of the Global Historical Climatology Network Database. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 78, 2837-2849 og Huang, B., V.F. Banzon, E. Freeman, J. Lawrimore, W. Liu, T.C. Peterson, T.M. Smith, P.W. Thorne, S.D. Woodruff & H.-M. Zhang. 2016. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and Intercomparisons. J. Climate, 28, 911–930. [dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00006.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00006.1)
- 6 Sjá Rahmstorf S, Foster G. og Cahill, N. 2017. Global temperature evolution: recent trends and some pitfalls. Environmental Research Letters, 12:5. Nokkrar gagnaraðir hnatrænna hitavika eru til (Mynd 3.1) og síðustu áratugi hefur hlýninun í þeim numið 0.17–0.19°C á áratug. Dæmigerð spönn 90% óvissubils á þessum leitnitölum er 0.05°C, t.d. 0.17 [0.15, 0.20]°C á áratug.
- 7 Skammstöfunin ppm stendur fyrir parts per million, þ.e. milljónasti hluti.
- 8 Myndin er byggð á gögnum frá Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/) og Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu/).
- 9 Þessar tölur eru byggðar á svokallaðri PIOMAS-endurgreiningu, en vegna þess hversu lítið er um þykktarmælingar kunna niðurstöður að vera háðar líkani. Tölur um samdrátt eru uppfærðar úr grein Schweiger, A., R. Lindsay, J. Zhang, M. Steele, H. Stern & R. Kwok 2011. Uncertainty in modeled Arctic sea ice volume, J. Geophys. Res., 116, C00D06, doi:10.1029/2011JC007084.
- 10 Turner, J., T. Phillips, G. J. Marshall, J. S. Hosking, J. O. Pope, T. J. Bracegirdle & P. Deb. 2017. Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016, Geophys. Res. Lett., 44, doi:10.1002/2017GL073656.
- 11 Hvað síðustu ár varðar er miðað við styrk CO₂ á Mauna Loa, tölur eru frá bandarísku veðurstofunni NOAA, sjá heimild í tilvitnun 8.
- 12 Einingin PgC táknar petagrömm af kolefni. Þetta er sama magn og gígatonn kolefnis, GtC. Skyld eining er gígatonn af CO₂ eða GtCO₂, en þegar fjallað er um losun CO₂ nota sumar heimildir GtC en aðrar GtCO₂. Auðvelt er að skipta á milli þessara eininga með því að nota sér að í 3.664 kg af CO₂ er 1 kg af kolefni.
- 13 Corinne Le Quéré ofl., Global Carbon Budget 2016. Earth Syst. Sci. Data, 8, 605-649, 2016 doi.org/10.5194/essd-8-605-2016
- 14 Greinar 3.6, 3.7 og 3.9 eru útdráttur greina A1, A2 og B1 í IPCC 2014. Summary for policymakers. Í: Climate Change 2014. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (ritstj.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom & New York, NY, USA, bls. 1–32. Í samræmi við frumtexta er *kvarðað orðalag* oftast innan sviga í þessum hluta textans.
- 15 Hér er enska orðið *vulnerability* þýtt sem tjónnæmi, en orðið *exposure* þýtt sem áraun. Síðara orðið hefur einnig verið þýtt sem viðvera (í umfjöllun um áættustýringu vegna ofanflóða) og einnig sem berstaða.
- 16 Nánar er fjallað um sviðsmyndir í hliðargrein 3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5.
- 17 Með náttúrulegum breytileika er hér átt við breytileika í veðurfari sem ekki er hægt að rekja til athafna mannkyns.
- 18 Mynd 3.6c sýnir að mjög fá hafslíkön ná vel að herma eftir hafisútbreiðslu árána 1979 – 2012. Hafa ber þetta í huga við mat á áreiðanleika framreikninga á hafisþekju.
- 19 Rammasamningur Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar heitir á ensku United Nations Framework Convention on Climate Change og er skammstafaður UNFCCC.
- 20 Hér er *reasons for concern* þýtt sem áhyggjuefni.
- 21 Sjá Smith, J.B. ofl. 2001. Vulnerability to climate change and reasons for concern: a synthesis, Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken & K.S. White, ritstjóri. Cambridge University Press, Cambridge, 913–967.
- 22 Í töflunni er miðað við hlýnun frá meðaltali árána 1986 – 2005, þ.e. frá lokum 20. aldar.
- 23 Þetta samkomulag er nefnt eftir borginni þar sem það náðist og kallað *Parisarsamkomulagið*. Sjá nánar unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php

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

- Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophys. Res. Lett.*, 41(10), 3502–3509.
- Sutterley, T. C., I. Velicogna, E. Rignot, J. Mouginot, T. Flament, M. R. van den Broeke, J. M. van Wess-~~em~~ og C. H. Reijmer 2014, Mass loss of the Amundsen Sea Embayment of West Ant-~~arctica~~ from four independent techniques. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 8421–8428. doi: 10.1002/2014GL061940.
- 46 Joughin, I., og R. B. Alley 2011. Stability of the West Antarctic ice sheet in a warming world. *Nat. Geosci.*, 4(8), 506–513.
- Joughin, I., B.E. Smith og B. Medley 2014. Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica. *Science*, 344(6185), 735–738.
- 47 Nerem, R. S., D. Chambers, C. Choe og G. T. Mitchum 2010. Estimating Mean Sea Level Change from the TOPEX and Jason Altimeter Missions. *Marine Geodesy*, 33(1), Suppl. 1, 435. Uppfært til 2016 með upplýsingum á vefsíðunni sealevel.colorado.edu.
- 48 Reager, J. T., A. S. Gardner, J. S. Famiglietti, D. N. Wiese, A. Eicker og M.-H. Lo. 2016. A decade of sea level rise slowed by climate-driven hydrology. *Science*, 351(6274), 699–703. doi: 10.1126/science.aad8386.
- 49 The Delta Committee (Deltacommissie). 2008. Working together with water. A living land builds for its future. Findings of the Deltacommissie. 2008. The Hague, Secretariat Delta Committee.

