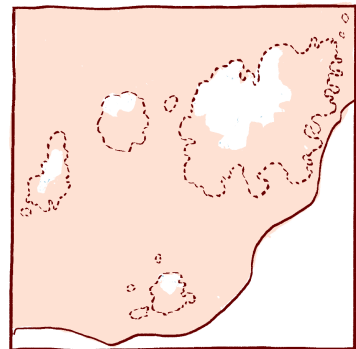
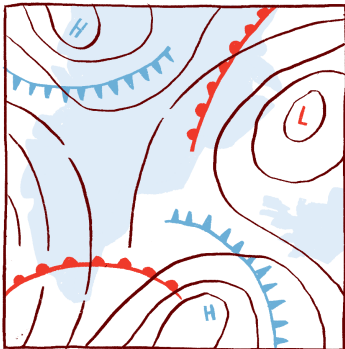


KAFLI

3

LÍKLEGAR LOFTSLAGSBREYTINGAR
Á ÍSLANDI Á ÖLDinni



Efnisyfirlit kafla

3.1	Losunarsviðsmyndir, reikniverkefni og líkön	76
	Sérgrein 3A: CMIP6 og SSP sviðsmyndir	76
3.2	Líklegar hita- og úrkomubreytingar við Ísland	79
3.2.1	Niðurstöður loftslagslíkana fyrir tímabilið 1860 til 2015	79
3.2.2	Niðurstöður loftslagslíkana fyrir 21. öldina	80
3.2.3	Hámarksúrkoma	81
3.2.4	Breytingar á árstíðasveiflu	86
3.3	Loftslagsbreytingar og náttúrulegur breytileiki	88
3.3.1	Valda aukin gróðurhúsaáhrif hitabreytingum á Íslandi?	88
3.3.2	Náttúrulegur breytileiki og sviðsmyndir um loftslagsbreytingar	89
3.4	Samanburður á niðurstöðum þriggja síðustu skýrslna	92
3.5	Sviðsmyndir og óvissa	94
3.6	Langtímasamhengi líklegra hitabreytinga	95

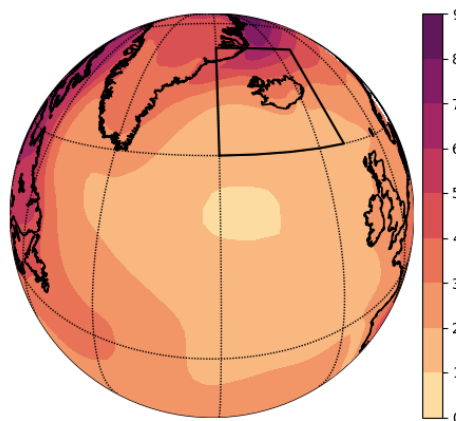
Samantekt

1. Veðurfar á Íslandi verður gjörólíkt því sem verið hefur frá landnámi og hugsanlega án fordæma síðan ísöld lauk, gangi heitasta sviðsmynd eftir. Fyrir miðlungsheitar sviðsmyndir er hlýnunin einnig án fordæma frá landnámi, en þó mögulegt að sumur hafi verið heitari snemma á nútíma.
2. Loftslagslíkön ná að herma þá hlýnun sem varð á Íslandi og nærliggjandi svæðum á síðustu áratugum sé reiknað með sögulegri aukningu gróðurhúsalofttegunda. Í útreikningum þar sem styrk gróðurhúsalofttegunda er haldið föstum herma þau ekki þá hlýnun sem varð á síðustu áratugum.
3. Fyrir Ísland og nærliggjandi hafsvæði er líklegt að fram að miðbiki aldarinnar hlýni um 1.0–1.7 °C [-1.1–2.6] °C frá meðaltali árána 1986 til 2015. Fram að miðbiki aldarinnar er ekki mikill munur á niðurstöðum loftslagslíkana fyrir ólíkar sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda.
4. Á síðari hluta aldarinnar dregur sundur með ólíkum sviðsmyndum og í heitustu sviðsmyndinni er hlýnun 3.5 °C [2.3–5.4] °C en 1.0 °C [-1.0–4.1] °C í þeirri köldustu.
5. Verði losun gróðurhúsalofttegunda þannig að markmið Parísarsamningsins náist getur heitasta sviðsmyndin ekki raungerst. Einnig veldur losun síðustu áratuga því að erfitt er að fylgja þeirri sviðsmynd þar sem geislunarálag er hvað minnst. Í sviðsmyndum sem liggja á milli þeirra heitustu og köldustu er hlýnunin í lok aldarinnar 2–2.8 °C [0–5.4] °C.
6. Úrkomubreytingar í sviðsmyndum eru ekki mjög eindregnar, en útlit er fyrir að úrkoma aukist um rúmlega 1% fyrir hverja gráðu sem hlýnar. Þó að líkönum beri ekki vel saman um umfang úrkomubreytinga benda niðurstöður til þess að aukningin verði meiri á haustmánuðum en minnst síðla vetrar.
7. Aftakaúrkoma (100 ára sólarhringshámark) gæti aukist um 5–15%, sem er aukning um 4–15 mm á sólarhring frá núverandi úrkomu, fyrir flest svæði en meira fyrir þá staði þar sem úrkoma er mest.
8. Endurkomutími þess úrkomumagns sem nú telst 100 ára úrkoma styttest þegar aftakaúrkoma eykst. Í heitari sviðsmyndum gæti slík úrkoma orðið sex- til áttfalt algengari í lok aldarinnar.
9. Niðurstöðum loftslagslíkana, sem notuð eru í þessari skýrslu, ber vel saman við þær niðurstöður sem kynntar voru í skýrslu síðustu vísindanefndar um loftslagsbreytingar, en bæði hlýnun og úrkomuaukning eru þó aðeins minni.
10. Samantekt á niðurstöðum þessarar skýrslu og skýrslum vísindanefndar 2008 og 2018 sýnir að ákafi hlýnunar í sviðsmyndareikningum er álíka. Til loka aldarinnar er ákafi hlýnunar á bilinu 0.1–0.16 °C á áratug í köldustu sviðsmyndum, í miðlungssviðsmyndum er hann 0.21–0.24 °C á áratug og 0.27–0.41 °C/á áratug í hlýjustu sviðsmynd. Í köldustu sviðsmyndum dregur úr ákafa hlýnunar á síðari hluta aldarinnar, en í hinum er hann óbreyttur eða eykst.
11. Niðurstöður líkanreikninga benda eindregið til þess að hlýnun verði meiri norðan við landið en sunnan við það.
12. Jafnvel þó að hlýni á öldinni í öllum sviðsmyndum og flestum líkönum, gætir tímabundinnar, staðbundinnar kólnunar í mörgum líkönum. Slík kólnun er algengari suður af landinu, en gætir skemur í heitari sviðsmyndum. Tímabundinnar kólnunar gætti lengur en 20 ár í 5–15%.

3.1 Losunarsviðsmyndir, reikniverkefni og líkön

Í skýrslum vísindanefndar árið 2008 og 2018 (V2008,V2018) voru kynntar niðurstöður loftslagslíkana um þróun veðurfars á reit sem þekur Ísland og nærliggjandi hafsvæði. Þessi reitur er í skýrslunum kallaður *Íslandsreiturinn* og afmarkast af 10–30°V og 60–70°N (sjá mynd 3.1). Þetta svæði samsvarar ágætlega því svæði sem kallað er *landið og miðin* í veðurfréttum, en var upphaflega valið með hliðsjón af upplausn reiknineta loftslagslíkana. Í fyrri skýrslum var byggt á gögnum frá CMIP3 og CMIP5 reikniverkefnunum, en innan þeirra voru nokkrir tugir líkana látin reikna sömu fjórar losunar-sviðsmyndirnar og auk þess *sögulega sviðsmynd*, þ.e. þróun loftslags við þær breytingar sem raunverulega urðu á *geislunarálagi*¹.

Í þessari skýrslu er byggt á niðurstöðum reikniverkefnisins CMIP6 (Eyring o.fl., 2016) þar sem var beitt tugum loftslagslíkana til að reikna endurbættar sviðsmyndir um losun gróðurhúsalofttegunda. Nánar er fjallað um losunarsviðsmyndir í viðauka C og sérgrein 3A fjallar um reikniverkefni margra loftslagslíkana og sviðsmyndir. Næstu greinar fjalla svo um niðurstöður líkananna fyrir Íslandsreitinn.



Mynd 3.1: Hitabreytingar (°C) á Norður-Atlantshafi. Sýndur er mismunur meðalhita tveggja tímabila, 1986–2015 og 2081–2100, í sviðsmynd SSP3-7.0. Myndin sýnir einnig staðsetningu Íslandsreitsins (frá 10–30°V og 60–70°N).

3A CMIP6 og SSP sviðsmyndir

Við gerð matsskýrslna IPCC er stuðst við niðurstöður frá CMIP-reikniverkefnum^a þar sem tugir loftslagslíkana nota sömu forsendur um losun. Skýrslur vísindanefndar byggjast að hluta á sömu gögnum.

Í skýrslu vísindanefndar 2018 (V2018) var notast við sviðsmyndir frá CMIP5-verkefninu en þær byggðust á fjórum RCP-sviðsmyndum^b um losun gróðurhúsalofttegunda (Meinshausen o.fl., 2011). Aukning gróðurhúsalofttegunda breytir afdrifum varmageislunar í lofthjúpnunum. Einn mælikvarði á það hversu mikið varmageislun til yfirborðsins breytist er geislunarálag sem er mælt í W/m^2 . Hver RCP-sviðsmynd lýsti þróun geislunarálags og aukningin til loka 21. aldar var notuð til aðgreiningar, t.d. RCP-2.6 og RCP-8.5.

Í CMIP6-verkefninu (Eyring o.fl., 2016) var notast við víðtækari SSP-sviðsmyndir^c sem taka tillit til samfélagslegrar og hagrænnar þróunnar (Vuuren o.fl., 2011; O'Neill o.fl., 2014; Riahi o.fl., 2017). Hver SSP sviðsmynd býður upp á ólíka möguleika um þróun

¹Geislunarálag er sú breyting sem verður á styrk gróðurhúsaáhrifa vegna losunar gróðurhúsalofttegunda eða annarra áhrifaþátta, s.s. styrks sólar eða agnamengunar. Það er mælt í W/m^2 og er hluti af nafni sviðsmynda, t.d. SSP2-4.5 sem hefur geislunarálagið 4.5 W/m^2 í lok 21. aldar.

geislunarálags, en í CMIP6-verkefnum var þróun geislunarálags í RCP-sviðsmyndunum höfð til hliðsjónar og sviðsmyndir með sambærilega losun gróðurhúsalofttegunda auðkenndar SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 og SSP5-8.5 (Meinshausen o.fl., 2020). Rétt eins og fyrir RCP-sviðsmyndirnar vísar talan á eftir bandstrikinu til aukningar geislunarálags í losunarsviðsmyndinni.

Auk þessara fjögurra losunarsviðsmynda var höfð til samanburðar söguleg sviðsmynd með metinni þróun geislunarálags frá 1850 til 2015, og til samanburðar við hana var einnig notuð sviðsmynd án aukinna gróðurhúsaáhrifa, þ.e. þar sem náttúrulegir áhrifaþættir geislunarálags eru þeir sömu og í sögulegu sviðsmyndinni, en losun gróðurhúsalofttegunda er óbreytt frá því fyrir iðnbýltingu.

Úrvinnsla hita- og úrkomusviðsmynda er sambærileg við fyrri skýrslur, viðmiðunartímabil er nú áratug lengra en í síðustu skýrslu, eða 1986-2015, og samanburðartímabil í lok aldarinnar er nú einn áratugur (2091-2100).

Niðurstöður CMIP6 og heit líkön

Niðurstöður CMIP6-líkana voru sóttar í gagnasafn loftslagslíkana (Cinquini o.fl., 2014; Balaji o.fl., 2018). Ein af niðurstöðum CMIP6 verkefnisins var að í sumum líkönum hlýnaði of mikið miðað við þróun geislunarálags. Í skýrslu IPCC (Lee o.fl., 2021) var brugðið á það ráð að nota samanburð á sögulegu sviðsmyndinni og raunverulegri hitaþróun ásamt upplýsingum um svörun líkana til þess að reikna vegið meðaltal, sem besta mat á líklegri hitaþróun^d. Þrátt fyrir að þessi aðferðafræði dugi vel við mat á hnattrænum breytingum er hún óheppileg fyrir svæðisbundnar breytingar og Hausfather o.fl. (2022) hafa lagt til einfaldari aðferðafræði, sem skilar sambærilegum niðurstöðum hvað varðar hnattræna meðalhlýnun og dreifingu hennar. Hausfather og meðhöfundar leggja til að sleppa líkönum þar sem TCR fellur utan við bilið 1.4-2.2 °C sem talið er *líklegt* (66% líkindi) af IPCC (Forster o.fl., 2021). Það skiptir máli fyrir mat á hlýnun við Ísland hvort notast er við öll líkön eða einungis þau þar sem TCR fellur innan *líklegra* marka eins og sjá má á mynd 3.2. Hún sýnir hlýnun í Íslandsreitnum í SSP sviðsmyndunum fjórum í öllum CMIP6-líkönum og í þeim líkönum þar sem TCR féll innan *líklegra* marka. Í síðara tilvikinu er greinilegt að líkön, þar sem hlýnun fer yfir 6 °C í Íslandsreitnum, falla á TCR-prófinu.

Tafla 3.1 sýnir fjölda líkana sem reiknuð voru í CMIP6 í hverri sviðsmynd og fjölda þeirra líkana þar sem TCR var innan *líklegra* marka. Í þessari skýrslu er ráðleggingum Hausfather o.fl. (2022) fylgt og einungis þau líkön sem standast TCR-prófið notuð við að meta hlýnun og breytingar á úrkomu. Ef ætlunin er að skoða eðlisfræðilega þætti sem ætla má að séu óháðir því hversu skarpa hlýnun líkön sýna er allt safnið notað. Í þeim tilvikum er slíkt tekið fram sérstaklega.

Til að meta breytingar á aftakaúrkomu eru notuð gögn frá Kópernikus-gagnaþjónustunni^e en þar má finna skrár þar sem búið er að reikna hámarks-24 tíma og -120 tíma úrkomu hvers árs. Tafla 3.2 sýnir hversu mörg líkön voru notuð fyrir hámarksúrkomu.

^aReikniverkefnum eru kölluð *Climate Model Intercomparison Project*, sem er skammstafað CMIP.

^bÁ ensku voru þessar sviðsmyndir nefndar *Radiative Concentration Pathways*, skammstafað RCP.

^cSviðsmyndir CMIP6 eru fimm ólíkar brautir samfélags- og hagrænnar þróunar, á ensku nefndar *Shared Socioeconomic Pathways*, skammstafað SSP1 til SSP5 (sjá nánar í viðauka C)

^dMeð svörun líkana er átt við það hversu næm þau reynast fyrir breytingum á styrk gróðurhúsalofttegunda, en sérstakar reiknilitraunir eru gerðar til þess að meta bæði *jafnvægisvörun* (*Equilibrium Climate Sensitivity, ECS*) sem er hlýnun loftslagslíkans eftir að styrkur CO_2 er aukinn skyndilega og svo haldið föstum, og *svípula svörun* (*Transient Climate Response, TCR*) sem er hlýnun loftslagslíkans eftir að 1% árleg aukning í styrk CO_2 hefur tvöfaldað styrkinn frá 1850.

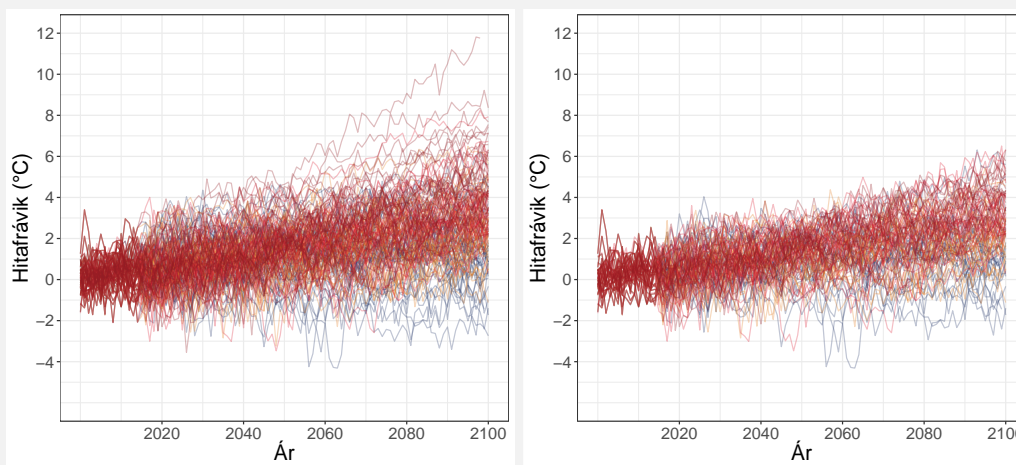
^eSjá CMIP6 climate projections á Copernicus Climate Data Store (Copernicus Climate Change Service, 2022).

Tafla 3.1: Sviðsmyndir notaðar í CMIP6-verkefninu, geislunarálag í hverri sviðsmynd, fjöldi líkana í CMIP6-safninu og fjöldi líkana með TCR á bilinu 1.4-2.2 °C, en þau voru notuð til að greina hita og úrkomubreytingar í grein 3.2. Í þeirri sviðsmynd þar sem engin losun á sér stað helst styrkur gróðurhúsalofttegunda (GHL) óbreyttur frá iðnbýltingu.

Sviðsmynd	Geislunarálag W/m^2	Fjöldi líkana	Fjöldi líkana sem stóðust TCR-próf
Söguleg	Raunþróun	58	34
SSP1-2.6	2.6	44	27
SSP2-4.5	4.5	42	26
SSP3-7.0	7.0	40	30
SSP5-8.5	8.5	45	26
Án losunar	GHL óbreytt	14	11

Tafla 3.2: Sviðsmyndir og fjöldi líkana sem notuð voru í til að kanna hámarksúrkomu.

Sviðsmynd	Fjöldi líkana	Fjöldi sem stóðust TCR próf
Söguleg	26	14
SSP1-2.6	25	14
SSP2-4.5	25	15
SSP3-7.0	20	14
SSP5-8.5	27	15

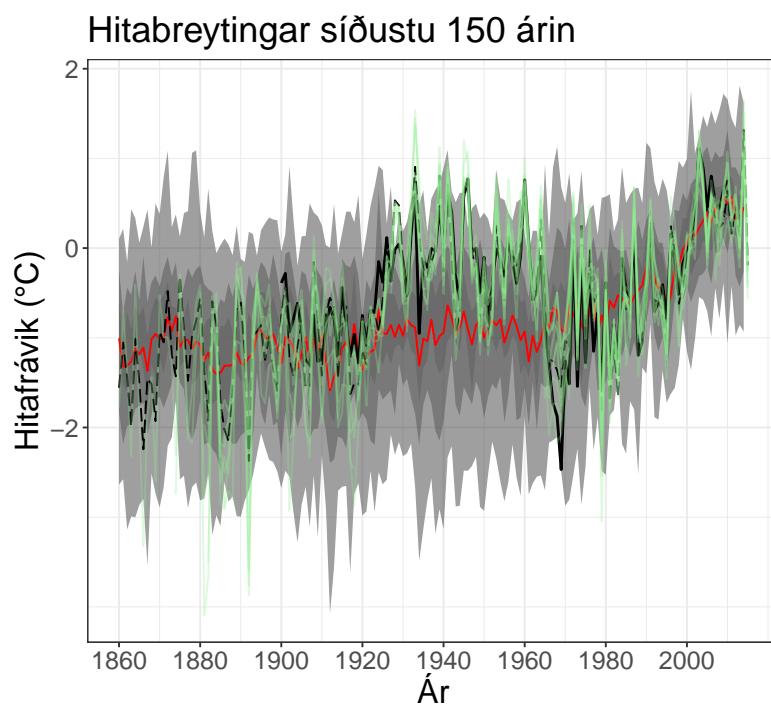


Mynd 3.2: Þróun meðalhita í Íslandsreitnum samkvæmt niðurstöðum CMIP6-líkana. Myndin til vinstri sýnir niðurstöður fyrir allar SSP sviðsmyndir og öll CMIP6-líkön, en myndin til hægri sýnir einungis niðurstöður fyrir þau líkön sem hafa TCR á bilinu 1.4-2.2 °C sem talið er líklegt (66% líkindi) af IPCC. Hitavik eru miðuð við tímabilið 1986 - 2015.

3.2 Líklegar hita- og úrkomubreytingar við Ísland

3.2.1 Niðurstöður loftslagslíkana fyrir tímabilið 1860 til 2015

Fyrst eru skoðaðar þær hitabreytingar sem loftslagslíkön reikna fyrir Íslandsreitinn í sögulegu sviðsmyndinni. Eins og í fyrri vísindaskýrslum er mikilvægt að áréttu að í sögulegu sviðsmyndinni er þróun geislunarálagsins einu upplýsingarnar sem líkön fá um raunverulega þróun á 19. og 20. öld. Líkön fá engar upplýsingar um þróun loftslagsins á þessu tímabili, heldur er það reiknað sem langtímaþróun reiknaðs veðurs og breytinga á því. Ólíkt hefðbundinni veðurspá er það veður, sem reiknað er í loftslagslíkönunum, því ekki spá fyrir neinn tiltekinn dag, heldur eining í safn sem gefur mynd af loftslagi. Sögulegu keyrslurnar skoða hvernig þetta loftslag hefur breyst vegna breytinga á geislunarálagi, en ekki er spáð fyrir um þróun innri breytileika í veðurfari. Hvernig sá breytileiki reiknast kann að fara eftir upphafsgildum líkana (t.d. ólíkir upphafsdagar til að byrja keyrslu) eða smáatriðum í hönnun þeirra sem setur takmörk um hversu vel líkönun getur borið saman.



Mynd 3.3: Hitabreytingar ($^{\circ}\text{C}$) í Íslandsreitnum á tímabilinu 1860–2015. Hitavik eru reiknuð miðað við tímabilið 1860–2015. Skyggðir borðar sýna dreifingu á niðurstöðum loftslagslíkana og afmarkar ljósgrár litur 5–95% dreifingarinnar, grár litur 20–80% og dökkgrár 35–65%. Meðaltal líkana er sýnt sem rauð lína. Heildregin svört lína sýnir niðurstöður ERA20C-greiningarinnar en brotalína sýnir niðurstöður BEST-hitagreiningarinnar. Fíndregnar ljósgrænar línur sýna mælingar á 14 veðurstöðvum á Íslandi (sömu stöðvar og á mynd 2.2).

Stöður 34 loftslagslíkana fyrir sögulegu sviðsmyndina, hitaþróun á 14 íslenskum veðurstöðvum og tvær greiningar raunþróun hita, ERA20C-endurgreiningunni og BEST-hitagreiningunni (Rohde og Hausfather, 2020). Gráskyggða svæðið á myndinni sýnir niðurstöður líkana og lýsir breidd þess breytileika líkana. Athuganir eru yfirleitt innan gráskyggða svæðisins sem sýnir að í heildina ná líkönin að spanna náttúrulegan breytileika. Augljóst er samt að rauða línan, sem sýnir meðaltal

Þegar reikniniðurstöður í sögulegu sviðsmyndinni eru skoðaðar er ekki við því að búast að loftslagslíkön hermi í smáatriðum eftir þróun loftslags í Íslandsreitnum, því margir loftslagsatburðir (s.s. hafísárin, kaldur vetur 1880 o.s.frv.) stafa ekki af breytingum í geislunarálagi heldur eru dæmi um afleiðingar innri breytileika í náttúrunni og það er undir hælinn lagt hvort loftslagslíkön ná að herma slíkan breytileika. Eftir sem áður má gera þá kröfu að breytileiki þess loftslags sem líkönin reikna sé í takt við raunverulegan breytileika, og auk þess er eðlilegt að búast við því að þróun loftslags endurspegli breytingar á geislunarálagi, t.d. vegna stórgosa eða bruna jarðefnaeldsneytis. Ef niðurstöður margra líkana eru skoðaðar og bornar saman við raunverulega þróun loftslags er því mikilvægt að skoða hvort langtíma-breytingar séu trúverðugar og að dreifing á niðurstöðum loftslagslíkana ná að spanna náttúrulegan breytileika.

Mynd 3.3 sýnir reikniniðurstöður

líkana, víkur víða frá raunverulegri þróun hitafars, en eins og rætt var í skýrslu vísindanefndar 2018 þá herma loftslagslíkön ekki hlýnun sem varð um miðbik síðustu aldar, enda sú hlýnun ekki drifin af breytingum í geislunarálagi.

Sama má segja um skemmri kuldaskleið, eins og t.d. hafísárin á 7. áratug síðustu aldar. Upp úr 1960 hlýnar í líkönun í Íslandreitnum en mælingar og endurgreining fara ekki að sýna hlýnun að ráði fyrir en upp úr 1980. Augljós spurning er að hversu miklu leyti hlýnun síðustu áratuga megi rekja til hnattrænna loftslagsbreytinga og hver sé hluti náttúrulegs breytileika. Þetta atriði er rætt frekar í grein 3.3, en rétt eins og fyrir CMIP5-líkönin í skýrslu vísindanefndar 2018, eru niðurstöðurnar hér þær að CMIP6-líkönin fara nærri því að spanna náttúrulegan breytileika hitafars í Íslandsreitnum en herma að meðaltali ekki eftir raunverulegri hitaþróun fyrir en á síðasta hluta 20. aldar.

3.2.2 Niðurstöður loftslagslíkana fyrir 21. öldina

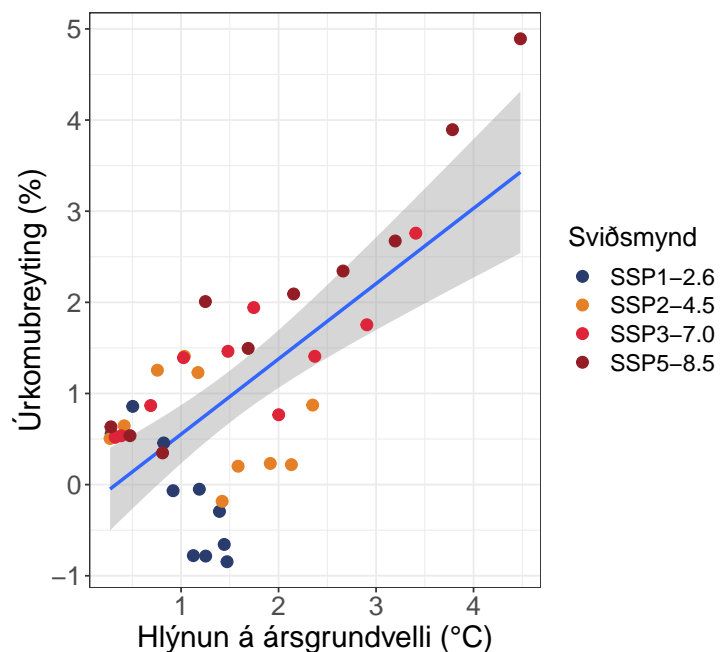
Hita- og úrkomubreytingar á Íslandsreitnum voru reiknaðar sem vik frá meðaltali árána 1985 til 2015. Fyrir úrkomu var hlutfallslegt frávik reiknað. Myndir 3.5 og 3.6 sýna niðurstöður fyrir ársmeðaltöl.

Eins og á fyrri mynd afmarkar ysti borðinn 5–95% dreifingarinnar, sá næsti 20–80% og innsti borðinn 35–65%. Rauða línán sýnir svo meðaltal líkana. Meðaltöl áratuga voru reiknuð fyrir miðja öldina og lok hennar og eru kassarit fyrir þær niðurstöður einnig sýnd á myndunum. Töflur 3.3 til 3.6 sýna sömu niðurstöður og kassaritin og sýnir hver tafla hlutfallsmörk (5%, 25%, 50%, 75% og 95%) dreifingarinnar við miðbik aldarinnar eða við aldarlok. Eins og í fyrri skýrslum sýnir hver dálkur þau mörk þar sem tiltekið hlutfall líkana er jafnkalt eða kaldara (töflur 3.3 og 3.4) eða jafnþurr eða þurrara (töflur 3.5 og 3.6), t.d. er helmingur líkana jafnkaldur eða kaldari en gildið í 50% dálki 3.3 og 3.4).

Hvað hitabreytingar varðar er hlýnun í ólíkum sviðsmyndum 1–1.7 °C við miðbik aldarinnar en 1–3.5 °C við lok hennar. Veruleg dreifing er þó á niðurstöðum, mest fyrir köldustu sviðsmyndina (rúmlega 5 °C spönn við lok aldarinnar), minni fyrir þá hlýjustu (rúmlega 2.5 °C). Fyrir miðbik aldarinnar er munur milli sviðsmynda yfirleitt ekki tölfraðilega marktækur en á síðari hluta aldarinnar dregur sundur milli ólíkra sviðsmynda og marktækur munur verður á milli þeirra.

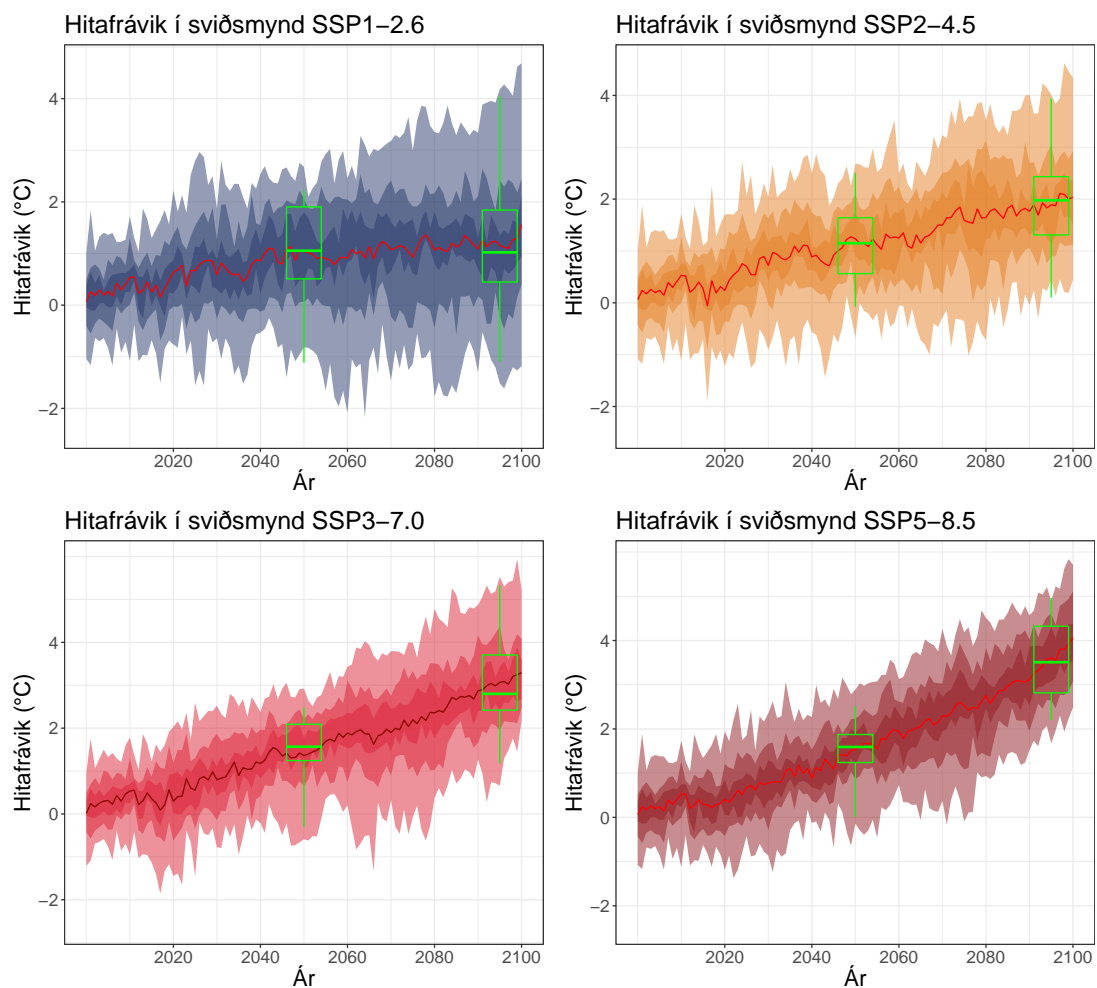
Að meðaltali eykst úrcoma lítilllega í flestum sviðsmyndum við lok aldarinnar en aukningin er þó ekki mikil og dreifing niðurstaðna slík að tölfraðilegur munur finnst ekki á milli sviðsmynda.

Eins og í fyrri skýrslum voru skoðuð áratugameðaltöl hita fyrir öll líkön í hverri sviðsmynd og þau borin saman við úrkomumeðaltöl sama tíma. Við þennan samanburð voru notuð öll CMIP6-líkönin óháð TCR-gildi, enda snýst samanburðurinn um eðlisfræðilegt samband sem gera má ráð fyrir að sé óháð því hvernig líkön svara breytingum í geislunarálagi. Mynd 3.4 sýnir að



Mynd 3.4: Úrkomubreytingar á móti hitabreytingum í Íslandsreitnum. Sýnd eru 10 ára meðaltöl fyrir sviðsmyndirnar fjórar. Notast er við öll CMIP6-líkönin.

úrkomu eykst með hlýnun og er aukningin rúmlega 1% fyrir hverja gráðu sem hlýnar eftir 2015. Þessi aukning er marktæk, en þó lægri en sambærilegur samanburður í CMIP5-líkönum (sem var um 1.5%) og enn lægri en niðurstöður CMIP3-líkana (2–3%).



Mynd 3.5: Hitabreytingar í Íslandsreitnum í SSP-sviðsmyndunum. Hitavik eru reiknuð miðað við tímabilið 1986–2015. Skyggðir borðar sýna dreifingu á niðurstöðum loftslagslíkana og eins og á mynd 3.3 afmarkar ljósasti liturinn 5–95% dreifingarinnar, næsti 20–80% og sá dekksti 35–65%. Meðaltal líkana er sýnt sem rauð lína. Kassarit eru sýnd fyrir meðaltöl áratuganna 2046–2055 og 2091–2100 og sýna sömu gögn og í töflum 3.3 og 3.4.

Í heildina eru niðurstöður CMIP6-líkana í Íslandsreitnum líkar niðurstöðum CMIP5-líkana sem lýst var í síðustu skýrslu vísindanefndar. Niðurstöður CMIP6 eru lítið eitt kaldari en CMIP5 niðurstöður og úrkoman er aðeins minni. Munurinn er þó ekki mikill og má teljast eðlilegur í ljósi þess að ferill geislunarálags í RCP- og SSP-sviðsmyndum er ekki alveg sá sami (sjá t.d. mynd SM1.1 í Abram o.fl. (2019)), auk þess sem nokkur þróun hefur verið í loftslagslíkönun síðasta áratug. Nánar er fjallað um samanburð CMIP3, CMIP5 og CMIP6 fyrir Íslandsreitinn í grein 3.4.

3.2.3 Hámarksúrkomu

Hámörk sólarhringsúrkomu hvers árs (RX1D) og árshámörk fimm-daga uppsafnaðrar úrkomu (RX5D) hafa verið reiknuð fyrir sum líkana í CMIP6-safninu og gerð aðgengileg hjá gagnagátt Kópernikusaráætlunarinnar (sjá töflu 3.2). Þessi gögn henta vel til að leggja mat á aftakaúrkomu en með þeim er auðvelt að meta magn 100 ára úrkomu og breytingar á henni. Nokkur munur er á

Tafla 3.3: Hitafarsbreytingar ($^{\circ}\text{C}$) í Íslandsreitnum frá meðaltali árána 1986-2015 til 2046-2055. Taflan sýnir hlutfallsmörk dreifingar á niðurstöðum loftslagslíkana. Sjá einnig kassarit á mynd 3.5.

Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
SSP1-2.6	-1.09	0.59	1.06	1.95	2.24
SSP2-4.5	-0.13	0.61	1.11	1.70	2.55
SSP3-7.0	-0.30	1.20	1.59	2.10	2.49
SSP5-8.5	0.07	1.30	1.65	1.90	2.61

Tafla 3.4: Hitafarsbreytingar ($^{\circ}\text{C}$) í Íslandsreitnum frá meðaltali árána 1986-2015 til 2091-2100. Taflan sýnir hlutfallsmörk dreifingar á niðurstöðum loftslagslíkana. Sjá einnig kassarit á mynd 3.5.

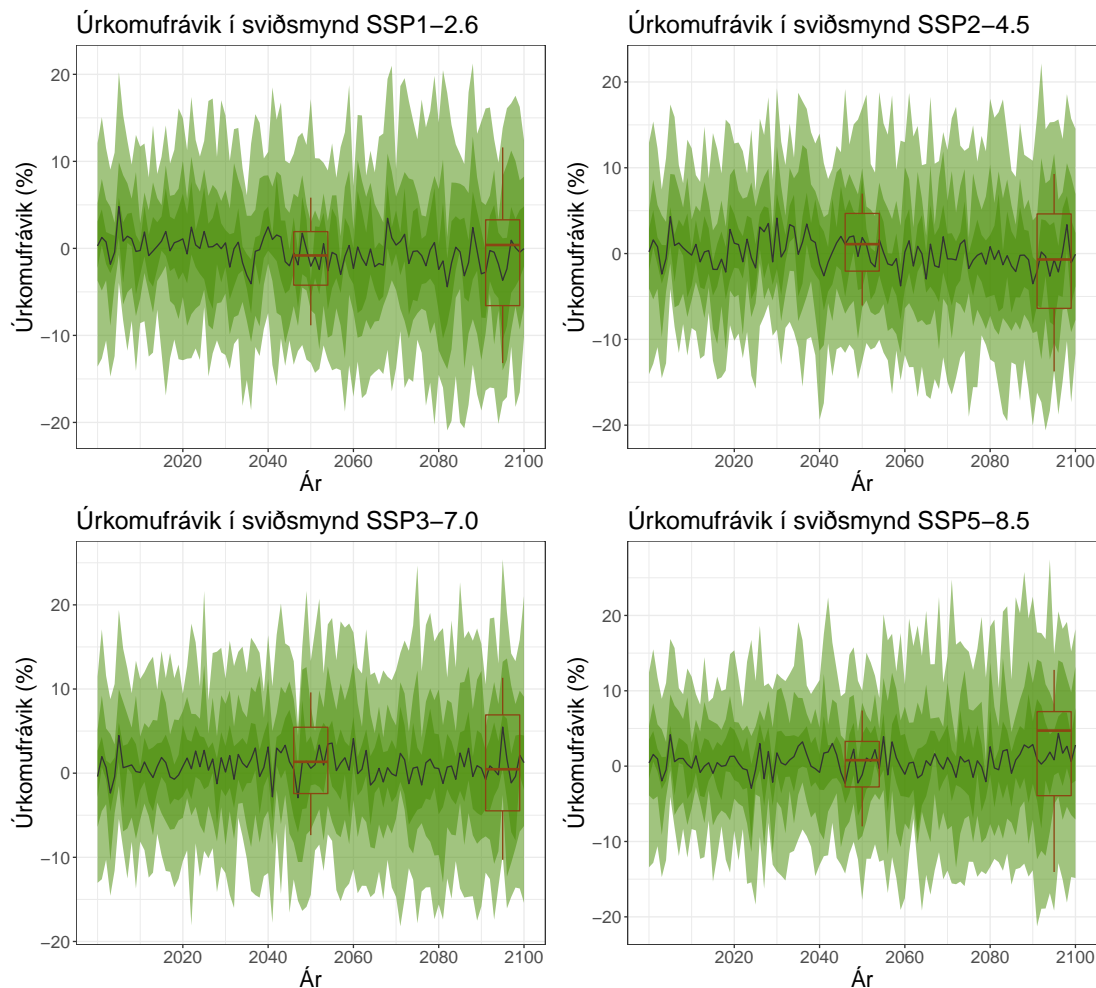
Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
SSP1-2.6	-1.02	0.39	1.01	1.91	4.11
SSP2-4.5	0.12	1.31	1.97	2.47	4.00
SSP3-7.0	1.17	2.45	2.81	3.75	5.38
SSP5-8.5	2.29	2.85	3.53	4.42	5.04

Tafla 3.5: Úrkomubreytingar (%) í Íslandsreitnum frá meðaltali árána 1986-2015 til 2046-2055. Taflan sýnir hlutfallsmörk dreifingar á niðurstöðum loftslagslíkana. Sjá einnig kassarit á mynd 3.6.

Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
SSP1-2.6	-8.76	-3.96	-1.06	2.20	5.85
SSP2-4.5	-7.15	-2.41	0.31	4.93	6.80
SSP3-7.0	-6.88	-2.38	2.08	5.19	8.87
SSP5-8.5	-7.78	-2.93	1.50	3.14	7.65

Tafla 3.6: Úrkomubreytingar (%) í Íslandsreitnum frá meðaltali árána 1986-2015 til 2091-2100. Taflan sýnir hlutfallsmörk dreifingar á niðurstöðum loftslagslíkana. Sjá einnig kassarit á mynd 3.6.

Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
SSP1-2.6	-12.73	-5.62	1.32	3.44	11.25
SSP2-4.5	-14.23	-6.67	-0.06	5.93	10.11
SSP3-7.0	-10.63	-4.12	0.99	5.97	11.01
SSP5-8.5	-13.78	-4.11	4.10	7.66	13.62



Mynd 3.6: Úrkomubreytingar í Íslandsreitnum í SSP-sviðsmyndunum. Skyggðir grænir borðar sýna dreifingu á niðurstöðum loftslagslíkana og, eins og á mynd 3.5, afmarkar ljósasti liturinn 5–95% dreifingarinnar, næsti 20–80% og sá dekksti 35–65%. Meðaltal líkana er sýnt sem dökkgræn lína. Kassarít eru sýnd fyrir meðaltöl áratuganna 2046-2055 og 2091-2100 og sýna sömu gögn og í töflum 3.5 og 3.6

úrkomumagni í líkönum en þau má bera saman með því að reikna hver árshámörk eru að jafnaði í hverju líkani á viðmiðunartíma. Þá má skoða hlutfallsleg frávik frá jafnaðargildinu, bera saman breytingar frávik allra líkana fyrir allar sviðsmyndir og loks nota almenna aftakagreiningu til að meta hversu mikils fráviks er að vænta fyrir ólíka endurkomutíma.

Aftakagildin sem eru reiknuð eru það úrkomumagn sem hefur 100 ára endurkomutíma, reiknað frá árshámörkum sólarhringsúrkomu eða fimm daga uppsafnaðrar úrkomu. Hér verða þessi 100 ára úrkomugildi kölluð *aftakaúrkoma* þar sem við á. Töflur 3.7 og 3.8 sýna niðurstöður fyrir hlutfallslegar breytingar á aftakaúrkomu (RX1D og RX5D) á Íslandsreitnum fyrir allar sviðsmyndir. Jafnaðargildi hvers líkans var reiknað frá gögnum sögulegu sviðsmyndarinnar fyrir tímabilið 1985-2014 og töflurnar sýna hlutfallslegar breytingar á 100 ára gildi fráviks.

Töflurnar sýna að í sögulegu keyrslunni er aftakaúrkoman rúmlega 1.5 [1.3 til 1.8] falt hærri en jafnaðargildið, en í sviðsmyndunum hækkar þetta hlutfall með hlýnun. Niðurstöður eru meira afgerandi fyrir sólarhringshámörk (RX1D) en þar er aftakagildið í sviðmynd SSP5-8.5 um 1.76-falt jafnaðargildi sem er tæp 15% hækkun frá sögulegu keyrslunni. Fyrir sömu sviðsmynd og fimm daga uppsafnaða úrkomu (RX5D) er samsvarandi hækkun um 12%. Hlutföllin eru hærri því heitari sem sviðsmyndin er, en SSP5-8.5 reyndist sú eina sem var afgerandi tölfræðilega frábrugðin sögulegu keyrslunni. Eins og tafla 3.2 sýnir voru einungis 14 til 15 líkön bak við þessar

niðurstöður. Ef einnig voru notuð þau líkön sem féllu á TCR-prófinu (sjá grein 3.1) breyttist miðgildið í töflum 3.7 og 3.8 lítið, en dreifingar breyttust nægilega til þess að SSP3-7.0 varð einnig marktækt frábrugðin sviðsmyndakeyrslunni og SSP2-4.5 færðist nær því að ná alltaf sk. 95% marktækni. Í þessari sviðsmynd er 100 ára gildi úrkomu um 1.6-falt jafnaðargildi sem er rúm 5% hækkun frá sögulegu keyrslunni. Aukning aftakaúrkomu á bilinu 5% til 15% er meiri en í rannsókn Massad o.fl. (2022) sem fengu 4 til 5% aukningu í CMIP5-sviðsmyndum. Nokkur aðferðafræðilegur munur var á þessum rannsóknum og getur hann útskýrt muninn.

Tafla 3.7: Hlutfallslegar breytingar á 100 ára gildi hámarksúrkomu eins dags (RX1D) á ársgrundvelli. Hlutföllin eru miðuð við dæmigerða hámarksúrkomu hvers árs á viðmiðunartímabilinu.

Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
Söguleg	1.33	1.44	1.54	1.61	1.82
SSP1-2.6	1.45	1.52	1.58	1.68	1.71
SSP2-4.5	1.46	1.53	1.59	1.70	1.91
SSP3-7.0	1.43	1.49	1.60	1.77	2.04
SSP5-8.5	1.57	1.72	1.76	1.94	2.01

Tafla 3.8: Hlutfallslegar breytingar á 100 ára gildi árshámarks fimm daga uppsafnaðrar úrkomu (RX5D). Hlutföllin eru miðuð við dæmigerða fimm daga hámarksúrkomu hvers árs á viðmiðunartímabilinu.

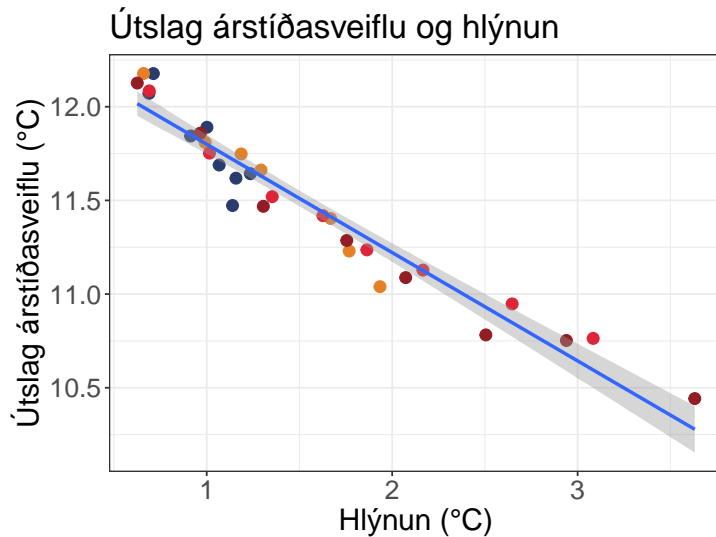
Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
Söguleg	1.38	1.50	1.52	1.60	1.69
SSP1-2.6	1.49	1.55	1.64	1.67	1.92
SSP2-4.5	1.43	1.54	1.58	1.74	1.85
SSP3-7.0	1.43	1.53	1.59	1.69	1.96
SSP5-8.5	1.57	1.60	1.71	1.75	1.82

Tafla 3.9: Endurkomutími (í árum) þeirrar úrkomu sem hafði 100 ára endurkomutíma í sögulegu keyrslunni við lok aldarinnar í ólíkum sviðsmyndum.

Sviðsmynd	Endurkomutími	
	RX1D	RX5D
SSP1-2.6	43	87
SSP2.4.5	31	56
SSP3-7.0	17	25
SSP5-8.5	13	37

Eins og rakið var í grein 2.1.3 sýna niðurstöður Massad o.fl. (2020) að 100 ára háværk sólarhringsúrkomu voru að jafnaði 1.75-falt hærra en miðgildi hámarksúrkomu hvers árs (metið með reikningi á 2 ára endurkomutíma) sem er nokkuð meira en gildið sem fæst í sögulegu keyrslunni í töflum 3.7 og 3.8. Líklegt er að þessi munur endurspegli þá staðreynd að möskvastærð reiknineta loftslagslíkana er um 50 til 100 km, en möskvastærð reikninetts endurgreiningarinnar er um 2.5 km. Þekkt er að yfirleitt herma reiknilíkön úrkomu betur eftir því sem upplausn reikninetts er meiri og því eðlilegt að 2.5 km reikninet skili betra mati á hámarksúrkomu en mun grófara reiknineti. Við mat á aukningu aftakaúrkomu er því eðlilegt að nota til viðmiðunar 100 ára úrkomuna hjá Massad o.fl. (2020) og nota 5%–15% aukningu frá sögulegu keyrslunni í niðurstöðum loftslagslíkana. Massad o.fl. (2020) sýndu að 100 ára gildi hámarksúrkomu er á

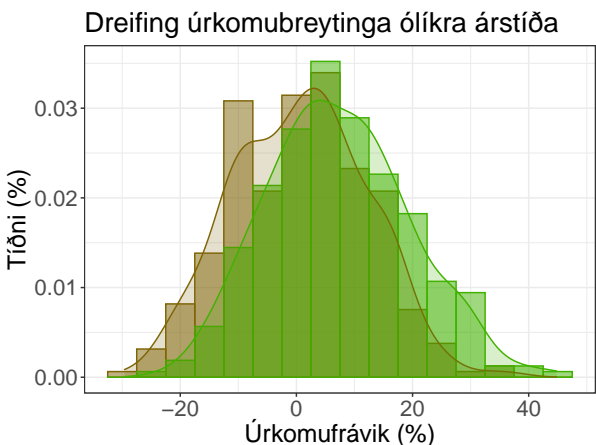
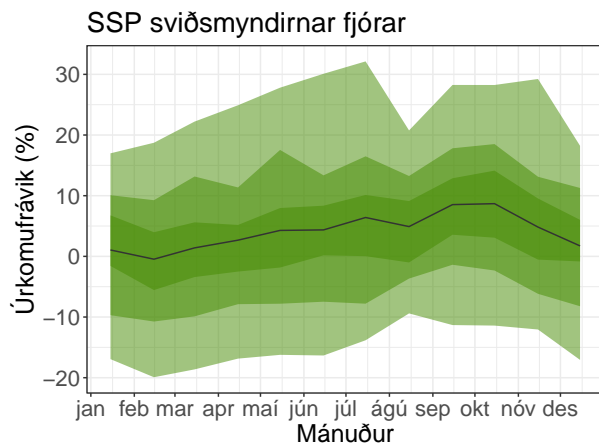
bilinu 70-100 mm fyrir flestar stöðvar á láglandi en getur verið hærri á sumum stöðvum og er almennt hærri austan- og suðaustanlands og til fjalla. Hækkun á 100 ára úrkomu um 5-15% nemur því allt að 4-15 mm á sólarhring fyrir flestar stöðvar, en er mun hærri tala fyrir þær stöðvar þar sem úrkoma er mest (sjá töflu 2.1).



Mynd 3.7: Breytingar í útslagi árstíðasveiflu á móti hlýnun í Íslandsreitnum. Punktarnir sýna meðaltöl hvers áratugs eftir 2020, litað eftir sviðsmynd (eins og á mynd 3.4). Einnig er sýnd besta lína og óvissumat hennar skyggt.

uppsafnaða úrkomu (RX5D). Fyrir sviðsmyndir SSP3-7.0 og SSP5-8.5 stýttist endurkomutíminn í 17 ár og 13 ár, en 25 og 37 ár fyrir fimm daga úrkomuna. Niðurstaðan er sú að úrkoman sem nú telst vera 100 ára úrkoma gæti orðið sexfalt til áttfalt algengari í lok aldarinnar, ef litið er til sólarhringsúrkomu, en þrefalt til fjórfalt algengari ef litið er til 5 daga uppsafnaðrar úrkomu.

Einnig má bera saman breytingar á endurkomutíma hámarksúrkomu í niðurstöðum loftslagslíkana. Hér hefur verið fjallað um niðurstöður reikninga á 100 ára hámarksúrkomu. Slíkt úrkomumagn getur hent oft- ar eða sjaldnar en á 100 ára fresti, því samkvæmt skilgreiningu er 100 ára atburður sá atburður sem hefur 1% árslíkur á að gerast (sjá grein 12A í V2018). Sú aftakaúrkoma sem nú hefur 1% árslíkur verður algengari þegar úrkoma eykst, þ.e. árslíkur hennar aukast og endurkomutími stýttist. Tafla 3.9 sýnir hvernig endurkomutími þess úrkomumagns sem var 100 ára úrkoma á viðmiðunartímabilinu verður í lok aldarinnar í hverri sviðsmynd. Taflan sýnir að endurkomutíminn stýttist verulega, bæði fyrir hámark sólarhringsúrkomu (RX1D) og fimm daga



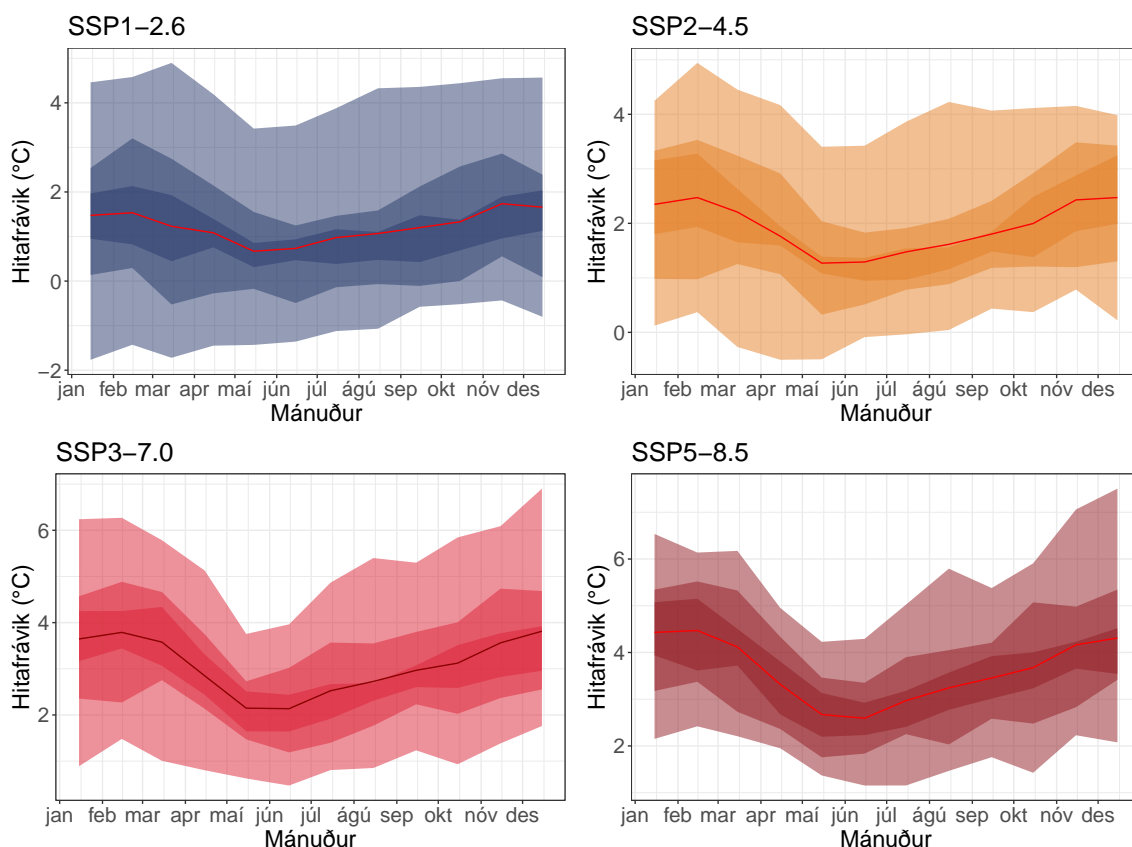
Mynd 3.8: Þróun árstíðasveiflu úrkomu í Íslandsreitnum í sameinuðum gögnum frá öllum SSP-sviðsmyndunum. Myndin til vinstri sýnir breytingar á árstíðasveiflu úrkomu (%) frá tímabilinu 1986-2015 til 2091-2100. Myndin til hægri sýnir dreifingu frávíka vetrarmánaða (janúar til mars, brúnleitt) og haustmánaða (september til nóvember, grænt). Marktækur munur er á breytingu þessara mánaða.

3.2.4 Breytingar á árstíðasveiflu

Lengi hefur verið ljóst að hlýnun vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa er ekki jafndreift yfir árið. Á norðlægum breiddargráðum hlýnar meira að vetri en sumri (Christensen o.fl. (2007), V2008, V2018).

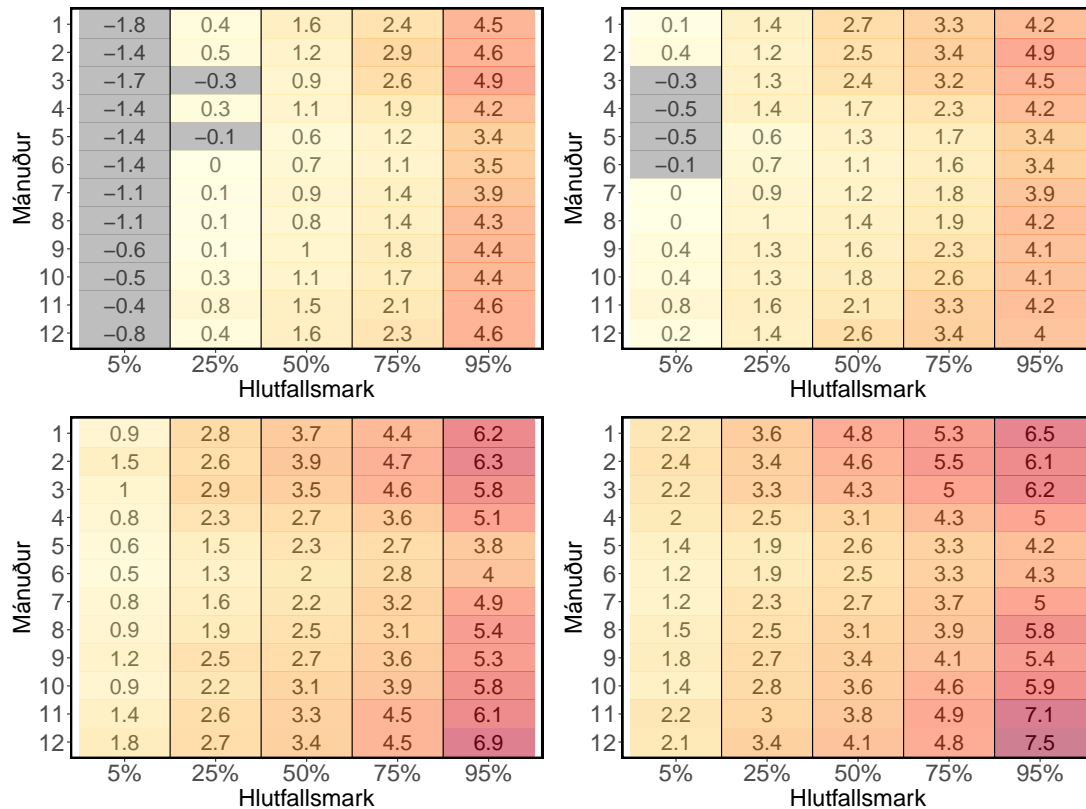
Mynd 3.9 sýnir hitabreytingar frá viðmiðunartímabilinu 1986-2015 til 2091-2100 fyrir hvern mánuð í SSP-sviðsmyndum. Mest hlýnar að vetri til, en minnst að sumri. Í sviðsmynd SSP1-2.6 hlýnar þannig um rúmlega 1.5 °C að vetri en 0.8 °C að sumri og í sviðsmynd SSP5-8.5 hlýnar um 4.5 °C að vetri en 2.5 °C að sumri. Mynd 3.7 sýnir samband hlýnunar og útslags árstíðasveiflu fyrir áratugameðaltöl allra sviðsmynda. Hallatala línunnar á myndinni gefur til kynna að ef hlýnar um 1 °C á ársgrundvelli þá dragi úr árstíðasveiflu hita um 0.6 °C. Dæmi um slíkt væri að það hlýnaði um 2.3 °C á vorin, haustin og á árs grundvelli, en hlýnunin er 3 °C að vetri og 1.6 °C að sumri.

Þá minnkar árstíðasveifla hita um 1.4 gráður sem er rúmlega 0.6-falt árgildið. Þessar niðurstöður eru sambærilegar við fyrri skýrslur, bæði hvað útslagsbreytingu varðar (meiri hlýnun að vetri en sumri) og samband árshlýnunar og minnkunar árstíðasveiflu hita. Niðurstöður þessara mynda eru dregnar á mynd 3.10 sem sýnir töflur með dreifingum hitabreytinga hvers mánaðar fyrir allar sviðsmyndir.



Mynd 3.9: Þróun árstíðasveiflu hita í Íslandsreitnum í SSP-sviðsmyndunum. Sýndur er mismunur meðalhita hvers mánaðar fyrir tvö tímabil, 1986-2015 og 2091-2100.

Úrkomubreytingar eru ekki jafneindregnar og hitabreytingar, þó að mynd 3.4 sýni samband á milli hlýnunar og úrkomuaukningar. Eins og fram kom í grein 3.2.2 var lítil munur á hlutfallslegum úrkomubreytingum á ársgrundvelli og sú mynd breyttist ekki þegar úrkomubreytingar voru skoðaðar fyrir hvern mánuð. Mynd 3.8 sýnir breytingar á árstíðasveiflu úrkomu í Íslandsreitnum. Þar sem allar sviðsmyndir skila álíka niðurstöðu voru þær sameinaðar og dreifing teiknuð fyrir hvern mánuð. Þess var gætt að mismunur ársmeðaltala sviðsmynda og mismunandi lengd mánaða



Mynd 3.10: Töflur sem sýna hlutfallsmörk hitabreytinga í hverri sviðsmynd. Tölurnar sýna hitabreytingar frá 1986-2015 til 2091-2100 (°C).

hefði ekki áhrif á samanburðinn.

Myndin sýnir að árstíðasveifla úrkomu hefur tilhneigingu til að breytast á þann veg að úrkoma aukist mest á haustmánuðum en minnst á fyrstu mánuðum ársins. Þessi munur var marktækur í öllum sviðsmyndum og sambærilegur við niðurstöður V2018 og Jóhannesson o.fl. (2007). Fyrstu mánuði ársins er að meðaltali ákaflega lítil aukning í úrkomu, en á haustin er hún að meðaltali nær 10%. Þó að niðurstöður hvers mánaðar dreifist verulega umhverfis meðaltalið sýnir myndin einnig að eftir sem áður er greinilegur munur á dreifingum vetrarmánaða (janúar til mars) og haustmánaða (september til nóvember).

Draga má breytingar í árstíðasveiflu úrkomu og hita saman á þann hátt að hlýnun verði meiri að vetri en sumri, og úrkoma aukist líklega mest á haustin.

3.3 Loftslagsbreytingar og náttúrulegur breytileiki

3.3.1 Valda aukin gróðurhúsaáhrif hitabreytingum á Íslandi?

Í grein 2.1.2 sýna myndir 2.2 og 2.4 þróun hita á síðustu öld. Myndirnar sýna að síðustu áratugi hefur verið tiltölulega heitt á landinu, en fyrir miðbik síðustu aldar var einnig hlýindaskeið þar sem hlýjstu árin voru sambærileg við hlý ár eftir aldamótin 2000. Ef áratugameðaltölin á mynd 2.4 eru skoðuð sést hinsvegar að meðalhiti síðustu áratuga er mun hærri en meðalhiti áratuga á hlýskeiði síðustu aldar. Eins og fram kemur í grein 2.1.2 liggur munurinn í að á hlýindaskeiði síðustu aldar komu einnig köld ár, ólíkt því sem verið hefur síðustu áratugi.

Mynd 3.3 sýnir að í loftslagslíkönum fer að gæta hlýnunar upp úr 1960 og verður hlýnunin áberandi eftir 1980. Sambærileg niðurstaða fyrir hnattræna samantekt var rædd í kafla 1, en sú hlýnun hefur verið rakin til breytinga í geislunarálagi (sjá V2008, mynd 1.6 og Hegerl o.fl. (2007)). Rökin fyrir því að hnattrænu hlýnunina megi rekja til aukinna gróðurhúsaáhrifa byggjast m.a. á samanburði líkanreikninga þar sem sögulega sviðsmyndin er borin saman við sviðsmynd þar sem losun gróðurhúsalofttegunda af mannavöldum átti sér ekki stað en náttúrulegar breytingar á geislunarálagi voru að öðru leyti eins. Slíkur samanburður hefur verið gerður fyrir hnattrænar breytingar og meginlönd (sjá t.d. mynd SPM.4 í Solomon o.fl. (2007)), en fyrir smærri svæði hefur reynst erfiðara að sjá marktækan mun.

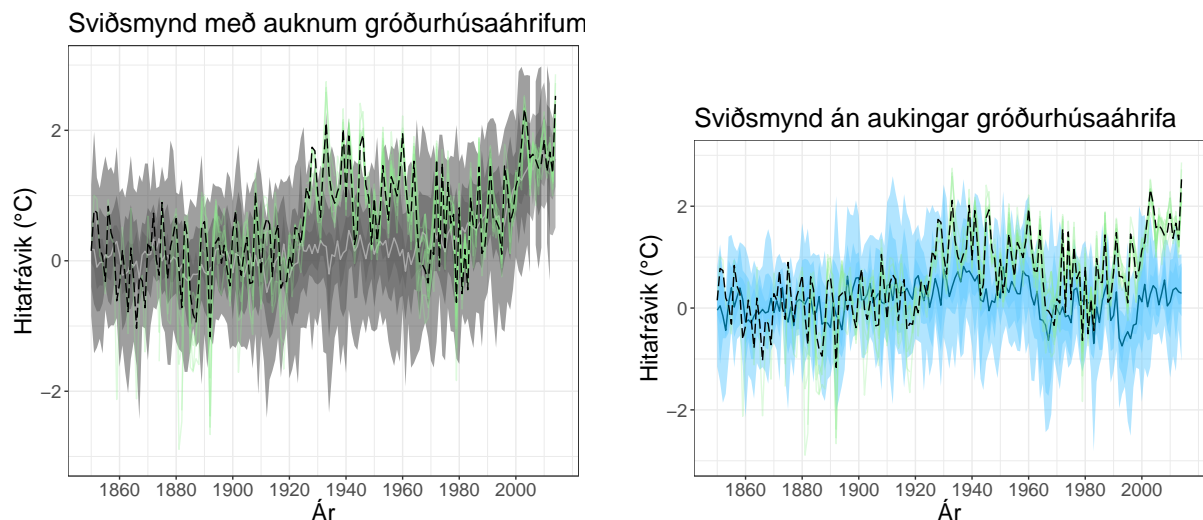
Mynd 3.11 sýnir slíkan samanburð fyrir Íslandsreitinn á tímabilinu 1850–2015. Hitavik eru reiknuð miðað við tímabilið 1850–1900, en þá gætti áhrifa losunar gróðurhúsalofttegunda lítið. Efri myndin byggist á mynd 3.3 og sýna gráskyggðir borðar dreifingu niðurstaðna ólíkra líkana fyrir sögulegu sviðsmyndina en á neðri myndinni sýna ljósbláir borðar niðurstöður sviðsmyndar þar sem aukningar gróðurhúsaáhrifa gætir ekki. Meðaltöl líkana eru sýnd sem fólgrá lína fyrir sögulegu sviðsmyndina og fölblá lína fyrir hina sviðsmyndina. Rétt eins og á mynd 3.3 sýnir svört brotalína niðurstöður BEST-hitagreiningarinnar og ljósgrænar línur mælingar á veðurstöðvum á Íslandi. Fyrir mæligögnin eru hitafrávikin einnig miðuð við tímabilið 1851–1900, en BEST-greiningin er 1.29 °C kaldari fyrir þetta tímabil en 1986–2015 og hefur mæligögnum verið hliðrað samsvarandi.

Eins og kom fram í 3.2.1 nær breytileiki í loftslagslíkönum að mestu leyti að spanna náttúrulegan breytileika í mælingum, þó að hlýskeið um miðbik síðustu aldar fari nærri efri mörkum dreifingar loftslagslíkana. Ef mynd 3.11 er skoðuð er ljóst að sama má segja um sviðsmyndina þar sem gróðurhúsaáhrif aukast ekki. Framan af nær hún að spanna raunverulega hitaþróun, en hlýnunin um miðbik síðustu aldar fer þó nærri jaðrinum. Öðru gildir um þá hlýnun sem átt hefur sér stað frá síðasta hluta 20. aldar. Sú hlýnun er utan við það umslag sem líkön spanna ef ekki er gert ráð fyrir aukningu gróðurhúsalofttegunda, en vel innan þess sem líkön sýna í sögulegu sviðsmyndinni.

Það umslag sem líkön spanna á myndum 3.3–3.6 lýsir mun á milli reikniniðurstaðna ólíkra líkana og breytileika milli ára og áratuga í niðurstöðum hvers líkans. Þessum breytileika líkana er ekki ætlað að herma nákvæmlega náttúrulegan breytileika, þó að niðurstöður sýni að líkönin ná að spanna hann. Þetta skiptir máli við túlkun á þeim niðurstöðum sem mynd 3.11 sýnir.

Nokkur vafi hefur verið á því hvort þær hitabreytingar sem átt hafa sér stað á Íslandi á síðustu áratugum séu dæmi um náttúrulegan breytileika eða afleiðingar aukinna gróðurhúsaáhrifa. Sú staðreynd að ekki er hægt að herma þessar breytingar nema í sviðsmynd þar sem gert er ráð fyrir auknum gróðurhúsaáhrifum bendir til að stór hluti þeirrar hlýnunar sem orðið hefur hér á landi á síðustu áratugum sé af mannavöldum.

Mótrök við þessari staðhæfingu eru þau að þó að hitafar á Íslandi sé nú með því hlýjasta frá því að samfelldar mælingar hófust, komu álíka hlý ár þegar best lét fyrir miðbik síðustu aldar, samanber umfjöllunina hér að ofan. Eftir sem áður er ljóst af meðaltölum áratuga (mynd 2.4) að eftir aldamót hefur verið hlýrra á Íslandi en verið hefur frá því að samfelldar mælingar hófust. Einnig má benda á að niðurstöðurnar á mynd 3.11 eru sambærilegar við niðurstöður frá mörgum öðrum svæðum og reyndar líka við hnattræna samantekt (sjá t.d mynd TS.7 í



Mynd 3.11: Hitabreytingar ($^{\circ}\text{C}$) í Íslandsreitnum á tímabilinu 1850–2015. Efri myndin er einfölduð útgáfa af mynd 3.3 og gráskyggða svæðið sýnir dreifingu líkana fyrir sögulegu sviðsmyndina, ljósgrá lína sýnir meðaltal líkana en svört brotalína og grænar línur sýna BEST greininguna og mælingar á veðurstöðvum. Á neðri myndinni eru sömu mæligögn en bláskyggða svæðið sýnir niðurstöður fyrir keyrslur þar sem geislunarálag þróast í samræmi við náttúrulegar breytingar en án aukningar í styrk gróðurhúsalofttegunda. Ljósblá lína sýnir þar meðaltal líkana. Hitafrávik eru miðuð við tímabilið 1851–1900, þ.e. áður en aukningar gróðurhúsalofttegunda fór að gæta að ráði.

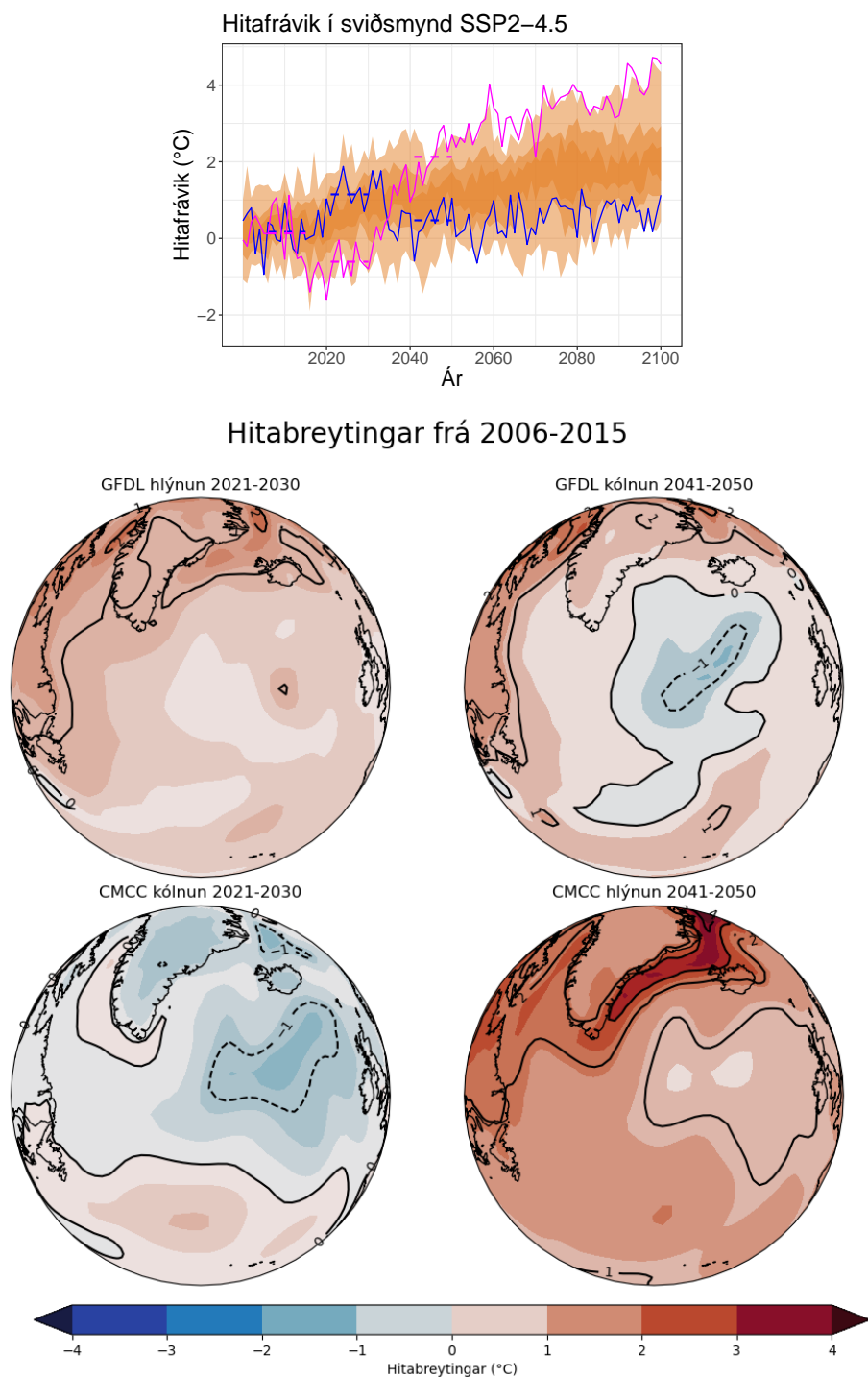
Arias o.fl., 2021). Sú staðreynd passar illa við hugmyndir um að hlýnunin á Íslandi sé dæmi um náttúrulegan breytileika eingöngu. Það liggur því beinast við að gera ráð fyrir áhrifum aukinna gróðurhúsalofttegunda til að útskýra hlýnun á Íslandi og niðurstöðurnar á mynd 3.11.

Tengt umræðunni um hvort hlýnun síðustu áratuga á Íslandi sé dæmi um náttúrulegan breytileika eða vegna aukinna gróðurhúsaáhrifa er spurningin hvort núverandi hlýnun geti gengið til baka. Hvað þetta varðar skiptir máli hver sé breytileiki í niðurstöðum sviðsmyndareikninga og hvernig hlýni á Norður-Atlantshafi.

3.3.2 Náttúrulegur breytileiki og sviðsmyndir um loftslagsbreytingar

Í fyrri skýrslum vísindanefndar hefur verið fjallað um náttúrulegan breytileika og framreikninga um hitafar (sjá t.d. grein 3A í V2008). Einnig hefur verið fjallað nokkuð um breytingar í hafi (sjá t.d. grein 4C í V2018) en náttúrulegan breytileika sem nær yfir nokkur ár eða áratugi má oft rekja til breytinga á aðstæðum í hafi. Í niðurstöðum loftslagslíkana má oft sjá töluverðar sviptingar milli áratuga í einstökum líkönum. Línuritið á mynd 3.12 sýnir hitaþróun allra líkana fyrir SSP2-4.5 sviðsmyndina í Íslandsreitnum (einföldun á mynd 3.5), en einnig eru sýnd dæmi um hitaþróun tveggja líkana, GFDL-ESM4 og CMCC-ESM2 (blá og rauð lína). Láréttar brotalínur á línuritinu sýna þrjú tíu ára tímabil á fyrri hluta aldarinnar (2006–2015, 2021–2030 og 2041–2050) og kortin á neðri myndinni sýna hitabreytingar á Norður-Atlantshafssvæðinu milli þessara tímabila. Ef hitaþróun líkananna tveggja er skoðuð sést að á þriðja áratug þessarar aldar hlýnar í niðurstöðum GFDL-líkansins en það kólnar í CMCC-líkaninu. Þegar nær dregur miðbiki aldarinnar snýst þetta við. Niðurstöður GFDL-líkansins sýna snögga kólnun en skörp hlýnun verður í CMCC-líkaninu. Kort af hitabreytingunum sýna að á hlýskeiðum er í báðum líkönum sérstaklega hlýtt norðan við landið en á kuldaskiðum er áberandi kalt á stóru svæði sunnan við landið.

Það er mikilvægt að hafa í huga að þrátt fyrir þessar sveiflur sýna bæði líkön hlýnun á öldinni, einnig þegar litið er til þess hluta Norður-Atlantshafsins sem kortin á mynd 3.12 sýna.

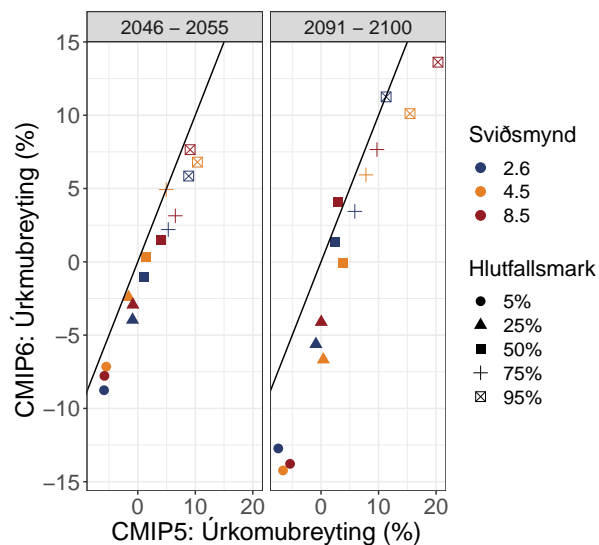


Mynd 3.12: Efri mynd: Dæmi um hlýnda- og kuldaskið í tveimur líkönum á 21. öldinni í sviðsmynd SSP2-4.5 teiknuð ofan á dreifingu allra líkana (sjá SSP2-4.5 í 3.5). Hitaþróun GFDL-líkansins í Íslandsreitnum er merkt blálituð, en þróun í CMCC-líkaninu er merkt með rauðleitum ferli. Á myndinni eru þrjú 10 ára tímabil afmörkuð með brotalínum. Nedri mynd: Kort af hitabreytingum á Norður-Atlantshafssvæðinu, byggt á niðurstöðum líkananna tveggja fyrir 10 ára tímabilin sem merkt eru á efri myndina.

Í niðurstöðum flestra líkana má finna álíka dæmi um kólnun einhvers staðar á Norður-Atlantshafi á 21. öldinni.

Sem dæmi má nefna að ef hitabreytingar milli 2015–2024 og 2091–2100 í SSP-sviðsmyndakeyrlum allra líkana í töflu 3.1 eru skoðaðar, finnst staðbundin kólnun einhversstaðar á Norður-Atlantshafi í 88% líkaniðurstaðna í sviðsmynd SSP1-2.6, 76% SSP2-4.5, 48% í SSP3-7.0 og 35% í SSP5-8.5.

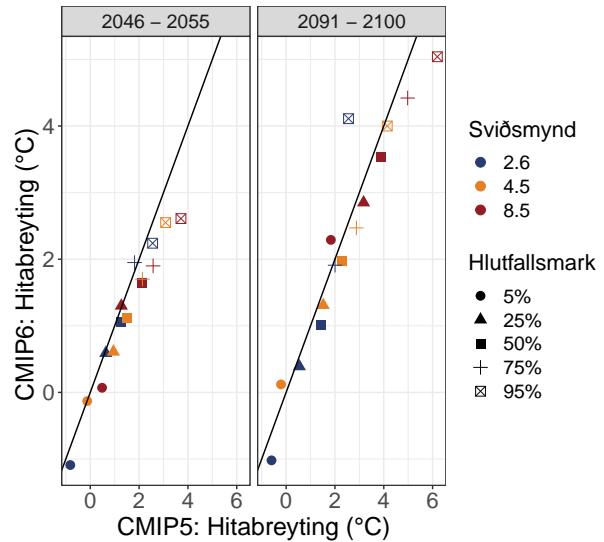
Þrátt fyrir þetta hlýnar í öllum líkön-um og öllum sviðsmyndum á Norður-Atlantshafssvæðinu í heild sinni. Ástæðan er sú að í flestum tilvikum er kólnunin staðbundin og þótt kólni á einu svæði hlýna nærliggjandi svæði. Ef talningin er einskorðuð við þau tilvik þar sem víðtæk staðbundin kólnun nær Íslandsströndum þá gerist slíkt í 48% líkaniðurstaðna í sviðsmynd SSP1-2.6, 40% SSP2-4.5, 21% í SSP3-7.0 og 15% í SSP5-8.5. Eftir sem áður hefur þetta ekki stórvægileg áhrif til kólnunar í Íslandsreitnum, tafla 3.4 sýnir að einungis í köldustu sviðsmyndinni (SSP1-2.6) fæst kólnun í Íslandsreitnum, og þá í mjög fáum líkön-um.



Mynd 3.14: Samanburður á úrkomu CMIP5 og CMIP6 fyrir sviðsmyndir með sama geislunarálag í lok aldarinnar (2.6, 4.5 og 8.5 W/m²). Ólík tákni eru notuð fyrir hvert hlutfallsmark. Skálínan sýnir hvar reikniverkefni gefa sömu niðurstöðu.

en gögn sýna að á norðurslóðum hlýnar mun hraðar en að hnattrænu meðaltali. Þessa gættir í meðaltölum sviðsmynda, en mynd 3.15 sýnir meðaltal hitabreytinga frá 1986–2015 og síðasta áratug 21. aldar.

Meðaltalið er reiknað fyrir öll líkön hvernar sviðsmyndar sem stóðust TCR-prófið, en ef öll



Mynd 3.13: Samanburður á hitabreytingum CMIP5 og CMIP6 fyrir sviðsmyndir með sama geislunarálag í lok aldarinnar (2.6, 4.5 og 8.5 W/m²). Ólík tákni eru notuð fyrir hvert hlutfallsmark. Skálínan sýnir hvar reikniverkefni gefa sömu niðurstöðu.

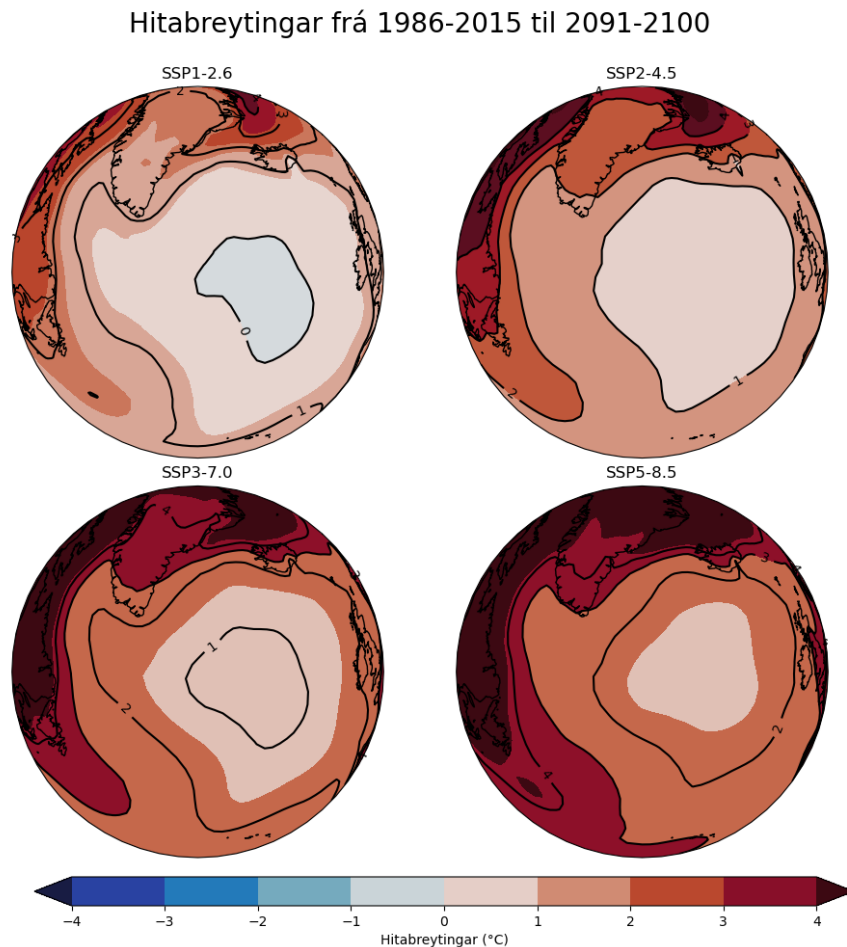
Í þeim niðurstöðum sem sýndar eru á mynd 3.5 er í öllum líkön-um breytileiki milli ára og áratuga. Í sumum tilvikum, sérstaklega framan af 21. öldinni, sýna niðurstöður kólnun frá viðmiðunartímabilinu 1986–2015. Einföld talning leiddi í ljós að fyrir tímabilið 2016 til 2100 sýndu 22% allra líkana einhver ár með kólnun í sviðsmynd SSP1-2.6, 14% í SSP2-4.5, 11% í SSP3-7.0 og 9% í sviðsmynd SSP5-8.5. Í langflestum líkön-um stóð slík kólnun ekki í mörg ár, í 70–75% tilvikum varði hún minna en 5 ár en 10–15% kuldaskiða entust í um áratug (5–15 ár) og álíka hlutfall kuldakasta entist lengur en 20 ár. Ekki var teljandi munur milli sviðsmynda á því hversu lengi kuldaköstin stóðu, þó að þau væru þeim mun færri eftir því sem sviðsmyndin var heitari.

Kortlagning á þessum hitasveiflum leiddi í ljós að rétt eins og á mynd 3.12 er áberandi að svæðisbundin kuldaköst verða gjarnan í hafi sunnan við Ísland, en skörp hlýnun sést frekar norðan við landið. Hlýnunin norðan við landið er að hluta svokölluð heimskautamögnun hlýnunar, en gögn sýna að á norðurslóðum hlýnar mun hraðar en að hnattrænu meðaltali. Þessa gættir í meðaltölum sviðsmynda, en mynd 3.15 sýnir meðaltal hitabreytinga frá 1986–2015 og síðasta áratug 21. aldar.

líkön væru notuð fást svipaðar myndir, sem þó víðast um gráðu hlýrri.

Meiri hlýnun norðan við landið en sunnan er í takt við það sem gerst hefur á síðustu áratugum svo að mynd 3.15 sýnir að vissu leyti framhald á þróun sem þegar hefur átt sér stað. Mikilvægt er að hafa í huga að svæðisbundnar breytingar sem þessar stafa íðulega af samspili ólíkra þátta, t.d. vindafari, varmaflutningi í hafi og hafisþekju en verða sjaldnast raktar beint til staðbundinnar aukningar geislunarálags.

Í stuttu máli má því segja að líklega verði hlýnunin fyrir norðan land meiri en fyrir sunnan það, en gera verði ráð fyrir nokkrum breytileika, jafnvel með kólnun sunnan við landið. Ekki er líklegt að slík kuldaskið vari lengi og að meðaltali sýna líkön hlýnun á Norður-Atlantshafssvæðinu, og þar með Íslandi.



Mynd 3.15: Hitabreytingar (°C) í öllum líkönum hveurrar sviðsmyndar frá 1986–2015 til 2091–2100

3.4 Samanburður á niðurstöðum þriggja síðustu skýrslna

Vísindanefnd hefur nú þrisvar tekið saman yfirlit um líklega hlýnun á 21. öldinni, árið 2008 fyrir reikniverkefnið CMIP3, árið 2018 fyrir CMIP5 og nú fyrir CMIP6. Þrátt fyrir að sviðsmyndir og viðmiðunartímabil séu ólík er tilefni til að bera þær saman.

Hvað CMIP5 og CMIP6 varðar sýna myndir 3.13 og 3.14 samanburð á töflum 4.1 og 4.4 í V2018 og töflum 3.3 til 3.6 í þessari skýrslu. Niðurstöður fyrir sviðsmyndir RCP-2.6, RCP-4.5 og RCP-8.5 í CMIP5 eru bornar saman við CMIP6-sviðsmyndir með sama geislunarálag, þ.e. SSP1-2.6, SSP2-4.5 og SSP5-8.5. Hlutfallsmörk dreifinganna eru borin saman og tillit tekið til mismunar í lengd tímabila sem hitabreytingar eru reiknaðar yfir (100 ár í CMIP5 og 95

Tafla 3.10: Hraði hlýnnunar ($^{\circ}\text{C}$ á áratug) á Íslandsreitnum reiknaður til loka aldarinnar í ólíkum sviðsmyndum og reikniverkefnum. Tölur innan hornklofa sýna 5% og 95% hlutfallsmörkin. Heiti sviðsmynda vísa til þeirra losunarsviðsmynda sem notaðar voru í CMIP3, CMIP5 og CMIP6. Byggt á töflum 3.1 í V2008, 4.2 í V2018, auk 3.4 hér að framan.

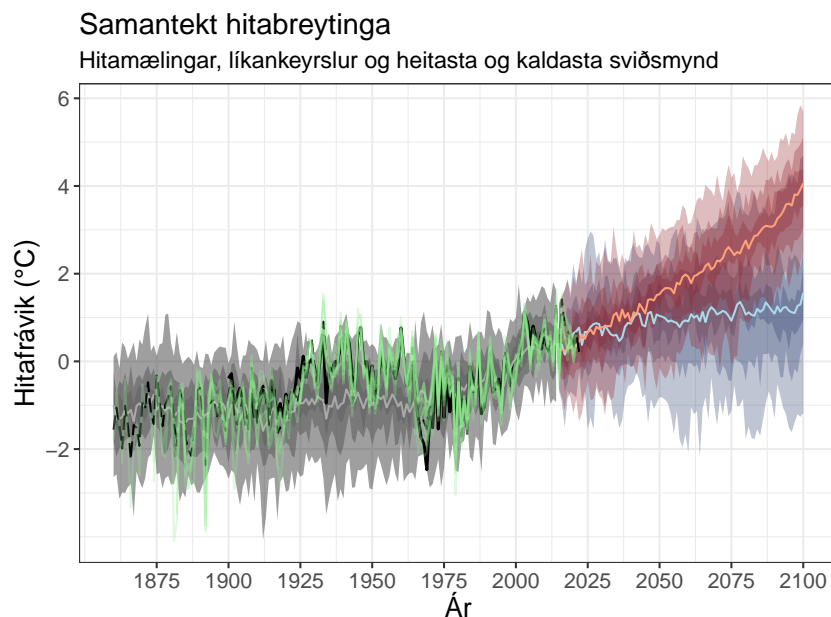
Skýrsla (CMIP)	Kaldasta sviðsmynd	Miðlungs sviðsmynd	Heitasta sviðsmynd
Vísindanefnd 2008 (CMIP3)	B2	A1B	A2
Hraði hlýnnunar ($^{\circ}\text{C}/\text{áratug}$)	0.16 [0, 0.33]	0.23 [0.08, 0.33]	0.27 [0.11, 0.41]
Vísindanefnd 2018 (CMIP5)	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Hraði hlýnnunar ($^{\circ}\text{C}/\text{áratug}$)	0.15 [-0.06, 0.27]	0.24 [-0.02, 0.44]	0.41 [0.19, 0.65]
Vísindanefnd 2023 (CMIP6)	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Hraði hlýnnunar ($^{\circ}\text{C}/\text{áratug}$)	0.11 [-0.11, 0.43]	0.21 [0.01, 0.42]	0.37 [0.24, 0.53]

ár í CMIP6). Hvert gildi í töflunum er teiknað sem einn punktur, litað eftir geislunarálagi sviðsmyndar (2.6, 4.5 eða $8.5 \text{ W}/\text{m}^2$) og lögun punkts fer eftir hlutfallsmarki. Skálína sýnir hvar CMIP5 og CMIP6 gefa sömu niðurstöðu, Munur milli niðurstaðna er meiri eftir því sem punktar liggja fjær skálínunni. Fyrir hitabreytingar er ekki mikill munur á CMIP5 og CMIP6 því punktar á myndinni liggja nærri skálínunni. Niðurstöður CMIP5 sýna þó aðeins meiri hlýnun fyrir fyrri hluta aldarinnar, sérstaklega þegar kemur að hærri hlutfallsmörkum, Þegar litið er til loka aldarinnar er þessi munur að mestu horfinn. Fyrir úrkomuna er greinilegt að í CMIP5 sýna niðurstöður meiri úrkomubreytingar en í CMIP6, bæði fyrir miðja öldina og lok hennar. Þetta er í samræmi við grein 3.2.2 þar sem niðurstöður CMIP6 sýna lægri hita en CMIP5 og eilítið minni úrkomu.

Erfiðara er að bera CMIP3 saman við síðari reikniverkefni. Í fyrsta lagi voru sviðsmyndir ólíkar, t.d. var meiri losun í þeirri köldustu (B1) en köldustu sviðsmynd CMIP5 og CMIP6 (RCP2.6 og SSP1-2.6, sjá t.d. mynd 1.15 í Cubasch o.fl. (2013)). Á móti kemur að svörun CMIP3 líkana var ekki jafn mikil og í CMIP5 (sjá grein 4.4.4 í V2018) og CMIP6 en það þýðir að í CMIP3 þurfti meira geislunarálag til að fá sambærilega hlýnun og í síðari reikniverkefnum. Í töflu 3.10 er því brugðið á það ráð að bera saman niðurstöður fyrir köldustu, miðlungs og heitustu sviðsmyndir í hverri skýrslu og meðaltal hlýnnunar á áratug fram til loka aldarinnar er reiknað. Tölur innan hornklofa sýna 5 og 95% hlutfallsmörk dreifingar á líkanniðurstöðum.

Af töflunni má sjá að köldustu sviðsmyndirnar sýna hlýnun um $0.1\text{--}0.16 \text{ }^{\circ}\text{C}$ á áratug til loka aldarinnar, miðlungssviðsmyndir um $0.21\text{--}0.24 \text{ }^{\circ}\text{C}$ á áratug og þær heitustu um 0.27 til $0.41 \text{ }^{\circ}\text{C}$ á áratug. Þessar niðurstöður breytast lítið milli CMIP3, CMIP5 og CMIP6, en það er tilhneiging til þess að óvissan aukist, þ.e. að 5%–95% spönn niðurstaðna sé meiri í CMIP5 og CMIP6. Samskonar skoðun fyrir miðbik aldarinnar leiddi í ljós minni mun milli sviðsmynda. Að meðaltali hlýnaði um $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ og 5%–95% spönn var að meðaltali á bilinu -0.6 til $2.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Hlýnun um $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ á fimm áratugum samsvarar um $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ hlýnun á áratug að jafnaði. Á síðari hluta aldarinnar skilur á milli sviðsmynda, í þeim kaldari verður frekari hlýnun takmörkuð en í miðlungs sviðsmyndum verður hlýnunin áfram rúmlega $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ á áratug til loka aldarinnar eða um $2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [0.4 til $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$] í heildina. Fyrir heitustu sviðsmyndir er hlýnunin svo um $0.35 \text{ }^{\circ}\text{C}$ á áratug til loka aldarinnar eða $3.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [2.3 til $5.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$] í heildina.

3.5 Sviðsmyndir og óvissa



Mynd 3.16: Samantekt hitabreytinga í Íslandsreitnum. Sögulegar keyrslur, sviðsmynd SSP1-2.6 (kaldasta) og SSP5-8.5 (heitasta). Raunverulegar hitabreytingar (BEST og ERA20C) merktar með svörtu og veðurstöðvar á Íslandi með grænu. Hitafrávik eru reiknuð miðað við tímabilið 1986–2015.

Óvissutegundin sem stafar af breytileika líkana var rædd í grein 3.3 en þá seinni má kalla sviðsmyndaróvissu og snýr að því hversu mikið verður losað, en ekki því hvernig loftslagskerfið bregst við losun. Ef bilið milli meðaltala sviðsmyndanna er notað til að leggja mat á þessa óvissu er hún frá 1.5 °C yfir í 4 °C, þ.e. 2.5 °C spönn.

Ef horft er til næstu áratuga er munur milli sviðsmynda ekki mikill í samanburði við breytileika líkana, en á síðari hluta aldarinnar dregur sundur með sviðsmyndum. Þetta má einnig sjá í töflum 3.3 og 3.4 sem sýna að líkleg hitaþróun er mjög háð því hvaða losunarsviðsmynd raungerist.

Uppruna þeirra losunarsviðsmynda sem CMIP5 og CMIP6 byggjast á má rekja til ársins 2010 (Meinshausen o.fl., 2011). Síðan þá hefur alþjóðasamfélagið náð samkomulagi um aðgerðir til að draga úr loftslagsbreytingum og þjóðir lýst yfir vilja til að draga úr losun. Verði staðið við þær yfirlýsingar er ólíklegt að þróun geislunarálags á síðari hluta aldarinnar fylgi SSP5-8.5 (Hausfather og Peters, 2020). Eftir sem áður hefur losun á síðustu árum verið slík að erfitt verður að ná þeim takmörkum sem lægstu losunarsviðsmyndir setja (Programme, 2022). Það er umdeilt hvaða sviðsmynd er líklegust að raungerast (Schwalm o.fl., 2020) og er háð því til hversu langs tíma er litið (Huard o.fl., 2022). Engu að síður er mögulegt að sviðsmyndaróvissan á mynd 3.16 sé ofmetin, því báðar sviðsmyndirnar séu ólíklegri en þær sem fara bil beggja.

Mynd 3.17 er sambærileg við mynd 3.16 en sýnir sviðsmyndir SSP2-4.5 og SSP3-7.0, sem segja má að séu miðlungs-sviðsmyndir. Ef miðað er við meðaltöl sviðsmynda við lok aldarinnar fæst hlýnun á bilinu 2.0-3.5 °C og spönn sviðsmyndaróvissu því 1.5 °C. Ekki eru efni til að leggja nánara mat á það hvaða sviðsmynd sé líklegust til að rætast, en hlýnun á ofangreindu bili fyrir Íslandsreitinn er algeng niðurstaða miðlungs sviðsmynda (grein 3.4) og fellur einnig að niðurstöðum Gosseling (2017) fyrir háupplausnarlíkön.

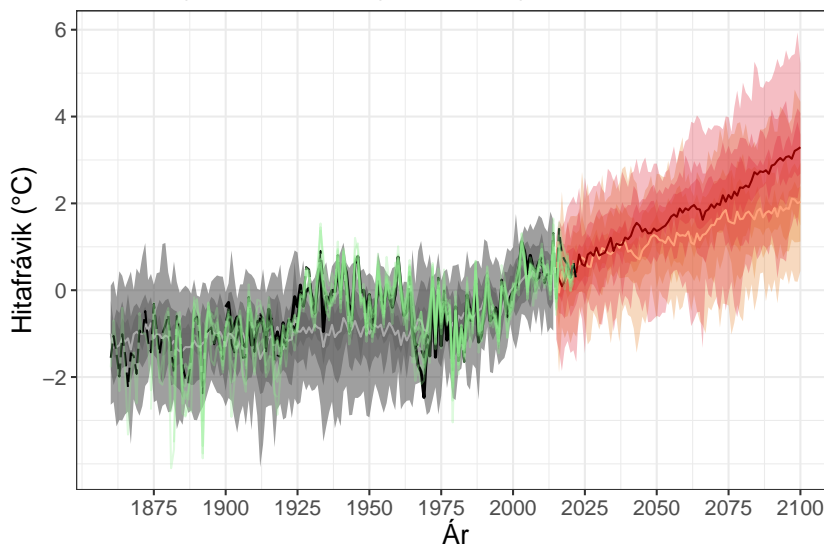
Mynd 3.16 sýnir samantekt á niðurstöðum CMIP6-líkana fyrir Íslandsreitinn. Myndin, sem er hliðstæð við mynd 4.23 í V2018, sýnir hitabreytingar líkana í sögulegu keyrslunni og í sviðsmyndum SSP1-2.6 og SSP5-8.5. Eins og á mynd 3.3 sýnir svört lína niðurstöður ERA20C-greiningarinnar, brotalína sýnir niðurstöður BEST-hitagreiningarinnar og ljósgrænar línur sýna mælingar á veðurstöðvum á Íslandi (sömu stöðvar og á mynd 2.2). Myndir af þessu tagi eru algengar í umfjöllun um loftslagsmál, bæði í hnattrænu og svæðisbundnu samhengi. Þær sýna ágætlega spönn þeirrar óvissu sem stafar af ólíkri hegðan líkana innan sömu sviðsmynda, og mismun sviðsmynda. Fyrri

Í grein 2.1.1 var sýnd mynd (2.1) með hitabreytingum á nútíma á og við Ísland. Myndin sýndi m.a. niðurstöður Sicre o.fl. (2021) um þróun yfirborðshita sjávar að sumarlagi metið með s.k. alkenone-vísi, byggt á sjávarkjarna MD99-2275 sem tekin var á Skjálfandadjúpi (á 66.55°N og 17.7°V). Til að bera þessar niðurstöður saman við mældan yfirborðshita sjávar að sumri voru notuð gögn fyrir þessa staðsetningu frá Hadley Center (Rayner o.fl., 2003) og niðurstöður CMIP6 loftslagslíkana (frá CDS, sjá grein 3.1) fyrir tvær sviðsmyndir (SSP1-2.6 og SSP5-8.5) auk sögulegrar keyrslu.

Mynd 3.18 sýnir sam-
anburð þessara ólíku gagna.
Öll gögn sem myndin sýn-
ir eru reiknuð sem frávik
miðað við tímabilið 1871
til 1970. Niðurstöður fyrir
setkjarnan eru sýndar sem
kassarit og sýnir kassi fyr-
ir hverja öld dreifingu nið-
urstaðna Sicre o.fl. (2021)
fyrir yfirborðshita sjávar
að sumri. Brotalína gegn-
um kassana sýnir hlaup-
andi vegið meðaltal sjáv-
arhitans reiknað með 100
ára gássískri síu sem hef-
ur 48 ára hálfvídd. Slík
sía dregur fram langtíma-
sveiflur sem taka nokkra
áratugi eða lengur. Sjáv-
arhitagögn Hadley Center
(Rayner o.fl., 2003) byggja
á öllum aðgengilegum mæl-
ingum frá síðari hluta 19.
aldar og eru gögnin netsett
á 1 x 1 gráðu reiknineti. Yf-
irborðshiti sjávar í júlí í þessum gögnum fyrir tímabilið 1870 til 2022 var línulega brúaður niður á staðsetningu sjávarsetkjarnans og græna línan á mynd 3.18 sýnir niðurstöðurnar eftir að búið er að sía þær til að draga fram lengri sveiflur í gögnunum. Gráskyggða svæðið á myndinni sýnir niðurstöður CMIP6 líkana fyrir sjávarhita í júlí mánuði reiknaðan fyrir reit sem markast af 66–67°N og 17–18°V. Rauðlituðu niðurstöðurnar eru fyrir SSP5-8.5 og þær blálituðu fyrir SSP1-2.6. Fyrir sviðsmyndirnar er síað meðaltal líkana einnig sýnt sem heildregin lína.

Samantekt hitabreytinga

Hitamælingar, líkankeyrslur og tvær miðlungs sviðsmyndir



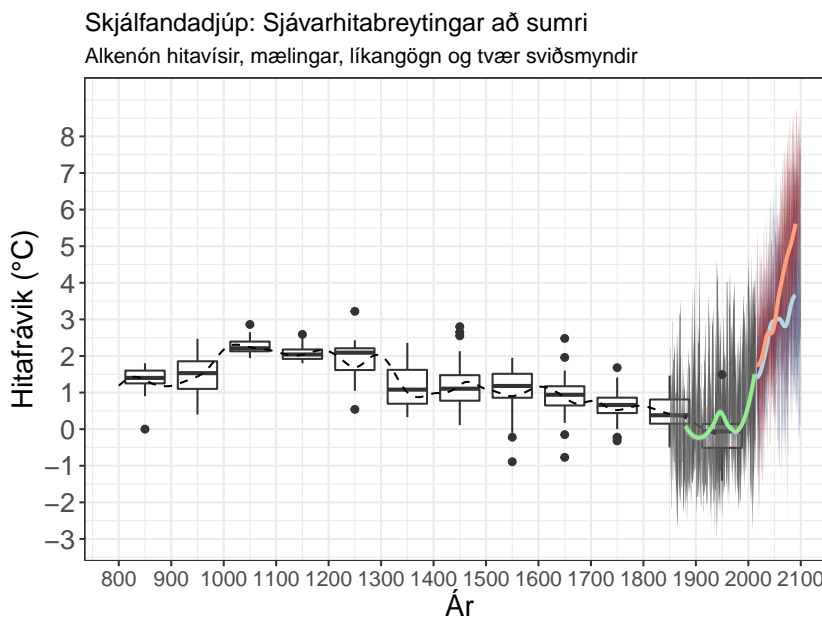
Mynd 3.17: Samantekt hitabreytinga í Íslandsreitnum. Sögulegar keyrslur, og hitagögn. Eins og mynd 3.16 en með miðlungs-sviðsmyndirnar tvær (SSP2-4.5 og SSP3-7.0) þar sem hlýnun er minni en í þeirri heitustu, en meiri en í þeirri köldustu.

3.6 Langtímasamhengi líklegra hitabreytinga

Ólíkir óvissubættir fylgja þessum gögnum og þeir draga úr því hversu trúverðugan samanburð hægt er að gera á milli þeirra. Eins og fram kom í grein 2.1.1 er staðsetning sjávarsetkjarnans slík að hiti í honum sveiflast í takt við breytingar á innflæði hlýsjávar sem berst sunnan að norður fyrir landið og kaldsjávar sem berst úr íshafinu, og staðsetningin þýðir líka að hann er ekki mjög háður breytingum sunnan við Ísland sem ræddar eru í grein 3.3.2. Norðan við landið eru hitaskil í sjónum milli kaldsjávar og hlýsjávar. Staðsetning kjarnans er slík að sveiflur í sjávarhita vegna breytinga á staðsetningu skilanna ættu að koma vel fram (Sicre o.fl., 2021) en eins og mynd 2.1 sýnir eru þessar sveiflur ekki í smáatriðum lýsandi fyrir breytingar á Íslandi eða stærra svæði.

Tilgangurinn með þessari mynd er því ekki að gera nákvæman samburð á þróun sjávarhita

Mynd 3.18: Samsett mynd af niðurstöðum byggðum á sjávarsetkjarna, mælingum á sjávarhita og loftslagslíkönum. Kassarit og svört lína sýna mat á breytingum á yfirborðshita sjávar að sumarlagi bygggt gögnum úr sjávarsetkjarna, græn lína sýnir sjávarhitagögn frá Hadley Center. Niðurstöður loftslagslíkana eru sýndar sem línur og skyggð svæði, grálitað fyrir sögulegu sviðsmyndina, blátt og rautt fyrir losunarsviðsmyndnar. Sjá nánari umfjöllun í texta.



norðan við landið frá landnámi og líklegri þróun á komandi öld, heldur bera saman umfang sjávarhitabreytinga á öldum áður og líklegra breytinga á komandi öld. Eins og kemur fram í grein 3.5 hefur losun gróðurhúsalofttegunda á síðustu árum verið slík að erfitt verður að ná að fylgja þeirri losun sem kaldari sviðsmyndin á myndinni byggir á. Hlýnun sjávarhita gæti því vel orðið meiri en kaldari sviðsmyndin sýnir, en jafnvel þó þessi sviðsmynd gengi eftir yrði sjávarhitinn að sumri norður af landinu meiri en verið hefur frá landnámi.

Niðurstöður þessa samanburðar sýna því að líklega verður veðurfar á Íslandi gjörólíkt því sem verið hefur frá landnámi og hugsanlega án fordæma síðan ísöld lauk. Fyrir miðlungs heitar sviðsmyndir er hlýnunin einnig án fordæma frá landnámi, en þó mögulegt að sumur hafi verið heitari snemma á nútíma. Eins og rakið er í grein 2.1.1 og í V2018 er vitað að á norðlægum breiddargráðum voru sumur hlý snemma á nútíma, en sú hlýnun sem reiknast í sviðsmyndum er meiri að vetri til en að sumri.

Heimildir

- Abram, Nerilie, Jean-Pierre Gattuso, Anjal Prakash, Lijing Cheng, Maria Paz Chidichimo, Susan Crate, Hiroyuki Enomoto, Matthias Garschagen, Nicolas Gruber, Sherilee Harper o.fl. (2019). „Framing and context of the report“. Í: Intergovernmental Panel on Climate Change Geneva, Switzerland, bls. 73–129.
- Arias, P A, N Bellouin, E Coppola, R G Jones, G Krinner, J Marotzke, V Naik, M D Palmer, G.-K. Plattner, J Rogelj, M Rojas, J Sillmann, T Storelvmo, P W Thorne, B Trewin, K Achuta Rao, B Adhikary, R P Allan, K Armour, G Bala, R Barimalala, S Berger, J G Canadell, C Cassou, A Cherchi, W Collins, W D Collins, S L Connors, S Corti, F Cruz, F J Dentener, C Dereczynski, A Di Luca, A Diongue Niang, F J Doblas-Reyes, A Dosio, H Douville, F Engelbrecht, V Eyring, E Fischer, P Forster, B Fox-Kemper, J S Fuglestedt, J C Fyfe, N P Gillett, L Goldfarb, I Gorodetskaya, J M Gutierrez, R Hamdi, E Hawkins, H T Hewitt, P Hope, A S Islam, C Jones, D S Kaufman, R E Kopp, Y Kosaka, J Kossin, S Krakovska, J.-Y. Lee, J Li, T Mauritsen, T K Maycock, M Meinshausen, S.-K. Min, P M S Monteiro, T Ngo-Duc, F Otto, I Pinto, A Pirani, K Raghavan, R Ranasinghe, A C Ruane, L Ruiz, J.-B. Sallée, B H Samset, S Sathyendranath, S I Seneviratne, A A Sörensson, S Szopa, I Takayabu, A.-M. Tréguier, B van den Hurk, R Vautard, K von Schuckmann, S Zaehle, X Zhang og K Zickfeld (2021). „Technical Summary“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, 33-144. DOI: 10.1017/9781009157896.002.
- Balaji, Venkatramani, Karl E Taylor, Martin Jukes, Bryan N Lawrence, Paul J Durack, Michael Lautenschlager, Chris Blanton, Luca Cinquini, Sébastien Denvil, Mark Elkington, Francesca Guglielmo, Eric Guilyardi, David Hassell, Slava Kharin, Stefan Kindermann, Sergey Nikonov, Aparna Radhakrishnan, Martina Stockhause, Tobias Weigel og Dean Williams (sep. 2018). „Requirements for a global data infrastructure in support of CMIP6“. Í: *Geoscientific Model Development* 11 (9), bls. 3659–3680. DOI: 10.5194/gmd-11-3659-2018.
- Christensen, Jens Hesselbjerg, Bruce Hewitson, Aristita Busuioc, Anthony Chen, Xuejie Gao, Isaac Held, Richard Jones, Rupa Kumar Kolli, Won-Tae Kwon, René Laprise o.fl. (2007). „Regional climate projections“. Í.
- Cinquini, Luca, Daniel Crichton, Chris Mattmann, John Harney, Galen Shipman, Feiyi Wang, Rachana Ananthakrishnan, Neill Miller, Sebastian Denvil, Mark Morgan, Zed Pobre, Gavin M. Bell, Charles Doutriaux, Robert Drach, Dean Williams, Philip Kershaw, Stephen Pascoe, Estanislao Gonzalez, Sandro Fiore og Roland Schweitzer (júl. 2014). „The Earth System Grid Federation: An open infrastructure for access to distributed geospatial data“. Í: *Future Generation Computer Systems* 36, bls. 400–417. DOI: 10.1016/j.future.2013.07.002.
- Copernicus Climate Change Service (2022). *Copernicus Climate Datastore*. Copernicus. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu> (skoðað 2022).
- Cubasch, U, D Wuebbles, D Chen, M C Facchini, D Frame, N Mahowald og J.-G. Winther (2013). „Introduction“. Í: gefið út af T F Stocker, D Qin, G.-K. Plattner, M Tignor, S K Allen, J Boschung, A Nauels, Y Xia, V Bex og P M Midgley. Cambridge University Press, bls. 119–158. ISBN: ISBN 978-1-107-66182-0. DOI: 10.1017/CB09781107415324.007.
- Eyring, Veronika, Sandrine Bony, Gerald A Meehl, Catherine A Senior, Bjorn Stevens, Ronald J Stouffer og Karl E Taylor (2016). „Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization“. Í: *Geoscientific Model Development* 9 (5), bls. 1937–1958.
- Forster, P, T Storelvmo, K Armour, W Collins, J.-L. Dufresne, D Frame, D J Lunt, T Mauritsen, M D Palmer, M Watanabe, M Wild og H Zhang (2021). „The Earth’s Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang,

- K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 923–1054. DOI: 10.1017/9781009157896.009.
- Gosseling, M (2017). *CORDEX climate trends for Iceland in the 21st century*. Icelandic Meteorological Office, bls. 46.
- Hausfather, Zeke, Kate Marvel, Gavin A Schmidt, John W Nielsen-Gammon og Mark Zelinka (2022). „Climate simulations: Recognize the ‘hot model’ problem“. Í: *Nature* 605, bls. 26–29.
- Hausfather, Zeke og Glen P. Peters (nóv. 2020). „RCP8.5 is a problematic scenario for near-term emissions“. Í: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (45), bls. 27791–27792. DOI: 10.1073/pnas.2017124117.
- Hegerl, Gabriele C, Francis W Zwiers, Pascale Braconnot, Nathan P Gillett, Yong Luo, Jose A Marengo Orsini, Neville Nicholls, Joyce E Penner, Peter A Stott, M Allen o.fl. (2007). *Understanding and attributing climate change*.
- Huard, David, Jeremy Fyke, Iñigo Capellán-Pérez, H. Damon Matthews og Antti-Ilari Partanen (okt. 2022). „Estimating the Likelihood of GHG Concentration Scenarios From Probabilistic Integrated Assessment Model Simulations“. Í: *Earth’s Future* 10 (10). DOI: 10.1029/2022EF002715.
- Jóhannesson, T, G Aðalgeirsdóttir, H Björnsson, P Crochet, E B Eliásson, S Gumundsson, J F Jónsdóttir, H Ólafsson, F Pálsson, Ó Rögnvaldsson, O Sigurðsson, Ó G Blöndal-Sveinsson og Th Thorsteinsson (2007). *Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland*. Reykjavík. Tæknileg skýrsla.
- Lee, J.-Y., J Marotzke, G Bala, L Cao, S Corti, J P Dunne, F Engelbrecht, E Fischer, J C Fyfe, C Jones, A Maycock, J Mutemi, O Ndiaye, S Panickal og T Zhou (2021). „Future Global Climate: Scenario-Based Projections and Near-Term Information“. Í: gefið út af V Masson-Delmotte, P Zhai, A Pirani, S L Connors, C Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, M I Gomis, M Huang, K Leitzell, E Lonnoy, J B R Matthews, T K Maycock, T Waterfield, O Yelekçi, R Yu og B Zhou. Cambridge University Press, bls. 553–672. DOI: 10.1017/9781009157896.006.
- Massad, Andréa-Giorgio, Guðrún Petersen, Tinna Þórarinsdóttir og Matthew James Roberts (okt. 2020). *Reassessment of precipitation return levels in Iceland*. Icelandic Meteorological Office, bls. 1–140.
- Massad, Andréa-Giorgio, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson, Matthew James Roberts og Tinna Þórarinsdóttir (sep. 2022). *Extreme precipitation in Iceland: Climate projections and historical changes in precipitation type*. Icelandic Meteorological Office, bls. 1–100.
- Meinshausen, Malte, Zebedee R. J. Nicholls, Jared Lewis, Matthew J. Gidden, Elisabeth Vogel, Mandy Freund, Urs Beyerle, Claudia Gessner, Alexander Nauels, Nico Bauer, Josep G. Canadell, John S. Daniel, Andrew John, Paul B. Krummel, Gunnar Luderer, Nicolai Meinshausen, Stephen A. Montzka, Peter J. Rayner, Stefan Reimann, Steven J. Smith, Marten van den Berg, Guus J. M. Velders, Martin K. Vollmer og Ray H. J. Wang (ágú. 2020). „The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500“. Í: *Geoscientific Model Development* 13 (8), bls. 3571–3605. DOI: 10.5194/gmd-13-3571-2020.
- Meinshausen, Malte, S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J-F. Lamarque, K. Matsumoto, S. A. Montzka, S. C. B. Raper, K. Riahi, A. Thomson, G. J. M. Velders og D.P. P. van Vuuren (nóv. 2011). „The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300“. Í: *Climatic Change* 109 (1-2), bls. 213–241. DOI: 10.1007/s10584-011-0156-z.
- O’Neill, Brian C., Elmar Kriegler, Keywan Riahi, Kristie L. Ebi, Stephane Hallegatte, Timothy R. Carter, Ritu Mathur og Detlef P. van Vuuren (feb. 2014). „A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways“. Í: *Climatic Change* 122 (3), bls. 387–400. DOI: 10.1007/s10584-013-0905-2.
- Programme, United Nations Environment (2022). *Emissions Gap Report 2022 The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies*. Bls. 132.

- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, D. P. Rowell, E. C. Kent og A. Kaplan (2003). „Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century“. Í: *Journal of Geophysical Research* 108.D14, bls. 4407. DOI: 10.1029/2002JD002670.
- Riahi, Keywan, Detlef P. van Vuuren, Elmar Kriegler, Jae Edmonds, Brian C. O'Neill, Shinichiro Fujimori, Nico Bauer, Katherine Calvin, Rob Dellink, Oliver Fricko, Wolfgang Lutz, Alexander Popp, Jesus Crespo Cuaresma, Samir KC, Marian Leimbach, Leiwen Jiang, Tom Kram, Shilpa Rao, Johannes Emmerling, Kristie Ebi, Tomoko Hasegawa, Petr Havlik, Florian Humpenöder, Lara Aleluia Da Silva, Steve Smith, Elke Stehfest, Valentina Bosetti, Jiyong Eom, David Gernaat, Toshihiko Masui, Joeri Rogelj, Jessica Strefler, Laurent Drouet, Volker Krey, Gunnar Luderer, Mathijs Harmsen, Kiyoshi Takahashi, Lavinia Baumstark, Jonathan C. Doelman, Mikiko Kainuma, Zbigniew Klimont, Giacomo Marangoni, Hermann Lotze-Campen, Michael Obersteiner, Andrzej Tabeau og Massimo Tavoni (jan. 2017). „The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview“. Í: *Global Environmental Change* 42, bls. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- Rohde, Robert A og Zeke Hausfather (2020). „The Berkeley Earth land/ocean temperature record“. Í: *Earth System Science Data* 12 (4), bls. 3469–3479.
- Schwalm, Christopher R., Spencer Glendon og Philip B. Duffy (nóv. 2020). „Reply to Hausfather and Peters: RCP8.5 is neither problematic nor misleading“. Í: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (45), bls. 27793–27794. DOI: 10.1073/pnas.2018008117.
- Sicre, Marie-Alexandrine, Bassem Jalali, Jón Eiríksson, Karen-Luise Knudsen, Vincent Klein og Violaine Pellichero (2021). „Trends and centennial-scale variability of surface water temperatures in the North Atlantic during the Holocene“. Í: *Quaternary Science Reviews* 265, bls. 107033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107033>.
- Solomon, Susan, D Qin, M Manning, Z Chen, M Marquis, K B Averyt, M Tignor og H L Miller (2007). „Summary for policymakers“. Í: *Climate change*, bls. 1–18.
- Vuuren, D P van, J Edmonds, M Kainuma, K Riahi, A Thomson, K Hibbard, G C Hurtt, T Kram, V Krey, J F Lamarque, T Masui, M Meinshausen, N Nakicenovic, S J Smith og S K Rose (2011). „The representative concentration pathways: an overview“. Í: *Climatic Change* 109 (1-2), bls. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.