

## SROCC

# Skýrsla Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á hafið og freðhvolfið.

*Samantekt á niðurstöðum unnin á Veðurstofu Íslands og Hafrannsóknastofnun, september 2019*

### Inngangur

Sérstök skýrsla Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna (Sp) um loftslagsbreytingar (IPCC) um áhrif loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið er unnin að beiðni ríkisstjórna aðildarþjóða Sp. Skýrslan byggir á birtum vísindagreinum auk upplýsinga frá alþjóðlegum gagnasöfnum og stofnunum. Skýrslan notar kvarðað orðalag sem IPCC notast við í skýrslum sínum til þess að tilgreina líkur á tiltekinni atburðarás eða niðurstöðu. Þessi skilgreining gefur lesmáli frá IPCC ákveðnari merkingu en ella. Slík orð eru skáletruð í textanum. Orðin eru alþekkt en nákvæmlega hefur verið skilgreint við hvað er átt, og er sá lykill gefinn í þriðja kafla skýrslu Vísindanefndar um loftslagsbreytingar frá 2018.

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

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

Hvað vísbendingar (*evidence*) varðar er notað orðalagið: Takmarkaðar, miðlungs eða traustar (*limited, medium & robust*) eftir því hversu eindregnar þær eru. Hversu sammála vísindamenn eru um niðurstöður er táknað með þremur stigum: lítt sammála, í meðallagi sammála og mjög sammála (*low, medium and high agreement*). Vissa (*confidence*) hefur eftirfarandi fimm stig: mjög lítil, lítil, miðlungs, mikil og mjög mikil (*very low, low, medium, high, very high confidence*). Stærðir eru oft gefnar upp með 90% öryggisbili. Þannig þýðir 0.5 [0.4–0.6] að 0.5 sé líklegasta gildi, en 90% vissa sé fyrir því að rétt mat liggi á bilinu 0.4 til 0.6.

### Sviðsmyndir sem notaðar eru í skýrslunni.

Þessi skýrsla fylgir 5. matskýrslu IPCC (2013) og notar fjórar megin sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Aukning gróðurhúsalofttegunda breytir afdrifum varmageislunar í lofthjúpnunum. Mælikvarði á þetta er geislunarálag sem er aukning varmageislunar í átt að yfirborði jarðar mælt í W/m<sup>2</sup>. Geislunarálag eykst mismikið í þessum fjórum sviðsmyndum og draga þær nafn sitt af álaginu í lok 21. aldar. Þannig eykst geislunarálag frá iðnbyltingu um

8.5 W/m<sup>2</sup> í sviðsmynd RCP8.5 en um 2.6 W/m<sup>2</sup> í sviðsmynd RCP2.6. Vegna þess að hlýnun er háð losun gróðurhúsalofttegunda hlýnar minnst í sviðsmynd RCP2.6 og mest í RCP8.5. Einnig eru notaðar sviðsmyndirnar RCP4.5 og RCP6.0. Sviðsmyndirnar eru ekki spá um losun, en þess er vænst að þær spanni heildarlosun gróðurhúsalofttegunda á 21. öldinni. Þessum sviðsmyndum er nánar lýst í grein 3C í skýrslu Vísindanefndar um loftslagsbreytingar (2018).

### Hafið og freðhvolfið og mikilvægi þeirra.

Hafið þekur 71% af yfirborði jarðar, nær heimskautasvæða á milli og inniheldur um 97% af öllu vatni á jörðinni. Freðhvolfið er samheiti yfir frosið vatn á jörðinni, m.a. snjó, jökla, jökulbreiður, íshellur, hafis, borgarís, ís á vötnum og ám, sífrera og jarðvatn sem frýs hluta ársins. Um 10% af yfirborði jarðar er hulið ís eða jöklum sem binda samanlagt um 69% af ferskvatni á jörðinni.

Hafið og freðhvolfið eru mikilvæg búsvæði lífs og tengjast öðrum hlutum loftslagskerfisins á ýmsa vegu, m.a. gegnum flæði orku, vatns og kolefnis. Allir íbúar jarðar eru ýmist beint eða óbeint háðir hafinu og freðhvolfinu. Hafið og freðhvolfið stuðla að miðlun ferskvatns og endurnýjanlegrar orku, dreifingu varma, upptöku kolefnis og dreifingu þess og matvælaframleiðslu. Hafið og freðhvolfið gegna einnig lykilhlutverki varðandi velferð, heilsu, varðveislu menningarverðmæta, efnahagsstarfsemi og í flutningum.

Hafið og freðhvolfið bregðast óhjákvæmilega við aukningu gróðurhúsalofttegunda og hlýnun á næstu áratugum og öldum. Sumar afleiðinganna verða óafturkræfar og geta gerst hratt. Til þess að stýra áhættu og koma í veg fyrir að hún aukist þarf að aðlaga þjóðfélög að breytingum og draga úr losun gróðurhúsalofttegunda. Meðal álags sem af breytingunum stafar er röskun á sífrera og freðhvolfi á heimskauta- og háfjallasvæðum, hækkandi sjávarstaða og breytingar á vatnafari.

Um 4 milljónir manna búa á heimsskautasvæðum og um tíundi hluti þeirra á ættir að rekja til þjóða sem þar hafa verið í þúsundir ára. Á lágsvæðum nærri ströndu búa um 680 milljón manns og mun líklega hafa fjölgað í milljarð eða meira um 2050. Álíka margir búa á háfjallasvæðum og kann þeim að fjölga í 740–840 milljónir um miðja öldina. Ástand og þróun hafsins og freðhvolfsins hefur áhrif á sjálfbæra þróun og skarast við þróunarmarkmið Sameinuðu þjóðanna og því skiptir framtíð þessara kerfa alla máli.

## FRAMKOMNAR BREYTINGAR OG ÁHRIF ÞEIRRA

### Merkjanlegar breytingar á jarðrænum kerfum

Freðhvolfr jarðar minnkar vegna bráðunar jökla og heimskautaíssins á Grænlandi og Suðurskautslandinu (*mjög mikil vissa*), minnkandi snjóalaga (*mikil vissa*) og hnignunar sífrera (*mjög líklegt*).

Allar ísbreiður og jöklar á jörðinni eru að minnka (*mjög mikil vissa*). Á tímabilinu 2006–2015 var rýrnun Grænlandsjökuls 278±11 Gíгатonn á ári (Gt á ári) og ísbreiðu Suðurskautslandsins 155±19 Gt á ári. Þetta tap samsvarar hækkun í heimshöfunum um 0.77±0.03 mm og 0.43 ± 0.05 mm á ári. Massatap Suðurskautslandsins verður aðallega vegna þynningar og hörfunar kelfandi jökla sem ganga úr Vestur-Antartíku ísbreiðunni/West Antarctic Ice Sheet (*mjög mikil vissa*). Á Grænlandi er rýrnunin aðallega vegna yfirborðsbráðunar (*mikil vissa*). Jöklar

á öðrum svæðum jarðar minnkuðu um  $278 \pm 113$  Gt á ári á tímabilinu 2006–2015, sem jafngildir hækkun í heimshöfunum um  $0.77 \pm 0.31$  mm á ári.

Snjóþekja í júnímánuði á norðurskautssvæðinu minnkaði að meðaltali um  $13.4 \pm 5.4\%$  á áratug á tímabilinu 1967–2018 (*mikil vissa*). Minnkandi snjóþekja tengist hlýnun utan hitabeltisins, en snjóþekja minnkar um  $800.000 \text{ km}^2$  á áratug fyrir hverja  $1^\circ\text{C}$  hlýnun að hausti og vori (*mikil vissa*). Snjódýpi, útbreiðsla snjóþekjunnar og hversu lengi hún endist hefur á síðustu áratugum, sérstaklega á láglendi (*mikil vissa*).

Hiti í sífrera hefur farið hækkandi og hefur ekki mælst hærrí frá því að mælingar hófust á 9. áratugi síðustu aldar (*mjög mikil vissa*). Til dæmis er hlýnun sífrera á heimskautasvæðum og í fjallendi um  $0.29 \pm 0.12^\circ\text{C}$  á tímabilinu 2007–2016. Sífrerasvæði jarðar geyma 1440–1600 Gt af lífrænu kolefni (*miðlungs vissa*) sem er nálega tvöfalt það magn sem finna má í lofthjúpunum. Gögn benda ekki ótvírætt til þess að hlýnun á sífrerasvæðum valdi nú aukinni losun gróðurhúsalofttegunda út í andrúmsloftið. Þiðnun sífrera og hop jökla hafa leitt dregið úr stöðugleika fjallshlíða (*mikil vissa*).

Útbreiðsla hafíss á norðurhveli hefur dregist saman alla mánuði ársins (*mikil vissa*). Á tíma samfelldra gervihnattagagna (1979–2018) var samdrátturinn í septembermánuði mjög líklega  $12.8 \pm 2.3\%$  á áratug með þeirri afleiðingu að lágmarksútbreiðsla nú er minni en hefur verið í amk. þúsund ár (*mikil vissa*). Það er *nánast öruggt* að norðurskautsísinn hefur þynnst og á sama tíma hefur hlutfall eldri íss minnkað. Frá árinu 1979 hefur það flatarmál þar sem þykkan fjölæran (amk. 5 ára) ís er að finna dregist saman um u.þ.b. 90%. Rekja má um helming af samdrættinum til hlýnunar af mannavöldum (*miðlungs vissa*). Á tímabilinu 1979–2018 var engin marktæk hneigð í breytingum á útbreiðslu hafíss umhverfis Suðurskautslandið en óvenjulítil ís hefur verið þar síðan 2016 (*mikil vissa*).

Það er *nánast öruggt* að hafið hefur hlýnað samfleytt frá 1970 og tekið upp meira en 90% af umfram varma vegna hnattrænnar hlýnunar (*mikil vissa*). Frá 1993 er hlýnun sjávar um tvöfalt hraðari en fyrr. Einnig er hafið að tapa súrefni (*miðlungs vissa*) og upptaka CO<sub>2</sub> veldur súrnun yfirborðslaga (*nánast öruggt*). Hitabylgjur í hafi eru að verða algengari og alvarlegri (*mjög mikil vissa*).

Á undanförunum árum hefur sú sjávarhlýnun sem rakin er í fimmtu matskýrslu IPCC haldið áfram. er *nánast öruggt* að órofa hlýnun hefur ríkt í hafinu frá 2005, en hlýnun fyrir þann tíma er vel skjalfest frá amk. 1970. Þessi hlýnun er af mannavöldum, en hafið hefur tekið upp meira en 90% af umfram varma vegna hnattrænnar hlýnunar frá 1970 (*mikil vissa*). Það er *nánast öruggt* að frá 1970 til 2017 náði hlýnunin bæði til efri hluta (0–700 m) hafsins og til millilaga (700–2000 m). Suðurhöf tóku við stórum hluta (35–40%) þess varma sem hafið hefur tekið við (*mikil vissa*) og *mjög líklegt* er að hraði upptöku hafi verið meiri á tímabilinu 2005–2017 en fyrr. Hafdjúpin fyrir neðan 2000 m hafa *líklega* hlýnað frá 1992, sérstaklega í suðurhöfum.

Gögn frá gervihnöttum sýna að tíðni hitabylgna í hafi (þ.e. óvenju mikill sjávarhiti í nokkra daga samfleytt) hefur *mjög líklega* tvöfaldast á tímabilinu frá 1982 til 2016, bæði hafa slíkir atburðir orðið heitari auk þess sem þeir hafa varað lengur. Það er *mjög líklegt* að milli 84% og

90% hitabylgna sem áttu sér stað á tímabilinu 2006 til 2015 megi rekja til hlýnunar af mannavöldum (*mikil víska*).

Frá 1970 hefur lagskipting yfirborðssjárvar aukist (*mjög líklegt*) sem hefur áhrif á súrefnis- og næringarinnihald auk frumframleiðni. Hlýnun yfirborðssjárvar og ferskari sjór við hærri breiddargráður léttu yfirborðslögin í samanburði við dýpri lög (*mikil víska*), sem hamlar blöndun milli yfirborðs og dýpri laga (*mikil víska*). Samanburður langtímameðaltala frá 1971–1990 og 1998–2017 sýnir að lagskipting í efstu 200 m heimshafanna jókst þegar á heildina er litið um  $2.30 \pm 0.12\%$ .

Það er *mjög líklegt* að hafið hafi tekið upp 20–30% af því kolefni sem losað hefur verið síðan á 9. áratugi síðustu aldar og við það hefur hafið súrnað (*nánast öruggt*). *Mjög líklegt* er að á þessu tímabili hafi sýrustig yfirborðssjárvar úthafanna hafi lækkað um 0.17–0.27 pH gildi á hverjum áratug. Vegna þessa er *mjög líklegt* að yfir megnið (95%) af yfirborði heimshafanna sé súrnunin nú þegar meiri en vænta má vegna náttúrulegs breytileika.

Heimshöfin tapa súrefni og *mjög líklegt* er að á tímabilinu frá 1970 til 2010 hafi tapið numið 0.5–3.3% í efstu 1000 m sjávar (*miðlungs víska*). Þetta tap stafar aðallega af aukinni lagskiptingu, breytingum á flæði súrefnis um yfirborð auk jarð- og lífefnafræðilegra ferla sem auka við þann samdrátt sem stafar af minni leysni súrefnis í hlýjum sjó (*mikil víska*). Súrefnisnaud svæði munu *líklega* stækka um 3–8%, sérstaklega á hitabeltissvæðum, en verulegar sveiflur eru milli áratuga sem valda erfiðleikum við að rekja minnkandi súrefnisinnihald hafsvæða í hitabeltinu til athafna manna (*mikil víska*).

Athuganir frá tíma samfelldra mælinga, hermanir með loftslagslíkönum og niðurstöður fornveðurfræðilegra rannsókna benda til þess að dregið hafi úr hringrás yfirborðs- og djúpsjárvar í Atlantshafinu (hinnar s.k. AMOC hringrásar) frá iðnbyltingu (*miðlungs víska*). Fyrirliggjandi gögn eru ekki nægilega traust til þess að leggja tölulegt mat á *líklegan* samdrátt.

Yfirborð heimshafanna fer hækkandi og hefur hraði hækkunarinnar aukist á liðnum áratugum.. Þótt hækkunin sé breytileg milli heimshluta verður hún smám saman örari vegna aukinnar rýrnunar Grænlandsjökuls og Suðurskautsjökulsins og af völdum varmaþenslu úthafanna (*mjög mikil víska*).

Hækkun hnattrænnar sjávarstöðu frá 1902 – 2015 er 0.16 m (*líklegt bil* 0.12–0.21 m) og frá 2006 – 2015 hækkaði það um 3.6 mm á ári (*mjög líklega* á bilinu 3.1 – 4.1 mm á ári). Þetta er um 2.5 falt hraðari hækkun en á tímabilinu 1901 – 2005 þegar hraðinn var 1.4 mm á ári (*mjög líklega* á bilinu 0.8 – 2.0 mm á ári).

Samanlögð árleg rýrnun hinna stóru jökulbreiða Grænlands og Suðurskautslandsins fer vaxandi (*nánast öruggt, mjög mikil víska*). Massatap þeirra árin 2012–2016 var líklega meira en á árunum 2002–2011 og margfalt á við massatap árunna 1992–2001 (*nánast öruggt, mikil víska*). Samanlagt leysingarvatn frá jöklum og jökulbreiðum leggur nú til stærstan hlut þessarar hækkunar (1.8 mm á ári, *mjög líklegt bil* 1.7 – 1.9 mm á ári) og er umfram varmaþenslu hafsins (1.4 mm á ári, *mjög líklegt bil* 1.1 – 1.7 mm á ári) vegna hlýnunar (*mjög mikil víska*). Breytingar af mannavöldum eru meginorsök hnattrænnar sjávarstöðuhækkunar síðan 1970 (*mjög mikil víska*).

Í Amundsenflóa við Vestur-Antarktíku og á Wilkeslandi á Austur-Antarktíku hefur skriðhraði jökla aukist og einnig kelfing í sjó fram (*mjög mikil vissa*). Mæligögn eru þó enn af skornum skammti á þessum svæðum og líkanreikningar ná ekki að herma ísskriðið nógu vel. Því er ekki ljóst hvort þarna megi greina upphaf óðahörfunar vegna óstöðugleika sem rekja má til þess að jöklar þessir (eða hlutar þeirra) mara í hálfu kafi í sjó.

Hækkun sjávarborðs er ekki jöfn um alla jörð. Varmápensla, hafstraumar og rennsli leysingarvatns til sjávar leiða til breytileika sem numið getur  $\pm 30\%$  miðað við hnattrænt meðaltal. Á allstórum svæðum í grennd við hörfandi jökla geta breytingar á þyngdarsviði jarðar haft mikil áhrif á sjávarstöðu og einnig lóðréttar jarðskorpuhreyfinga af völdum breytinga á jökulfargi. Að auki getur landsig af völdum umsvifa mannsins haft í för með sér breytingar á sjávarborði auk þess sem breytingar í ölduhæð hafa áhrif á strandsvæðum (*mikil vissa*).

Loftslagsbreytingar af mannavöldum hafa aukið úrkomu, vindstyrk og sjávarflóð tengd sumum lægðum bæði innan og utan hitabeltisins, og átt þátt mörgum aftakaatburðum sem höfðu keðjuverkandi áhrif (*mikil vissa*). Á síðustu þremur áratugum hefur mesta ölduhæð aukist um 5% (*miðlungs vissa*).

#### **Merkjanleg áhrif á vistkerfi**

Frá miðbiki síðustu aldar hefur útbreiðsla plöntu og dýrahópa í hafi og árstíðabundin hegðan breyst vegna hlýnandi sjávar. Dæmi um þetta eru breytingar á útbreiðslu hafíss og lífefnafræðilegar breytingar svo sem súrefnisinnihaldi sjávar (*mikil vissa*). Þetta hefur leitt til breytinga í samsetningu stofna og stærðar þeirra, framleiðni vistkerfa frá hitabeltinu að heimskautasvæðum. Áhrif þessa á samspil tegunda hefur svo skilað sér í keðjuverkandi áhrifum á uppbyggingu og virkni vistkerfa (*miðlungs vissa*). Í tilvikum sumra nytjastofna hefur orðið vart við bæði áhrif sóknar og loftslagsbreytinga (*miðlungs vissa*).

Bein og óbein áhrif hlýnunar hafanna og freðhvolfsbreytinga á frumframleiðni eru breytileg milli hafsvæða (*mikil vissa*). Þörungar eru fyrr á árinu í vorblóma og lengd og umfang þörungablóma hefur vaxið á seinustu áratugum (*mikil vissa*). Á Suðurskautslandinu hafa þessháttar breytingar verið raktar til hraðfara umhverfisbreytinga á tilteknum svæðum, m.a. hopunar jökla og breytinga á útbreiðslu hafíss.

Lífshættir, framleiðni og útbreiðsla sumra dýrasvifstegunda í Norður Íshafinu hafa tekið breytingum og Suður-Íshafsljósáta hefur fært sig sunnar í Atlantshafi. Ennfremur hefur stærðarsamsetning þessara stofna breyst (*miðlungs vissa*). Áhrifa veðurfarsbreytinga á vistkerfi norðurslóða gætir í fiskafla (*mikil vissa*).

Hraði breytinga í útbreiðslu hjá plöntu og dýrahópum frá því um 1950 er talinn vera um  $52 \pm 33$  km á áratug og  $29 \pm 16$  km á áratug fyrir lífverur í uppsjónum annars vegar og á botni hins vegar (*mjög líklegt*). Aukin útbreiðsla tegunda af völdum hlýnunar hefur breytt vistkerfum í Norður-Atlantshafi, Norðaustur-Kyrrahafi og í Norður-Íshafinu (*miðlungs vissa*).

Aukin súrnun sjávar og minnkað súrefnisinnihald hefur haft áhrif í tveimur af fjórum helstu blöndunarsvæðum við austanverð meginlönd jarðar (*mikil vissa*). Súrnun sjávar og minni

súrefnisstyrkur í blöndunarsvæðinu í Kaliforníustraumnum hefur valdið breytingu á frumframleiðni og samsetningu vistkerfisins, sem síðan hefur haft áhrif á samsetningu fiskafla (*miðlungs vissa*).

Á mörgum svæðum hefur samdráttur í stofnstærð fiski- og skelfiskstofna vegna óbeinna áhrifa hnattrænnar hlýnunar þegar leitt til minnkaðs afla. Sumir stofnar hafa einnig stækkað vegna stækkunar hentugra búsvæða (*mikil vissa*). Sögulegar rannsóknir og líkangerð benda til þess að hlýnun sjávar á 20. öld hafi stuðlað að almennri minnkun á mögulegum heildarafla (*miðlungs vissa*). Samfara þessu hafa síðan 1970 orðið breytingar í tegundasamsetningu í vistkerfum víða á landgrunnssvæðum meginlanda (*miðlungs vissa*)

Vistkerfi á grunnslóð eru undir álagi vegna hlýnunar sjávar, tíðari sjávarhitabylgna, súrnunar sjávar, minnkandi súrefnisstyrks og hækkandi sjávarstöðu, sem og óhagstæðra áhrifa frá margvíslegri starfsemi mannsins á sjó og á landi (*mikil vissa*)

Sjávarhitabylgjur hafa haft neikvæð á sjávarlífverur og vistkerfið í heimshöfunum síðustu 20 ár, það á meðal á undirstöðutegundir (mjög mikil vissa). Tíðni „kóralbleikingar“ vegna hlýnunar hefur aukist á stórum svæðum síðan 1977 og það hefur síðan valdið niðurbroti rifanna og þau þróast í átt til svæða þar sem þörungar ríkja (*mikil vissa*). Á sama hátt eru botnsætnar kalklífverur (t.d. hrúðurkarlar og kræklingur) í klettafjöllum mjög nærmar fyrir snöggum hitabreytingum og súrnun (*mikil vissa*) og minnkun í fjölbreytileika þeirra og magni hefur komið fram í vistkerfum þar sem að súrnun hefur átt sér stað við náttúrlegar aðstæður (*miðlungs vissa*).

Hækkandi sjávarstaða á strandsvæðum hefur áhrif á vistkerfi, m.a. vegna minnkunar búsvæða, fjölbreytileika og virkni, en einnig vegna tilfærslu búsvæðanna. Athafnir manna á strandsvæðum (t.d. endurheimt lands og uppfyllingar) geta magnað þessi áhrif. Manngerðar tálmanir geta hindrað setflutninga og tilfærslu flæðilanda og leirviðarskóga inn á land (*mikil vissa*). Almennu hefur þó tilfærsla flæðilanda og leirviðarskóga haldið í við sjávarstöðuhækkun (um allt að 10 mm/ári) en ýmsir þættir s.s. ölduálag, útslag sjávarfalla, setburður og takmörkun strandar hafa ráðandi áhrif þar á. Við árósa skipta breytingar á vatnasvæðinu einnig máli, sérstaklega framboð á vatni og seti (*mikil vissa*).

#### Merkjanleg áhrif á fólk og samfélög

Breytingar á snjó og ís á Norðurskautssvæðinu og á háfjallasvæðum hafa haft margvísleg áhrif á samfélög manna síðan um miðja 20. öld. Þar er einkum um að ræða afleiðingar fyrir ferskvatnsframboð, vatnsafl, innviði af ýmsum toga, samgöngur, matvælaframleiðslu, ferðamennsku og útivist og nokkra aðra þætti. Þessar afleiðingar koma fram með mismunandi hætti fyrir mismunandi samfélög og þjóðfélagshópa.

Breytingar á snjóalögum, ís á ám og vötnum og sífrera hafa haft neikvæð áhrif á matvælaöryggi, vatnsgæði og vatnsframboð víða á Norðurskautssvæðinu (*mikil vissa*) og á háfjallasvæðum. Breytingarnar hafa torvelað aðgengi að veiðilendum og svæðum sem nýtt eru til beitar og til þess að afla matar (*mikil vissa*). Dreigið hefur úr framleiðni í landbúnaði á sumum svæðum þar sem leysingavatn hefur minnkað, sérstaklega þar sem annað álag af

völdum loftslagsbreytinga eða félagslegra þátta hefur aukist. Nefna má vestanverð Bandaríki Norður-Ameríku og háfjallasvæði í Asíu og svæði nærri miðbaug jarðar í Andesfjöllum sem dæmi um þetta (*miðlungs vissa*).

Samfélög á Norðurskautssvæðinu hafa lagað ýmsa starfsemi að breyttri árstíðasveiflu og erfiðari skilyrðum á hefðbundnum ferðaleiðum (*mikil vissa*). Sveitarfélög og atvinnulíf eru að byrja að bregðast við skemmdum og bilunum á samgöngu- og samskiptabúnaði vegna þiðnandi sífrera (*miðlungs vissa*). Sum samfélög við sjávarsíðuna og samvinnuaðilar þeirra undirbúa flutning á búnaði og jafnvel hluta byggðar lengra frá ströndinni (*miðlungs vissa*).

Rekstri vatnsaflsvirkjana hefur í nokkrum tilvikum verið breytt og sumar þeirra endurbyggðar til þess að laga þær að meira eða minna rennsli jökuláa og annarra vatnsfalla, sem eiga upptök í fjalllendi, og að breyttri árstíðasveiflu rennslisins. Slíkar breytingar hafa átt sér stað í Mið-Evrópu, á Íslandi, í vesturhluta Bandaríkjanna og Kanada og í suðurhluta Síle. *Takmarkaðar* vísbendingar eru þó fyrirliggjandi um áhrif þessarra breytinga á rekstur virkjana og raforkuframleiðslu en á Íslandi og í Noregi hefur raforkuframleiðsla aukist af þessum völdum.

Breytingar á snjó og jöklum hafa haft nokkra erfiðleika í för með sér fyrir vetrarferðamennsku, m.a. fyrir rekstur skíðasvæða, gönguferðir, fjallamennsku og ferðir á jökla (*miðlungs vissa*). Framleiðsla á snjó á skíðasvæðum hefur víða reynst skilvirk mótvægisáðgerð til þess að bregðast við hlýnandi veðurfari. (*miðlungs vissa*)

Skipaferðir í Norður Íshafinu að sumarlagi hafa aukist mjög á seinustu tveimur áratugum samfara minnkandi hafíspekju og stækkun svæða þar sem íspekja er árstíðabundin (*mikil vissa*). Vaxandi skipaflutningar um Norður-Íshafssvæðið og ferðaþjónusta hafa afleiðingar fyrir heimsviðskipti og efnahag norðlægra þjóða sem tengjast hinum hefðbundnu skipaleiðum. Jafnframt eykst áhætta sú sem vistkerfi sjávar og strandbyggðum er búin af völdum skipaferðanna (*mikil vissa*).

Veðurfarstengdar breytingar í heimshöfunum hafa skaðað starfsemi vistkerfa (*mikil vissa*) og haft áhrif á fiskveiðar (*mikil vissa*). Aðrir þættir tengdir manningum sem orðið hafa fyrir áhrifum eru fæðuöflun (*mikil vissa*), heilsa og vellíðan (*miðlungs vissa*), menning frumbyggja (*miðlungs vissa*), ferðamennska (*miðlungs vissa*), og viðskipti og flutningar (*mikil vissa*).

Breytingar á útbreiðslu og stofnstærð fiskistofna af völdum hlýnunar hafa þegar haft áhrif á veiðar úr mikilvægum stofnum og á efnahagslegan ávinning veiðanna (*mikil vissa*). Þetta hefur torveldað viðleitni haf- og fiskveiðistjórnunarstofnana til þess að tryggja gott ástand vistkerfa, mynda efnahagslegan ávinning og styrkja lífsafkomu, menningu og aðra þætti þjóðfélaganna (*mikil vissa*).

Eitraðir þörungar hafa dreifst víðar en áður og tíðni tilfella þar sem magn eitraðra þörungar er yfir hættumörkum hefur verið að aukast síðan um 1980. Aukningin er að hluta rakin til hlýnunar sjávar, súrnunar og súrefnislækkunar sem og til ofauðgunar næringarefna og til mengunar (*mikil vissa*). Eitraðir þörungar hafa neikvæð áhrif á fæðuframboð, ferðamennsku, efnahag og heilsu (*mikil vissa*). Samfélög þar sem að vöktun er takmörkuð eru talin hvað berskjölduðust fyrir þessari líffræðilegu hættu (*miðlungs vissa*).

Byggð og búseta á strandsvæðum stendur frammi fyrir margháttaðri loftslagstengdri áhættu sem tengist breytingum í hafi og á freðhvolfi. Meðal þessa má nefna aftakasjavarflóð, hitabylgjur í hafi, minni hafís og þiðnun sífrera (*mikil vissa*). Aftakasjavarflóð fara versnandi vegna hækkandi meðalsjavarstöðu, og áhrif hækkandi sjávarborðs á sjávarfallaflóð eru merkjanleg á sumum svæðum. Gripið hefur verið til margvíslegra aðgerða vegna þessa, oftast í kjölfar aftakaflóða, en einnig hefur verið gengið út frá hækkandi sjávarstöðu þegar fram líða stundir í uppbyggingu umfangsmikilla innviða í sumum tilvikum (*mikil vissa*).

Þó gera megi ráð fyrir að hækkun sjávarborðs auki flóðahættu við strendur (*mikil vissa*) er óvída hægt að rekja áhrif á samfélagsleg kerfi eingöngu til hækkunar sjávar (*miðlungs vissa*) því margvíslegir aðrir orsakabættir skipta líka máli. Meðal þeirra má nefna byggðarþróun á strandsvæðum, landsig vegna athafna manna, mengun, hrörnun búsetusvæða, tap á staðbundinni þekkingu innfæddra, en allir þessir þættir hafa aukið áhættu vegna afleiðinga loftslagsbreytinga (*mikil vissa*).

Strandvarnir eru útbreiddar í borgum við sjóinn og á ósasvæðum og veita fyrirsjáanlega vörn (*mjög mikil vissa*). Nokkur aukning hefur verið á notkun lausna sem byggja á blöndu náttúrulegra og manngerðra þátta en lítið er vitað um kostnað við þær eða hversu haldgóðar þær eru (*mikil vissa*). Á þéttbýlum svæðum þar sem land skortir er löng hefð fyrir uppfyllingum eða öðum aðferðum til að heimta land úr sjó. Einnig eru dæmi um að hogað sé frá ströndinni, en yfirleitt er það bundið við lítil samfélög eða gert til að skapa votlendissvæði við ströndina (*mikil vissa*). Samfélagslegum úrræðum er æ meira beitt til að aðlagast sjávarstöðubreytingum, sérstaklega í þróunarlöndum, og til að aðlagast umhverfisbreytingum í hafinu á Norðurskautssvæðinu (*mikil vissa*).

## LÍKLEGAR BREYTINGAR OG ÁHÆTTA

Fullyrða má með *mikilli vissu* að á komandi árum og áratugum muni jöklar enn hörfa víðast hvar, að snjóhula að vetri muni endast skemur og að sífreri þiðni enn frekar og hjaðni. Áhrifa þessara breytinga mun gæta í rennsli vatnsfalla. Einnig er *mikil vissa* fyrir þeim niðurstöðum líkana að rýrnun íss og snævar muni enn aukast á seinni hluta 21. aldar ef losun gróðurhúslofttegunda verður áfram veruleg. Verði stórlega dregið úr losuninni á komandi áratugum er líklegt að hægja taki á rýrnun sífrera og snjóhulu þegar fram í sækir, en hörfun margra jökla og ísbreiðanna á Grænlandi og Suðurskautslandinu mun halda áfram út öldina

Sé gert ráð fyrir að losun verði í minna lagi á öldinni (sviðsmynd RCP2.6) er massatap jökla jarðar, að frátöldum ísbreiðum Grænlands og Suðurskautslandsins, áætlað  $18 \pm 7\%$  á tímabilinu 2015–2100, en  $36 \pm 11\%$  ef losun verður mikil (sviðsmynd RCP8.5). Tilsvareandi hækkun sjávarborðs verður  $94 \pm 25$  mm í fyrra tilvikinu en  $200 \pm 44$  mm í hinu síðara (*miðlungs vissa*). Litlir jöklar í Ölpunum, Kákasusfjöllum, í hitabeltinu, Norður-Asíu og Skandinavíu munu rýrna um meira en 80% að rúmmáli til aldarloka (*miðlungs vissa*). Rýrnun jökla verður mest á heimskautasvæðunum, þ.á.m. á jöðrum Grænlandsjökuls og Suðurskautsjökulsins, á kanadísku og rússnesku íshafseyjunum, í Alaska, á Íslandi og á Svalbarða. Frá þessum síðarnefndu svæðum munu berast meira en 80% jöklaþáttar af sjávarborðshækkun til ársins 2100 (*mikil vissa*).



Snjóhula á norðurslóðum frá hausti til vors mun endast 5–10% skemur en nú á árabílinu 2031–2050. Sé miðað við sviðsmynd lítillar losunar (RCP2.6) mun snjótímabilið ekki styttest frekar eftir það en ef losun verður mikil (sviðsmynd RCP8.5) mun hún enn styttest um 15–25%. Áætlað er að meðaldýpi snævar á láglandari svæðum fjallahéraða minnki um 10 til 40% á árabílinu 2031–2050, í samanburði við 1986–2005. *Mikil víska* er um þessa niðurstöðu, óháð losunarsviðsmyndum. Á árabílinu 2081–2100 er *líklegt* að meðal-snjódýpi hafi minnkað um 50% til 90% (mikil losun, RCP8.5) en 10% til 40% ef losun verður lítil (RCP2.6).

Mikil víska er fyrir því að sífreri muni þiðna og hjaðna mjög víða á þessari öld. Flatarmál svæða þar sem sífreri er nærri yfirborði mun minnka um 2–66% fram til 2100 sé miðað við losunarsviðsmynd RCP2.6 og um 30–99% fyrir sviðsmynd RCP8.5. Við þiðnunina munu tugir eða jafnvel hundruð milljarða tonna (Gíгатonna) kolefnis losna úr sífreranum og berast upp í andrúmsloftið sem koltvísýrlingur og metan. Sú viðbót mun auka hlýnunina enn frekar. Meiri lífmassi í gróðri og nýmyndun jarðvegs gæti þó unnið gegn kolefnistapinu úr sífreranum.

Á háfjallasvæðum munu fjallahlíðar verða óstöðugri vegna hörfunar jökla og þiðnunar sífrera. Einnig munu jaðarlón framan við jökla stækka og slíkum lónum mun fjölga. Búast má við að berghlaup og jökulhlaup úr slíkum lónum muni verða þar sem slíkra atburða hefur ekki áður orðið vart. Snjóflóðum mun sennilega fækka og þau munu ekki ná jafn langt frá fjallahlíð og áður, en krapaflóðum og blautum snjóflóðum mun fara fjölgandi, jafnvel að vetri til. Flóð í ám sem orsakast af asarigningu á snjó munu verða fyrir á vorin og síðar um haust en áður. Þau verða líka tíðari hærra til fjalla en fátíðari neðar í fjöllum.

Mikil víska er fyrir því að rúmmál og árstíðasveifla afrennslis frá vatnasviðum þar sem framlaga snjóbráðar og jöklaleysingar gætir muni breytast þegar snjóhula minnkar og jöklar rýrna. Vetrarrennslis mun aukast og vorleysingar verða fyrir á ferðinni. Árlegt meðalrennslis frá jöklum á flestum fjallasvæðum mun ná hámarki síðar á þessari öld og verður svo tekið að minnka á ný fyrir aldarlok.

Líklegt er að útbreiðsla hafís á Norðurskautssvæðinu minnki amk. fram til miðbiks aldarinnar, en hversu mikill samdráttur íssins er á síðari hluta aldarinnar fer eftir því hversu mikið hlýnar. Nota má samband útbreiðslu hafíss að sumarlagi á norðurslóðum, hnattræns hita og uppsafnaðrar losunar CO<sub>2</sub> til þess að leggja mat á líkur á íslausu hafi á norðurslóðum í september. Árlegar líkur þessa eru um 1% verði hlýnun jarðar haldið undir 1.5°C en 10–30% verði hlýnun jarðar 2°C (*mikil víska*). Það er *lítil víska* um niðurstöður framreikninga fyrir hafís umhverfis Suðurskautslandið.

Gera má ráð fyrir að hafið haldi áfram að hlýna á öldinni með áframhaldandi minnkun hafíss og súrefnisstyrk, aukinni súrnun, æ tíðari hitabylgjum í sjó og samdrætti í hringrás yfirborðs- og djúpsjár í Atlantshafinu (*mikil víska*). Aukin lagskipting sjávar mun breyta súfnisbúskap, framboði næringarefna og frumframleiðni. Þessar breytingar eru mun umfangsmeiri í sviðsmyndum þar sem mikið er losað af gróðurhúsalofttegundum á öldinni en í hinum þegar minna er losað.

Hlýnun hafsins mun halda áfram á öldinni (*nánast öruggt*). Í þeirri sviðsmynd sem minnst hlýnar (RCP2.6) er líklegt að við lok aldarinnar muni hafið taka upp 2–4 sinnum meiri varma en það hefur gert síðan 1970. Í hlýjustu sviðsmyndinni (RCP8.5) er munurinn 5–7 faldur (*mjög líklegt*). Í lok aldarinnar styrkist lagskipting í efstu 200 m sjávar milli 60°N og 60°S að meðaltali um 1–9% í sviðsmynd RCP2.6 og 12–30% frá því sem var á tímabilinu 1986–2005.

Á hnattræna vísu eykst tíðni hitabylgna í hafi *mjög líklega* fimmtugfalt í lok aldarinnar í sviðsmynd RCP8.5 og um tuttugfalt í sviðsmynd RCP2.6 miðað við síðari helming 19. aldar (*miðlungs vissa*). Mesta aukningin verður í hitabeltinu og í Norður-Íshafinu (*miðlungs vissa*).

Það er *nánast öruggt* að áframhaldandi upptaka sjávar á kolefni úr lofti mun sýra sjóinn en frekar. Í sviðsmynd RCP8.5 er *nánast öruggt* að sýrustig lækki um 0.3 pH einingar fram til loka aldarinnar. Þetta mun líklega leiða til ætandi skilyrða allt árið fyrir lífverur sem mynda aragónít kalk, sérstaklega á úthafssvæðum Norður-Íshafsins, í Norður-Atlantshafi og sumum hlutum Kyrrahafsins (*mikil vissa*). Ef dregið er verulega úr losun, eins og gert er ráð fyrir í sviðsmynd RCP2.6, er *mikil vissa* fyrir því að ekki komi til þess að ætandi skilyrði skapist undir lok aldarinnar á þessum víðáttumiklu hafsvæðum en þó er hætta á þessari þróun á uppstreymissvæðum nærri austurströndum úthafanna.

Aukin lagskipting í efri lögum sjávar mun í hlýjustu sviðsmynd (RCP8.5) breyta súrefnisinnihaldi og frumframleiðni í hafi. Styrkur súrefnis í heimshöfunum dregst að meðaltali *mjög líklega* saman um 3–4% fram til síðustu áratuga aldarinnar og framboð næringarefna uppsjávar, sérstaklega í hitabeltinu, mun dragast saman um 9–14% (*miðlungs vissa*). Í þessari sviðsmynd veldur margháttað umhverfisálag því að frumframleiðni dregst saman í heimshöfunum en *lítill vissa* er um þá þróun. Í köldustu sviðsmyndinni má sjá álíka breytingar, en mun minni en í þeirri hlýjustu.

Á þessari öld munu aðstæður í heimshöfum breytast og þróast yfir í ástand ólíkt því sem ríkti fyrir daga iðnbyltingar (1850–1900). Þessar breytingar koma mishratt fram fyrir ólíka umhverfisþætti (*mikil vissa*). *Líklegt* er að súrefnistap verði merkjanlegt yfir 59–80% af yfirborði heimshafanna frá 2030–2050, og aukist í 79–91% í lok aldarinnar (2081–2100) í sviðsmynd RCP8.5. *Mjög líklegt* er að þessar breytingar verði í lok aldarinnar merkjanlegar yfir meira en 30% heimshafanna í sviðsmynd RCP2.6 og 60% í sviðsmynd RCP8.5.

Í heitustu sviðsmynd (RCP8.5) er *líklegt* er að kröftugir El Niño og La Niña atburðir verði algengari, en líkön sýna minni tíðnibreytingar í þeirri sviðsmynd sem minnst hlýnar (RCP2.6). Á þeim svæðum þar sem slíkir atburðir leiða nú þegar til óvenjumikillar úrkomu eða þurrka er *líklegt* að áhrifin versni.

Mjög líklegt er að á 21. öldinni muni draga úr styrk hringrásar yfirborðs- og djúpsjávar í Atlantshafi, þ.e. hinni s.k. AMOC hringrás (*mikil vissa*). Skyndilegt hrun er *mjög ólíklegt* (*miðlungs vissa*). Komi til verulegs samdráttar í styrk þessarar hringrásar, gæti það leitt til minni frumframleiðni í sjó í Norður-Atlantshafi, verri vetraráhlaupa í Evrópu, minni sumarúrkomu á Sahel svæðinu og í Suður-Asíu, fækkunar hitabeltislægða á Atlantshafi og hækkandi sjávarborðs við norðausturströnd Norður-Ameríku (*miðlungs vissa*). Þessar breytingar myndu bætast við aðrar afleiðingar hnattrænnar hlýnunar.

Sjávarstaða mun enn hækka (*mikil vissa*) og aftakaflóð sem nú henda sjaldan verða algengari um 2050 (*mikil vissa*). Komi ekki til umfangsmikillar aðlögunar umfram það sem nú er gert mun hækkun sjávar og fjölgun aftakaatburða verulega auka áhættu vegna flóða á lágsvæðum (*mikil vissa*). Reiknuð sjávarstöðuhækkun er nú meiri en IPCC mat árið 2013 (í s.k. AR5 skýrslu) í þeim sviðsmyndum þar sem mikið hlýnar. Ástæða þessa er sú að mat líklegrar rýrnunar íss á Suðurskautslandinu hefur hækkað (*miðlungs vissa*). Sjávarstöðubreytingar munu halda áfram á næstu öldum og gætu orðið nokkrir sentimetrar á ári og skilað margra metra hækkun sjávarstöðu til langframa (*miðlungs vissa*).

Líkleg hnattræn sjávarstöðuhækkun er 0.39 m (0.28–0.54 m) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100 í sviðsmynd RCP2.6 og 0.43 m (0.29–0.59 m) í aldarlok. Í heitustu sviðsmyndinni (RCP8.6) eru sambærilegar niðurstöður 0.71 m (0.51–0.92) fyrir tímabilið 2081–2100 og 0.84 m (0.61–1.10 m) í aldarlok. Þessar tölur eru hærri en fyrra mat IPCC (frá 2013), fyrir RCP8.5 er meðalhækkun 0.1 m hærri í lok aldarinnar, og efri mörk líklegrar hækknar ná nú yfir 1 m, vegna óvissu um framlag frá Suðurskautslandinu (*miðlungs vissa*), en óvissa í hækkun sjávarstöðu við lok 21. aldar má rekja til óvissu um bráðnun íshvelanna á Grænlandi og sérstaklega á Suðurskautslandinu.

Breytingar á sjávarstöðu munu á mörgum svæðum víkja verulega frá hnattrænni hækkun sjávarstöðu. Staðbundin ferli, óháð loftslagsbreytingum, s.s. landsig vegna náttúrulegra ferla og athafna manna geta haft áhrif á hversu mikil hækkun á hverjum stað verður (*mikil vissa*). Þó áhrif loftslagsbreytinga á sjávarstöðu aukist með tíma, þarf að taka tillit til slíkra þátta þegar lagt er mat á líklegra sjávarstöðubreytingar og viðbrögð við þeim (*mikil vissa*).

*Mikil vissa* er fyrir því að í sviðsmynd RCP8.5 eykst ölduhæð víða (suðurhöf, austanverð hitabeltissvæði í Kyrrahafi, og Eystrasaltið), en það dregur úr henni annarsstaðar (Norður-Atlantshaf og Miðjarðarhaf). Styrkur hitabeltislægða og úrkomuákefð í þeim mun aukast á öldinni og aukningin er meiri í heitustu sviðsmynd (RCP8.5) en þeirri köldustu (RCP2.6). *Lítill vissa* er í mati á breytingum á fjölda hitabeltislægða á hnattræna vísu.

Hækkun sjávarborðs í öllum sviðmyndum þýðir að aftakaatburðir með hárrí sjávarstöðu sem nú eru fágætir, s.s. sjávarflóð tengd hitabeltislægðum (t.d. hundrað ára atburðir) verða algengir árið 2100 (*mikil vissa*). Í öllum sviðsmyndum munu slíkir atburðir henda árlega árið 2050 í stórborgum á lágsvæðum og á lágglendum eyjum. Komi ekki til markvissrar aðlögunar mun þetta auka tíðni alvarlegra flóða (*mikil vissa*).

Í sviðsmynd RCP8.5 er líklegt að hraði hnattrænnar sjávarstöðuhækknar verði 15 mm á ári í lok aldarinnar og gæti farið yfir nokkra cm á ári á næstu öld ef áköf losun gróðurhúsalofttegunda heldur áfram eftir næstu aldamót. Veruleg óvissa er um það hvenær íshellur umhverfis Suðurskautslandið brotna upp og hversu óstöðug jökulhvelin þar kunna að reynast. Í ljósi þessarar óvissu gæti framlag Suðurskautslandsins til sjávarstöðuhækknar á næstu árhundruðum reynst meira en það talnabil sem talið er líklegast (*lítill vissa*). Ekki er vitað hversu mikil hlýnun má verða áður en jökulhvel verða óstöðug, og hversu hratt sjávarstaða hækkar af þessum sökum.

Breytingar á snjó, ís og jöklum munu hafa áhrif á vistkerfi á landi og í fersku vatni á heimskauta- og háfjallasvæðum. Búsvæði tegunda munu hníkast til norðurs og yfir á hærri svæði til fjalla sem hefur áhrif á uppbyggingu vistkerfa og framleiðni lífríkisins. Gert er ráð fyrir að breytingarnar dragi úr líffræðilegum fjölbreytileika þegar fram í sækir og að tegundir deyi út á líffræðilega einstökum svæðum.

Á háfjallasvæðum mun áframhaldandi tilfærsla tegunda til hálandari svæða leiða til minnkandi búsvæða, aukinnar dánartíðni og fækkunar í mörgum tegundastofnum. Þetta á sérstaklega við um lífverur sem þrífast í grennd við snjó og jökla (*mikil vissa*). Sumar tegundir munu hverfa, fyrst af ákveðnum svæðum og síðan deyja alveg út af þessum sökum (*miðlungs vissa*). Ýmsar háfjallategundir munu aðeins lifa af ef gripið verður til viðeigandi verndunar- og mótvægisáðgerða (*mikil vissa*).

Spáð er minnkandi fjölbreytileika lífríkis á Norðurskautssvæðinu vegna þess að sumar hánorrænar tegundir eiga þess ekki kost að flytja sig norðar eða hærra í landið og lúta því í lægra haldi í samkeppni við suðrænni tegundir (*miðlungs vissa*). Talið er að kjarr og trjágróður mundi breiða úr sér og þekja 24–52% túndru Norðurskautssvæðisins um 2050 ef losun gróðurhúsalofttegunda verður mikil (*miðlungs vissa*). Barrskógar munu breiða úr sér til norðurs en dragast saman á suðlægari slóðum þar sem í staðinn koma skóga- og kjarrsvæði með minni heildarlífsmassa (*miðlungs vissa*).

Þiðnun sífrera og minni vetrarsnjór munu hafa áhrif á vatnafar og skógarelda á Norðurskautssvæðinu (*miðlungs vissa*). Um 20% sífrerasvæða á Norðurskautssvæðinu geta bráðnað hratt og þar orðið mikil röskun á landslagi og landsig. Gert er ráð fyrir að þessi þróun auki flatarmál lítilla stöðuvatna um meira en 50% í lok aldarinnar ef losun gróðurhúsalofttegunda verður mikil (RCP8.5) (*miðlungs vissa*). Þrátt fyrir að hringrás vatns á heimskautasvæðinu verði öflugri, m.a. vegna aukinnar úrkomu, kann aukin uppgufun og aukið rennsli til Norðurskautshafsins að leiða til þurrari yfirborðsjarðlaga. Þetta hefur áhrif á framleiðni lífríkis og getur leitt til röskunar þess á sumum svæðum (*miðlungs vissa*). Hætta á skógar- og gróðureldum er talin munu fara vaxandi út öldina á túndru- og barrskógasvæðum. Þróun í tíðni og umfangi gróðurelda mun ráðast af samspili breytinga í loftslagi og gróðurfari sem erfitt er að segja fyrir um (*miðlungs vissa*).

Ef hlýnar um 2°C mun styrkur hitabeltislægða, hlutfall 4. og 5. stigs fellibylja og úrkomuákefð tengd hitabeltislægðum aukast merkjanlega frá hvaða tímabili sem miðað er við (*miðlungs vissa*). Hækkandi sjávarstaða mun leiða til verri flóða samfara hitabeltislægðum (*mjög mikil vissa*). Þetta mun einni gauka áhættu vegna strandflóða og úrhellisrigningar. Á síðari hluta aldarinnar eru þessar breytingar meiri í sviðsmynd RCP8.5 en RCP2.6 (*miðlungs vissa*). Það er lítil vissa um breytingar í tíðni hitabeltislægða á hnattræna vísu.

Hraði framleiðni og lífmassi í vistkerfi sjávar er talinn munu minnka í öllum sjávarlögum, grunnnum sem djúpum (*miðlungs vissa*). Jafnframt verður tilfærsla í útbreiðslu tegunda í átt til pólsvæða sem leiða mun til breytinga á samfélagsgerð (*mjög mikil vissa*): Draga mun úr fiskafla með aukinni hlýnun hafsvæða á 21. öldinni (*miðlungs vissa*). Þessara breytinga mun mest gæta nærri miðbaug (*mikil vissa*) en áhrifin verða margbreytilegri á pólsvæðunum. Fjöldi tegunda, framleiðni og fæðutengslum innan vistkerfisins er ennfremur ógnað af súrnun (*miðlungs vissa*), súrefnistapi (*miðlungs vissa*) og minnkun hafíss (*miðlungs vissa*), sem síðan kunna að versna með athöfnum mannsins og svæðisbundum aðstæðum (*miðlungs vissa*).

Hlýnun sjávar og breytingar á frumframleiðni munu líklega breyta lífmassa, framleiðni og samfélagsbyggingu vistkerfa sjávar (*mikil vissa*), sérstaklega á svæðum nærri miðbaug (*mikil vissa*). Heildarlífsmassi spendýra og hámarksafli frá fiskveiðum er talinn minnka á bilinu 15,0±5,9% (*mjög líklegt bil*) og 16,2% til 25,5% fram til 2100 samkvæmt RCP8.5. Samkvæmt þeirri sviðsmynd verða breytingarnar þrefalt-fjórfalt meiri en skv. RCP2.6.

Minnkað framboð næringarefna vegna aukinnar lagskiptingar mun um 2100 mjög líklega valda lækun á frumframleiðni sem nemur 7-16% á svæðum við miðbaug samkvæmt RCP8.5 (*miðlungs vissa*). Á hinn bóginn mun hlýnun, lagskipting og minnkun hafíss leiða til aukinnar frumframleiðni á heimskautasvæðum í norðri (*miðlungs vissa*) og suðri (*lítil vissa*). Breytingar á hripi lífræns kolefnis frá yfirborðslögum- og til dýpri laga sjávar munu að stórum hluta tengjast breytingum á frumframleiðni (*mikil vissa*) og þannig leiða til minni lífmassa á botni í djúpsjónum (3000-6000 m dýpi). Þessi minnkun verður meiri samkvæmt RCP8.5 heldur en við RCP4.5 og RCP2.6 (*miðlungs vissa*).

Áætluð hlýnun, súrnun sjávar, minni útbreiðsla árstíðabundins íss og áframhaldandi minnkun á fjölærum ís mun hafa áhrif á vistkerfi sjávar á pólsvæðum. Þar er átt við bein og óbein áhrif á búsvæði og dýrastofna (*miðlungs vissa*). Talið er að útbreiðslusvæði vistfræðilega mikilvægra dýrategunda á norðurskautssvæðinu, eins og spendýra, fugla, og fiska, muni minnka. Jafnframt munu sumar tegundir á tempraðri svæðum færa sig norður á bóginn og þar með auka álag á hánorrænar tegundir (*miðlungs vissa*). Áframhaldandi minnkun á fjölærum ís mun stuðla að myndun þörungablóma undir ísnum (*miðlungs vissa*) en meiri lagskipting í framtíðinni kann að draga úr blöndun næringarefna til yfirborðslaga og það getur aftur leitt til minni frumframleiðni (*miðlungs vissa*). Þessar breytingar á frumframleiðni munu hafa áhrif allt vistkerfið í námunda við hafísinn (*miðlungs vissa*).

Hlýnun og súrnun sjávar, lækun súrefnisinnihalds og minnkun á flæði lífræns kolefnis frá yfirborðslögum niður í djúphafið mun draga úr kalkmyndun og auka rof og uppleysingu kaldsjávar kóralla sem styðja fjölbreytt lífríki (*miðlungs vissa*). Kaldsjávar kórallar sem mynda búsvæði verða sérstaklega berskjaldaðir þegar hitastig og súrefnisaðstæður verða utan þolmarka einstakra tegunda (*miðlungs vissa*). Samkvæmt RCP8.5 er ætlað að þegar kemur fram undir 2100 muni framboð fæðuagna til 95% kaldsjávar kóralla hafa minnkað miðað við það sem nú er og mun það leiða til minnkunar á lífþyngd (*miðlungs vissa*).

Ef sviðsmyndir þar sem mikið er losað ganga eftir verður í aldarlok aukin hætta á verulegum áhrifum á líffræðilegan fjölbreytileika, byggingu og starfsemi strandsjávar vistkerfa. Áhrifin á vistkerfin verða tap á víðáttumiklum búsvæðum og tegundaauðgi og niðurbrot á vistfræðilegri starfsemi á þeim svæðum sem eftir standa. Þar sem vistkerfin eru viðkvæm verður áhættan mikil ef hnattræn hlýnun verður 1,5 °C umfram það sem var fyrir iðnvæðingu, ásamt með öðrum tengdum veðurfarshættum (*mikil vissa*). Hlýsjávar kórallar eru í mikilli hættu jafnvel þó að hnattræn hlýnun verði minni en 1,5 °C (*mjög mikil vissa*). Með því að draga úr röskun af mannavöldum er unnt að efla möguleika vistkerfa til þess að svara og aðlagast breyttum aðstæðum.

Á grundvelli áætlaðrar hækkunar sjávarborðs og eyðingar búsvæða er talið að á heimsvísu muni 20-90% af votlendissvæðum nærri ströndu hafa tapast um 2100 (*mikil vissa*). Sum strand- og votlendissvæði eru að stækka af náttúrulegum orsökum þar sem setframburður er mikill og vistkerfið getur teygst sig í átt til lands (*miðlungs vissa*). Í sviðsmyndum þar sem lítið er losað geta fenjaskógar, marhálmsengi og sjávarfitjar haldið í við sjávarborðshækkun út öldina, en einungis 2055 – 2070 ef losun þróast samkvæmt RCP8,5 (*miðlungs vissa*). Þróist losun í samræmi við RCP8.5 skapast mikil hætta á staðbundinni

eyðingu strandgróðurs (*miðlungs vissa*), sérstaklega þar sem tilfærsla í átt til lands er takmörkuð af manngerðum breytingum á strandlengju og þéttbýlisþróun (*mikil vissa*).

Áætluð hlýnun, sjávarborðshækkun og breytingar á sjávarföllum á 21. öldinni munu áfram stuðla að hækkun seltu og undirmettun súrefnis í árósum (*mikil vissa*) sem aftur stofnar í hættu lífríki á botni og í vatnssúlunni (göngur, staðbundin útrýming, verri afkoma) (*miðlungs vissa*).

Næstum öll kóralrif í hlýjum sjó munu rýrna, jafnvel þó að hnattræn hlýnun verði undir 2°C (*mikil vissa*). Tegundasamsetning og fjölbreytileiki á rifum sem eftir standa munu verða frábrugðin því sem nú er (mjög mikil vissa). Eyðing kóralrifa mun skerða verulega framlegð þeirra til mannlegs samfélags, svo sem fæðuframboðs (*mikil vissa*), verndunar strandsvæða (*mikil vissa*) og ferðamennsku (*miðlungs vissa*).

### Líklegir áhættuþættir fyrir samfélög

Breytingar sem spáð er að verði á snjó og ís munu hafa áhrif á vatnsauðlindir og hagnýtingu þeirra, m.a. á vatnsafl, áveitur í landbúnaði og vatnsgæði. Breytingarnar koma fram á heimskauta- og fjallasvæðum og neðar á vatnasviðum þar sem áhrifa snjóa og jökla til fjalla gætir (*miðlungs vissa*). Matvælaöryggi og skilyrði til búsetu á Norðurskautssvæðinu munu breytast. Breytinga er að vænta á náttúruvá, m.a. á flóðum í ám, snjóflóðum, skriðuföllum og vandamálum vegna óstöðugra jarðlaga, sem vænta má að hafi áhrif á innviði, ferðamennsku og aðstæður til útivistar (*mikil vissa*). {2.3, 3.4.3}

Ýmsar þjóðfélagsbreytingar gera það að verkum að mörg samfélög eru berskjaldaðri fyrir náttúruvá en áður var. Spár um breytingar á náttúruvá á mismunandi svæðum sýna að áhætta mun halda áfram að vaxa af þessum sökum á Norðurskautssvæðinu og á háfjallasvæðum eftir því sem afleiðingar af breytingum á snjó og jöklum koma fram (*miðlungs vissa*). Rýrnun jökla dregur úr stöðugleika nærliggjandi fjallshlíða þegar aðhald jöklanna minnkar og getur leitt til skriðufalla á jöklana og í sumum tilvikum niður í jökullón. Gera má ráð fyrir að núverandi viðbúnaður og varnaraðgerðir verði víða ófullnægjandi þegar fram í sækir (*miðlungs vissa*).

Þiðnun sífrera og íss í jörðu valda landsigi og myndar keldur og ker á stórum svæðum þar sem áður var frost í jörðu (*miðlungs vissa*). Þessi þróun hefur áhrif á margs konar innviði, m.a. vegakerfi, rafdreifikerfi, samskiptabúnað og hagnýtingu auðlinda á Norðurskautssvæðinu og á háfjallasvæðum (*miðlungs vissa*).

Gert er ráð fyrir að minnkandi afrennsli frá snjó og jöklum dragi úr framleiðni í landbúnaði sem háður er áveitum á sumum svæðum (*miðlungs vissa*). Erfiðara aðgengi að veiði- og beitarlendum, minna fæðuframboð á sumum svæðum og nýjar tegundir sníkjudýra og sjúkdóma munu valda erfiðleikum við öflun fæðu og vatns fyrir sum samfélög á Norðurskautssvæðinu (*mikil vissa*).

Rekstur vatnsaflsvirkjana mun verða fyrir vaxandi áhrifum af breytingum á heildarmagni og árstíðasveiflu afrennslis frá snjó og jöklum (*mikil vissa*). Í sumum tilvikum getur bráðnun jökla og

Þiðnun sífrera valdið mengun þungmálma og annarra efna frá stöðum þar sem slíkum efnum hefur verið fargað. Slík mengun getur rýrt vatnsgæði fyrir lífríki, heimilisnot og áveitur (*miðlungs vissa*).

## ÁSKORANIR

Breytingar í hafi og freðhvolfi af völdum loftslagsbreytinga reyna á aðlögunargetu samfélaga og vistkerfa. Sú áhætta sem fylgir breytingunum mun reyna á stjórnunarhætti á öllum stjórnsýslustigum og á alþjóðavísu (*mikil vissa*).

Áhrif loftslagsbreytinga á haf og freðhvolf og samfélagslegar afleiðingar eru víðfeðmar og ná yfir mislangan tíma, allt frá árum til alda. Þetta fellur illa að núverandi stjórnkerfum og getur hindrað rétt viðbrögð og leiðir til þess að samfélög standa frammi fyrir auknum áskorunum. Sem dæmi má nefna áhættu tengda ofanflóðum, og flóðahættu á háfjallasvæðum, stjórnun á nýtingu endurnýjanlegra auðlinda, kosti til að vernda fjölbreytileika lífs á heimskautasvæðum og ógnir sem steðja að lykilvisterfum í hafi (*miðlungs vissa*).

Núverandi stjórnkerfi eru gjarnan of dreifð um ólík stjórnsýslusvið til þess að geta á samþættan hátt tekist á við aukna áhættu og keðjuverkun áhættuþátta vegna breytinga í hafi og freðhvolfi (*mikil vissa*). Stjórnkerfiseiningar sem bera ábyrgð á málefnum haf- og heimskautasvæða hafa styrkst en eru þó hvorki nægilega viðbragðsfljót né áreiðanleg til að ráða við þá áhættu sem af þessum breytingum stafar (*mikil vissa*).

## VALKOSTIR

Ýmsir möguleikar eru tiltækir til þess að varðveita þau vistkerfi sem tengjast hafi og freðhvolfi og tryggja að virkni þeirra raskist ekki. Þar á meðal eru verndun, endurheimt, vistfræðileg stýring endurnýjanlegra náttúruauðlinda, draga úr mengun og álagi (*mikil vissa*).

Net verndarsvæða á landi og í hafi gera varið vistkerfi og tryggt þjónustu þeirra, einnig stutt við tilfærslur tegunda í átt að kaldari svæðum, í takt við þróun sem þegar er hafin vegna hlýnunar (*mikil vissa*). Ýmsir þættir tengdir landi og landnotkun á hálendissvæðum, strandsvæðum og á norðurheimskautssvæðinu draga þó úr slíkum tilfærslumöguleikum (*mikil vissa*).

Traust fiskveiðistjórnun dregur úr neikvæðum áhrifum loftslagsbreytinga á sjávarútveg og styrkir sjálfbærni í hagkerfum sem byggja á nýtingu auðlinda hafsins (*miðlungs vissa*). Sveigjanleg stýring veiðiálags getur dregið úr áhættu fyrir fiskveiðar á heimskautasvæðum (*miðlungs vissa*) en dugir skammt til að glíma við breytingar á vistkerfum.

Sjálfbær fiskveiðistjórnun getur stuðlað að uppbyggingu ofveiddra fiskistofna, bætt stofnstærð, aflabrogð og efnahag, sérstaklega í sviðmyndum þar sem lítið er losað (*miðlungs vissa*).

Til þess að bregðast við hækkandi sjávarstöðu og aftakaflóðum af hennar völdum þurfa strandsamfélög að glíma við erfiðar en óhjákvæmilegar áskoranir. Taka þarf tillit til ólíkra þarfa, vega saman kostnað og ábata ólíkra valkosta sem hægt er að laga að breyttum

aðstæðum ef þörf krefur þegar fram í sækir (*mikil vissa*). Greining á afleiðingum ákvarðana, aðferðir til þess að draga úr hagsmunaárekstrum og gott skipulag byggðar nýtast til þess að takast á við þessar áskoranir (*mikil vissa*).

Verði losun í samræmi við þá sviðsmynd þar sem minnst er losað (RCP2.6) er ekki líklegt að álag fari yfir tæknileg mörk eiginlegra eða hefðbundinna strandvarna, en það gæti gerst eftir 2100 fylgi losun sviðsmynd RCP8.5 (*mikil vissa*). Ef landrými er takmarkað og verðmæti mannvirkja mikið geta hefðbundnar strandvarnir verið hagkvæmur kostur (*mikil vissa*) en fyrir yfirvöld með takmarkað fjármagn geta slíkar varnir verið óframkvæmanlegar. Þar sem landrými er nægilegt geta vistkerfislausnir dregið úr áhættu við ströndina og jafnframt skilað margskonar hliðarábata (*miðlungs vissa*).

Bætt flóðaþol byggðar og viðvörunarkerfi er oft bæði ódýr og mjög hagkvæm lausn, sértaklega á dreifbýlum svæðum (*mikil vissa*). Búast má við því að slíkar lausnir nái gagnsemismörkum sínum fyrr en dæmigerðar strandvarnir. Á fámennum, strjálbýlum strandsvæðum þar sem áhætta er nú þegar mikil getur verið árangursríkt að hopa frá ströndinni, þó það sé erfitt af menningar-, félags- og stjórnmálalegum ástæðum (*mikil vissa*). Flutningi byggðar eru ýmsar skorður settar sem ekki eru vel þekktar að svo komnu máli.

Viðbrögð samfélaga við hækkandi sjávarmáli er djúpstæð áskorun fyrir stjórnkerfi og samfélagið allt. Óvissa er um umfang hækkunar og mismunandi þættir rekast á., s.s. samfélagsleg markmið (t.d. öryggi, náttúruvernd og efnahagsþróun), takmarkaðir fjármunir og hagsmunaárekstrar (*mikil vissa*). Mæta má þessum áskorunum með sveigjanlegum lausnum sem aðlaga stiga af stigi, greiningu á afleiðingum ákvarðana, skipulagi byggðar, samráði við hagsmunaaðila auk aðferða til að draga úr ágreiningi (*miðlungs vissa*).

Þrátt fyrir verulega óvissu um hækkun sjávarborðs má nú byggja á sveigjanlegum lausnum (sem aðlaga má stig af stigi) og styðja þær með vöktunarkerfum svo hægt sé að vara við sjávarflóðum í tæka tíð. Slíkar ákvarðanir þarf að endurskoða reglulega og treysta ákvarðanatökuna með því að taka tillit til sérfræðipækkingar, margskonar sviðsmynda og gagna (*mikil vissa*). Sé áhættuþol lítið er gagnlegt að skoða ítrustu sviðsmyndir um sjávarborðshækkun (s.s. RCP8.5 þar sem sjávarstaða rís meira en 1.1 m við aldarlok) (*mikil vissa*). Þetta þýðir m.a. að nauðsynlegt er að taka tillit til sviðsmynda þar sem mögulegar breytingar með alvarlegum afleiðingum eiga sér stað (t.d. mikil hækkun sjávar) sem erfitt er að glíma við án skilvirktrar aðlögunar.

## AÐ GERA BREYTINGAR MÖGULEGAR

Viðbrögð vegna breytinga á hafi og freðhvolfi skipta miklu. Víðtæk samvinna ólíkra aðila á mörgum sviðum og svæðum er mikilvæg til þess að hrinda í framkvæmd árangursríkum aðgerðum (*mikil vissa*). Menntun, bættur skilningur á áhrifum manna á loftslag og áhrifum loftslags á samfélög, eftirlit, spár, fjármögnun og stuðningur stofnana eru einnig ómissandi fyrir þátttöku í aðlögun sem hentar hverju sinni, og fyrir mat á kostnaði og hliðarávinningi þess draga úr áhættu og auka áfallaþol (*mikil vissa*).



Svæðisbundnir samstarfssamningar á Norðurskautssvæðinu og á sumum hálendissvæðum og milli stjórnsýslueininga sem deila vatnasvæðum geta auðveldað aðgerðir til aðlögunar. Stefnumótun tekur þó enn takmarkað mið af afleiðingum tjóns sem kann að stafa af breytingum í hafi og freðhvolfi (*mikil vissa*).

Víðtæk fjárfesting í menntun á ýmsum stigum auðveldar félagsnám, þ.e. að læra af og með öðrum, og uppbyggingu hæfni til þess að móta og hrinda í framkvæmd stefnu sem dregur úr áhættu og eykur áfallapól á Norðurskautssvæðinu og sumum hálendum svæðum (*miðlungs vissa*). Eftir því sem við á getur eftirlit með og spár um breytingar á hafi og freðhvolfi stutt við aðlögun og treyst ákvarðanatöku þar sem vega þarf saman skammtíma og langtímahagsmuni (*miðlungs vissa*).

Hingað til hefur eftirfarandi reynst vel hvað viðbrögð við sjávarstöðubreytingum varðar: Í fyrsta lagið að horfa til lengri tíma jafnvel þegar teknar eru ákvarðanir til skammtíma, og taka tillit til óvissu um áhættu eftir 2050 (*mikil vissa*) og byggja upp stjórnhætti sem ráða við flækjustig afleiðinga sjávarstöðubreytinga (*miðlungs vissa*). Í öðru lagi getur bætt samhæfing viðbragða á ólíkum stofnunum, stjórnsýslustigum og geirum auðveldað að takast á við afleiðingar og aukna áhættu vegna sjávarstöðubreytinga (*mikil vissa*). Í þriðja lagi skiptir máli fyrir sjálfbæra þróun, og það að byggja upp áfallapól á sanngjarnan og réttlátan hátt, að forgangsroðun taki tillit til tjónnæmis og jafnréttis þjóðfélagshópa (*mikil vissa*), og þá getur hjálpað að tryggja öruggan farveg fyrir umræðu og lausn deilumála (*miðlungs vissa*). Loks má bæta almennan skilning á sjávarstöðubreytingum, áhættu og viðbrögðum með því að taka tillit til staðbundinnar þekkingar jafnt sem vísindalegrar þekkingar þegar hugað er að viðbrögðum á hverjum stað (*mikil vissa*).

Metnaðarfullar og samhæfðar aðgerðir til þess að minnka losun gróðurhúsalofttegunda, draga úr afleiðingum loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið og aðlagast mögulegum breytingum eru nauðsynlegar. Slíkar aðgerðir eru forsendasjálfbærrar þróunar sem þolir áhrif loftslagsbreytinga (*mikil vissa*).

Veruleg áskorun verður fyrir þjóðir að aðlagast þeim breytingum sem þegar eiga sér stað og líklegt er að muni verða í hafi og freðhvolfi, jafnvel með samhæfðum aðgerðum til þess að draga úr losun (*mjög mikil vissa*). Í samburði við sviðsmyndir þar sem mikið er losað fylgir mun minni áhætta fyrir hafið og freðhvolfið sviðsmyndum þar sem lítið er losað (*mikil vissa*) og jafnframt fylgja þeim ýmsar jákvæðar hliðarverkanir. Ef losun verður mikil er útlit fyrir að samfélög sem eru háð hafsins gæðum og freðhvolfi muni ná þolmörkum aðlögunar eftir 2100. Þetta getur gerst fyrr fyrir hópa sem eru berskjaldaðir fyrir áföllum. Umfangsmiklar breytingar á efnahag og innviðum þarf til þess að koma í veg fyrir óæskilegar breytingar á hafi og freðhvolfi (*mikil vissa*).

Niðurstöður þessarar matskýrslu eru í samræmi við niðurstöður IPCC SR1.5 (um leiðir til að halda hlýnun undir 1.5°C) og skýrslu milliríkjanefndar um líffræðilegan fjölbreytileika og vistkerfi (IPBES, 2019). Verulegur ávinningur er af einbeittum aðgerðum til þess að draga úr losun og aðlagast loftslagsbreytingum fyrir sjálfbæra þróun. Á hinn bóginn felst vaxandi kostnaður og aukin áhætta í því að fresta aðgerðum. Möguleikar til þess að grípa til aðgerða eru mismunandi fyrir ólík svæði og þjóðir. Til þess að hrinda í framkvæmd stefnu um loftslagsþolna þróun þarf að forgangsraða tímabærum, metnaðarfullum, samhæfðum og varanlegum aðgerðum til þess að draga úr áhrifum loftslagsbreytinga á hafið og freðhvolfið.