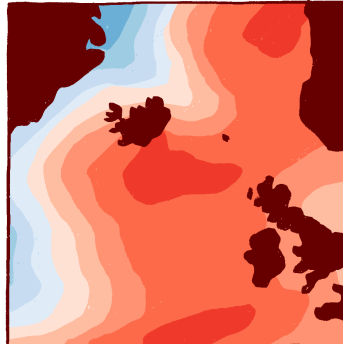


KAFLI

2

VEÐURFAR, VATNAFAR, JÖKLAR  
OG SJÁVARSTAÐA



## Efnisyfirlit kafla

2.1	Veðurfar . . . . .	25
2.1.1	Þróun veðurfars á nútíma . . . . .	25
2.1.2	Hitaþróun á Íslandi á tíma samfelldra mælinga . . . . .	27
2.1.3	Þróun úrkomu . . . . .	29
2.2	Vatnafar . . . . .	34
2.2.1	Afrennsli og flóð . . . . .	34
2.2.2	Breytingar á snjóhulu . . . . .	37
2.2.3	Breytingar á afrennsli vegna hops jökla . . . . .	38
2.3	Ástand sjávar . . . . .	40
2.4	Jöklar . . . . .	44
2.4.1	Ástand og breytingar frá lokum litlu ísaldar . . . . .	44
2.4.2	Líklegar breytingar íslenskra jökla á komandi öld . . . . .	49
2.5	Sjávarstöðubreytingar . . . . .	54
2.5.1	Orsakir sjávarstöðubreytinga . . . . .	54
2.5.2	Sviðsmýndir um eiginlegar sjávarstöðubreytingar . . . . .	56
2.5.3	Landhæðarbreytingar . . . . .	59
2.5.4	Afstæðar sjávarstöðubreytingar kringum Ísland . . . . .	62

## Samantekt

1. Sú saga fornveðurfars, sem meta má með gögnum frá Íslandi, fellur í megindráttum að veðurfarssögu norðurhvelsins utan hitabeltisins.
2. Á Íslandi voru skilyrði hlýjust snemma á nútíma. Síðan skiptust á óregluleg, hlýrri og kaldari tímabil en í heildina kólnaði og kaldast varð í lok 19. aldar.
3. Frá lokum 19. aldar hefur hlýnað verulega (fyrir árshita um 1,0 °C á öld að jafnaði), meira að vetri (um 1,4 °C á öld) en sumri (um 0,7 °C á öld).
4. Þó hægt hafi á hraða hlýnnunar frá útkomu síðustu skýrslu vísindanefndar er enn óvenjuhlytt á landinu og meðaltal síðustu áratuga er nokkuð yfir meðaltali allra annarra áratuga síðan mælingar hófust. Óvenjulega hlý sumur hafa slegið hitamet á nokkrum veðurstöðvum.
5. Úrkoma jókst á síðustu áratugum og síðustu ár hefur ársúrkoma verið um 5–10% meiri en á tímabilinu 1971–2000.
6. Hlutfall snævar í úrkomu minnkaði á síðustu áratugum, meira á láglendi en hálendi.
7. Snjóhula fór minnkandi samfara hlýnun í lok síðustu aldar en tók að aukast á ný eftir aldamótin. Umtalsverður munur er á þróun snjóhulu milli landshluta og haustmánaða og vormánaða.
8. Mesta aftakaúrkoma á sólarhring er 50–190 mm á veðurstöðvum. Samkvæmt reikningum, byggðum á endurgreiningu, er hún 70–110 mm víða á láglendi, en 140–180 mm austan- og suðaustanlands og á hálendinu, en fer yfir 500 mm á jöklum.
9. Breytingar á tíðni flóða ráðast m.a. af úrkomubreytingum, breytingum á leysingu jökla, breytingum á snjósöfnun og hlutfalli snævar í úrkomu.
10. Aukin úrkoma og hlýindi að vetri geta aukið tíðni flóða á haust- og vetrarmánuðum, en að sama skapi fækkað þeim að vor- og sumarlagi.
11. Framreikningar með sviðsmyndum benda til þess að stærð flóða aukist. Flóð af þeirri stærð, sem nú er fágæt, verða tíðari.
12. Nota má breytingar í tíðni minni flóða (amaflóða og flóða sem hafa endurkomutíma innan 20 ára) til að leggja mat á breytingar í tíðni stærri og sjaldgæfari flóða.
13. Verulega hefur hlýnað í Norður-Atlantshafi á síðustu áratugum. Þó eru umtalsverðar sveiflur í sjávarhita umhverfis Ísland.
14. Á öðrum áratug þessarar aldar kólnaði á hafsvæðinu suðvestur af landinu og suður af Grænlandi. Á síðustu árum hefur hlýnað aftur á því svæði.
15. Veltihringrás Atlantshafsins (AMOC) hefur verið frekar stöðug síðustu ár en vísindalegar niðurstöður um langtíma stöðugleika hennar eru ekki samhljóða. Flest loftslagslíkön sýna að styrkur hringrásarinnar dregst saman með hlýnun og þegar síðasta skýrsla kom út var hrun hringrásarinnar á þessari öld metið sem mjög ólíklegt. Nýjar rannsóknir hafa dregið úr vissu þess mats.
16. Hafið umhverfis Ísland er 2–4 °C hlýrra en önnur hafsvæði á sömu breiddargráðu og hluti þeirrar umframhlýnnunar eru áhrif veltihringrásarinnar.
17. Jöklar á Íslandi hafa haldið áfram að rýrna þó heldur hafi hægt á rýrnun eftir 2010, samanborið við tímabilið 1995–2010. Frá hámarksútbreiðslu, undir lok 19. aldar, hafa þeir rýrnað um 2300 km<sup>2</sup> sem samsvarar 19% af hámarksflatarmálinu.

18. Heildarmassatap jöklanna á tímabilinu 1890–2019 var  $540 \pm 130$  Gt, eða sem svarar  $16 \pm 4\%$  af heildarmassa árið 1890. Það samsvarar  $1.50 \pm 0.36$  mm sjávarstöðuhækkun að meðaltali yfir öll heimshöfin.
19. Nokkrir jöklar hafa horfið alveg.
20. Vegna hörfunar jökla eru jaðarlón fyrir framan að stækka og ný að myndast.
21. Vetrarafkoma jöklanna hefur verið of lítil og sumarleysing of mikil til að jafnvægi í stærð þeirra haldist.
22. Framtíð jökla landsins er mjög háð þróun loftslags og sjávarhita umhverfis landið. Þeir munu halda áfram að rýrna, en niðurstöður líkanreikninga sýna að núverandi massi þeirra mun minnka um 40–50% ef Parísarsamningurinn er haldið. Ef ekki tekst að ná tökum á losun gróðurhúsalofttegunda er hugsanlegt að rýrnunin verði mun meiri.
23. Sjávarstöðubreytingar við Ísland munu ráðast af landhæðarbreytingum, hlýnun hafsins og massatapi ísbreiðanna á Suðurskautslandinu og Grænlandi.
24. Mælingar sýna útbreitt landrís við miðbik landsins og suðausturströnd þess. Landsig mælist á suðvesturhluta landsins. Annars staðar við ströndina gætir landrís eða landsigs í minna mæli.
25. Breytingar á þyngdarsviði jarðar valda því að massatap Grænlandsjökuls hækkar ekki sjávarstöðu við Ísland, en massatap ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu gerir það.
26. Mikil óvissa er um þróun sumra ferla sem geta valdið hröðu massatapi ísbreiðanna á Suðurskautslandinu og á Grænlandi, sérstaklega eftir aldamótin 2100. Óvissumörk á mati sjávarstöðuhækkunar hér við land árið 2150 eru því stór. Vegna þessa getur sjávarstöðuhækkun, í versta tilfalli, numið mörgum metrum. Miðgildi hækkunar er lægra og víða rúmlega metri eða minna.
27. Mat á sjávarstöðubreytingum til aldamóta sýnir að við suðausturströndina, þar sem land rís hraðast, er líklegt að afstæð sjávarstaða geti fallið um  $\sim 1,5$  m en hækkað um allt að 1,2 m þar sem landsig er hvað mest. Annars staðar á landinu er sjávarstöðuhækkun mismikil og ræðst m.a. af landrís eða landsigi. Víða er hún nokkrum tugum sentimetra meiri í hlýjum sviðsmyndum.
28. Sjávarstöðubreytingar munu halda áfram öldum saman, jafnvel þó takist að minnka losun gróðurhúsalofttegunda.
29. Skipulagsákvæðanir, sem teknar eru nú á dögum, munu hafa áhrif á byggð og innviði í nokkur hundruð ár. Þess vegna þarf að taka tillit til komandi sjávarstöðubreytinga á þessari öld og þeirri næstu við skipulagsákvæðanir.

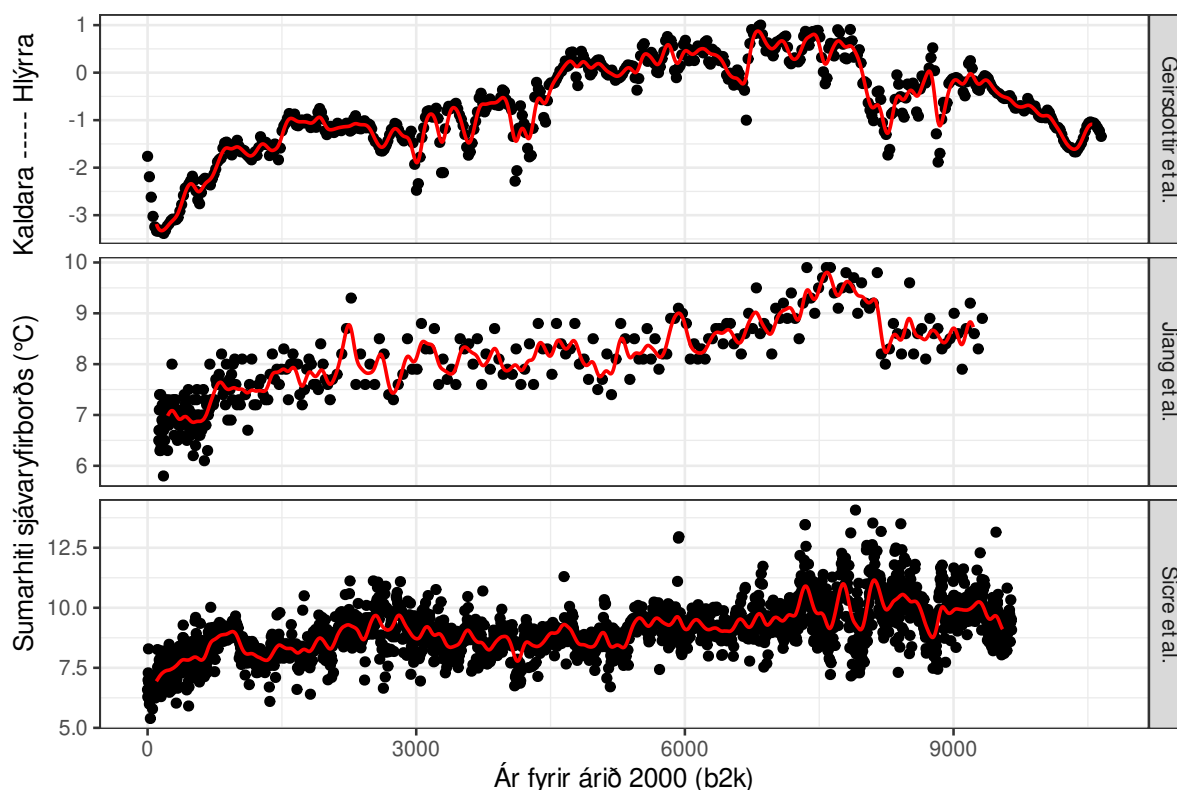
Í tveimur síðustu skýrslum vísindanefndar var farið yfir þær rannsóknir sem gerðar hafa verið á veðurfari, vatnafari, jöklum og tengdum sviðum hér á landi (sjá Halldór Björnsson o.fl. (2008) og Halldór Björnsson o.fl. (2018), **V2008** og **V2018** hér eftir). Niðurstöður rannsókna á þessum þáttum eru mjög viðamikil efni svo umfjöllun hefur einskorðast við þann hluta sem snýr að loftslagsbreytingum og áhrifum þeirra. Í þessum kafla verður farið yfir nýlegar rannsóknir á þessum eðlisþáttum jarðar.

## 2.1 Veðurfar

### 2.1.1 Þróun veðurfars á nútíma

Fjallað var um rannsóknir á loftslagssögu á Íslandi og í Norður-Atlantshafi í V2008 og V2018. Í stuttu máli sýna niðurstöður að á nútíma, frá síðasta jökulskeiði, hefur spönn langtíma hitastigsbreytinga á Íslandi verið um 4 °C (sjá grein 4.2 í V2018 og Miller o.fl. (2012)), sem er stærri spönn en að meðaltali fyrir jörðina á sama tíma. Hljústast var á landinu fyrir um 6–8 þúsund árum. Síðan þá hefur kólnað, þó ekki órofa heldur skiptust á hlýrri og kaldari tímabil. Kaldasta tímabil nútíma virðist hafa verið á litlu ísöld, sem lauk í lok 19. aldar. Hlýnun síðan þá er um 0,8 °C á öld. Hér verður einungis gerð stuttlega grein fyrir niðurstöðum nýlegra rannsókna á veðurfarsögu Íslands. Samantektinni er ekki ætlað að vera tæmandi fyrir fornveðurfarsrannsóknir á Íslandi.

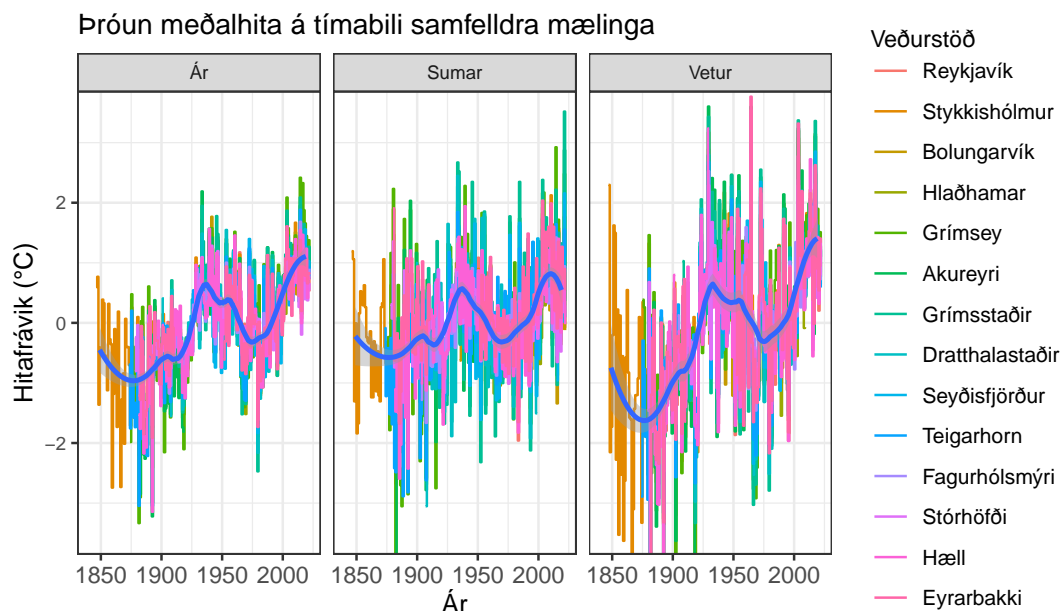
Í rannsóknum á vatna- og sjávarseti sýna gögn, sem tengja virkni lífvera við þróun veðurfars, sterka svörun við inngeislun sólar að sumri til (Geirsdóttir o.fl., 2013). Á norðurslóðum sýna margvísleg gögn að sumarkólnun á nútíma hafi orðið vegna minnkandi inngeislunar að sumarlagi. Það orsakast af reglubundnum breytingum í afstöðu jarðar og sólar. Rannsóknir á Íslandi hafa stutt við þessa mynd og bætt við þekkingu um sumarkólnun og þrepaskiptingu hennar (Geirsdóttir o.fl., 2019).



Mynd 2.1: Breytingar á hitafari á Íslandi og norðan við það á nútíma (athugið að tímaásinn er viðsnúinn: elsti hluti grafsins er til hægri og yngsti til vinstri, ásinn sýnir aftur í tímann frá árinu 2000). Efsta myndin byggist á vatnaseti frá sjö stöðvötnum (Geirsdóttir o.fl., 2019), en neðri myndirnar tvær á sjávarseti frá setlagakjarnanum MD99-2275, sem tekinn var austan við Grímsey. Myndin í miðjunni byggist á kísilþörungum (Jiang o.fl., 2015) en sú neðri er s.k. alkenónvísir (Sicre o.fl., 2021). Á öllum myndunum sýna svartir punktar mæliniðurstöður, en rauði ferillinn er hlaupandi meðaltal reiknað með gássískri síu sem hefur 100 ára hálfvæðing.

Magn lífræns kísils í vatnaseti sýnir lífvirkni (aðallega kísilþörungum) í vötnum að sumarlagi en hlutfall kolefnis og niturs (C:N hlutfall) sýnir breytingar á uppruna lífræns efnis, sem tengja má jarðvegsrofi og óstöðugleika yfirborðs. Samsettar mæliraðir á setkjörnum frá sjö stöðuvötnum sýna að sumarkólnunin, sem kemur fram í breytingum á magni lífræns kísils á mið- og síðari hluta nútíma, virðist hafa átt sér stað í þrepum, samfara breytingum á C:N hlutfalli sem bendir til víðtækra umhverfisbreytinga á sama tíma (Geirsdóttir o.fl., 2019). Fyrri rannsóknir sýndu að jöklar hurfu að mestu af landinu snemma á nútíma (sjá umfjöllun í V2018), en líklegt er að nýmyndun þeirra hafi fylgt í kjölfar þessara kólnunarþrepa. Langjökull fyrir um 5500 árum, Vatnajökull fyrir um 4500 árum og Drangajökull fyrir um 2600 árum (Geirsdóttir o.fl., 2019). Þá sýna rannsóknir einnig að fyrir um 1500 árum hafi orðið breytingar á C:N hlutfalli, sem bendir til umhverfisbreytinga og aukins jarðvegsrofs nokkru fyrir landnám (Geirsdóttir o.fl., 2019).

Sú saga fornveðurfars, sem gögn frá Íslandi lýsa, fellur í megindráttum að veðurfars sögu norðurlhvelsins utan hitabeltis (Marcott o.fl., 2013) og þeim veðurfarsbreytingum sem ráða má af sjávarsetskjörnum sem teknir eru nærri Íslandi (sjá t.d. mynd 4.11 í V2018). Mynd 2.1 sýnir mat á hitafari á Íslandi á nútíma. Efst eru niðurstöður, byggðar á vatnaseti frá sjö stöðuvötnum á Íslandi (Geirsdóttir o.fl., 2019), en fyrir neðan eru sýndar niðurstöður á rannsóknum á sjávarsetkjarna sem tekinn var skammt austan Grímseyjar (MD99-2275). Á myndinni í miðjunni er hiti yfirborðssjávar að sumarlagi metinn út frá magni kísilþörungum og breytingum á þeim á nútíma (Jiang o.fl., 2015). Á neðstu myndinni er byggt á öðrum veðurvísi, svokölluðum alkenónvísi (Sicre o.fl., 2021). Lóðrétti ásinn á efstu myndinni er ekki beinn hitakvarði, en hann sýnir mun á kaldari (neikvæðar tölur) og hlýrri (jákvæðar tölur) skilyrðum. Kvarðinn á neðri myndunum sýnir yfirborðshita sjávar að sumarlagi. Þessum hitaferlum ber ekki vel saman í smáatriðum, þó sýna báðir að veður voru hlýjust snemma á nútíma og kaldasta tímabilið var í lok 19. aldar. Spönn sjávarhitabreytinga í þessum tveimur kjörnum er um 2,5 og 3 °C sem er minna en sú 4 °C spönn sem kom fram í V2018, en sú tala á við breytingar á landi. Aðferðafræðilegur munur á niðurstöðum Jiang o.fl. (2015) og Sicre o.fl. (2021) er nokkur, en munurinn á milli þeirra varpar ljósi á þá óvissu sem er til staðar í mati á breytingum á sjávarhita.



Mynd 2.2: Þróun meðalhita á Íslandi frá 1846 til 2022 a) ársmeðaltalshiti, b) sumarmeðaltalshiti og c) vetrarmeðaltalshiti. Framlenging og endurgerð á mynd 4.12 í V2018.

Kjarninn (MD99-2275) var staðsettur nærri skilum hlý- og kaldsjávar norðan við landið. Það þýðir að sveiflur í innflæði hlýsjávar norður fyrir landið valda líklega meiri hitasveiflum en við suðurströndina, þar sem slíkra áhrifa gættir síður. Ef hitabreytingar í hafi á síðustu áratugum

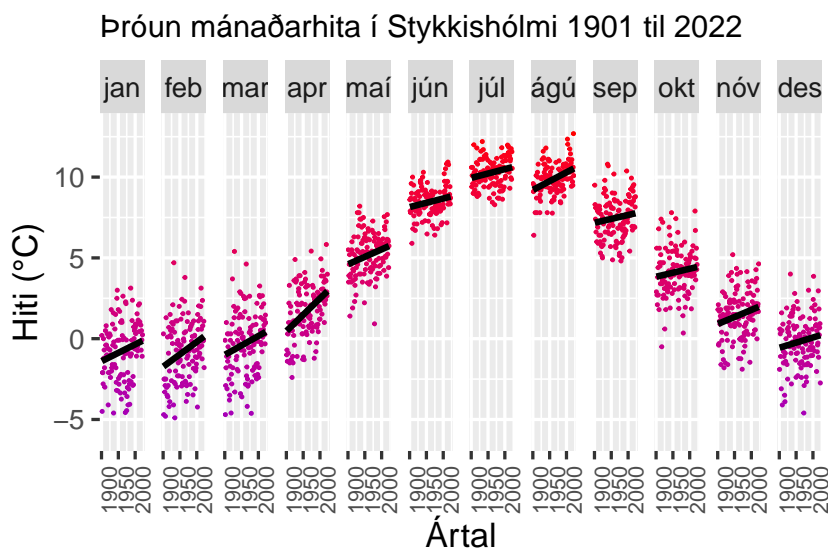
eru skoðaðar (sjá mynd 2.15) sést að þær eru ólíkar norðan við landið og sunnan við það. Í grein 3.6 eru niðurstöður á mynd 2.1 settar í samhengi við líklegar breytingar á næstu áratugum.

### 2.1.2 Hitapróun á Íslandi á tíma samfelldra mælinga

Í V2018 var hitafar á Íslandi sett í samhengi við landfræðilega staðsetningu landsins og farið yfir langtímabreytingar og þróun á síðustu öld. Hitafar á landinu fór kólnandi síðustu þúsundir ára og kaldasta tímabilinu virðist hafa verið náð á litlu ísöld, sem lauk í lok 19. aldar. Frá þeim tíma hefur hlýnað verulega á landinu, hvort sem litið er til ársins í heild sinni, einstakra árstíða eða mánaða. Rétt eins og kólnunin, sem rædd var í 2.1.1, var hlýnunin ekki órofa. Á 2. áratug síðustu aldar var ákaft hlýnunarskeið en upp úr miðbiki aldarinnar kólnaði aftur fram að lokum 8. áratugar síðustu aldar. Þá tók við áköf hlýnun sem hefur varað fram til síðustu ára.

Mynd 2.2 sýnir þróun meðalhita á Íslandi fyrir árið, sumur (júní til ágúst) og vetur (desember til mars). Myndin sýnir að breytileiki í hita er meiri að vetri til en minnstur fyrir sumar meðaltalið. Hallatölur í gögnum fyrir allt tímabilið sýna að hraði vetrarhlýnunar nam að jafnaði  $1.4 \pm [1.3, 1.6]$  °C á öld, þar sem tölurnar innan hornklofa sýna 95% óvissumörk. Hraði sumarhlýnunar var um  $0.7 \pm [0.6, 0.8]$  °C á öld og hraði hlýnunar fyrir ársmeðaltal er  $1.0 \pm [0.9, 1.1]$  °C á öld. Í öllum tilvikum sýnir myndin að verulegar sveiflur eru á hraða hlýnunar og kólnunarskeið upp úr miðri öldinni er áberandi. Mynd 2.3 sýnir þróun meðalhita hvers mánaðar í Stykkishólmi frá 1901 til 2022, auk þess sem besta lína um hitagögn hvers mánaðar er sýnd. Myndin sýnir að allir mánuðir hafa hlýnað og er hlýnunin síðla vetrar og á vorin meiri en aðra mánuði ársins.

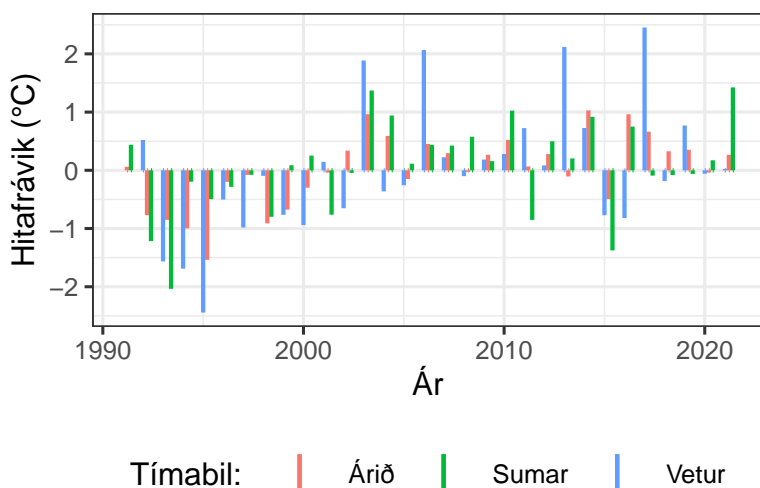
Frá útkomu V2018 hefur hægt á hinni áköfu hlýnun sem einkenndi hitafar á landinu frá því skömmu fyrir aldamót fram til 2016 sem var hlýjasta ár í sögu mælinga í Stykkishólmi. Þetta sýnir mynd 2.2. Hún sýnir einnig að eftir 2016 hefur verið mjög hlýtt á landinu, hvort sem er að vetri eða sumri. Sem dæmi má nefna að sumarið 2021 var það hlýjasta frá upphafi mælinga víða, m.a. á Akureyri, Egilsstöðum, Dalatanga og á Grímsstöðum á Fjöllum. Sumarið 2021 hafði flesta daga þar sem hámarkshiti mældist 20 °C eða meira einhvers staðar á landinu og það var líka óvenjusólríkt og þurrt á Norður- og Austurlandi.



Mynd 2.3: Þróun meðalhita hvers mánaðar í Stykkishólmi. Lóðréttu dálkarnir afmarka hvern mánuð og einnig er sýnd besta lína gegnum gögn hvers mánaðar.

Mynd 2.4 sýnir meðalhita hvers áratugar frá aldamótunum 1900 á sjö stöðvum sem eru nokkuð jafndreifðar um landið og voru í rekstri frá 1900. Athygli vekur að síðustu tveir áratugir eru mun heitari en hlýjustu áratugir um miðbik síðustu aldar, nokkuð sem sést ekki vel á mynd 2.2. Ástæðan er sú að á hlýndaskeiðinu um miðbik síðustu aldar var meiri munur á hlýjustu og köldustu árum innan hvers áratugar og köldustu árin drógu meðaltal hvers áratugar niður. Hljáa tímabilið sem hófst á 9. áratug síðustu aldar hefur ekki samsvarandi köld ár til að lækka meðaltal hvers áratugar.

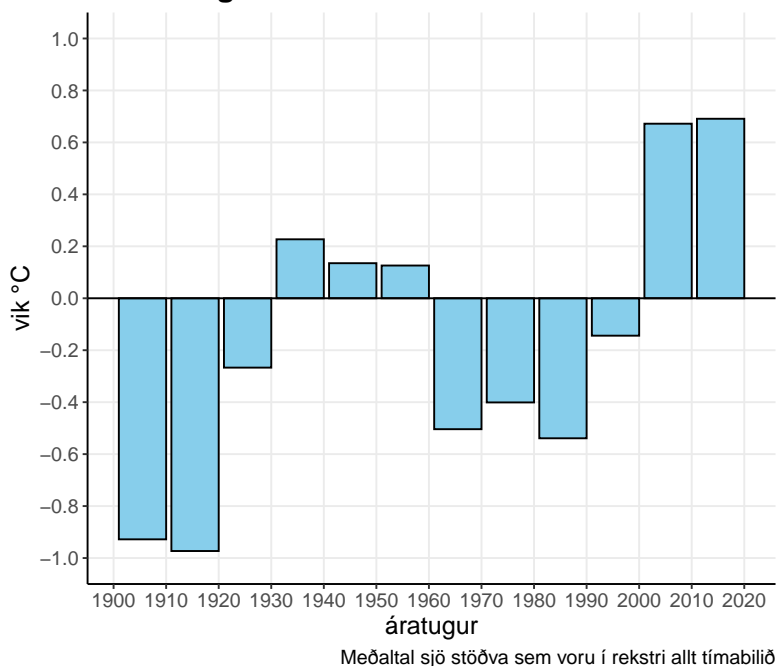
Myndir 2.2, 2.3 og 2.4 eru alltar byggðar á mæligögnum veðurstöðva. Í V2018 var einnig byggt á niðurstöðum *endurgreininga* til að teikna kort af hita- og úrkomubreytingum. Eins og rakið er í grein 4A í V2018 þá eru endurgreiningar leið til þess að nota sem mest af gögnum til þess að gera sem besta mynd af ástandi lofthjúpsins á hverjum tíma og henta mjög vel til að skoða kort af þróun hita, úrkomu og veðurtengdra þátta. Í V2018 byggði fjórði kafli að nokkru á niðurstöðum ICRA endurgreiningar Veðurstofu Íslands (Nawri o.fl., 2017) en hér er einnig byggt á nýrri endurgreiningum, *CARRA* (Schyberg o.fl., 2020) fyrir Ísland og *ERA5* endurgreiningunni fyrir stærra svæði (Hersbach o.fl., 2017; Hersbach o.fl., 2020). Nánari mynd af hitabreytingum síðustu áratuga að vetri og sumri og yfir árið má sjá á mynd 2.5. Myndin er byggð á *CARRA* endurgreiningunni og sýnir vik frá meðaltali árunna 1991–2020.



Mynd 2.5: Þróun hita á Íslandi samkvæmt *CARRA* greiningunni (sjá einnig mynd 2.7). Hver súla sýnir vik frá meðaltali árunna 1991 til 2020, fyrir ársmeðaltalshita og einnig meðaltalshita vetrar og sumars.

vetri til var þessu öfugt farið, á þeim árstíma hlýnaði áfram og áratugurinn 2010-2020 var hlýrri

Vik áratugshita frá meðalhita árunna 1981–2010



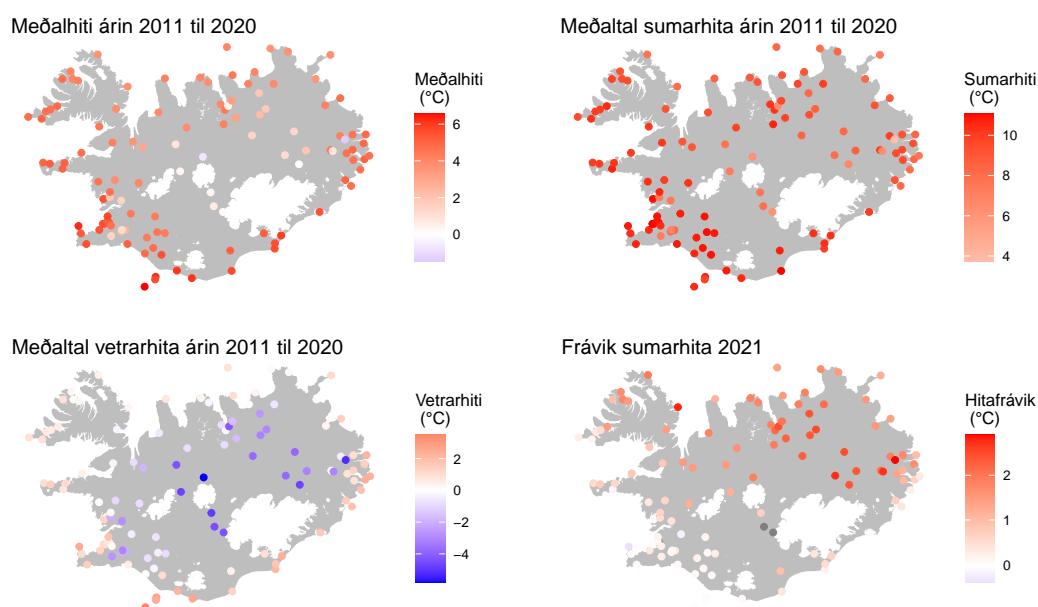
Mynd 2.4: Þróun meðalhita hvers áratugar á Íslandi frá aldamótunum 1900. Sýnd eru vik frá meðaltali árunna 1981–2010. Myndin sýnir gögn frá sjö stöðvum víðs vegar um landið, þ.e. Reykjavík, Stykkishólmi, Akureyri, Grímsey, Stórhöfða, Teigarhorni og Hæli/Árnesi. Þessar stöðvar voru í rekstri allt tímabilið.

Fyrir árshitann eru lægstu gildin á fyrri hluta 10. áratugar liðinnar aldar, en eftir það hlýnar og árshitinn er yfir meðaltalinu flest ár nýrrar aldar. Mynd 2.4 sýnir að lítill munur er á meðaltölum síðustu tveggja áratuga og mynd 2.5 sýnir einnig lítinn mun á árgildum á fyrsta og öðrum áratug þessarar aldar. Þótt litlar breytingar hafi verið milli áratuga hvað árshitann varðaði var nokkur munur á þróun sumar- og vetrarhita. Þrátt fyrir að sumarið 2021 sé það hlýjasta í *CARRA* greiningunni voru á fyrsta áratug þessarar aldar fleiri sumur sem voru heitari en meðaltal árunna 1991–2020, því kólnaði í heildina milli áratuga að sumarlagi. Að



en fyrsti áratugur þessarar aldar.

Mynd 2.7 sýnir þessar breytingar nánar, en hún sýnir kort af mismun milli meðaltalshita 10. áratugar síðustu aldar og 1. áratugar þessarar aldar og mismun meðaltalshita milli 1. og 2. áratugar þessarar aldar. Eins og mynd 2.5 byggist hún á CARRA endurgreiningunni og sýnir líka sams konar samanburð fyrir sumur og vetur. Vinstri dálkurinn á mynd 2.7 sýnir mismun meðalhita áratuga fyrir og eftir síðustu aldamót. Greinilegt er að hlýnunin er bæði mikil og víðfeðm, það hlýnar meira að vetri en sumri og árið í heild hlýnar einnig verulega. Með því að bera saman myndirnar í dálkunum tveimur má sjá þróun hitabreytinga yfir tímabilið. Hægri dálkurinn sýnir samanburð áratuganna 2001–2010 og 2011–2020 og í heildina er hlýnunin minni en sjá má í vinstri dálknum (fyrir áratugina 1991–2000 til 2001–2010). Á sumum svæðum verður kólnun, mest um hálfu til eina gráðu að sumri til. Fyrir árið í heild sinni er munurinn milli áratuga lítill, hlýnun víðast undir hálfri gráðu en kólnun suðvestantil á landinu. Að vetri til heldur hlýnun víða áfram, sérstaklega á Vestfjörðum og á Austurlandi en stöku svæði, sérstaklega suðvestanlands, kólna lítilega.



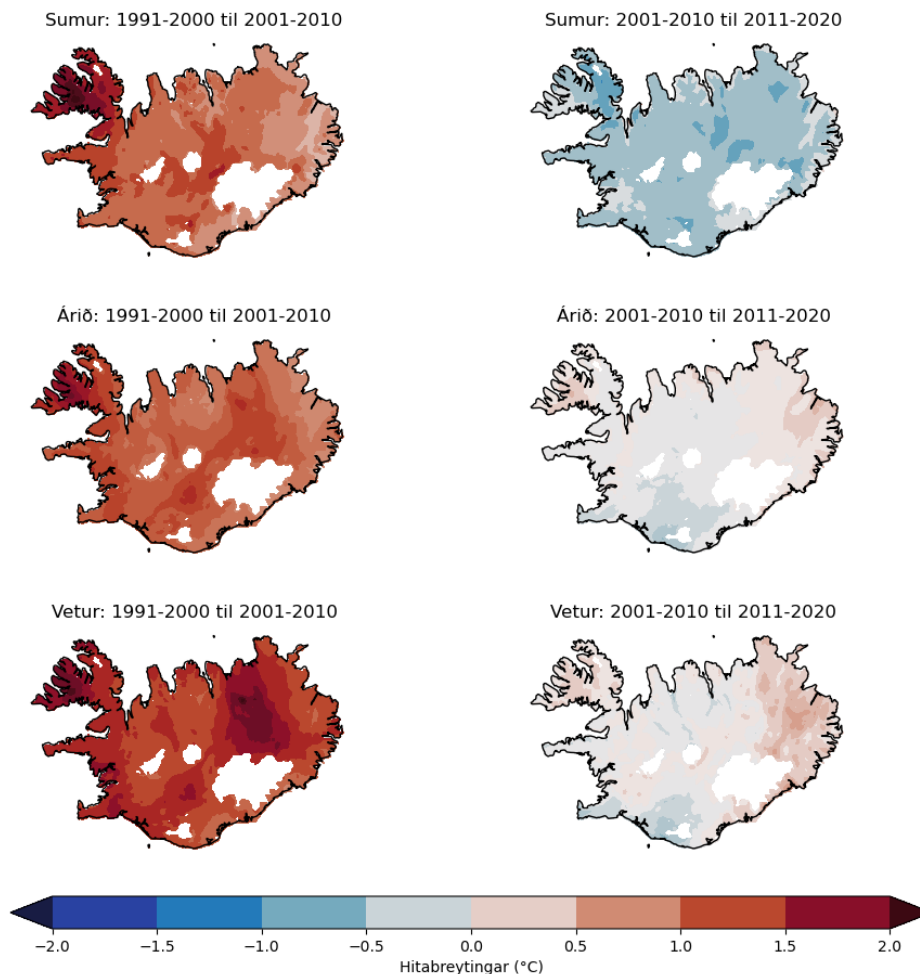
Mynd 2.6: Ársmeðalhiti á tímabilinu 2011–2020 á sjálfvirkum veðurstöðvum, sumarmeðalhiti og vetrarmeðalhiti og vik hita ársins 2021 frá sumarmeðaltalinu.

Frá aldamótum hefur sjálfvirkum veðurstöðvum á landinu fjölgað mikið, en mönnum veðurstöðvum að sama skapi fækkað. Á síðasta áratug var net sjálfvirkra veðurstöðva nokkuð þétt og sýnir mynd 2.6 ársmeðaltal, auk meðaltals sumar- og vetrarhita fyrir áratuginn 2011–2020. Þá sýnir myndin einnig frávik sumarhita árið 2021 og þau hlýndi sem urðu á norðan- og austanverðu landinu það sumar. Þó nokkur munur sé á tíðni mælinga á sjálfvirkum og mönnum stöðvum þá sýna þær sambærilega þróun hita, bæði í tíma og rúmi.

### 2.1.3 Þróun úrkomu

Í V2018 var greint frá helstu gögnum um úrkomu á Íslandi, bæði meðaltöl úrkomu og breytingar á síðustu áratugum. Meðalársúrcoma á landinu var lengi um 1500 mm (um 1000 mm á láglandi) á síðustu öld, en á 21. öld hefur hún aukist og er nú um 1600–1700 mm (1100–1200 mm á láglandi). Meðalársúrcoma jókst um allt landið á tímabilinu 1985–2014 en að sumarlagi var aukningin mest áberandi á vestanverðu landinu, á sama svæði og hlýnaði mest. Einnig kom fram að hámarks sólarhringsúrcoma hvers árs jókst en sú aukning var ekki tölfræðilega marktæk því verulegar sveiflur einkenna mæliraðir (sjá mynd 12.3 í V2018).

## Hitabreytingar milli áratuga 1991 til 2020



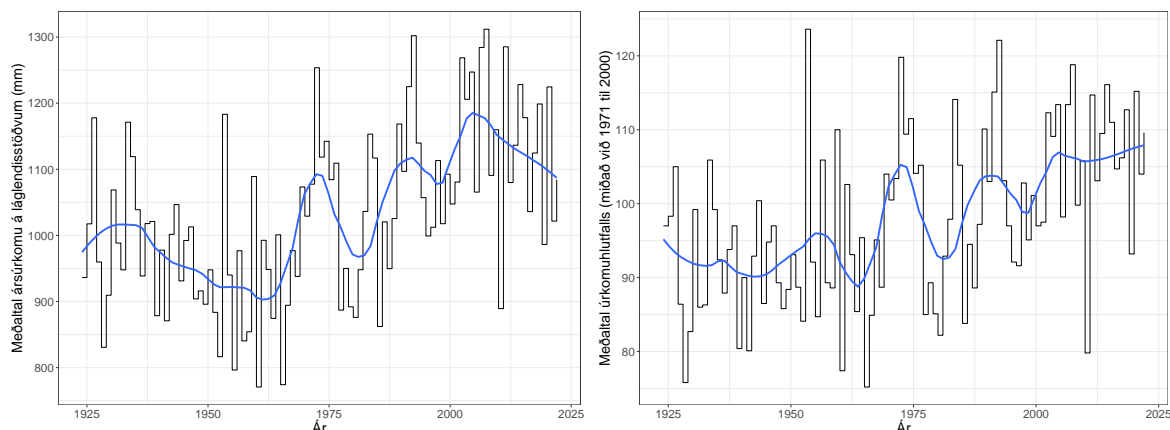
Mynd 2.7: Hlýnun milli áratuga í CARRA endurgreiningunni að sumri, á ársgrundvelli og að vetri. Kortin sýna annars vegar mismun meðaltala áratuganna 2001–2010 og 1991–2000 (vinstri dálkur) og hins vegar mismun meðaltala áratuganna 2011–2020 og 2001–2010 (hægri dálkur).

Mynd 2.8 sýnir að í meginatriðum hefur þróun úrkomu, sem lýst var í V2018, haldið áfram á síðustu árum. Á láglandisstöðvum er meðalársúrcoma síðustu ára á bilinu 1050 til 1200 mm sem er 5–10% meiri úrcoma en á tímabilinu 1971–2000 og mun meiri en fyrr á 20. öldinni. Leitnilínur gegnum mæliröðina sýna aukningu hámarksúrkomu, en sveiflur á milli ára eru stórar og því er aukningin ekki marktæk. Á síðustu árum hafa verið umtalsverðar breytingar á úrkomutegund og ákefð aftakaúrkomu.

### 2.1.3.1 Breytingar á aftakaúrkomu

Á undanförunum árum hafa orðið nokkur skyndiflód vegna úrhellisrigningar í brattlendi við byggð, auk alvarlegra flóða og skriðufalla vegna óvenjulega mikillar uppsafnaðrar úrkomu yfir nokkra daga. Sem dæmi má nefna atburðinn á Seyðisfirði í desember 2020, þá varð uppsöfnuð úrcoma (RX5D) dagana 14.–18. desember samtals 569,9 mm sem er það mesta sem mælst hefur hér á landi. Óvenjuhlýtt var þessa daga miðað við þennan árstíma og því féll þessi úrcoma sem rigning. Afleiðingarnar voru mestu skriðuföll í sögu Seyðisfjarðarbyggðar.

Til að leggja mat á umfang aftakaúrkomu er reiknað út hversu mikil úrcoma fellur í fágætum



Mynd 2.8: Úrkomuþróun á láglendisstöðvum. Myndin til hægri sýnir meðaltal ársúrkomu en myndin til vinstri sýnir hlutfall úrkomu af meðaltali yfir tímabilið 1971–2000.

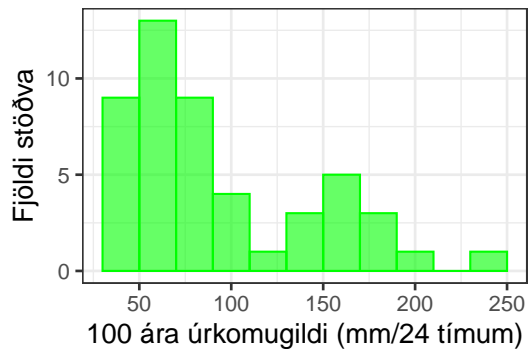
atburði eða hversu oft slíkur atburður gerist. Til dæmis er 100 ára úrkoma sú sólarhringsúrkoma sem hefur eitt prósent líkur á að verða á hverju ári, því að meðaltali myndi slík úrkoma verða á 100 ára fresti (sjá einnig umfjöllun í grein 12A í V2018 og gildi í töflu 2.1). Slíkt úrkomumagn er mikið meira en algeng hámark, eins og mesta úrkoma hvers árs, og gagnlegt getur verið að meta hversu mikill munurinn er. Við skoðun á aftakaúrkomu er hér byggt á gögnum úr ICRA endurgreiningu veðurgagna (sjá umfjöllun í grein 2.1.2 og Nawri o.fl., 2017, auk greinar 4A í V2018) og úrkomumælingum frá 43 veðurstöðvum.

Tafla 2.1: Sú sólarhringsúrkoma (í mm) sem hefur 100 ára endurkomutíma, Massad o.fl. (2020). Stöðvum er raðað eftir úrkomumagni og sýndar eru þær 14 stöðvar þar sem reiknuð gildi voru hæst.

Staður	100 ára úrkoma (mm/sólar- hring)
Dalatangi	128
Höfn	130
Hveravellir	132
Siglufjörður	139
Neskaupstaður	155
Hellisskarð	155
Eskifjörður	157
Ólafsfjörður	162
Ölkelduháls	168
Grundarfjörður	174
Seyðisfjörður	186
Laufbali	188
Ólafsvík	193
Kvísker	247

Sérstaklega voru hámarksúrkoma og endurkomugildi aftakaúrkomu skoðuð (Massad o.fl., 2020). Tvær stærðir eru sérstaklega áhugaverðar, hámark sólarhringsúrkomu (skammstafað RX1D) og hámark fimm-daga uppsafnaðrar úrkomu (RX5D), og eru þessar stærðir bornar saman við dæmigerða hámarksúrkomu hvers árs. Þessar stærðir lýsa því hversu mikillar úrkomu má vænta frá verstu úrkomulægð hvers árs, og einnig frá hægfara veðrakerfi sem getur verið marga

daga að skila af sér úrkomu eða ítrekuðum lægðagangi yfir nokkura daga tímabil. Mynd 2.10 byggist á reikningum á gögnum frá ICRA endurgreiningunni (Massad o.fl., 2020) og sýnir RX1D og RX5D fyrir tímabilið 1981–2010

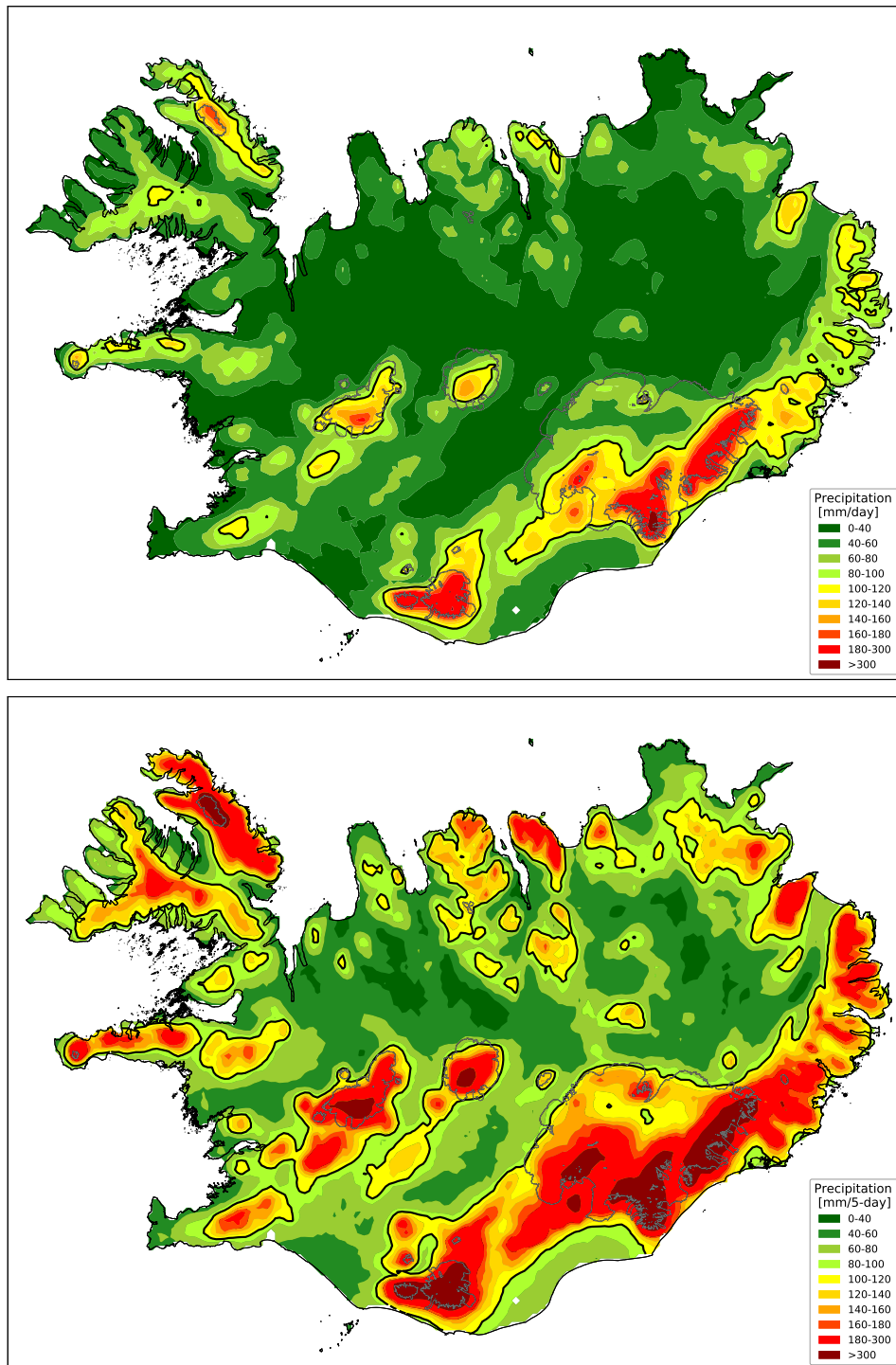


Mynd 2.9: Aftök sólarhringsúrkomu á veðurstöðvum á landinu. Lárétti ásinn er gildi 100 ára sólarhringsúrkomu samkvæmt Massad o.fl. (2020) en lóðrétti ásinn sýnir fjölda stöðva með tiltekna 100 ára sólarhringsúrkomu.

á landinu. Þetta magn er á bilinu 70–110 mm víða um landið, 140–180 mm austan- og suðaustanlands og á hálendi og meira en 500 mm á jöklum. Bera má þessa niðurstöðu saman við mynd 2.9 sem sýnir 100 ára sólarhringsúrkomu á öllum veðurstöðvunum í Massad o.fl. (2020). Greinilegt er að á flestum stöðvum er hámarkið á bilinu 50–100 mm en annað hámark í dreifingunni er 130–190 mm á sólarhring. Þessi síðari flokkur inniheldur þær 14 stöðvar sem sýndar eru í töflu 2.1. Í grein 3.2.3 eru ofangreindar niðurstöður settar í samhengi við líklegar breytingar á aftakaúrkomu á næstu áratugum.

Mesta sólarhringsúrcoma, sem búast má við á hverju ári, er á bilinu 40–60 mm víða um landið, en 80–100 mm austan- og suðaustanlands og á hálendi, en allt að 300 mm á jöklum. Mesta uppsafnaða úrcoma yfir fimm daga er víða 60–80 mm á láglendi en rúmlega 100 mm austan- og suðaustanlands og á hálendi og gildið er hæst á jöklum. Í skýrslu Massad o.fl. (2020) voru töflur með gildum fyrir 2, 5, 10, 25, 50 og 100 ára endurkomutíma úrkomu safnað upp í 3, 6, 12, 24 og 48 tíma. Slíkir útreikningar voru gerðir fyrir veðurstöðvar og tengdir niðurstöðum endurgreiningarinnar. Töflur í Massad o.fl. (2020) sýna að fyrir sólarhringsúrkomu er gildi með 100 ára endurkomutíma um 1.75 [1.6–2.2] -falt herra en gildi með tveggja ára endurkomutíma. Miðgildi mestu ársúrkomu, eins og sýnt er á mynd 2.10, er yfirleitt sambærilegt úrkomu með tveggja ára endurkomutíma og því er hægt að tengja niðurstöður á myndinni niðurstöðum Massad o.fl. (2020).

Með því að margfalda gildin á efri myndinni með 1.75 fæst gróft mat á 100 ára sólarhringsúrkomu



Mynd 2.10: Miðgildi hámarksúrkomu hvers árs samkvæmt gögnum úr ICRA endurgreiningunni fyrir tímabilið 1981–2010. Efri myndin sýnir niðurstöður fyrir sólarhringshámörk (RX1D), neðri myndin háværk á fimm-daga úrkomu (RX5D) (byggt á gögnum frá Massad o.fl., 2020).

## 2.2 Vatnafar

Í 8. kafla AR6-WG1 (Douville o.fl., 2021) er fjallað um breytingar á vatnshringrás. Hlýnun jarðar hefur í för með sér breytingar á úrkomusvæðum og með hlýnun eykst úrkomuákefð. Flódatíðni getur aukist, bæði vegna úrkomubreytinga og massataps jökla. Í kaflanum er lögð áhersla á að tengsl breytinga á úrkomu og flóðum sé flókin. Meiri úrkoma þarf ekki alltaf að þýða stærri flóð því hún er háð mörgum þáttum s.s. landslagi, gerð vatnasviðs, hversu lengi rignir og jarðveginum sem rigningin fellur á. Aukist gegnumdreygni jarðvegs og rýmd til að geyma vatn hafa úrkomubreytingar minni áhrif á flóð, en þurrkar geta leitt til yfirborðs sem verður nær ógegndræpt og geymir því ekkert vatn sem eykur yfirborðsafrennsli í vötn og ár. Áhrif breytingar á árstíðasveiflu og tegund úrkomu geta einnig verið flókin. Aukin rigning á kostnað snjókomu og vorleysingar sem hefjast fyrir á vorin geta á köldum svæðum aukið vetrar- og vorflóð, en minni vetrarsnjór getur minnkað líkur á stærri flóðum í kjölfar snöggrar leysingar.

### 2.2.1 Afrennsli og flóð

Úrkoma á landinu hefur aukist undanfarin ár (sjá mynd 2.8) og hlýnun hefur leitt til rýrnunar jökla og aukins afrennslis, sjá nánar grein 2.4. Ekki er hneigð til meira afrennslis í ám, eins og rakið er í grein 5.2 í V2018, en mælingar á afrennsli sýna verulegan breytileika milli ára. Þróun rennslis í nokkrum dragám er sýnd á mynd 2.11 og þar sést að aukin úrkoma á liðnum árum hefur ekki leitt til herra meðalrennslis, og sveiflur á milli ára eru verulegar.

Hlýnun hefur haft áhrif á ýmsar tímasetningar, t.d. upphaf leysinga og hvenær vorflóð og hámarksrennsli er. Skoðun á ICRA endurgreiningunni fyrir tímabilið 1979–2017 (Massad o.fl., 2022) sýnir að upphaf leysingatíma á nokkrum vatnasviðum hefur færst fyrir á árið (sjá töflu 2.2). Í V2008 og V2018 var fjallað um vorleysingar og bent á að með hlýnun muni leysingartíminn hefjast fyrir. Í V2018 kom fram að vetrarflóð, sérstaklega í dragám, muni líklega verða tíðari aukist hlutfall rigningar í úrkomu að vetri (sjá grein 2.2.2), en leysingaflóð að vori verði minni að sama skapi. Afrennsli frá jöklum mun aukast í takt við massatap þeirra og tími mesta afrennslis mun líklega hefjast fyrir að vori og ná lengra fram á haustið. Tafla 2.2 sýnir að nokkur munur er eftir landshlutum, á vatnasvæðum Þórisvatns, Tungnaár og við Búðarháls er tilfærsla upphafs leysingartíma 20 dagar eða meira og hún er á bilinu 10–19 dagar á öðrum vatnasviðum sunnanlands. Norðaustanlands er tilfærslan lítil, leysing hefst fimm dögum fyrir í Hágöngulóni og átta dögum síðar í Ufsarlóni. Með aukinni hlýnun geta vetrarleysingar orðið ofar á hálendinu, í V2018 kemur fram að síðustu áratugi hafa mestu vetrarflóðin orðið vestanlands, af svæði sem er í um 400 m hæð yfir sjávarmáli. Einnig kemur fram að mestu leysingaflóð að vori koma frá svæði á Sprengisandi sem liggur í um 600–800 m hæð. Aukin vetrarhlýnun eykur leysingu ofar á hálendinu og flóð þaðan gætu færst yfir á vetrartímann.

Síðan V2018 kom út hefur farið fram greining á flóðum í íslenskum ám og stærð flóða við mismunandi endurkomutíma, samtals í 63 rennslisröðum (Hilmar Björn Hróðmarsson og Tinna Þórarinsdóttir, 2018). Samanburður á stærð algengari og sjaldgæfari flóða<sup>1</sup> sýnir að rennsli í algengari flóðum hefur háa fylgni við rennsli sjaldgæfari flóða. Mynd 2.12 sýnir reiknað rennsli flóða með 5, 10, 25, 50, 100 og 200 ára endurkomutíma sem fall af rennsli flóðs með tveggja ára endurkomutíma fyrir hverja rennslisröð og tafla 2.3 sýnir reiknaðan halla á línunum fyrir hvern endurkomutíma. Eftir því sem flóðin eru sjaldgæfari eru þau stærri, þannig er flóð með 25 ára endurkomutíma um tvöfalt stærra en flóð með tveggja ára endurkomutíma í sömu á og fyrir sjaldgæfari flóð er hlutfallið herra.

Jafnvel þótt loftslagsbreytingar muni hafa í för með sér ýmiss konar breytingar á hringrás

<sup>1</sup>Hér verður talað um flóð sem hafa 2 ára eða 5 ára endurkomutíma sem algeng flóð, en flóð með 50, 100 eða 200 ára endurkomutíma sem sjaldgæf flóð. Eins og rætt er í grein 12A í V2018 eru þetta einungis leiðbeinandi nafngiftir. Flóð með tveggja ára endurkomutíma hefur 50% árslíkur, en flóð með 100 ára endurkomutíma hefur 1% árslíkur. Því væri nákvæmara að tala um líklegri og ólíklegri flóð, frekar en algengari og sjaldgæfari. Oftast valda algengari flóð litlu tjóni en af þeim getur verið nokkur ami og eru slík flóð kölluð *amaflóð*.

Tafla 2.2: Tilfærsla upphafs leysingartíma í dögum á tímabilinu 1979–2017, byggð á reikningum í ICRA-gagnasafninu. Upphaf leysingartíma byrjar sífellt fyrr á vorin á flestum vatnasviðum, neikvæðar tölur þýða að leysing byrjar fyrr í árinu. (Massad o.fl., 2022, tafla 2).

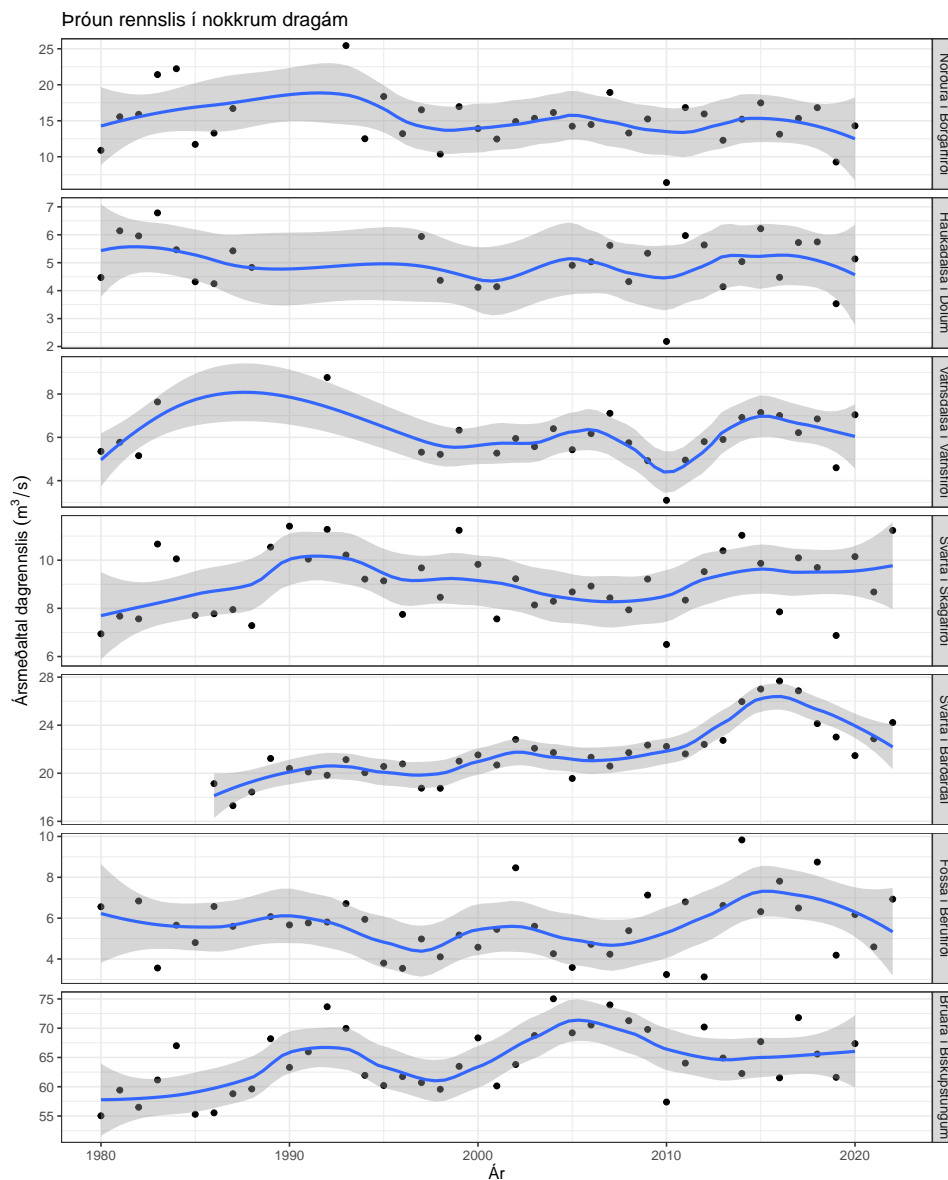
Vatnasvið	Tilfærsla upphaf, leysingartíma (dagar)
Blöndulón	–9
Búðarháls	–21
Hágöngulón	–5
Háslón	0
Hraunaveita	–11
Kvísloveita	–12
Sultartangi	–12
Þingvallavatn	–19
Þórisvatn	–27
Tungnaá	–29
Ufsárlón	8

vatns, eins og stærð flóða, er þó líklegt að áfram verði svipað samband milli stærðar algengra og sjaldgæfari flóða, a.m.k. fyrir þær ár sem eru háðar breytileika í veðri (t.d. úrkomuflóð, leysingaflóð). Ekki er hægt að staðhæfa að engar breytingar verði á hallatölunum sem sýndar eru í töflu 2.3 en á næstu árum og áratugum er ekki líklegt að sambandið breytist verulega. Hér þarf þó að setja þann fyrirvara að þetta á líklega ekki við um ár þar sem jökulhlaupa gætir. Þrjú áberandi vik frá línunum sjást á línuritunum fyrir flóð með 100 og 200 ára endurkomutíma á mynd 2.12. Þau eru öll frá ám þar sem jökulhlaup geta valdið stórflóðum. Rýrnun jökla á næstu áratugum og öldum (sjá grein 2.4) getur breytt sambandi rennslis í algengari og sjaldgæfari flóðum í jökulám sem hlaupa. Þrátt fyrir þennan fyrirvara sýnir mynd 2.12 og tafla 2.3 að mikilvægt er að fylgjast vel með breytingum í rennsli algengari flóða. Í mörgum ám geta þær breytingar verið vísir á líklegar breytingar í rennsli sjaldgæfari flóða.

Tafla 2.3: Hallatala línú gegnum punktastöfn sem lýsir sambandi á rennsli algengs flóðs (flóð með tveggja ára endurkomutíma) og flóða með lengri endurkomutíma (sjá mynd 2.12). Tölur innan hornklofa sýna bil 95% marktækni hveðrar hallatölu. (Gögn: Hilmar Björn Hróðmarsson og Tinna Þórarinsdóttir, 2018).

Endurkomutími	Hallatala
F5ár	1.35 [1.32 – 1.38]
F10ár	1.61 [1.55 – 1.67]
F25ár	1.97 [1.85 – 2.09]
F50ár	2.26 [2.09 – 2.44]
F100ár	2.58 [2.33 – 2.84]
F200ár	2.93 [2.57 – 3.30]

Vatnafræðilega líkaninu Hype hefur verið beitt á nokkur vatnasvið, sem hafa dragár, lindár og vatnsföll sem eiga upptök í stöðuvötnum, til að leggja mat á líklegar breytingar í tímasetningu og stærð flóða vegna loftslagsbreytinga í framtíðinni (Crochet, 2020; 2021; 2022). Úrkomu- og hitafarsbreytingar frá CORDEX verkefningu (CORDEX, 2012) voru notaðar sem innlagsgögn. CORDEX notaði losunarsviðsmyndirnar RCP4.5 og RCP8.5 (sjá grein 3C í V2018) til að reikna veðurfarsbreytingar á þéttu reiknineti, m.a. fyrir Ísland (sjá kafla 4.5 í V2018). Niðurstöður

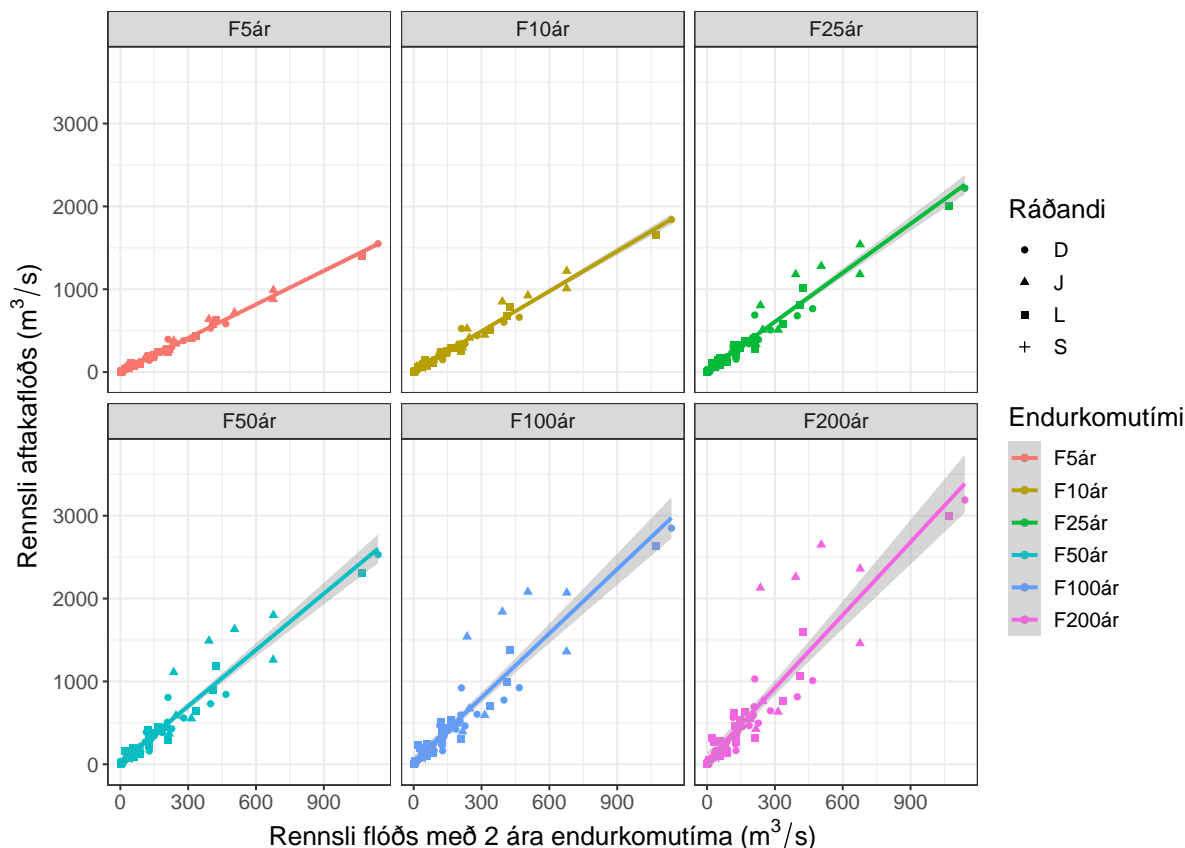


Mynd 2.11: Þróun rennslis í nokkrum dragám á tímabilinu 1980–2022 ( $m^3/s$ ). Ársmeðaltal dagrennslis (punktar) og útjafnaður (loess) ferill (bláar línur).

sýna vel áhrif minni snjóþekju og aukið hlutfall rigningar í úrkomu með hækkandi hitastigi. Samkvæmt reikningunum munu flóð færast á milli árstíða þannig að fjöldi flóða mun aukast yfir haust- og vetrarmánuði en vor- og sumarflóðum fækkar. Þegar líður á öldina minnkar rennsli á vormánuðum, rennslistoppar vorleysinga minnka og færast fyrir á árið. Í hlýrri sviðsmýndinni (RCP8.5) hverfa vorleysingar í lok aldarinnar. Samfara minni flóðtoppum að vori og sumri mun rennsli yfir haust- og vetrarmánuði aukast. Á vatnasviðum, þar sem núverandi hámarksrennsli ársins er jafnan í vorleysingum, hefur þessi tilfærsla töluverð áhrif þar sem hámarksrennsli ársins mun þá í auknum mæli eiga sér stað að vetri eða hausti. Niðurstöður sýna ekki mikla breytingu í sumarrennsli en í þessari rannsókn var ekki skoðað vatnasvið með umtalsverðum jökulþætti í afrennsli. Rennsli flóða með tiltekinn endurkomutíma mun aukast um minna en 20% á þeim vatnasviðum sem voru skoðuð. Slík aukning hefur þó veruleg áhrif því munur á rennsli sjaldgæfra flóða er oftast minni en þetta, til dæmis er minna en 20% munur á rennsli í flóðum með 50 og 100 ára endurkomutíma og á rennsli flóða með 100 ára og 200 ára endurkomutíma. Það er líka innan við 20% munur á rennsli í flóðum með 10 ára og 25 ára endurkomutíma í



## Rennsli aftakaflóða móti rennsli flóðs með 2 ára endurkomutíma



Mynd 2.12: Reiknað rennsli flóða með 5, 10, 25, 50, 100 og 200 ára endurkomutíma sem fall af rennsli flóðs með tveggja ára endurkomutíma fyrir 63 rennslisráðir (Hilmar Björn Hróðmarsson og Tinna Þórarinsdóttir, 2018). Rennslisráðir eru merktar eftir ráðandi tegund vatnsfalls, D: dragá, J: jökulá, L: lindá og S: afrennsli úr stöðuvatni.

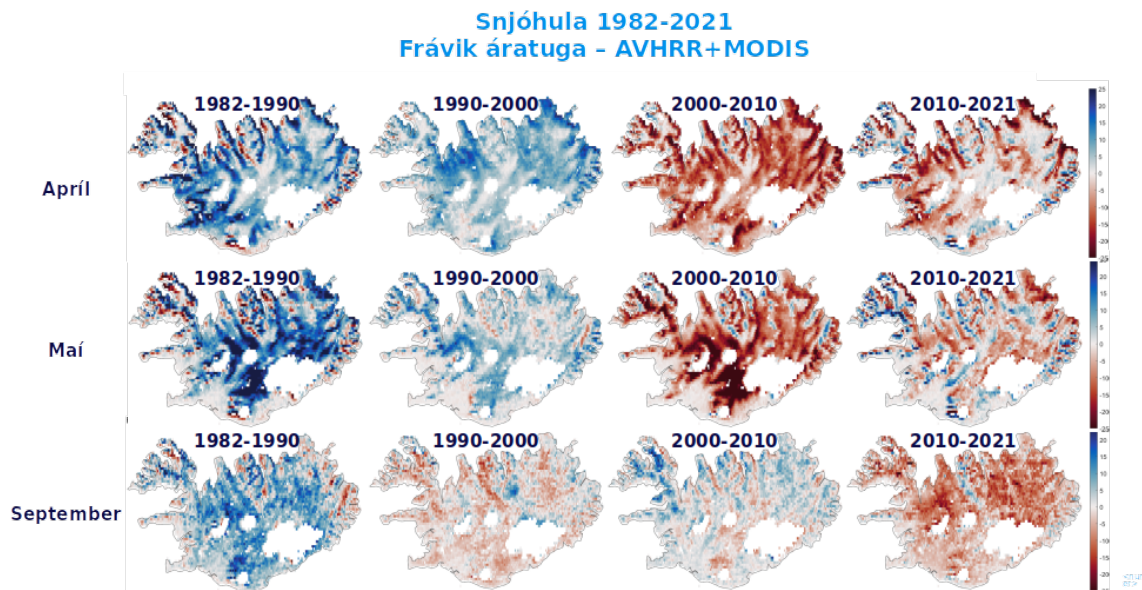
meirihluta rennslisraða (um 60%) sem mynd 2.12 og tafla 2.3 byggjast á. Flóð sem nú hafa tiltekinn endurkomutíma gætu gerst allt að tvöfalt oftár samkvæmt framtíðarsviðsmyndum fyrir 21. öld. Að aftakaatburðir af þeirri stærð sem nú er sjaldgæf verði algengari í framtíðinni er í samræmi við umfjöllun í 3.2.3 og einnig við niðurstöður IPCC (2021).

### 2.2.2 Breytingar á snjóhulu

Rannsókn á snjóhulu- og snjóþykktarbreytingum frá því snemma á 20. öldinni (Eythorsson o.fl., 2023) sýnir aukningu í úrkomu samfara hlýnun. Niðurstöðurnar sýna að hlutfall snjóhulu í mælineti Veðurstofu Íslands jókst á kalda tímabilinu á síðari hluta 20. aldar, en minnkaði aftur þegar fór að hlýna á 10. áratug síðustu aldar. Eftir aldamótin jókst hlutfall snjóhulu aftur en bent er á að samfara fækkun á mönnum veðurstöðvum í upphafi þessarar aldar fækkaði stöðvum sem mæla snjóhulu og snjóþykkt. Eythorsson o.fl. (2023) reyna að mæta þessu með því að nota bæði gervitunglagögn og loftslagslíkön til þess að meta líklega þróun til loka þessarar aldar. Gervitunglagögnin sýna sambærilega aukningu í snjóhulu eftir aldamótin, sem bendir til þess að um raunverulega aukningu sé að ræða, en ekki bara breytingar á mælineti. Niðurstöður um snjóþykkt eru sambærilegar, eftir minnkandi snjóþykkt í lok 20. aldarinnar jókst hún aftur á síðasta áratug.

Mynd 2.13 sýnir breytingar á snjóhulu fyrir vor- og haustmánuði milli áratuga frá 1980 til 2021. Myndin sýnir greinilega að þrátt fyrir ofangreindar sveiflur í snjóhulu eru áberandi frávik

milli landshluta og árstíma. Minni snjóhula er greinileg eftir aldamótin, en fyrir aldamótin er munur á þróun vormánuða og haustmánuða áberandi.

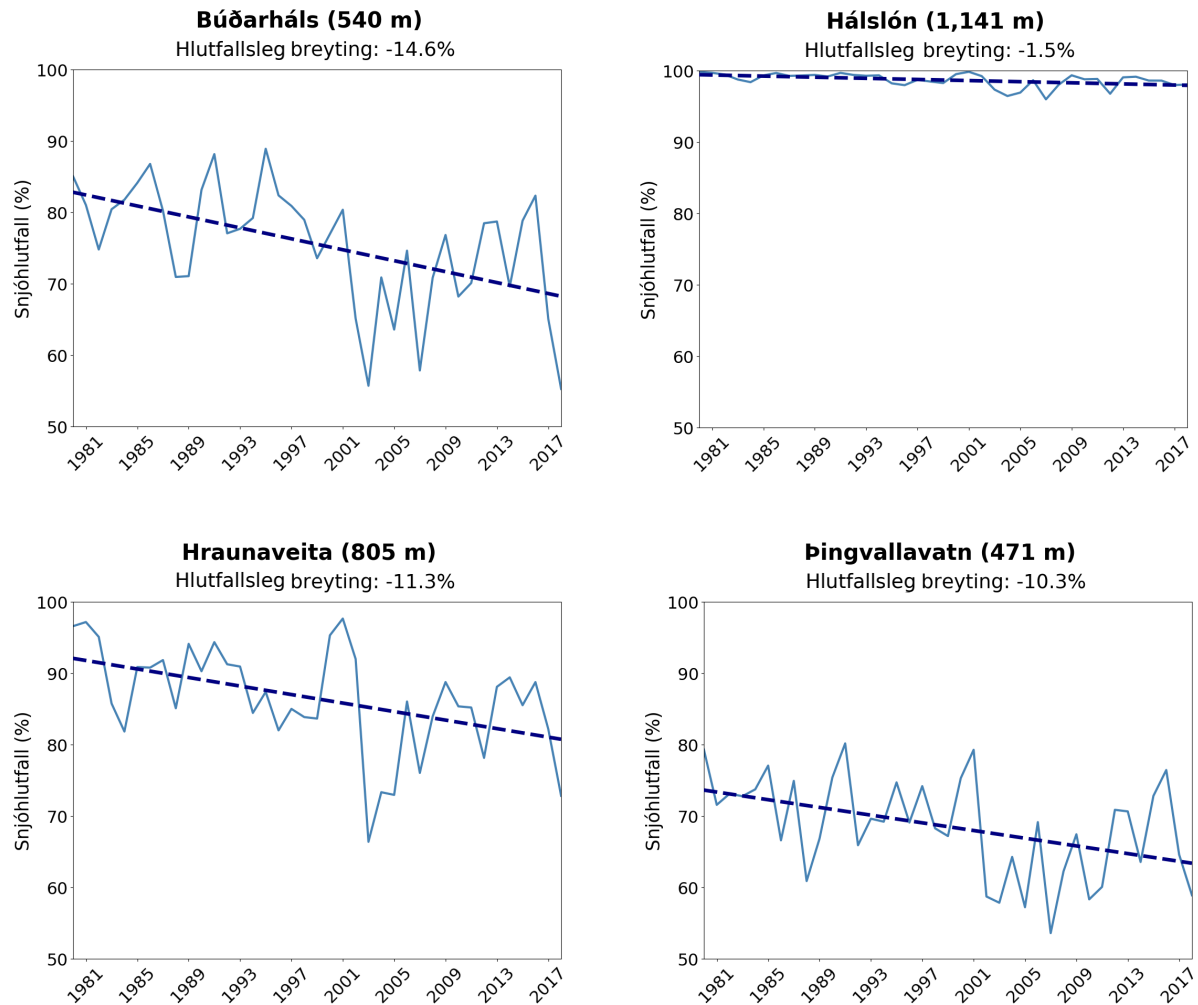


Mynd 2.13: Breytingar í snjóhulu milli áratuga fyrir þrjá mánuði ársins, apríl, maí og september. Fyrir hvern mánuð sýnir myndin frávík meðaltals viðkomandi áratugar frá meðaltali alls tímans. Blár litur þýðir meiri snjóhula, rauður litur minni. (Mynd: Andri Gunnarsson, Landsvirkjun).

Þróun á snjóhlutfalli, þ.e. hlutfalli þeirra daga þar sem úrkoma fellur sem snjór, á fjórum vatnasviðum sem standa mishátt er sýnd á mynd 2.14. Gögnin eru frá ICRA greiningunni (Massad o.fl., 2022) og sýna myndirnar að þróunin er háð hæð því hitastig stjórna hvort úrkoma fellur sem rigning eða snjór. Á vatnasviðinu sem hæst stendur (Hálslón, 1141 m.y.s) er snjóhlutfallið hæst og lækkaði einungis um 1.5% frá 1980 til 2017. Snjóhlutfallið lækkaði um 14.6% á vatnasviði Hraunaveitu (805 m.y.s.), 11.3% á vatnasviði Búðarháls (540 m.y.s.) og 10.3% á vatnasviði Þingvallavatns (471 m.y.s.). Fleiri rannsóknir sýna að snjóhlutfall hefur farið lækkandi og niðurstöður loftslagslíkana (sjá nánar 3.1) sýna að með áframhaldandi hlýnun má gera ráð fyrir að hlutfall snævar í úrkomu minnki og muni halda áfram að lækka (Eythorsson o.fl., 2023). Breytingar á snjóhlutfalli geta haft mikil áhrif á árstíðabundið rennsli í ám og aftakarigning sem fellur að vetri getur sett af stað skyndiflóð falli hún á frosna jörð. Dæmi eru um að langur rigningakafli að vetri valdi skriðuföllum, sbr. umfjöllun um skriðufallið á Seyðisfirði í desember 2020 í grein 2.1.3.1. Eins og kemur fram í grein 2.2.1 má gera ráð fyrir tíðari vetrarfloðum haldi snjóhlutfallið áfram að falla.

### 2.2.3 Breytingar á afrennsli vegna hops jökla

Rætt var um mögulegar breytingar á afrennsli vegna rýrnunar jökla í V2018. Í töflu 5.3 eru sýnd dæmi um jökulár sem skipt hafa um farveg og í töflu 5.4 er listi yfir ár þar sem breytingar á farvegum eru yfirvofandi. Í grein 2.4 er rætt um jöklabreytingar á Íslandi og framtíðarhorfur þeirra. Víða við jökla eru stöðuvötn bak við ísstíflur, þar verða oft jökulhlaup við það að vatnið kemst undir eða framhjá ísstíflunni. Stærð slíkra hlaupa er í hlutfalli við rúmmál stöðuvatnsins. Ísstífluð stöðuvötn á Íslandi skipta tugum. Kunnust þeirra eru Grímsvötn í miðjum Vatnajökli og Grænalón sem Skeiðarárjökull stíflaði. Þegar jöklarnir hopa minnka ísstíflur, t.d. hefur Grænalón ekki myndast aftur eftir að það tæmdist í jökulhlaupi árið 2012. Mjög ólíklegt er nú talið að Grænalón geti aftur safnað vatni og þaðan verði jökulhlaup (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2020). Jökulhlaup úr Grímsvötnum hafa orðið oft á síðustu áratugum og er fylgst grannt með stærð

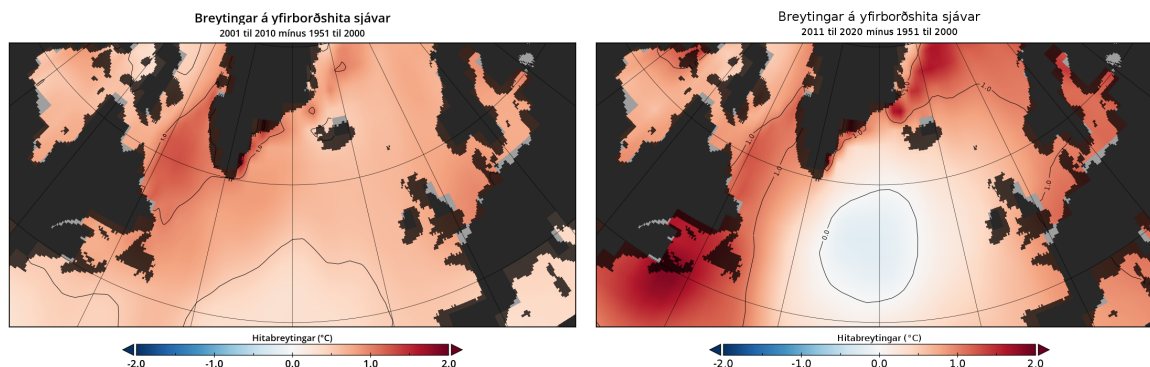


Mynd 2.14: Snjóhlutfall á fjórum vatnasviðum. Lækkandi hlutfall þýðir að meira af úrkomu fellur sem regn og minna sem snjór. (Byggt á mynd 9 í Massad o.fl., 2022)

stöðuvatnsins. Nú er metið að ekki safnist mikið meira en um 1 km<sup>3</sup> af vatni í Grímsvötnum áður en hleypur úr þeim (Finnur Pálsson og Eyjólfur Magnússon, 2021; 2022) Jaðarlónum fyrir framan hopandi jökla fjölgar, einkum við suðurhluta Vatnajökuls, þau stækka og farvegir fallvatna þaðan eru stöðugri (Guðmundsson o.fl., 2020). Í nokkur þessara lóna kelfir jökulsporðurinn. Jökulsárlón á Breiðamerkursandi er þeirra stærst, um 35 km<sup>2</sup> árið 2022. Skoðun á botnkortum og aðstæðum við Skeiðarárjökul benda til að færsla Súlu í Gígju á Skeiðarársandi sé varanleg til áratuga (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2020) og einnig er ólíklegt að vatnaskil Hverfisfljóts og Skaftár nærri jökuljaðri breytist á næstunni (Finnur Pálsson o.fl., 2019).

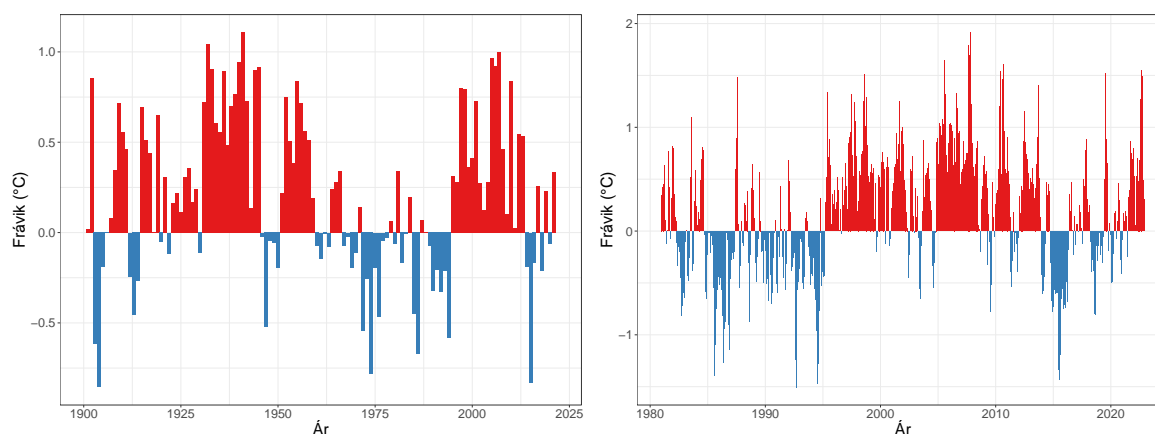
## 2.3 Ástand sjávar

Fjallað er ítarlegar um ástand sjávar umhverfis landið í kafla 5 en hér verður tæpt á hitabreytingum í Norður-Atlantshafi á síðustu áratugum, en þær má setja í samhengi við hitabreytingar á landi (sjá grein 2.1.2) og líklegar breytingar í Norður-Atlantshafi á öldinni (sjá grein 3.3.2).



Mynd 2.15: Yfirborðshlýnun sjávar í Norður-Atlantshafi frá aldamótum. Myndin til vinstri sýnir meðaltalshlýnun árána 2001–2010, miðað við viðmiðunartímabilið 1951–2000, og myndin til hægri sýnir sambærilega niðurstöðu fyrir tímabilið 2011–2020. Byggt á ERSSTV5 endurgreiningu sjávarhita (Huang o.fl., 2017).

Heimshöfin hlýnuðu verulega á síðustu öld, mynd 2.15 sýnir að í Norður-Atlantshafi hélt sú hlýnun áfram á fyrsta áratug þessarar aldar. Hlýnunin norður af landinu var meiri en suður af því og á öðrum áratug þessarar aldar herti á hlýnuninni norður af landinu, en það hægðist á henni og hún stöðvaðist suður af landinu. Á stóru svæði sunnan við Grænland varð kólnun, sem hefur fengið nokkra umfjöllun í vísindaheiminum (Josey o.fl., 2018), og í fjölmiðlum, þar sem svæðið hefur verið kallað *blái bletturinn*. Á þessu svæði hafa í gegnum tíðina verið umtalsverðar sveiflur í sjávarhita, eins og sjá má á mynd 2.16. Myndin sýnir meðalhita á svæði sem afmarkast af 48–58°N og 20–35°V en það svæði nær að þekja bláa blettinn (Josey o.fl., 2018).



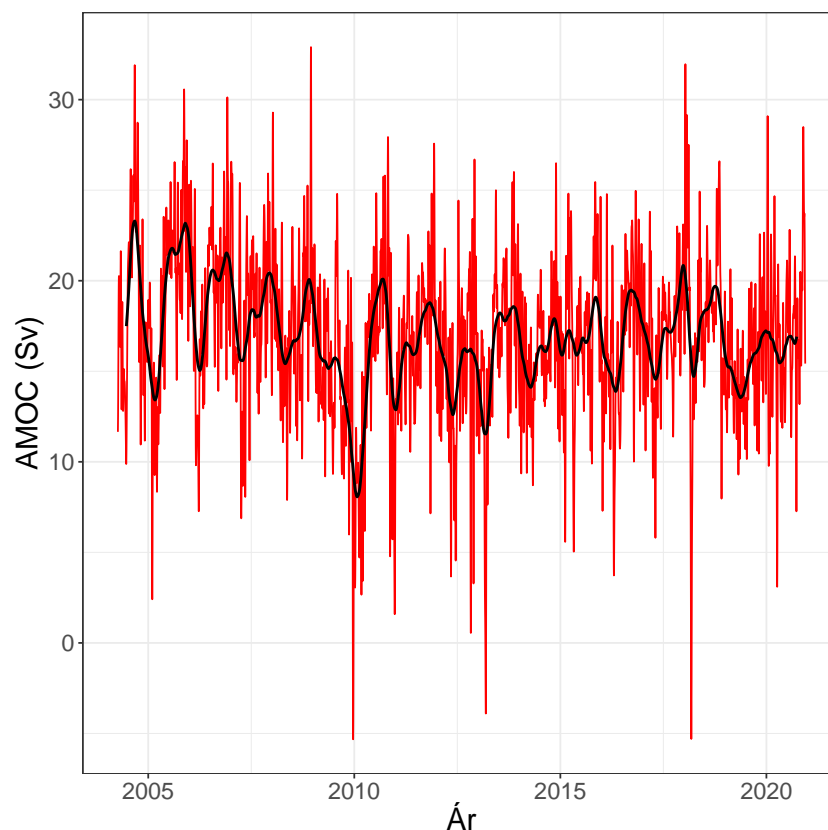
Mynd 2.16: Sveiflur í sjávarhita á svæðinu 48–58° N og 20–35° V frá aldamótunum 1900. Myndin til vinstri sýnir frávik ársmeðaltals yfirborðshita sjávar frá meðaltalinu 1971–2000 fyrir tímabilið 1900–2022 og myndin til hægri sýnir frávik í mánaðarhita fyrir tímabilið 1980–2022. (Framlenging á mynd 3 í Josey o.fl. (2018), gögn frá ERSSTV5 um endurgreiningu sjávarhita (Huang o.fl., 2017)).

Þessi kólnun hefur oft verið rædd í samhengi við samdrátt í lóðréttri hringrás í Norður-Atlantshafi (veltihringrásin, AMOC) eins og rætt var í grein 4C í V2018. Mælingar á styrk

Þeirrar hringrásar sýna að á tímabilinu 2004 til 2010 dró úr styrk innflæðis á hlýsjó til Norður-Atlantshafsins yfir 26°N. Eftir 2010 breyttist styrkurinn lítið (Smeed o.fl., 2016). Þessi þróun var sýnd á mynd 4.35 í V2018 og mynd 2.17 sýnir framlengingu á þeirri tímaröð til ársins 2020. Myndin sýnir að innflæðið hefur að jafnaði haldist nokkuð stöðugt síðasta áratuginn.

Loftslagslíkön sýna að með hlýnun heimshafanna er líklegt að það dragi úr styrk AMOC. Það myndi að öllu jöfnu kæla hluta Norður-Atlantshafsins, eða a.m.k. draga úr hlýnun, því samfara hringrásinni er varmaflæði til norðurs í Atlantshafi. Áhyggjur af samdrættinum tengdust mögulegu hruni þessarar hringrásar, sem gæti leitt til skarprar kólnunar á norðurslóðum, jafnvel þótt hnattræn hlýnun ætti sér stað á sama tíma. Mynd 4.36 í V2018 sýnir fremur hægfara samdrátt í veltihringrásinni í niðurstöðum margra CMIP5 líkana og byggt á þeim niðurstöðum var í AR5 (og SROCC) metið að hrun veltihringrásarinnar á þessari öld sé *mjög ólíklegt*. Umræðu um veltihringrásina má finna í AR6-WG1 (Fox-Kemper o.fl., 2021) og sérstaklega eru breytingar á henni ræddar í grein 9.2.3.1 í AR6-WG1.

Rannsóknir síðustu ára hafa dregið úr vissu um að hrun sé *mjög ólíklegt*. Í AR6-WG1 hefur matinu því verið breytt og nú er talin *miðlungs vissu* fyrir því að hrun veltihringrásarinnar eigi sér ekki stað á öldinni. Hrun veltihringrásarinnar myndi án efa hafa í för með sér verulegar breytingar skilyrða í Norður-Atlantshafi og valda kólnun. Hér eru þó tvö atriði sem taka þarf fram. Í fyrsta lagi er mikilvægt að hafa í huga að jafnvel þótt veltihringrásin hrynji ekki eru sveiflur sjávarhita sem ná yfir nokkur ár eða áratugi líklegar (sjá umfjöllun í grein 3.3.2). Mynd 2.16 sýnir að slíkar sveiflur eru ekki undantekning heldur reglan. Myndin sýnir einnig að á síðustu árum hefur hlýnað á svæðinu þar sem kólnun var áður áberandi (þ.e. á bláa blettinum).

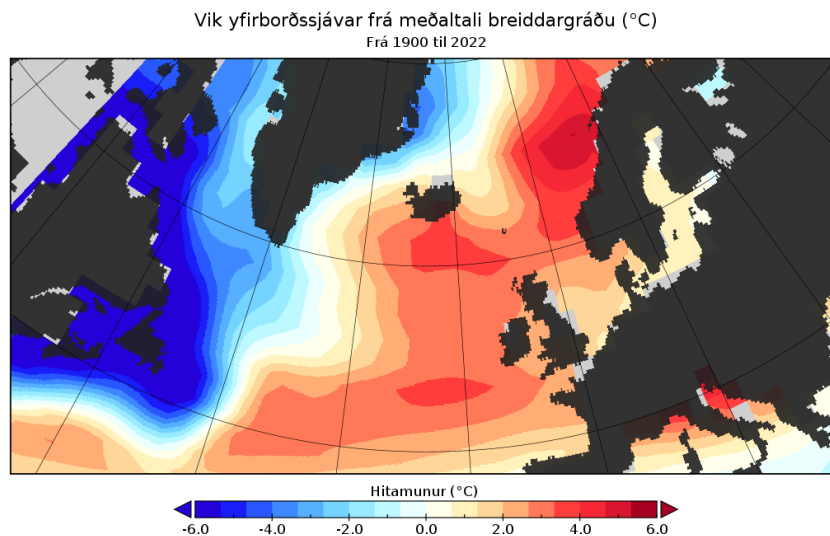


Mynd 2.17: Styrkur veltihringrásarinnar (Sv) frá 2004 til 2020. Myndin sýnir niðurstöður mælinga á sniði í Norður-Atlantshafi við 26°N. Rauða línan sýnir niðurstöður mælinga og svarta línan sýnir útjafnaðan feril. (Framlenging á mynd 4.35 í V2018, gögn frá Smeed o.fl. (2016)).

Í öðru lagi skiptir máli að hafa í huga að fleiri þættir en veltihringrásin hafa áhrif á hitafar í Norður-Atlantshafi. Í V2018 er vitnað í bók Þorvaldar Thoroddsen: Lýsingu Íslands, þar sem

segir: *Á Íslandi er úthafsveður og eyjaloft miklu mildara og hlýrra en mætti búast við eftir legu landsins á hnettinum* (Þorvaldur Thoroddsen, 1911). Mynd 4.3 í V2018 sýnir hvernig loftthiti við yfirborð jarðar vikir frá meðaltali breiddargráðunnar. Mynd 2.18 sýnir sambærileg frávik fyrir yfirborðshita sjávar í Norður-Atlantshafi. Rétt eins og myndin í V2018 sýnir mynd 2.18 að á vesturhluta Norður-Atlantshafsins er mun hlýrra en austan til. Segja má að frá austurströnd Grænlands og suður fyrir Nova Scotia sé sjór kaldari en að meðaltali á breiddargráðunni, en austan þessa svæðis sé sjór hlýrri. Þessi svæði samsvara áhrifasvæðum kaldra hafstrauma sem streyma meðfram Austur-Grænlandi og austurströnd Kanada. Hlýju svæðin liggja á áhrifasvæði Norður-Atlantshafsstraumsins sem er framlenging á Golfstraumnum sem liggur meðfram strönd Norður Ameríku.

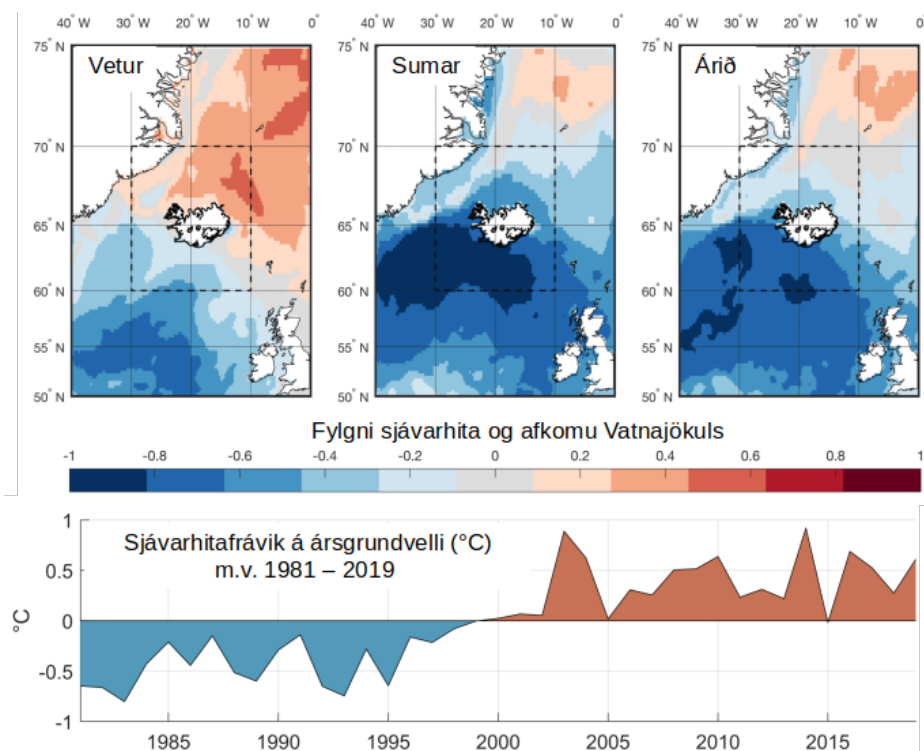
Í almennt umræðu er þetta straumakerfi oft kallað Golfstraumurinn, en í raun á það nafn aðeins við hluta þeirra hafstrauma sem flytja hlýjan sjó frá austurströnd Norður-Ameríku til norðurs og austurs í Norður-Atlantshafi. Eftir sem áður er mikilvægt að hafa í huga að óháð því hvort þetta kerfi er kallað Golfstraumskerfið eða Norður-Atlantshafsstraumurinn þá er veltihringrásin hluti af yfirborðshringrásinni og stöðvun eða samdráttur veltihringrásarinnar myndi hafa áhrif á það hversu mikinn varma hafið flytur til norðurs og austurs. Mynd 2.18 sýnir að við suðurströnd Íslands er sjávarhitinn 2–4 °C hlýrri en meðaltal breiddargráðunnar. Hluti þessarar umframhlýnunar stafar af varmaflutningi hafstrauma, þótt fleiri þættir hafi áhrif (Seager o.fl., 2002). Mögulegt hrún eða samdrátt veltihringrásarinnar þarf að skoða í þessu ljósi. Áhrif veltihringrásarinnar eru einungis hluti af heildaráhrifum sjávar og því takmörk fyrir því hversu mikil kólnun hlytist af samdrætti veltihringrásarinnar við Íslandsstrendur. Þetta er rætt nánar í grein 3.3.2 þar sem farið er yfir niðurstöður loftslagslíkana og mögulega kólnun í Atlantshafi.



Mynd 2.18: Hitavik breiddargráðu, þ.e. mismunur yfirborðshita sjávar í Norður-Atlantshafi og á meðtali sjávarhita á breiddargráðunni. (Sjávarhitaútgáfa af mynd 4.3 í V2018, gögn frá ERSSTV5 endurgreiningu sjávarhita (Huang o.fl., 2017) fyrir árabilið 1900 til 2022.)

Hitasveiflur í hafi geta haft margvísleg áhrif á náttúruferla hér á landi (sjá t.d. grein 4C í V2018). Nokkrar rannsóknir hafa sýnt samband breytileika í yfirborðssjávarhita og afkomu jökla (t.d. Steingrímur Jónsson, 2023; Björnsson o.fl., 2013). Fylgni afkomu Vatnajökuls og sjávarhita umhverfis landið er sýnd á mynd 2.19. Fylgnin að vetri til er jákvæð norðan við landið, sem þýðir að hlýnun sjávar þar eykur á ákomuna á jöklinum, en fylgnin við sjávarhita suður og vestur af landinu er neikvæð á sumrin. Það þýðir að hlýindi sjávar sunnan og vestan við landið auka bráðnun jökulsins, sem leiðir til lélegri afkomu.

Mikilvægt er að hafa í huga að víxlhrif loftþjúps og hafs eru margþætt og erfitt getur verið að greina milli áhrifaþátta. Þannig hafa vindáttir áhrif á það hvort staðbundnar hitabreytingar sjávar fjær landinu ná að berast til landsins. Nánar er rætt um hvaða hafsvæði hafa mest áhrif á hitafar á landinu í grein 4C í V2018.



Mynd 2.19: Fylgni sjávarhita umhverfis landið og afkomu Vatnajökuls fyrir vetur, sumar og ársmeðaltal (efri myndir). Neðri mynd: Þróun sjávarhita umhverfis landið síðustu áratugi (sjá reit afmarkaðan með strikalínu á efri mynd). (Mynd: Andri Gunnarsson, Landsvirkjun).



Mynd 2.20: Morsárjökull 1931 (til vinstri, ljósm. Emily Todtmann) og 2019 (til hægri, ljósm. Hrafnhildur Hannesdóttir). Á þessu tímabili hefur Morsárjökull hopað um tvo km. Dökkt yfirborð jökulsins á nýrri myndinni er vegna skriðu sem féll á jökulinn árið 2007.

## 2.4 Jöklar

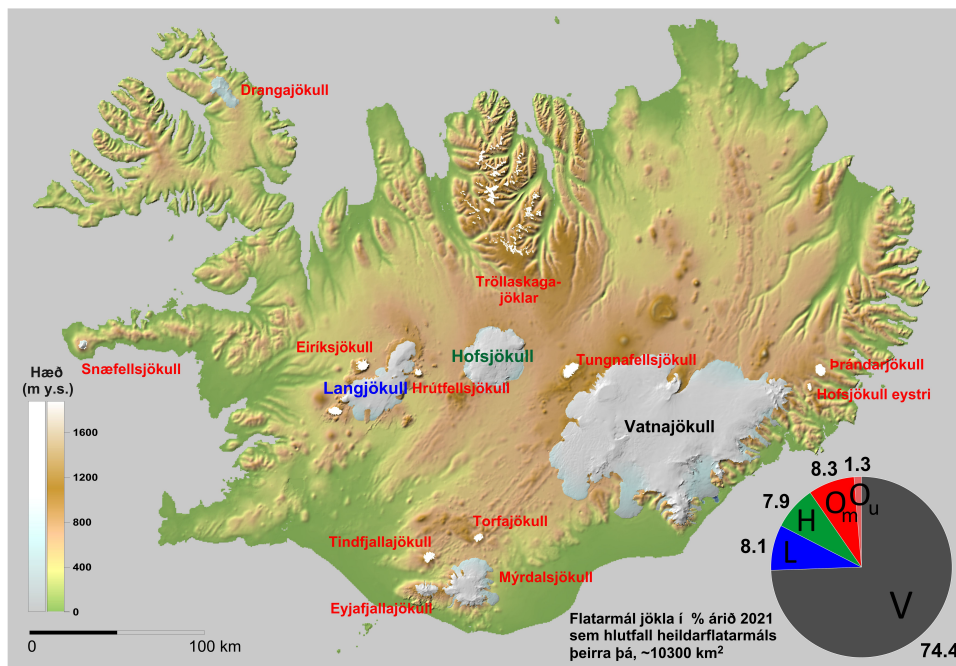
Í tveimur síðustu skýrslum vísindanefndar (V2008 og V2018) var birt yfirlit um niðurstöður rannsóknna á veðurfari, vatnafari, jöklabreytingum og öðrum umhverfisþáttum hér á landi. Íslensku jöklarnir hafa haldið áfram að hörfa en breytileiki á milli ára jókst og einnig hægði nokkuð á rúmmálstapi jöklanna eftir árið 2010 (Aðalgeirsdóttir o.fl., 2020). Heildarmassi allra jökla á Íslandi samsvarar nú um 9 mm af jafndreifðri sjávarstöðuhækkun og heildarrúmmál þeirra er nærri 3400 km<sup>3</sup> íss. Heildarflatarmál helstu jökla landsins er sýnt á mynd 2.21. Frá ritunartíma V2018 hafa nokkrar vísindagreinar um ástand og þróun íslenskra jökla komið út og þær skerpa myndina af hörfun jöklanna og nokkrar framtíðarspár hafa verið settar fram. Myndir 3 og 2.20 sýna tvö þör sögulegra ljósmynda af Morsárjökli og Skaftár- og Svínafellsjökli frá mismunandi tímum og sést vel hversu miklar breytingar hafa orðið á jökulsporðunum á u.þ.b. síðustu 100 árum.

### 2.4.1 Ástand og breytingar frá lokum litlu ísaldar

Frá aldamótunum 2000 hafa íslensku jöklarnir tapað tæplega 850 km<sup>2</sup> en heildarflatarmál jökla árið 2021 var um 10.300 km<sup>2</sup> (Hrafnhildur Hannesdóttir o.fl., 2021, uppfærðar tölur). Frá hámarksútbreiðslu undir lok 19. aldar hafa jöklarnir minnkað um 2300 km<sup>2</sup>, sem samsvarar 19% af hámarksflatarmálinu. Vatnajökull tapaði um 13% af flatarmáli sínu á tímabilinu ~1890–2022 en hinir stóru jöklarnir 20–50% og þeir minni 35–80%. Nú þegar hafa nokkrir tugir lítilla jökla horfið, eða eftir eru einungis leifar sem hættar eru að skriða undan eigin þunga, og hefur hvarf Okjökuls líklega vakið mesta athygli. Minnisvarði um þann jökul var settur upp á Okinu 18. ágúst 2019. Á Tröllaskaga eru horfnir 13 jöklar sem töldust nægilega merkilegir til þess að ganga undir eigin nafni, sex á Austfjörðum, sex nærri Vatnajökli, sjö í Kerlingarfjöllum, tveir nærri Langjökli og þrír á öðrum svæðum landsins. Flestir þessara jökla voru litlir með flatarmál á bilinu 0,1–1 km<sup>2</sup> í upphafi þessarar aldar. Flatarmálsbreytingar nokkurra stærri jöklanna eru sýndar á mynd 2.22. Gögnin eru frá mörgum rannsóknahópum sem hafa gert mælingar og dregið útlínur jöklanna af kortum, loftmyndum og gervitunglagögnum. Stökkið uppávið, sem sést í báðum efri myndunum, er vegna framhlaups Brúarjökuls 1963–1964 (Björnsson o.fl., 2003).

Eins og rakið er í grein 2.2.3 veldur hörfun jökla því að ný jaðarlón myndast fyrir framan þá og eldri lón stækka. Mörg dæmi þessa má finna við sunnanverðan Vatnajökul og er samanlagt flatarmál sporðlóna þar nú orðið um 60 km<sup>2</sup> (Guðmundsson o.fl., 2020). Stærsta lónið er Jökulsárlón á Breiðamerkursandi sem var um 35 km<sup>2</sup> árið 2022 en það byrjaði að myndast um 1933.





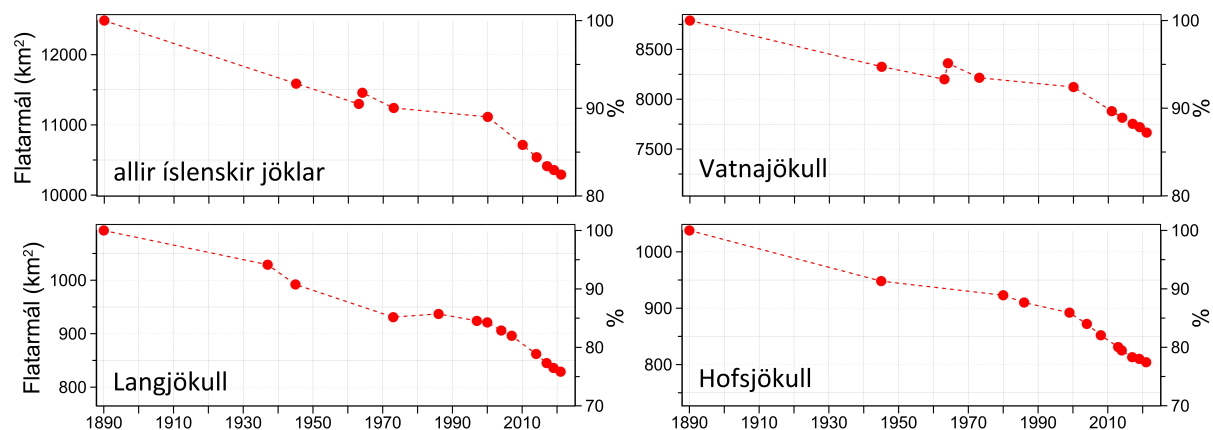
Mynd 2.21: Helstu jöklar á Íslandi. Sýnd er flatarmálsskipting þeirra sem hlutfall af heildarflatarmáli árið 2021 sem var ~10.300 km<sup>2</sup>. Vatnajökull (V) er langstærstur jöklanna, 74.4%, Langjökull (L) og Hofsjökull (H) eru um 8% hvor, en þeir minni eru samtals <10% af heildarflatarmáli (O<sub>m</sub> eru aðrir jökullar sem eru mældir og O<sub>u</sub> eru aðrir ómældir jökullar). Myndin er uppfærð útgáfa af mynd úr yfirlitsgrein um afkomu jöklanna síðan ~ 1890 (Aðalgeirsdóttir o.fl., 2020).

Samkvæmt síðustu sporðamælingum á vegum sjálfbodaliða Jökларannsóknafélags Íslands eru flestir jökulsporðar að hörfa (Hrafnhildur Hannesdóttir, 2022). Af þeim hopaði Skeiðarárjökull mest 2021–2022, eða um 600 m þar sem mest var, við austanverðan sporðinn en á undanförunum árum hafa brotnað stórir flákar framan af sporðum margra jökla vegna rýrnunar þeirra. Skaftafellsjökull og Breiðamerkurjökull hopuðu einnig um hundruð metra þar sem kelfir af sporðunum í lón. Nánari upplýsingar um jöklabreytingar er að finna á nýrri jöklahefingisá<sup>2</sup> sem er samstarfsverkefni þeirra sem stunda jöklahefingar á Íslandi. Þar er að finna mælingar og yfirlit um jöklahefingarnir, þ.m.t. sporðamælingar, afkomumæliraðir, jökuljaðra, safn ljósmynda og margvíslegan fróðleik um jökla.

Yfirborðsafkoma meginjökla landsins, Vatnajökuls, Hofsjökuls og Langjökuls, hefur verið mæld árlega síðan á árabílinu 1988–1997 að reglulegar mælingar hófust. Óreglulegar mælingar hafa einnig verið gerðar á Mýrdalsjökli, Drangajökli, Eyjafjallajökli og á nokkrum jöklum á Tröllaskaga og á Suðurlandi. Jökulárið 2021–2022 var yfirborðsafkoma mæld á 123 stöðum á stærri jöklum landsins (Andri Gunnarsson o.fl., 2022). Mælingar á Vatnajökli og Langjökli eru gerðar í samstarfi Jarðvísindastofnunar Háskólans og Landsvirkjunar og á Hofsjökli eru mælingar gerðar af Veðurstofu Íslands. Niðurstöður mælinga á yfirborðsafkomu þessara þriggja jökla (reiknað fyrir allt yfirborðið út frá punktmælingum og síðan heildað yfir hvern jökul) eru sýndar á mynd 2.23. Myndin sýnir að afkoma jöklanna hefur að mestu verið neikvæð frá jökulárinu 1994–1995. Áberandi eru áhrif Eyjafjallajökulgossins 2010; þá féll gjóska á jöklana sem lækkaði endurkaststuðulinn (*e. albedo*) víðast hvar og jökul sumarleysingu. Eftir 2010 hefur sumarleysing verið heldur minni, heildarafkoman var jákvæð jökulárið 2014–2015 og jökulárið 2021–2022 voru jöklarnir nærri því að vera í jafnvægi.

Til viðbótar við árlegar afkomumælingar eru veðurstöðvar reknar á jökluunum. Á bílinu

<sup>2</sup>Sjá vefsvæðið [www.islenskirjoklar.is](http://www.islenskirjoklar.is)



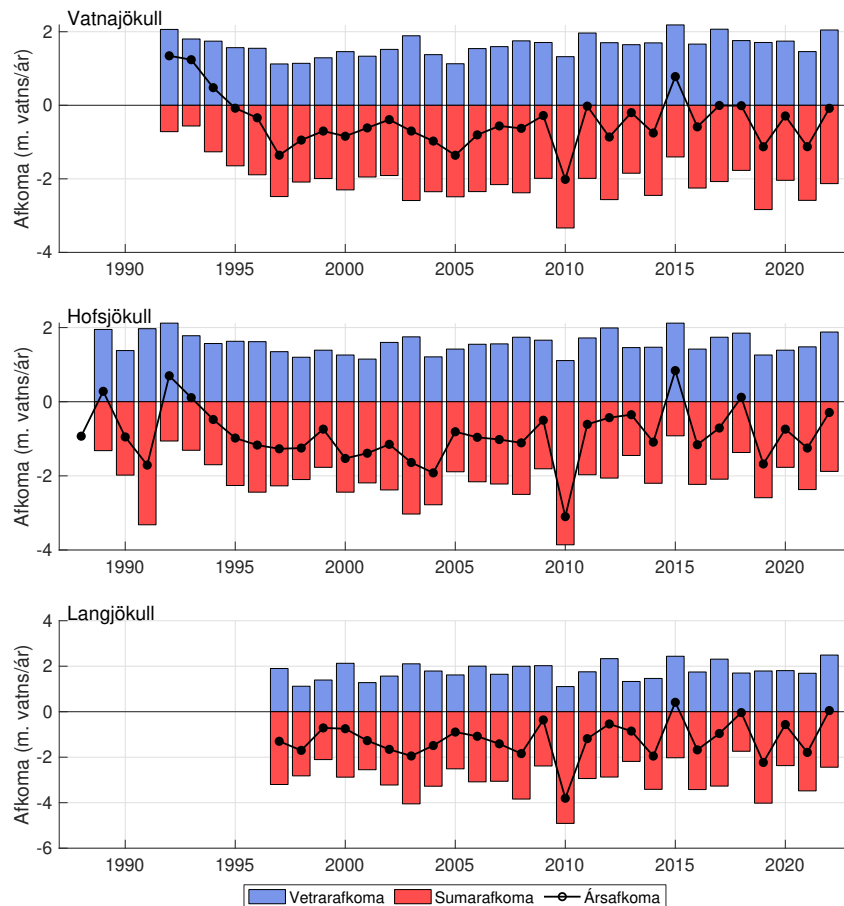
Mynd 2.22: Flatarmálsbreytingar stærstu jökla á Íslandi frá 1890: efst til vinstri heildarflatarmál allra jökla Íslands, efst til hægri Vatnajökull, sem er langstærstur, og á neðri myndunum tveimur eru sýndar breytingar á Langjökli og Hofsjökli. Á vinstri ás er flatarmálið í km<sup>2</sup> en á hægri ás er hlutfallsleg breyting. (Gögnin eru aðgengileg á vefsíðunni [www.islenskirjoklar.is](http://www.islenskirjoklar.is). Á vefsíðunni eru einnig gögn fyrir fleiri jökla en sýndir eru hér). Stökkið upp í efri myndunum er vegna framhlaups Brúarjökuls sem varð 1963–1964 og er ekki loftslagstengt.)

4–6 veðurstöðvar eru reknar allt árið á Vatnajökli en á vorin eru til viðbótar settar upp 5–7 veðurstöðvar á Vatnajökli, Hofsjökli, Langjökli og Mýrdalsjökli sem eru teknar niður á haustin. Þær mæla alla þætti orkubúskapar við yfirborð; hita, raka, vindhraða, inn- og útgeislun á stutt- og langbylgjum og á sömu stöðum er einnig mælt hvernig yfirborðið lækkar yfir sumarið. Mælingarnar eru notaðar til rauntímavöktunar á jöklum yfir leysingartímabilið en hafa einnig verið notaðar til að sannreyna og kvarða m.a. loftslagslíkön, vatnafars- og jöklalíkön, auk afurða úr fjarkönnun (Schmidt o.fl., 2020; Belart o.fl., 2020; Gunnarsson o.fl., 2021; Noël o.fl., 2022; Berthier o.fl., 2023). Til þess að reikna leysingu á yfirborði jökla þarf endurkaststuðull yfirborðsins að vera þekktur og gervitunglagögn hafa nýst vel til að meta þann stuðul, sem er mjög breytilegur á milli ára (Gunnarsson o.fl., 2021).

Á mynd 2.24 er sýnt samhengi vetrar- og sumarafkomu við heildarafkomu Vatnajökuls, Langjökuls og Hofsjökuls. Myndirnar sýna með lóðréttri strikalinu og tölum þá vetrarafkomu (ræðst að mestu af snjósöfnun) og sumarafkomu (ræðst að mestu af yfirborðsleysingu) sem hver jökull þyrfti að hafa til þess að hann sé í jafnvægi, miðað við núverandi lögun. Á þeim árum sem mælingarnar hafa verið gerðar hefur meðaltal vetrarafkomu allra jöklanna verið of lágt til að jafnvægi haldist, á Vatnajökli 93%, á Langjökli 86% og á Hofsjökli 84% af jafnvægisgildinu. Á sama tíma hefur meðaltal sumarleysingar verið hátt, þ.e. 119% umfram jafnvægisgildi á Vatnajökli, 144% á Langjökli og 145% á Hofsjökli. Hvort tveggja hefur stuðlað að rýrnun jöklanna þau ár sem mælingarnar spanna.

Hafa þarf í huga að auk leysingar á yfirborði bráðnar ís vegna jarðhita, eldgosa og varma vegna stöðuorkutaps við ísskrið en einnig brotnar framan af jökulsporðum sem ganga út í jadalón og er það kallað kelfing. Þessi leysing er mismikil en reiknast á bilinu 5.5–9 cm vatnsgildis á ári fyrir Langjökul, Hofsjökul og norður- og vesturhluta Vatnajökuls, en rúmlega 30 cm vatnsgildis á ári fyrir suðurhluta Vatnajökuls og Mýrdalsjökul (Tómas Jóhannesson o.fl., 2020). Samtals nemur leysing af þessum toga um 2 Gt á ári (gígatonn=10<sup>12</sup> kg) fyrir alla íslensku jöklana, sem er um 20% af árlegu massatapi þeirra að meðaltali á tímabilinu 2000–2019. Þetta massatap kemur til viðbótar við yfirborðsleysinguna sem sýnd er á mynd 2.23 og er summan kölluð heildarafkoma.

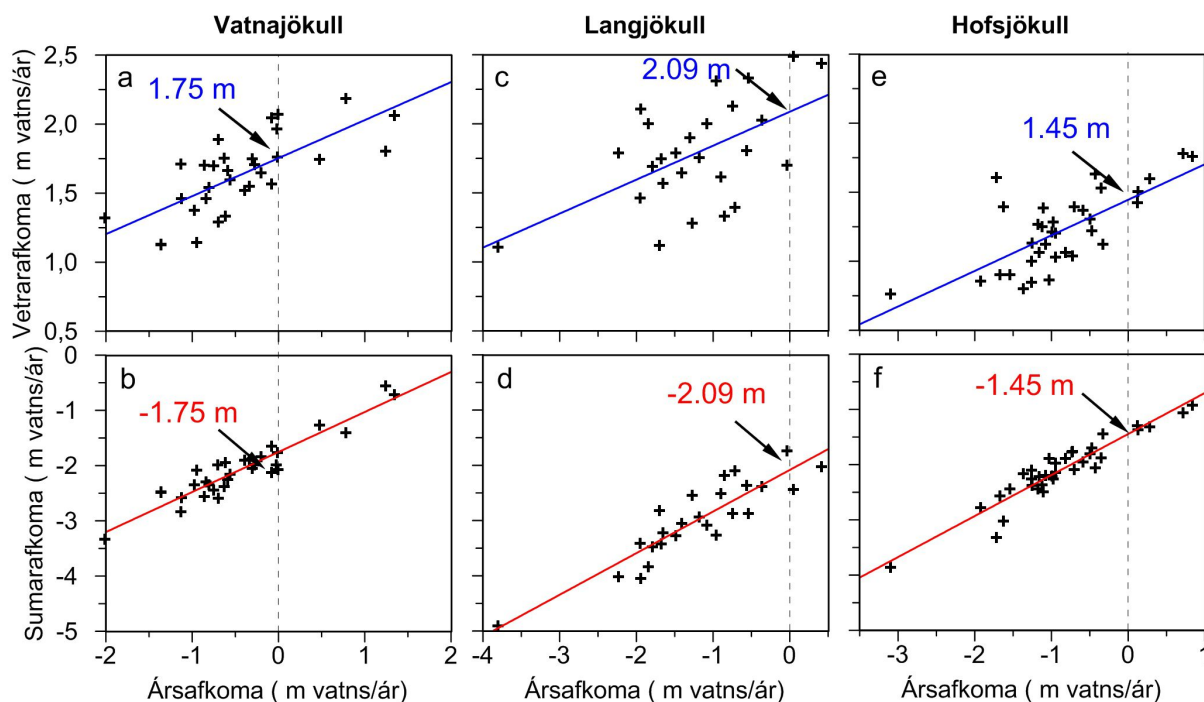
Uppsöfnuð yfirborðs- og heildarafkoma er sýnd á mynd 2.25, en þá er afkoma hvers árs lögð við afkomu árána á undan og þannig hægt að sýna heildartap jöklanna yfir lengra tímabil. Tafla 2.4 sýnir heildartap þriggja stærstu jöklanna á mælitímabilinu. Vatnajökull og Hofsjökull hafa að jafnaði verið að tapa tæpum metra (81 cm og 99 cm) en Langjökull rúmlega það, eða



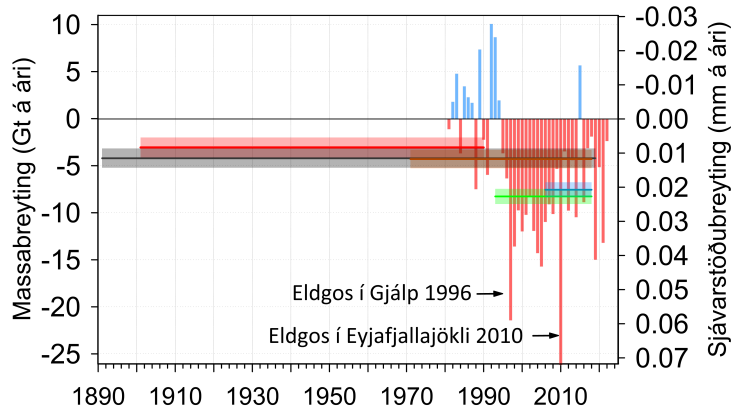
Mynd 2.23: Yfirborðsafkomumælingar, vetrarafkoma (bláar súlur), sumarafkoma (rauðar súlur) og heildarafkoma (grænir punktar), á þremur stærstu jöklum Íslands, Vatnajökli, Hofsjökli og Langjökli (Andri Gunnarsson o.fl., 2022; Finnur Pálsson o.fl., 2022a; Finnur Pálsson o.fl., 2022b; Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2017). Athugið að lóðrétti ásin á myndinni fyrir Langjökul er annar en á efri myndunum tveimur (gögn aðgengileg á vefsíðunni [islenkirjoklar.is](http://islenkirjoklar.is)).

um 126 cm á ári (mælt sem vatnsgildi). Vatnajökull hefur á þessu tímabili tapað um 26 m af ísþykkt (6.9%), en Hofsjökull 31 m (12%) og Langjökull 39 m (18%).

Samantekt á öllum gögnum sem lýsa þróun jökla á Íslandi sýnir að massatapið var mest á tveimur tímabilum, þ.e. 1930–1950 og 1994–2010 (Aðalgeirsdóttir o.fl., 2020). Heildarmassatap á öllu tímabilinu 1890–2019 var  $540 \pm 130$  Gt eða sem svarar  $16 \pm 4\%$  af heildarmassa árið 1890, en það samsvarar  $1.50 \pm 0.36$  mm sjávarstöðubreytingu að meðaltali yfir öll heimshöfin. Eins og mynd 2.26 sýnir varð nærri helmingur af heildarmassatapinu á tímabilinu 1994–2019 eða  $240 \pm 20$  Gt en þá tapaðist að meðaltali  $-9.6 \pm 0.8$  Gt á ári miðað við  $-4.2 \pm 1.0$  Gt á ári fyrir allt tímabilið frá 1890 (Aðalgeirsdóttir o.fl., 2020). Öðrum aðferðum hefur einnig verið beitt til þess að meta afkomu jöklanna. Hugonnet o.fl. (2021) notuðu ASTER ljósmyndir og ArcticDEM og REMA hæðargögn til þess að meta hæðarbreytingar allra jökla á jörðinni, þ.m.t. íslensku jöklanna, yfir tímabilið 2000–2020 og gerðu mat á árlegu massatapi þeirra. Þeim niðurstöðum ber vel saman við beinu mælingarnar á afkomu jöklanna á Íslandi sem sýndar eru hér að ofan. Niðurstöður frá GRACE (Wouters o.fl., 2019) og CryoSat-2 (Foresta o.fl., 2016) gervitunglunum eru ekki eins nákvæmar og aðferð Hugonnet o.fl. (2021). Samanburður á öllum fjarkönnunaraðferðunum og niðurstöðum beinu mælinganna var gerður af Berthier o.fl. (2023). Þar kemur fram hve vel gögnin frá íslensku jöklunum nýtast til sannprófunar á fjarkönnunargögnum.



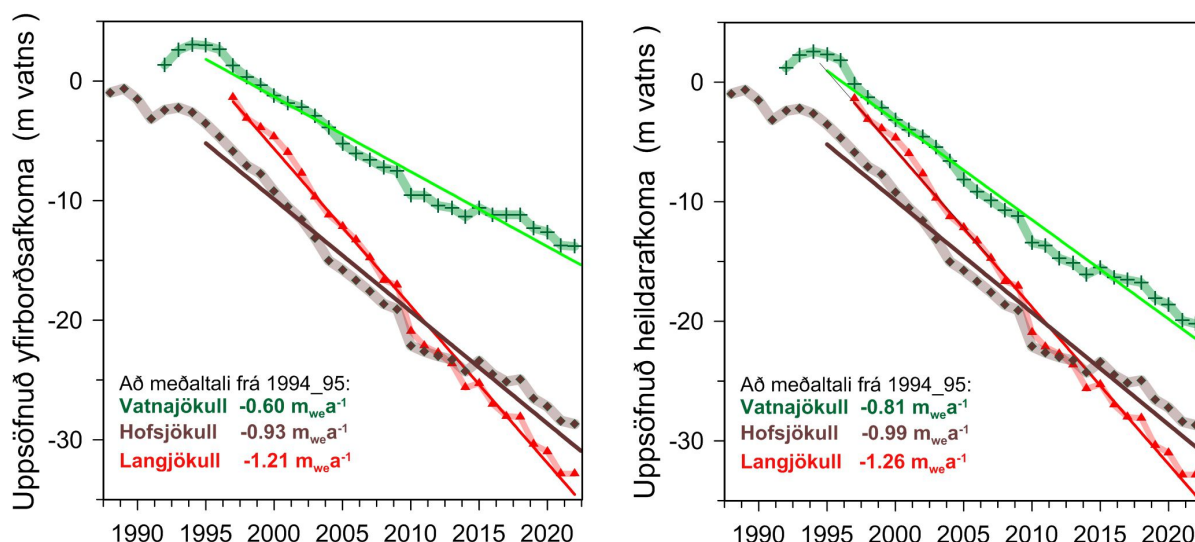
Mynd 2.24: Samhengi vetrar- (efri röð) og sumarafkomu (neðri röð) við ársafkomu Vatnajökuls, Langjökuls og Hofsjökuls. Lóðrétta strikaða línan og tölurnar á hverri mynd sýna þá vetrarafkomu (í efri röð) og sumarafkomu (í neðri röð) sem myndi skila jökli í jafnvægi (ársafkoma = 0). Meðaltal árána sem afkoman hefur verið mæld er heldur minni vetrarafkoma, en meiri leysing en þarf fyrir jafnvægisástand (flestar punktanna eru vinstra megin við lóðrétta strikuðu línuna). Því hafa jöklarnir verið að rýrna á undanförunum árum.



Mynd 2.26: Heildarafkoma jökla á Íslandi, mælieining er Gt á ári (gígatonn= $10^{12}$  kg) á vinstri ás en á hægri ás er mælieiningin meðalsjávarstöðubreyting í mm SLE á ári. Myndin byggir á afkomumælingum (Andri Gunnarsson o.fl., 2022; Finnur Pálsson o.fl., 2022a; Finnur Pálsson o.fl., 2022b; Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2017), mismunakortum (Belart o.fl., 2019; Belart o.fl., 2020) og rúmmáls-flatarmáls skölun. Einnig er tekið tillit til annars massataps en á yfirborði (Tómas Jóhannesson o.fl., 2020) (Mynd er uppfærð frá Aðalgeirsdóttir o.fl. (2020)).

Afkoma margra minni jökla landsins og Mýrdalsjökuls (Belart o.fl., 2019; Belart o.fl., 2020; Bernat, 2022) hefur verið metin með greiningu landlíkana frá mismunandi tímum með upphafslandlíkani sem byggst á AMS-kortunum frá 1945. Mynd 2.27 sýnir afkomu minni jökla með hring fyrir hvern jökul. Litur hringjanna sýnir afkomu (rauður fyrir neikvæða og blár fyrir jákvæða afkomu) og breyting í stærð þeirra sýnir breytingu í flatarmáli. Á tímabilinu 1994–2010 var rýrnun meiri en á hinum tímabilunum. Mynd 2.28 sýnir breytingu í hæð yfirborðs Mýrdalsjökuls milli árána 2010 og 2021. Yfirborð jökulsins lækkaði um hátt í 50 m víða við jökuljadarinn á þessu árabili en hæðin breyttist lítið um miðbik jökulsins.

Vöktun á jöklum með fjarkönnun hefur fleygt fram á síðari árum og nú er til dæmis unnt að búa til



Mynd 2.25: Uppsöfnuð yfirborðsafkoma (til vinstri) og heildarafkoma (til hægri) stóru jöklanna (m vatnsgildi). Byggt á afkomumælingunum sem sýndar eru á mynd 2.23. Eftir 2010 hefur hægt á rýrnun, en breytileiki á milli ára aukist, afkoma var jákvæð jökulárið 2014–2015 og 2021–2022 voru jöklarnir nærri því að vera í jafnvægi.

Tafla 2.4: Heildarafkoma stóru jöklanna á tímabilinu 1994/1995–2021/2022, hér er innri leysing vegna jarðhita, kelfingar og eldgosa tekin með í reikninginn. Fyrstu tveir dálkar sýna breytingar í ísþykkt (m) og rúmmáli ( $km^3$ ). Þriðji dálkurinn sýnir hlutfallslega rýrnun og fjórði hlutfallslega rýrnun á ári að meðaltali yfir tímabilið. Síðasti dálkurinn sýnir breytingu sem vatnsgildi (m vatns/ári), en þar er búið að reikna breytingu á jökulís yfir í samsvarandi rúmmál af vatni (gögn sýnd á mynd 2.25).

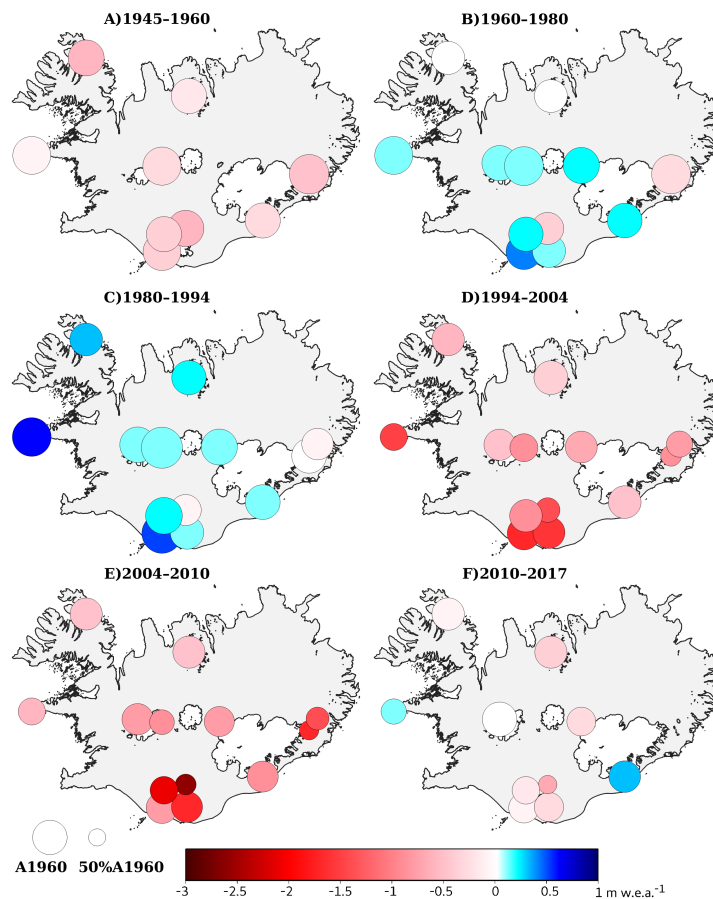
Nafn jökuls	Ísþykkt (m)	Rúmmál íss ( $km^3$ )	Hlutfallsleg rýrnun (%)	Rýrnun (%) á ári	Árleg breyting ( $m_{vatns}/\text{ár}$ )
Vatnajökull	20	200	6.3	0.23	-0.84
Hofsjökull	29	26	14	0.48	-0.96
Langjökull	33	32	16	0.59	-1.33

nákvæmar myndir af samfelldum yfirborðshraða íslensku jöklanna og hvernig hann er að breytast (sjá mynd 2.30), sem byggst á gögnum frá Sentinel-1 gervitunglum ESA Wuite o.fl., 2022). Þessi nýju gögn opna marga möguleika á nákvæmum rannsóknum á flæði jöklanna og þau nýtast einnig til sannprófunar á líkönum fyrir framtíðarspár.

#### 2.4.2 Líklegar breytingar íslenskra jökla á komandi öld

Í V2018 voru sýndar spár um framtíð Hofsjökuls og Langjökuls en í V2008 voru eldri spár fyrir þessa sömu jökla og til viðbótar spár sem sýndu mögulega framtíð suðurhluta Vatnajökuls. Þessar spár sýndu allar að jöklarnir munu halda áfram að tapa massa á komandi áratugum. Núverandi stærð þeirra og hraði hlýnunar ræður mestu um hversu fljótt þeir kunna að verða horfnir með öllu. Líkur eru á að flestir af smærri jöklunum muni hverfa alveg á næstu áratugum eða verða mikið minni en þeir eru nú vegna hlýnunar sem orðin er.

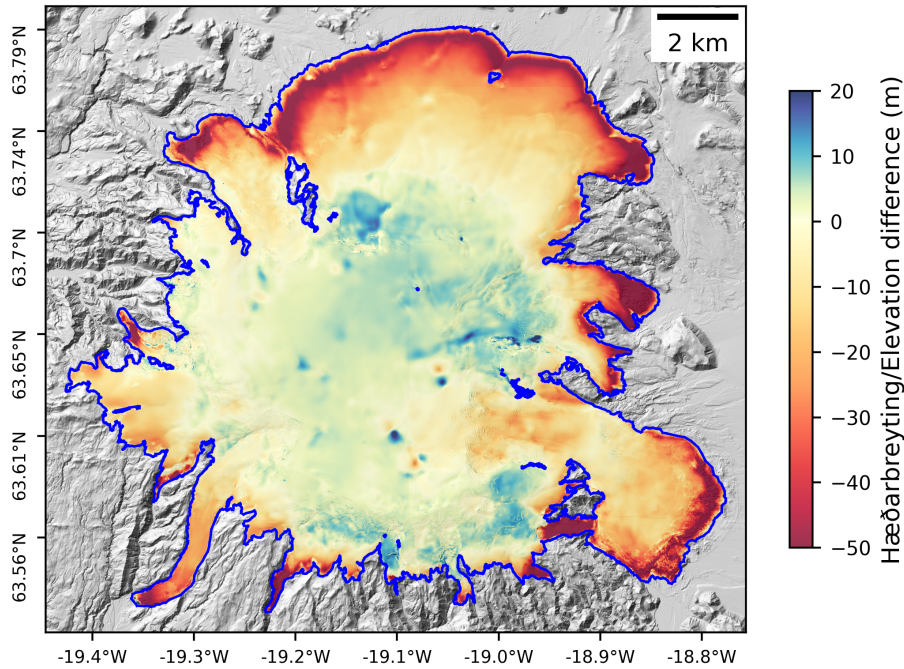
Spá um framtíð Vatnajökuls (Schmidt o.fl., 2020) sýnir að það hefur mikið að segja fyrir jökulinn hversu hratt tekst að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda á næstu áratugum. Reikningarnir



Mynd 2.27: Afkoma minni jökla landsins, reiknuð með greiningu á landlíkönun á mismunandi tímum. Hver hringur sýnir afkomu í m vatns á ári, sjá litaskala, rauður litur fyrir rýrnun en blár fyrir jákvæða afkomu. Frá árinu 1994 til 2010 var rýrnunin mun meiri en á síðastliðnum 10 árum. Stærð hringjanna sýnir breytingu í flatarmáli. (Mynd frá Belart o.fl. (2020)).

voru gerðir með samtengdu ísflæðilíkani (PISM, 2010) og orkubúskapslíkani innan HIRHAM líkansins (sjá lýsingu í Schmidt o.fl., 2020) með nokkrum jadarskilyrðum frá svæðisbundnum loftslagslíkönunum úr safni CORDEX (2012). Loftslagslíkönin gefa spár fram til ársins 2100 en keyrt var áfram í 200 ár til viðbótar (til ársins 2300) með sama loftslagi og á síðustu tveimur áratugum þessarar aldar. Tvær sviðsmyndir voru notaðar; RCP4.5, en í henni hlýnar um rétt rúmlega 2 °C að meðaltali á jörðinni miðað við meðaltalið 1850–1900, og RCP8.5, þar sem hlýnunin er um 4 °C. Á mynd 2.29 er sýnt hvernig Vatnajökull bregst við hugsanlegri hlýnun. Fram til 2100 er rúmmálstap hans svipað í öllum keyrslunum (um það bil 20%), en eftir það sést að ef hlýnun takmarkast við 2 °C við lok aldarinnar, eins og Parísarsamningurinn segir til um, þá er mögulegt að um 30–60% af núverandi rúmmáli Vatnajökuls verði eftir og að jökullinn finni nýtt jafnvægi í hlýrra loftslagi. Ef hins vegar hlýnunin verður 4 °C við lok aldarinnar minnkar hann hraðar og gæti horfið alveg, eða einungis litlir sundurslitnir jöklar orðið eftir á hæstu fjöllum undir núverandi jökli.

Fleiri spár um framtíð jökla á jörðinni, annarra en stóru jökulbreiðanna á Suðurskautslandinu og Grænlandi, hafa verið gerðar. Samantekt Hock o.fl. (2019) og Marzeion o.fl. (2020) gerir grein fyrir niðurstöðum frá sex jökullíkönunum fyrir fjórar sviðsmyndir og 25 mismunandi lofthjúpslíkön. Flatarmáls- og massabreytingar eru reiknaðar fyrir 19 svæði með jöklu á jörðinni og er Ísland eitt þeirra. Fyrir loftslagssviðsmyndina RCP4.5 er því spáð að massi jökla á jörðinni minnki um u.þ.b. 30% til 2100, miðað við árið 2015, en þeirra íslensku um u.þ.b. 40%. Gerð er ítarleg grein fyrir óvissu í þessari niðurstöðu, sem skipt er upp í fjóra þætti. Þegar kemur fram undir aldarlok

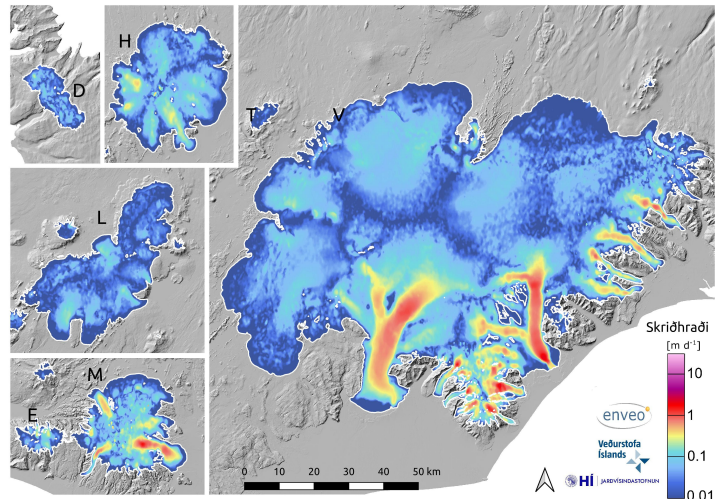


Mynd 2.28: Breyting á hæð yfirborðs Mýrdalsjökuls skv. kortum sem byggð eru á leysimælingum úr flugvél (2010) og á ljósmyndum Pléiades gervitungla (2021). (Mynd frá Bernat o.fl. (2023)).

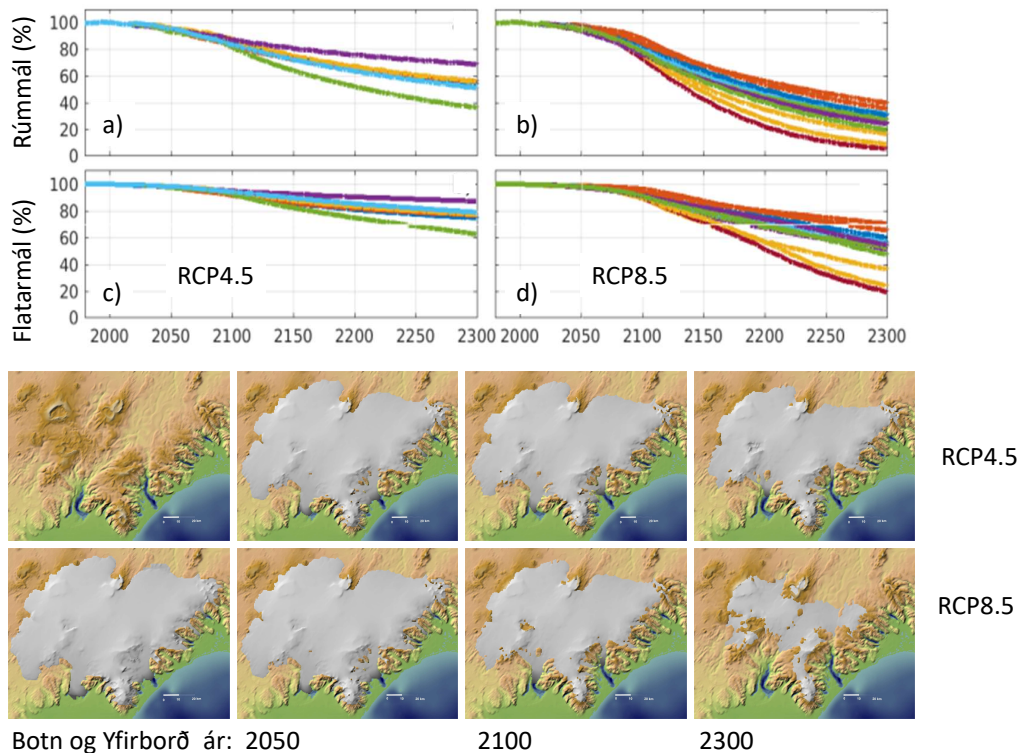
skiptir óvissa, sem á rætur að rekja til mismunandi sviðsmynda, mestu máli. Hún vex jafnt og þétt eftir því sem líður á öldina. Óvissa, sem stafar af mismunandi jöklalíkönunum, er mikilvægust á fyrri hluta aldarinnar og fer hlutfallslegt mikilvægi hennar minnkandi með tíma. Óvissa vegna mismunandi lofthjúpslíkana og náttúrulegs breytileika í veðurfari er tiltölulega lítil þegar litið er til jarðarinnar allrar en getur tímabundið haft mikið að segja á mismunandi svæðum.

Hnattræna jöklalíkanið PyGEM (Rounce o.fl., 2023) sýnir að samþærilegar niðurstöður, eins og fyrir íslensku jöklana, skipta miklu máli um að það takist að takmarka hlýnun eins mikið og hratt og frekast er unnt. Í sviðsmynd, þar sem hlýnar um 1.5 °C til ársins 2100, er því spáð að massatap jökla verði  $25 \pm 6\%$  miðað við árið 2010 og í sviðsmynd, þar sem hlýnar um 4 °C, tapast  $41 \pm 11\%$  en það samsvarar  $90 \pm 26$  eða  $154 \pm 44$  mm sjávarstöðuhækkun að meðaltali fyrir heimshöfin.

Á mynd 2.31 eru niðurstöður Rounce o.fl. (2023) fyrir stærstu íslensku jöklana bornar saman við fyrri spár um framtíð þeirra. Aðrir jöklar en þessir þrír eru <10% af flatarmáli jökla landsins og gefa þessar niðurstöður því góða mynd af hugsanlegum breytingum á jöklunum öllum. Myndin sýnir niðurstöður hnattræna jöklalíkansins PyGEM fyrir sex RCP og SSP sviðsmyndir



Mynd 2.30: Yfirborðsskriðhraði jökla á Íslandi. Sýndur er meðaltalsskriðhraði yfir tímabilið október 2014 til desember 2022. Myndin byggir á ratsjárgögnum frá Sentinel 1A og 1B gervitunglum ESA og er framlenging á gögnunum sem eru birt í grein Wuite o.fl., 2022.



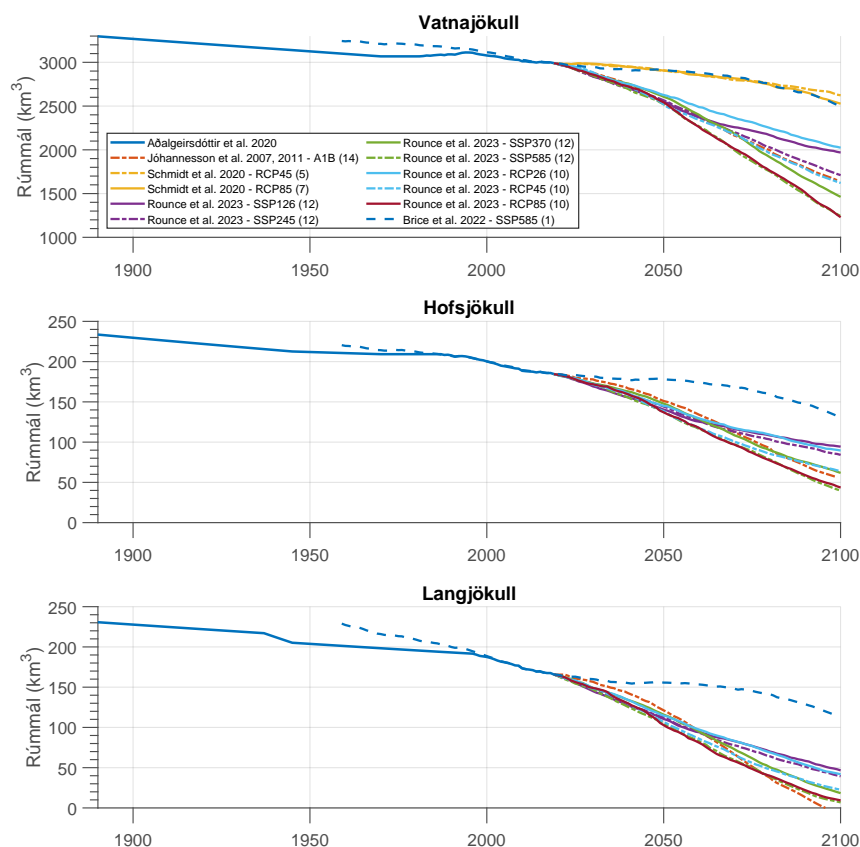
Mynd 2.29: Framtíð Vatnajökuls reiknuð með ísflæðilíkaninu PISM og afkomu frá mismunandi loftslagslíkönum úr safni CORDEX (sjá nánari skýringar í texta) (Schmidt o.fl., 2020). Efri myndirnar sýna rúmmáls- ((a) og (b)) og flatarmálsbreytingar ((c) og (d)) fyrir tvær sviðsmyndir (RCP4.5 til vinstri, RCP8.5 til hægri). Hver ferill sýnir eina keyrslu með einu loftslagslíkani úr safninu. Nedri myndir lengst til vinstri sýna botn og yfirborð Vatnajökuls við upphaf keyrslanna. Efri röðin af myndunum sýnir yfirborðið árin 2050, 2100 og 2300 í RCP4.5 sviðsmyndinni og nedri röðin í RCP8.5 sviðsmyndinni. Yfirborðin eru úr keyrslu með loftslagi frá HIRHAM-EC-Earth sem er um það bil um miðbik keyrslanna sem sýndar eru í myndunum fyrir ofan.

(Rounce o.fl., 2023) og RACMO afkomulíkansins fyrir eina SSP sviðsmynd (Noël o.fl., 2022). Til samanburðar eru sýndar spár skv. norræna CES verkefninu (Jóhannesson o.fl., 2007; Tómas Jóhannesson o.fl., 2011), sem byggt var á í V2018 og miðast við eldri IPCC sviðsmyndirnar B2/A2 og A1B (niðurstöður fyrir sunnanverðan Vatnajökul hafa verið aðlagðar til þess að ná til jökulsins alls með hliðsjón af afkomumælingum á tímabilinu 1992–2023) og niðurstöður líkanreikninga með samtengdu PISM ísflæðilíkani og HIRHAM orkubúskaparlíkani (Schmidt o.fl., 2020) fyrir tvær RCP sviðsmyndir. Afkomulíkansniðurstöður Noël o.fl. (2022) hafa verið keyrðar gegnum einfalt kvíkt jöklalíkan til þess að þær séu sambærilegar við aðrar niðurstöður sem myndin sýnir. Líkanreikningar Compagno o.fl. (2021) með jöklalíkaninu GloGEMflow fyrir íslenska jökla, með fjölmörgum loftslagslíkönum, eru í aðalatriðum sambærilegar við niðurstöður Rounce o.fl. (2023). Í sviðsmyndunum B2/A2, A1B, RCP4.5 og SSP2-4.5 hlýnar að jafnaði um u.þ.b. 2 °C að sumri hér á landi til næstu aldamóta. Í þessum sviðsmyndum er hnattræn hlýnun meiri en ef gripið er til öflugra aðgerða til þess að hemja losun gróðurhúsalofttegunda (RCP2.6, SSP1-2.6) en minni en ef aðgerðir eru litlar sem engar (RCP8.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5).

Loftslagslíkön eru keyrð á grófu reiknineti og niðurstöður þeirra eru oft bjagaðar á stórum svæðum með tilliti til vedurmælinga. Auk þess endurspeglar svæðisbundinn náttúrulegur breytileiki síðustu áratugi í líkanreikningunum víðast hvar ekki raunverulegar, náttúrulegar breytingar á viðkomandi svæði. Mismunandi aðferðum er beitt til þess að leiðrétta bjögun af þessum toga. Í líkanreikningum CES-verkefnisins, Compagno o.fl. (2021) og Rounce o.fl. (2023) voru líkönin stillt af þannig að þau endurspeglu mælda rýrnun íslensku jöklanna á síðustu



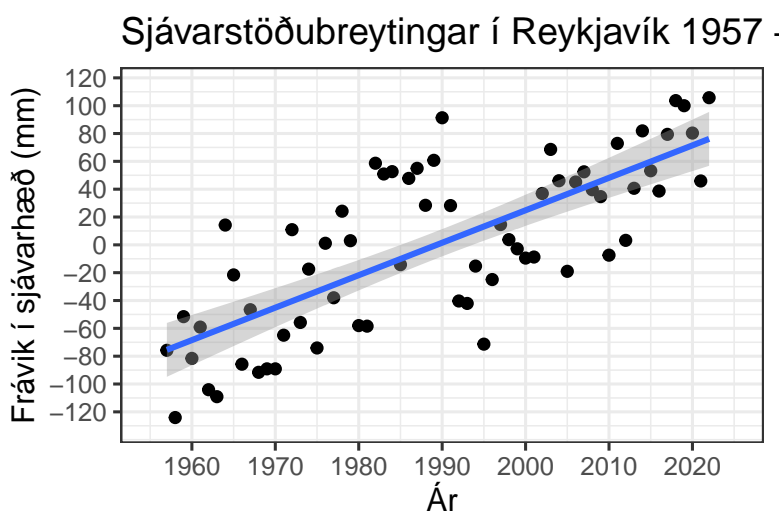
áratugum en í líkanreikningum Schmidt o.fl. (2020) er rýrnun Vatnajökuls síðan 1995 vanmetin, og þá væntanlega einnig spá um rýrnun jökulsins næstu áratugi. Niðurstöðurnar spanna breitt bil og stjórnast af forsendum um áhrif losunar gróðurhúsalofttegunda á þróun loftslags, en einnig skiptir náttúrulegur breytileiki loftslags á N-Atlantshafi miklu máli, svo og tæknileg útfærsla hinna kviku jökla- og afkomulíkana sem beitt er við reikningana. Ef hafsvæði suður af Íslandi og Grænlandi helst kalt næstu áratugi miðað við nærliggjandi svæði, eins og verið hefur undanfarna áratugi, eða ef dregur úr styrk hafhringrásar á N-Atlandshafi (sjá umfjöllun í greinum 2.3 og 3.3.2) kunna breytingar á íslensku jöklunum að verða tiltölulega litlar fram undir miðja öldina eins og niðurstöður Noël o.fl. (2022) gefa til kynna, en þar er gengið út frá loftslagslíkani sem sýnir slíka þróun. Í mörgum öðrum loftslagskeyrslum gætir þessa kaldara svæðis ekki eins mikið. Í þeim er hlýnun á hafsvæðum suður af landinu meiri og rýrnun íslensku jöklanna verður hröð og sambærileg við aðra jökla á jörðinni, u.þ.b. 40–50% til loka aldarinnar (miðað við 2015), eins og fram kemur í líkanreikningum norræna CES verkefnisins (Jóhannesson o.fl., 2007; Tómas Jóhannesson o.fl., 2011) og niðurstöðum Compagno o.fl. (2021) og Rounce o.fl. (2023). Ef ekki tekst að ná tókum á losun gróðurhúsalofttegunda og loftslagsþróun til 2100 verður svipuð og í sviðsmyndum RCP8.5, SSP3-7.0 eða SSP5-8.5 er einnig mögulegt að rýrnunin verði hraðari.



Mynd 2.31: Rúmmálsþróun þriggja stærstu jökla landsins 1890–2100. Fyrir tímabilið 1890–2019 er sýnt mat frá Aðalgeirsdóttir o.fl. (2020) (sjá mynd 2.26 og frá 2019 eru sýndar líkanniðurstöður miðað við ýmsar sviðsmyndir um loftslagsbreytingar (fjöldi keyrslna er sýndur með tölum í sviga). Sjá umfjöllun um keyrslurnar í texta.

## 2.5 Sjávarstöðubreytingar

Sjávarstöðubreytingar voru ræddar ítarlega í V2018 og sett fram mat á líklegum sjávarstöðubreytingum í kringum Ísland til loka þessarar aldar (sjá grein 5.3 í V2018). Í V2018 var byggt á 13. kafla skýrslu WG1 fyrir AR5 (Church o.fl., 2013) til að leggja mat á eiginlegar breytingar sjávarstöðu við Ísland sem hlutfall af hnattrænum breytingum og síðan tekið tillit til líklegra landhæðarbreytinga til þess að leggja mat á afstæða breytingu sjávarstöðu. Að gefnum forsendum um bráðnun Grænlandsjökuls og Suðurskautslandsins var metið að hækkun sjávarstöðu á Íslandi yrði um 30–40% af hnattrænni hækkun. Stærsti óvissuþátturinn er tengdur því hversu mikið bráðnar af hverju íshveli.



Mynd 2.32: Sjávarstöðubreytingar í Reykjavík frá 1956 til 2022. Myndin sýnir frávik í mm frá meðalsjávarhæð tímabilsins 1971 til 2000. Bein lína á myndinni hefur hallatöluna 2.3 [1.8–2.8] mm/ári.

Reykjavík eina mæliröðin sem er aðgengileg (PSMSL, 2023). Mynd 2.32 er uppfærsla á mynd 5.16 í V2018 og sýnir sjávarstöðubreytingar í Reykjavík frá 1956–2022. Myndin sýnir að töluverðar sveiflur eru í sjávarhæð í Reykjavík en hallatala bestu línu sýnir að sjávarstaða hefur að jafnaði hækkað um 2.3 [1.8–2.8] mm/ári á tímabilinu. Þetta er hærra hallatala en var sýnd í V2018 en þar var hækkun sjávarborðs í Reykjavík frá 1957 til 2014 metin 2.0 [1.4–2.6] mm/ári. Ástæðan er að á síðustu árum hefur sjávarstaða verið há miðað við fyrri ár, eins og sést á mynd 2.32, en munurinn er innan óvissumarka.

Eins og lýst er í grein 5.3 í V2018 má rekja orsakir sjávarstöðubreytingar til nokkurra áhrifaþátta sem gætir í mismiklum mæli á Íslandi. Þeim er skipt í hnattræna og svæðisbundna áhrifaþætti. Í kafla 9.6 í skýrslu WG1 fyrir AR6 (Fox-Kemper o.fl., 2021) er gerð grein fyrir nýjustu þekkingu á sjávarstöðubreytingum (sjá mynd A.2 og umræðu um hana í kafla 1) og, byggt á þeirri umfjöllun, sýnir tafla 2.5 hvernig hraði hnattrænna sjávarstöðubreytinga hefur þróast frá upphafi 20. aldar. Fyrir alla þættina er hraðinn mestur á síðasta tímabilinu, 2006–2018.

### 2.5.1 Orsakir sjávarstöðubreytinga

Varmábensla sjávar er stærsti áhrifaþátturinn í sjávarstöðubreytingum en aðrir þættir, eins og framlag jökla og ísbreiða á Grænlandi og Suðurskautslandinu, eru að stækka. Í IPCC AR6-WG1 (Fox-Kemper o.fl., 2021) er metið að varmaþensla hafi valdið tæplega 39% af um 4.4 cm hækkun

Bent var á að þessar niðurstöður væru túlkun á gögnum frá IPCC, en byggðust ekki á lausn hnattræns sjávarstöðulíkans, sem yki enn á óvissuna í niðurstöðum fyrir Ísland. Nú hefur forritið SELEN (Spada og Melini, 2019) verið notað til að reikna nánar breytingar fyrir Ísland en það leysir sjávarstöðujöfnuna og metur áhrif fingrafars jöklabráðnunar fyrir Ísland, eins og rakið er í grein 2.5.2. Í V2018 er fjallað stuttlega um skort á langtímastöðvum til að mæla sjávarstöðu, en elsta mæliröðin á Íslandi er í Reykjavík. Á vegum Siglingasviðs Vegagerðarinnar og Væðurstofu Íslands hefur síðan verið gert átak að bæta mælistöðvar, en til að skoða breytingar á liðnum áratugum er mæliröðin í

Tafla 2.5: Hraði hnattrænna sjávarstöðubreytinga frá upphafi 20. aldar til 2018, eining talna er mm á ári. Tölur innan hornklofa sýna 5 til 95% óvissumörk. Sýnd eru 5 tímabil og hraði breytinga er mestur á því síðasta. Tölurnar eru úr töflu 9.5 í Fox-Kemper o.fl. (2021) en í þeirri töflu eru einnig sýndar tölur fyrir heildarhækkun sjávarstöðu á sömu tímabilum. Samanburður á tveimur neðstu línunum, metnu heildarframlagi allra þátta og mæliniðurstöðum, sýnir að fyrir öll tímabilin skarast óvissubíl heildarframlags allra áhrifaþátta og mælinga á sjávarstöðuhækkun (samanburður á neðstu tveimur línunum).

Áhrifa- þáttur	1901–1990	1971–2018	1993–2018	2006–2018	1901–2018
Varmþensla sjávar	0.36 [0.17–0.54]	1.01 [0.73–1.29]	1.31 [0.95–1.66]	1.39 [0.74–2.05]	0.54 [0.40–0.68]
Jöklar, nema á					
Suðurskauts- landinu og Grænlandi	0.58 [0.34–0.82]	0.44 [0.21–0.67]	0.55 [0.40–0.70]	0.62 [0.57–0.68]	0.57 [0.36–0.79]
Ísbreiðan og jöklar á Grænlandi	0.33 [0.18–0.47]	0.25 [0.16–0.34]	0.43 [0.36–0.51]	0.63 [0.51–0.74]	0.35 [0.23–0.46]
Ísbreiðan og jöklar á Suður- skautslandi	0.00 [–0.10–0.11]	0.14 [–0.09–0.37]	0.25 [0.16–0.33]	0.37 [0.24–0.50]	0.06 [–0.03–0.15]
Vatnsgeymslur á landi	–0.15 [–0.35–0.04]	0.15 [–0.05–0.36]	0.31 [0.13–0.49]	0.60 [0.32–0.88]	–0.11 [–0.39–0.17]
Heildarframlag	1.11 [0.71–1.52]	2.00 [1.52–2.49]	2.85 [2.41–3.29]	3.61 [2.88–4.35]	1.41 [1.00–1.82]
Sjávarstöðu- hækkun samkvæmt mælingum	1.35 [0.78–1.92]	2.33 [1.55–3.12]	3.25 [2.88–3.61]	3.69 [3.21–4.17]	1.73 [1.28–2.17]

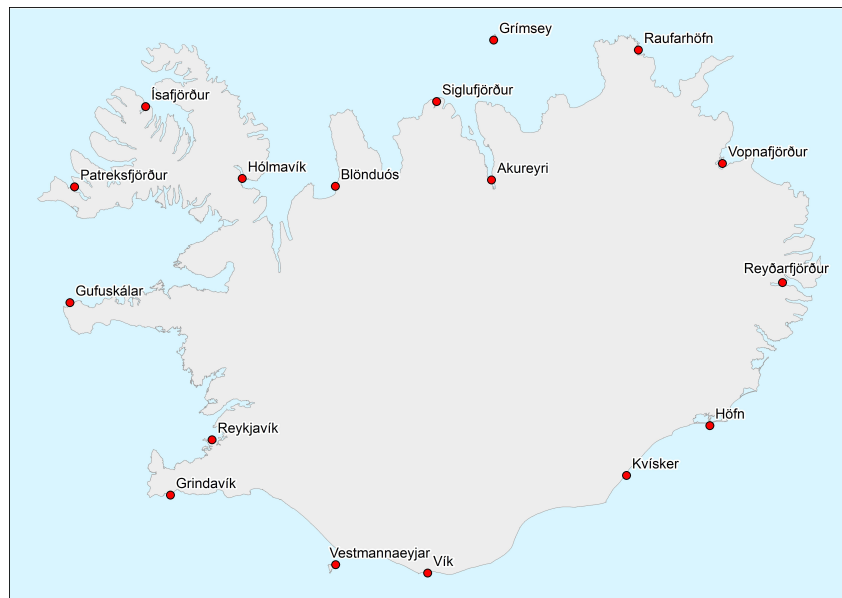
hnattrænnar sjávarstöðu á tímabilinu 2006–2018. Á sama tímabili lagði massatap jökla og ísbreiða til rúmlega 17% og 27% hvort, en afgangur hnattrænnar hækkunar sjávarstöðu (rúmlega 16%) er vegna breytinga í vatnsgeymslum á landi.

Svæðisbundnar sjávarstöðubreytingar verða vegna áhrifaþátta sem styttest að mestu út þegar hnattrænt meðaltal er reiknað. Afhrænir áhrifaþættir eru breytingar á loftþrýstingi, vindi og hafstraumum sem geta valdið sjávarstöðuhækkun á einum stað en sjávarstöðulækkun á öðrum. Fingrafar jöklabráðnunar og aðlögun að flotjafnvægi eru áhrifaþættir sem valda svæðisbundnum sjávarstöðubreytingum (sjá ítarlega umfjöllun í grein 5A í V2018). Massi jökla viðheldur hærri sjávarstöðu nærri þeim svo massatap veldur því að sjávarstaða lækkar nærri þeim – en hækkar þá meira fjær þeim. Þetta er hið s.k. fingrafar jöklabráðnunar og afleiðingar þess fyrir sjávarstöðubreytingar við Ísland eru tvíþættar. Massatap jökla á Íslandi og Grænlandi breytir þyngdarsviðinu þannig að sjávarstaða hér við land myndi að öðru óbreyttu lækka, en massatap jökla fjarri landinu og ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu veldur sjávarstöðuhækkun hér. Þessi hækkun er hin eiginlega hækkun sjávarstöðu, en lóðrétt færsla lands (landsig eða landris), m.a. sem svörun jarðskorpunnar við fargbreytingum vegna massataps jökla veldur, leggst við eða dregst frá eiginlegu hækkuninni, og niðurstaðan verður hin afstæða sjávarstöðuhækkun.

Fyrir mat á sjávarstöðubreytingum er því gagnlegt að skipta verkefninu í tvo hluta, að meta *eiginlegar* og *afstæðar* sjávarstöðubreytingar. Eiginlegar breytingar eru miðaðar við fasta landhæð, en afstæðar breytingar taka einnig tillit til landhæðarbreytinga, sem eru verulegar á Íslandi (sjá grein 2.5.3).

## 2.5.2 Sviðsmyndir um eiginlegar sjávarstöðubreytingar

Frá útkomu AR5 (Church o.fl., 2013) hafa auknar rannsóknir á þeim þáttum sem leiða til sjávarstöðubreytinga, þar með talið á íshvelum Grænlands og Suðurskautslands og þeim ferlum sem leiða til massataps þeirra, bætt við þekkingu á bæði orðnum og komandi sjávarstöðubreytingum.



Mynd 2.33: Staðir við strönd Íslands þar sem sjávarstöðu- og landhæðarbreytingar eru reiknaðar sérstaklega (kort byggt á Berglind Pétursdóttir (2023)) og sýndar í töflum 2.8, 2.9, 2.10 og 2.10.

Þetta er rakið í úttekt WG1 í AR6 (Fox-Kemper o.fl., 2021) og þar eru einnig settar fram niðurstöður sviðsmyndareikninga (sjá 3.1) um líklegar sjávarstöðubreytingar á komandi öldum. Hér verður fjallað um þrjár þessara sviðsmynda, SSP2-4.5 þar sem losun gróðurhúsalofttegunda er slík að hlýnun er 2,7 °C á öldinni, SSP5-8.5 þar sem losun er áköf og hlýnun um 4,4 °C á öldinni (sjá umfjöllun um sviðsmyndir í 3.1 og viðauka C). Ef bornar eru saman niðurstöður fyrir

Þessar sviðsmyndir og sambærilegar losunarsviðsmyndir í AR5 (RCP4.5 og RCP8.5, sjá V2018) er ljóst að mat á framlagi ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu er hærra í nýrri skýrslu IPCC, en aðrir þættir breytast minna. Fyrir sambærilegar losunarsviðsmyndir er mat á hnattrænni sjávarstöðuhækkun 3–5 cm hærra fyrir árið 2100 í AR6. Þriðja sviðsmyndin sem hér verður skoðuð, SSP5-8.5LC (LC fyrir Low Confidence), er sviðsmynd sem hefur sömu hlýnun og SSP5-8.5 en í þessari sviðsmynd er tekið tillit til ferla sem meiri óvissa er um eins og ákafari rýrnunar ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu.

Í V2018 kom fram að það er lítil breytileiki í varmaþenslu umhverfis landið í hverri sviðsmynd. Þess vegna er hægt að nota eina tölu fyrir varmaþenslu í hverja sviðsmynd. Ný spá um varmaþenslu fram til 2100 og 2150 er sett fram í töflu 9.8 í Fox-Kemper o.fl. (2021), gögnin eru einnig aðgengileg á sjávarstöðusíðu NASA (NASA, 2021) og eru þær sýndar í töflu 2.6.

Tafla 2.6: Spá fyrir varmaþenslu (í cm) við Íslandsstrendur árin 2100 og 2150 í tveimur sviðsmyndum IPCC. Fyrir sviðsmynd SSP5-8.5LC er gert ráð fyrir sömu varmaþenslu og í SSP5-8.5 (NASA, 2021)

Sviðsmynd	2100	2150
SSP2-4.5	29	44
SSP5-8.5	44	77

Samkvæmt Fox-Kemper o.fl. (2021) hafa rannsóknir á síðustu árum leitt í ljós að á um 3000 ára tímabili í lok síðasta jökulskeiðs (fyrir 11,4 þúsund árum að 8,2 þúsund árum) hækkaði sjávarstaða nokkuð jafnt og þétt um ~15 m á hverjum 1000 árum, með stöku tímabilum þar sem sjávarborð reis enn hraðar. Vesturhvelið á Suðurskautslandi er sjávarísbreiða, þ.e. hún stendur á sjávarbotni, og vitað er að slíkar ísbreiður geta verið óstöðugar (Weertman, 1974).

Tafla 2.7: Spönn óvissu í spám um eiginlegar sjávarstöðubreytingar við Ísland árin 2100 og 2150 í þremur sviðsmyndum. Hlutfallsleg staðsetning miðgildis ( $p$ ) er mælikvarði á ósamhverfu óvissunnar og er hún notuð í mati á óvissu í spám um afstæðar sjávarstöðubreytingar (sjá töflur 2.10 og 2.11).

Sviðsmynd	2100		2150	
	Spönn (cm)	p (%)	Spönn (cm)	p (%)
SSP2-4.5	44.4	42	53.6	41
SSP5-8.5	52.4	42	109.4	42
SSP5-8.5LC	123.8	61	478.8	30

Seint á síðasta jökulskeiði hvarf þannig sjávarísbreiða í Barentshafi milli Svalbarða og Noregs (Ingólfsson, 2011). Líklegt er að meginhrun ísbreiðunnar hafi tekið um 2000 ár og að breytingar á umhverfisadstæðum, m.a. hækkun sjávarborðs, hafi verið ráðandi þáttur (Petrini o.fl., 2020). Hverfi Vesturhvels Suðurskautslandins á sama hátt myndi það valda hækkun hnattrænnar sjávarstöðu um 3,3 m (Bamber o.fl., 2009). Því hefur mikilli athygli verið beint að stöðugleika sjávarísbreiða á síðustu árum og þeim möguleika að hrún þeirra geti flýtt fyrir hröðu massatapi Vesturhvels Suðurskautslandins. Niðurstaða IPCC er að þekking á slíkum ferlum, sem gætu valdið hröðu og óafturkræfu massatapi sjávarísbreiðunnar, er ekki næg til að hægt sé að leggja mat á líkur þess að slíkt gerist (Fox-Kemper o.fl., 2021) og þess vegna er einnig sett fram sviðsmyndin SSP5-8.5LC sem tekur tillit til ferla sem *lítil vissa* er fyrir, en ekki er hægt að útiloka. Í sviðsmyndinni er gert ráð fyrir sömu losun gróðurhúsalofttegunda og í heitu sviðmyndinni (SSP5-8.5) og því er hlýnun jarðar og varmaþensla sjávar óbreytt. Hins vegar þýðir aukið massatap ísbreiddanna meiri sjávarstöðubreytingar, hnattrænt er 11 cm meiri sjávarstöðuhækkun

aldamótin 2100 og 66 cm árið 2150 í SSP5-8.5LC en í SSP5-8.5. Svæðisbundinn munur á sjávarstöðubreytingum í þessum sviðsmyndum er einnig töluverður, sérstaklega nærri Grænlandi og Suðurskautslandinu (NASA, 2021).

Tafla 2.8: Eiginlegar sjávarstöðubreytingar (í cm) á 17 stöðum umhverfis Ísland (sjá skýringar í texta). Ekki er tekið tillit til landhæðarbreytinga. Óvissumat fyrir hverja sviðsmynd og hvort ár er sýnt í töflu 2.7.

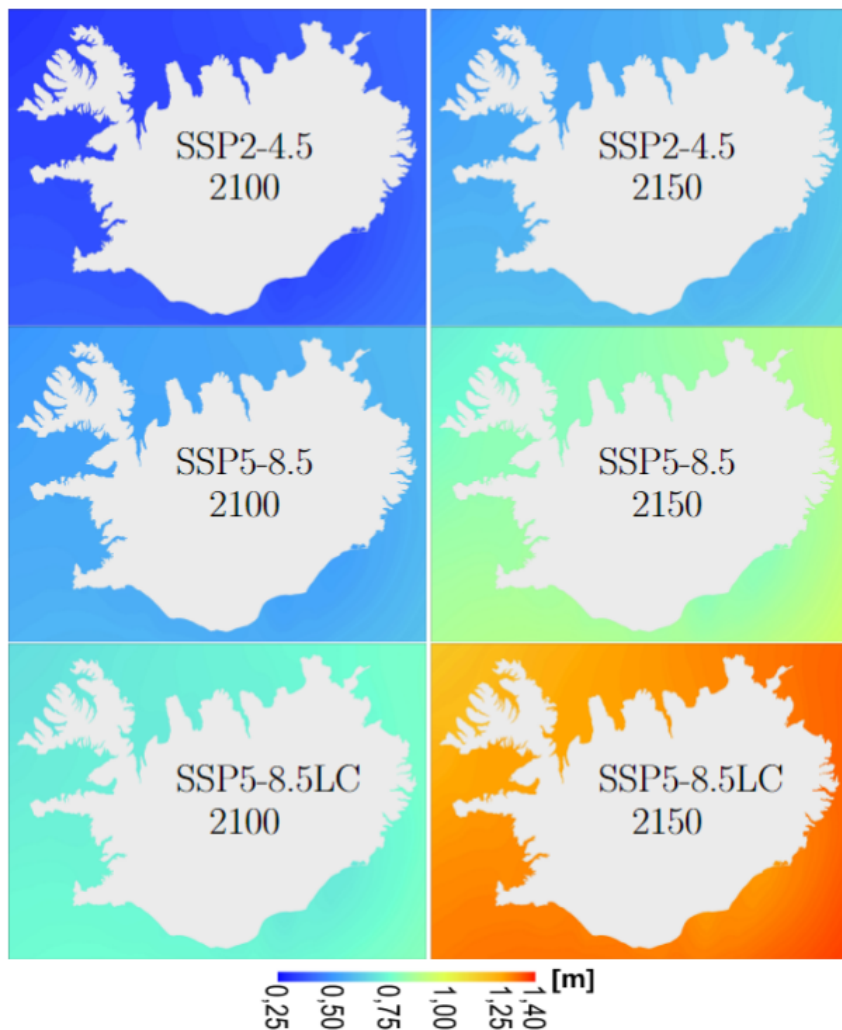
Staður	2100			2150		
	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5LC	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5LC
Reykjavík	32.2	45.3	63.3	47.5	74.2	121.6
Gufuskálar	31.5	43.6	61.6	44.7	70.1	116.4
Patreksfjörður	30.3	41.4	59.4	41.6	65.3	110.8
Ísafjörður	30.5	41.7	59.7	41.9	65.9	111.5
Hólmavík	30.8	43.0	60.9	44.1	69.4	115.9
Blönduós	30.9	43.0	61.0	44.3	69.6	116.1
Siglufjörður	31.9	44.2	62.2	45.8	71.3	118.1
Grimsey	32.4	44.9	62.9	46.8	72.6	119.6
Akureyri	31.8	44.0	62.0	45.9	71.3	118.2
Raufarhöfn	33.7	46.8	64.9	49.4	76.3	123.9
Vopnafjörður	33.8	46.9	65.0	50.4	77.1	125.2
Reyðarfjörður	34.4	47.6	65.7	52.0	78.8	127.6
Höfn	32.0	43.4	61.5	48.4	71.8	120.5
Kvísker	31.9	43.2	61.4	48.2	71.6	120.3
Vík	32.7	45.3	63.4	49.2	74.9	123.3
Vestmannaeyjar	32.9	46.0	64.1	49.3	76.0	124.1
Grindavík	33.0	46.2	64.2	48.5	75.6	123.1

Til að aðlaga þessar niðurstöður fyrir Ísland notaði Berglind Pétursdóttir (2022) forritið SELEN (Spada og Melini, 2019) sem leysir sjávarstöðujöfnuna til að reikna áhrif fingrafars jöklabráðunar á hafsvæðið í kringum Ísland. Sem jaðarskilyrði er massatap ísbreiðanna á Grænlandi og Suðurskautslandinu frá IPCC AR6-WG1 (Fox-Kemper o.fl., 2021) fyrir sviðsmyndirnar SSP2-4.5, SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC notað. Fyrir íslensku jöklana er notað mat á massatapi þeirra í sviðsmyndum RCP4.5 og RCP8.5 byggt á Schmidt o.fl. (2020) og V2018 og það aðlagð fyrir SSP sviðsmyndirnar. Þar sem óvissa um hrun ísbreiða á ekki við um íslenska jökla er notað sama massatap fyrir íslenska jökla í sviðsmyndum SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC. Mynd 2.33 sýnir þá staði sem skoðaðir voru sérstaklega og mynd 2.35 sýnir framlag fingrafars jöklabráðunar til sjávarstöðuhækkunar árið 2100 ásamt varmaþenslu (sjá töflu 2.6) fyrir tvær sviðsmyndir, SSP2-4.5 og SSP5-8.5.

Massatap ísbreiðunnar á Grænlandi og jöklanna á Íslandi veldur sjávarstöðulækkun vegna þyngdarsviðsáhrifa bráðunarinnar. Áhrifin eru mest næst massanum sem tapast þannig að áhrif massataps ísbreiðunnar á Grænlandi lækkar sjávarstöðuna mest á Ísafirði og massatap íslensku jöklanna (Vatnajökull er þar langstærstur) lækkar sjávarstöðuna mest á Höfn í Hornafirði og við Kvísker. Fingrafar jöklabráðunar á Suðurskautslandinu veldur sjávarstöðuhækkun sem er um það bil jafnmikil að stærð og lækkun vegna massataps Grænlandsjökuls í sviðsmyndinni SSP2-4.5 en hlutfallslega minni í sviðsmyndinni SSP5-8.5. Varmaþenslan sem veldur sjávarstöðuhækkun í kringum Ísland vegur á móti þessum svæðisbundnu áhrifum og veldur því að summa þessara þátta er jákvæð eða sjávarstöðuhækkun í báðum sviðsmyndum. Svarta súlan sýnir samanlagða þætti og eru þeir, ásamt hnattrænum þáttum (NASA, 2021) og niðurstöðum fyrir sviðsmyndina

SSP5-8.5LC fyrir sömu staði bæði árin 2100 og 2150, sýnd í töflu 2.8.

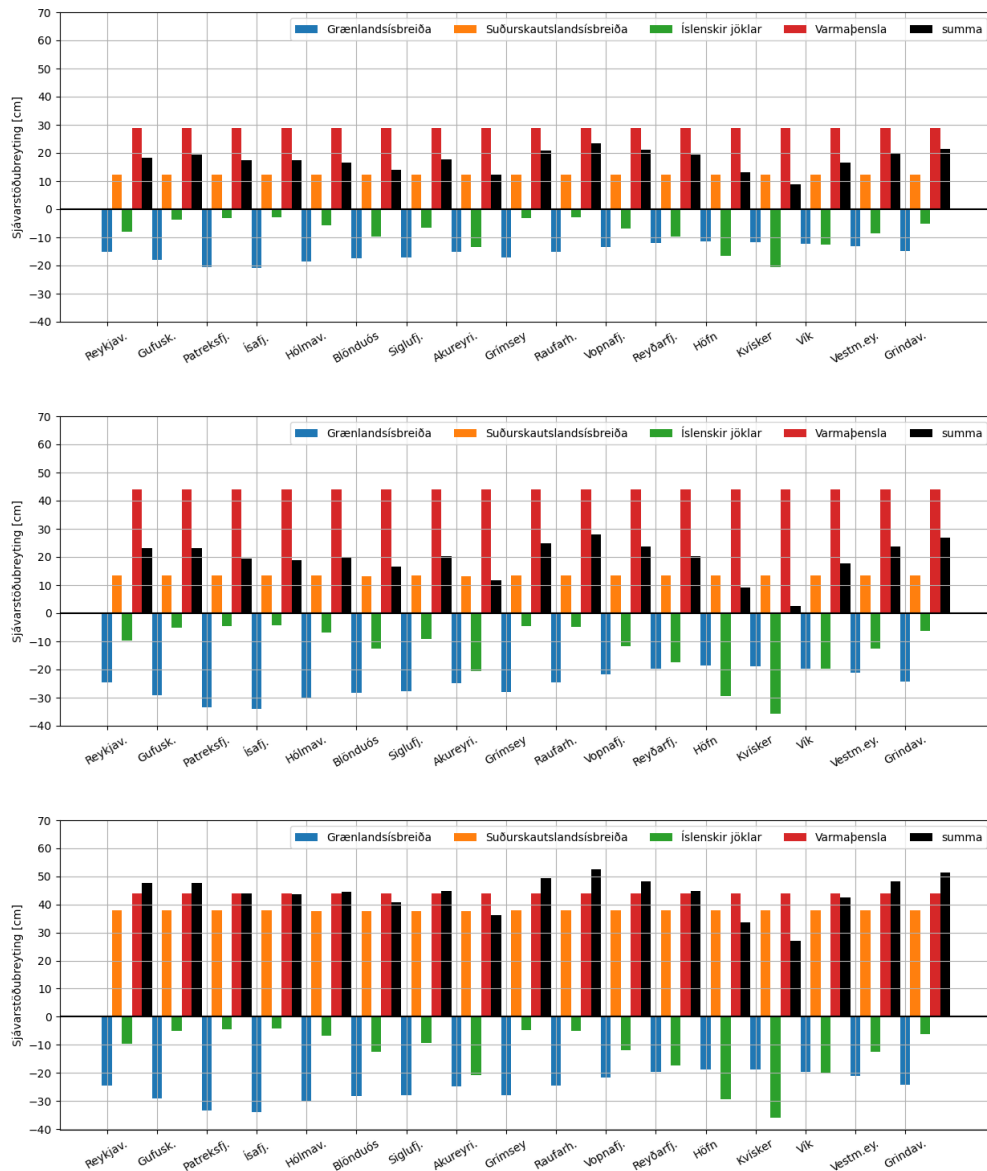
Til að leggja mat á óvissu í spánum fyrir sjávarstöðubreytingar kringum Ísland í framtíðinni er óvissumat IPCC (Fox-Kemper o.fl., 2021), sem sýnir 17% til 83% óvissubíl, yfirfært á þessar spár (sjá töflu 2.7). Óvissa vegna landhæðabreytinga í töflu IPCC er dregin frá heildaróvissunni og einnig litið framhjá óvissu í vatnsgeymslu á landi (sem er mjög lítil stærð). Óvissan í töflum IPCC er ósamhverf og því er hlutfallsleg staðsetning miðgildis dreifingarinnar reiknuð og sama hlutfall notað fyrir íslensku spána (einnig sýnt í töflu 2.7). Mynd 2.34 sýnir eiginlega sjávarstöðuhækkun við Íslandsstrendur fyrir sviðsmyndirnar þrjár árin 2100 og 2150. Myndin sýnir spár um breytingar á sjávarstöðu vegna varmaþenslu (sjá töflu 2.6) og massataps jökla og ísbreiða, fingrafars jöklabráðunar (reikningar með sjávarstöðulíkaninu SELEN, Berglind Pétursdóttir (2022), sjá dæmi á mynd 2.35).



Mynd 2.34: Eiginlegar sjávarstöðubreytingar fyrir þrjár sviðsmyndir árið 2100 (vinstri dálkur) og 2150 (hægri dálkur). Gert er ráð fyrir varmaþenslu (sjá töflu 2.6, massatapi jökla og ísbreiða og fingrafari jöklabráðunar).

### 2.5.3 Landhæðarbreytingar

Breytingar á landhæð á Íslandi voru raktar í grein 5.3.1 í V2018 og kort af hraða landhæðarbreytinga, auk tímaraða frá samfelldu GPS-mælineti var sýnt á mynd 5.21. Það kort byggði á mælingum frá 2004–2016 og samfelldum GPS mæliröðum til 2015. Mynd 2.36, sem sýnir uppfærslu á fyrrgreindri mynd, byggist á mælingum Landmælinga Íslands á tímabilinu 2004–2022 og GPS-mælingum frá mælineti Veðurstofu Íslands til ársins 2022. Rétt eins og fyrri mynd byggist mynd 2.36 á GPS-mælingum á yfirborði jarðar en nýlegar niðurstöður sem fengnar eru með fjarkönnunargögnum gefa sams konar mynd af lóðréttri tilfærslu lands (Drouin og Sigmundsson, 2019; Cao o.fl., 2022). Kortið sýnir ákaft landris inn til landsins og við suðausturströndina. Einnig er landris við suðurströndina, en á hluta Reykjanesskaga, Snæfellsness og nyrst á Norðurlandi er landsig. Víða við vestur- og norðurströndina er óverulegt landris (0–5 mm/ári), og sama má segja um Austfirði.



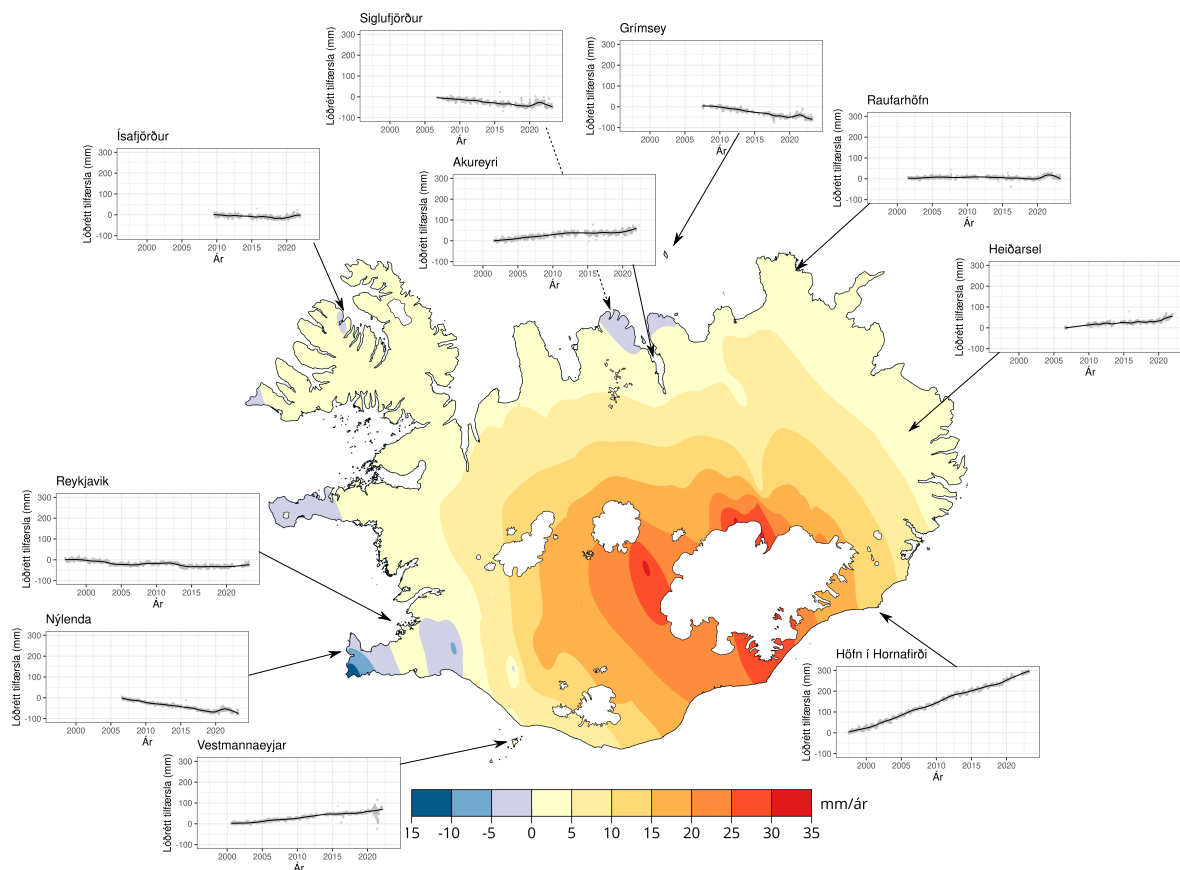
Mynd 2.35: Fingrafar jöklabráðnunar og varmaþensla á nokkrum stöðum við ströndina kringum Ísland árið 2100. Valdar staðsetningar eru sýndar á mynd 2.33. Massatap ísbreiðunnar á Grænlandi og íslensku jöklanna veldur sjávarstöðu lækkingun (bláar og grænar súlur) en massatap ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu veldur sjávarstöðuhækkun (appelsínugular súlur). Varmabensla (raugar súlur) er sú sama á öllum stöðunum og er samkvæmt töflu 2.6. Efsta myndin sýnir niðurstöður fyrir sviðsmynd SSP2-4.5 (RCP4.5 fyrir íslensku jöklana), miðmyndin fyrir sviðsmynd SSP5-8.5 (RCP8.5 fyrir íslensku jöklana) og neðsta myndin fyrir sviðsmyndina SSP5-8.5LC (aukið framlag frá ísbreiðu Suðurskautslandins) (Berglind Pétursdóttir, 2022). Summa þáttanna (svartar súlur) ásamt hnattrænum þáttum og niðurstöðum fyrir 2150 á sömu stöðum eru sýnd í töflu 2.8.

GPS-mæliraðirnar, sem einnig eru sýndar á mynd 2.36, segja sömu sögu og var sýnd í V2018, en þó sýnir heildregna línán, þar sem árstíðasveifla hefur verið numin burt, uppsveiflu eftir 2020 sem er tímabundin í sumum stöðvanna. Ástæður þessarar tímabundnu uppsveiflu eru ókunnar, en hneigð línanna er sú sama og í V2018. Eins og rakið er í V2018 benda líkanreikningar til þess að landris um miðbik og á suðausturhluta landsins sé að stærstum hluta vegna rýrnunar jökla. Fyrir ítarlegri umfjöllun er vísað í V2018, en einnig er rætt um landhæðarbreytingar (Kierulf



o.fl., 2019) í grein 2.5.2.

Ekki hafa verið gerðar spár um hvernig þróun landhæðarbreytinga verður á næstu áratugum, unnið er í þróun reiknilíkana fyrir slíkar spár, en hér verður notast við framreiknaðar landhæðarbreytingar út frá þeim gögnum sem til eru. Sömu sautján staðir umhverfis landið og sýndir voru í kafla 2.5.2 voru valdir (sjá mynd 2.33), landhæðarbreytingar fyrir þá staði lesnir af kortinu á mynd 2.36 og framreiknaðar til 2100 og 2150. Niðurstöður þessara framreikninga eru sýndar í töflu 2.9.



Mynd 2.36: Fyrir miðju: Kort sem byggist á GPS-mælingum á hraða á lóðréttum tilfærslum (mm/ári) á mælistöðvum Landmælinga Íslands á tímabilinu 2004 til 2022. Línurit umhverfis: Niðurstöður frá nokkrum GPS-stöðvum nærri ströndinni þar sem til eru samfelldar GPS-mælingar hluta tímabilsins 1996–2022. Línuritin hafa öll sama kvarða, punktar sýna mælingar með fimm punkta miðgildis-sú og heildregin lína sýnir feril án árstíðasveiflu. (Kort byggt á gögnum LMÍ og GPS gögn frá VÍ).

Til að leggja gróft mat á óvissuna í framreiknaðri heildarlandhækkun, sem sýnd er í töflu 2.9, var reiknað línulegt framhald fyrir öll línuritin á myndinni og síðan reiknað óvissubíl spánna fyrir 2100 og 2150. Það óvissubíl reyndist 5–15 cm fyrir árið 2100 og 7.5–22.5 cm fyrir árið 2150. Lengd tímaraðar hafði ráðandi áhrif á spönn óvissubilsins en ef miðað er við lengd þess tímabils sem kortið byggist á verður spönn óvissu fyrir 2100 um 10 cm og 15 cm fyrir 2150. Hér er sjálfsagt að taka fram varnagla á þessu óvissumati. Í fyrsta lagi er hér verið að meta óvissu með því að skoða samfelldar raðir og nota óvissuna á kort sem byggist á nokkrum endurteknum mælingum. Í öðru lagi eru allar mæliradirnir sem teiknaðar eru á mynd 2.36 stuttar, og með því að nota spönn óvissubils fyrir spárnar fyrir árin 2100 og 2150 er verið að gera ráð fyrir því að meginhneigð og breytileiki séu stöðug fyrir lengra tímabil en þessar stuttu mæliradír sýna. Eins og fyrr segir má líklega rekja stóran hluta af landrasi til rýrnunar jökla, en mörg önnur jarðfræðileg ferli hafa áhrif á landhæðarbreytingar svo beinn framreikningur, eins og sýndur er

Tafla 2.9: Hraði landhæðarbreytinga (mm/ár) og framreiknuð heildarlandhækkun (cm) fyrir árin 2100 og 2150. Hraðinn er lesinn af kortinu á mynd 2.36. Gróf spönn óvissu sem byggist á línuritum á mynd 2.36 er 10 cm fyrir 2100 og 15 cm fyrir árið 2150.

Staðir	mm/ár	2100 (cm)	2150 (cm)
Reykjavík	0.5	4.0	6.6
Gufuskálar	-1.3	-10.0	-16.3
Patreksfjörður	0.7	5.5	8.9
Ísafjörður	-0.6	-6.1	-9.9
Hólmavík	2.6	21.1	34.2
Blönduós	4.3	34.1	55.3
Siglufjörður	-1.2	-9.5	-15.4
Akureyri	3.5	27.7	45.0
Grimsey	-2.7	-21.6	-35.1
Raufarhöfn	0.6	4.9	7.9
Vopnafjörður	0.9	7.3	11.9
Reydarfjörður	4.4	35.5	57.7
Höfn	14.2	112.7	183.1
Kvísker	25.5	204.5	332.3
Vík	5.3	42.6	69.2
Vestmannaeyjabær	3.3	25.8	42.0
Grindavík	-7.1	-55.6	-90.4
Spönn óvissu (cm)		10	15

hér, hefur verulega óvissu. Yfirstandandi rannsóknir á líklegri þróun landhæðarbreytinga munu væntanlega skila betra mati á næstu árum. Eins og fram kemur í grein 2.5.2 er rýrnun jökla og ísbreiða ráðandi í óvissu á sjávarstöðubreytingum á næstu öldum.

#### 2.5.4 Afstæðar sjávarstöðubreytingar kringum Ísland

Til að gera spá fyrir afstæðar sjávarstöðubreytingar fyrir árin 2100 og 2150 á stöðunum 17 umhverfis landið eru niðurstöðurnar, sem sýndar eru í töflum 2.8 og 2.9 fyrir eiginlegar sjávarstöðubreytingar og landhæðarbreytingar, notaðar. Töflur 2.10 og 2.11 sýna þessar niðurstöður með óvissumörkum sem reiknuð eru frá töflu 2.7 fyrir eiginlega sjávarstöðuhækkun og óvissumati fyrir framtíðarlandhæðarbreytingar sem sýnt er í töflu 2.9. Samanlögð óvissa þáttanna tveggja er rót kvadrattsummu þeirra sem þýðir að óvissan í eiginlegri sjávarstöðuhækkun er ráðandi í óvissubílinu sem sýnt er í töflum 2.10 og 2.11.

Niðurstöðurnar sýna að spárnar gera ráð fyrir að umhverfis landið muni afstæð sjávarstaða hækka víða. Þar sem landris er mest á suðausturhluta landsins nær það þó að yfirvinna eiginlega sjávarstöðuhækkun og afstæð sjávarstaða lækkar því á þessu svæði. Þetta er í samræmi við niðurstöður V2018 en töflur 2.10 og 2.11 gefa skýrari mynd af líklegum sjávarstöðubreytingum í framtíðinni og stærð óvissu þeirra.

Vert er að benda á að óvissan í spánum um hækkun sjávarstöðu vex töluvert eftir árið 2100. Sviðsmynd SSP5-8.5LC sker sig úr, í henni veldur massatap ísbreiðunnar á Suðurskautslandinu mikilli hnattrænni hækkun sjávarstöðu og líka hér við land. Óvissan um massatapið er mikið sem veldur því að spönn óvissunnar fyrir þessa sviðsmynd verður einnig mjög mikil. Ef efri óvissumörk þessarar sviðsmyndar eru skoðuð sýnir spáin verulega sjávarstöðuhækkun umhverfis landið árið 2150 (tafla 2.11), líka á þeim stöðum þar sem landris er mest. Þetta endurspeglar þá miklu óvissu sem er um þróun sjávarstöðu á næstu öld.

Fyrir hinar sviðsmyndirnar er óvissan ekki jafnmikil og sjávarstöðuhækkunin minni, þótt hún

Tafla 2.10: Afstæð hækkun sjávar (cm) á 17 stöðum umhverfis landið fyrir árið 2100. Sýndar eru niðurstöður fyrir sviðsmyndir SSP2-4.5, SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC. Tölur innan hornklofa tákna 17%–83% óvissumörk, eða líklega (66%) spönn óvissunnar. Afstæð hækkun tekur tillit til landhæðarbreytingar og eiginlegra sjávarstöðubreytinga.

Staður	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5LC
Reykjavík <i>óvissa</i>	28 [9 til 55]	41 [19 til 72]	59 [−17 til 108]
Gufuskálar <i>óvissa</i>	42 [22 til 68]	54 [31 til 85]	72 [−14.2 til 120]
Patreksfjörður <i>óvissa</i>	24 [6 til 51]	36 [14 til 67]	54 [−22 til 102]
Ísafjörður <i>óvissa</i>	37 [18 til 63]	48 [26 til 79]	66 [−10 til 114]
Hólmavík <i>óvissa</i>	10 [−9 til 36]	22 [−1 til 53]	40 [−36 til 88]
Blönduós <i>óvissa</i>	−3 [−22 til 23]	9 [−13 til 40]	27 [−49 til 75]
Siglufjörður <i>óvissa</i>	41 [22 til 68]	54 [31 til 85]	72 [−4 til 120]
Akureyri <i>óvissa</i>	4 [−15 til 31]	16 [−6 til 47]	34 [−41 til 82.8]
Grimsey <i>óvissa</i>	54 [35 til 80]	67 [44 til 97]	85 [9 til 133]
Raufarhöfn <i>óvissa</i>	29 [10 til 55]	42 [20 til 73]	60 [−16 til 109]
Vopnafjörður <i>óvissa</i>	27 [7 til 53]	40 [17 til 71]	58 [−18 til 106]
Reyðarfjörður <i>óvissa</i>	−1 [−20 til 25]	12 [−10 til 43]	30 [−46 til 79]
Höfn <i>óvissa</i>	−81 [−100 til −54]	−69 [−92 til −38]	−51 [−127 til −3]
Kvísker <i>óvissa</i>	−173 [−192 til −146]	−161 [−184 til −130]	−143 [−219 til −95]
Vík <i>óvissa</i>	−10 [−29 til 17]	3 [−20 til 34]	20 [−55 til 69]
Vestmannaeyjar <i>óvissa</i>	7 [−12 til 34]	20 [−2 til 51]	38 [−38 til 87]
Grindavík <i>óvissa</i>	89 [70 til 115]	102 [79 til 133]	120 [44 til 168]

Tafla 2.11: Afstæð hækkun sjávar (cm) á 17 stöðum umhverfis landið fyrir árið 2150. Sýndar eru niðurstöður fyrir sviðsmyndir SSP2-4.5, SSP5-8.5 og SSP5-8.5LC. Tölur innan hornklofa tákna 17% til 83% óvissumörk, eða líklega (66%) spönn óvissunnar. Afstæð hækkun tekur tillit til landhæðarbreytingar og eiginlegra sjávarstöðubreytinga.

Staður	SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP5-8.5LC
Reykjavík <i>óvissa</i>	41 [18 til 74]	68 [21 til 132]	115 [−29 til 450]
Gufuskálar <i>óvissa</i>	61 [38 til 94]	86 [40 til 150]	133 [−11 til 468]
Patreksfjörður <i>óvissa</i>	33 [10 til 66]	56 [10 til 120]	102 [−42 til 437]
Ísafjörður <i>óvissa</i>	52 [29 til 85]	76 [30 til 140]	122 [−22 til 457]
Hólmavík <i>óvissa</i>	10 [−13 til 43]	35 [−11 til 99]	82 [−62 til 417]
Blönduós <i>óvissa</i>	−11 [−34 til 22]	14 [−32 til 78]	61 [−83 til 396]
Siglufjörður <i>óvissa</i>	61 [38 til 94]	87 [40 til 151]	133 [−10 til 469]
Akureyri <i>óvissa</i>	1 [−22 til 34]	26 [−20 til 90]	73 [−70 til 409]
Grimsey <i>óvissa</i>	82 [59 til 115]	108 [61 til 172]	155 [11 til 490]
Raufarhöfn <i>óvissa</i>	42 [19 til 74]	68 [22 til 133]	116 [−28 til 451]
Vopnafjörður <i>óvissa</i>	39 [16 til 71]	65 [19 til 129]	113 [−30 til 449]
Reyðarfjörður <i>óvissa</i>	−6 [−29 til 27]	21 [−25 til 85]	70 [−74 til 405]
Höfn <i>óvissa</i>	−135 [−158 til −102]	−111 [−158 til −47]	−63 [−206 til 273]
Kvísker <i>óvissa</i>	−284 [−307 til −251]	−261 [−307 til −197]	−212 [−356 til 123]
Vík <i>óvissa</i>	−20 [−43 til 13]	6 [−41 til 70]	54 [−90 til 389]
Vestmannaeyjar <i>óvissa</i>	7 [−16 til 40]	34 [−12 til 98]	82 [−62 til 417]
Grindavík <i>óvissa</i>	139 [116 til 172]	166 [120 til 230]	214 [70 til 549]

sé veruleg á flestum stöðunum, meiri í sviðsmynd SSP5-8.5 en í sviðsmynd SSP2-4.5 og meiri árið 2150 en árið 2100. Mikilvægt er að hafa í huga að sjávarstöðubreytingar munu halda áfram öldum saman, jafnvel þótt losun gróðurhúsalofttegunda verði minnkuð eða stöðvuð. Í IPCC AR6-WG1 er spáin fyrir hnattræna sjávarstöðuhækkun árið 2300 meiri en þrjú metrar, jafnvel í sviðsmynd þar sem náðst hefur að minnka losun gróðurhúsalofttegunda (SSP1-2.6) (Fox-Kemper o.fl., 2021). Það má því búast við því að sú hækkun sem sýnd er í töflum 2.10 og 2.11 fyrir sviðsmyndir SSP2-4.5 og SSP5-8.5 muni rætast að lokum, jafnvel þó að framvindan verði hægari en reikningar samkvæmt þessum sviðsmyndum gefa til kynna.

Það er mikilvægt að tekið sé tillit til þessara spáa fyrir þróun sjávarstöðubreytinga við skipulag við strönd landsins. Tæplega 30 ár eru síðan fyrst voru gefnar út viðmiðunarreglur um viðbrögð við sjávarstöðubreytingum. Þær áttu við um árið 2100 sem þá var eftir 105 ár. Árið 2023 eru 77 ár til ársins 2100 og 127 til ársins 2150. Mörg dæmi eru um það að byggð við sjávarsíðuna á Íslandi hafi verið skipulögð á 19. öld eða fyrr, þ.e. fyrir lengri tíma síðan en nú er til ársins 2150. Sem dæmi má nefna staðsetningu Kvosarinnar í Reykjavík og byggðakjarna á seteyrum eins og á Oddeyri á Akureyri. Því er vert að gera ráð fyrir því að skipulagsákvæðanir, sem teknar eru nú, geti haft áhrif fram til ársins 2150. Það er því mikilvægt er að haga skipulagi við strendur landsins með væntanlegar sjávarstöðubreytingar í huga svo ekki verði aukin vandamál sem tengjast ágangi sjávar sem mun fylgja hækkun sjávarstöðu.

## Heimildir

- Aðalgeirsdóttir, Guðfinna, Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Thorsteinn Thorsteinsson, Joaquín M.C. Belart, Tómas Jóhannesson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Bergur Einarsson, Etienne Berthier, Louise Steffensen Schmidt, Hannes Haraldsson og Helgi Björnsson (2020). „Glacier changes in Iceland from ~1890 to 2019“. Í: *Frontiers in Earth Science* 8, bls. 520. DOI: 10.3389/feart.2020.523646.
- Andri Gunnarsson, Finnur Pálsson, Þorsteinn Þorsteinsson, Hrafnhildur Hannesdóttir og Skafti Brynjólfsson (2022). „Afkoma íslenskra jökla 2021-2022“. Í: *Jökull* 72, bls. 81–86. DOI: 10.33799/jokull12022.72.079o.
- Bamber, Jonathan L, Riccardo EM Riva, Bert LA Vermeersen og Anne M LeBrocq (2009). „Reassessment of the potential sea-level rise from a collapse of the West Antarctic Ice Sheet“. Í: *science* 324.5929, bls. 901–903.
- Belart, Joaquín M. C., Eyjólfur Magnússon, Etienne Berthier, Ágúst Þ Gunnlaugsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Thorsteinn Thorsteinsson og Helgi Björnsson (2020). „Mass Balance of 14 Icelandic Glaciers, 1945–2017: Spatial Variations and Links With Climate“. Í: *Frontiers in Earth Science* 8, bls. 163. DOI: 10.3389/feart.2020.00163.
- Belart, Joaquín M. C., Eyjólfur Magnússon, Etienne Berthier, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir og Tómas Jóhannesson (2019). „The geodetic mass balance of Eyjafjallajökull ice cap for 1945–2014: processing guidelines and relation to climate“. Í: *Journal of Glaciology* 65 (251), bls. 395–409. DOI: 10.1017/jog.2019.16.
- Berglind Pétursdóttir (2022). *Jöklabreytingar og sjávarstaða umhverfis Ísland*. Rannís - Lokaskýrsla.
- (2023). „Áhrif massataps Grænlandsísbreiðu á sjávarstöðu umhverfis Ísland“. B.Sc. thesis. Jarðvísindadeild, Háskóli Íslands.
- Bernat, Maud (2022). *Geodetic mass balance of Mýrdalsjökull ice cap, 1999–2021: DEM processing and climate analysis*. Glaciology. Tæknileg skýrsla. PSL Université Paris, bls. 29. URL: <https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03772002>.
- Bernat, Maud, Joaquín M.C. Belart, Etienne Berthier, Tómas Jóhannesson, Romain Hugonnet, Amaury Dehecq, Eyjólfur Magnússon og Andri Gunnarsson (2023). „Geodetic Mass Balance of Mýrdalsjökull ice cap 1999–2021“. Journal Article.
- Berthier, Etienne, Dana Floriciou, Alex S Gardner, Noel Gourmelen, Livia Jakob, Frank Paul, Désirée Treichler, Bert Wouters, Joaquín M C Belart, Amaury Dehecq, Ines Dussaillant, Romain Hugonnet, Andreas Käab, Lukas Krieger, Finnur Pálsson og Michael Zemp (2023). „Measuring glacier mass changes from space—a review“. Í: *Reports on Progress in Physics* 86.3, bls. 36801. DOI: 10.1088/1361-6633/acaf8e.
- Björnsson, Helgi, Finnur Pálsson, Sverrir Gudmundsson, Eyjólfur Magnússon, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Etienne Berthier, Oddur Sigurðsson og Thorsteinn Thorsteinsson (2013). „Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: Trends and variability since the Little Ice Age“. Í: *Geophysical Research Letters* 40.8, bls. 1546–1550. DOI: 10.1002/grl.50278.
- Björnsson, Helgi, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson og Gwenn E. Flowers (2003). „Surges of glaciers in Iceland“. Í: *Annals of Glaciology* 36, bls. 82–90. DOI: <https://doi.org/10.3189/172756403781816365>.
- Cao, Yunmeng, Sigurjon Jonsson og Sigrun Hreinsdóttir (2022). „Iceland Kinematics from InSAR“. Í.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer og A.S. Unnikrishnan (2013). „Sea Level Change“. Í: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. 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, United Kingdom og New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Compagno, Loris, Harry Zekollari, Matthias Huss og Daniel Farinotti (2021). „Limited impact of climate forcing products on future glacier evolution in Scandinavia and Iceland“. Í: *Journal of Glaciology* 67.264, bls. 727–743. DOI: 10.1017/jog.2021.24.
- CORDEX (2012). *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*. URL: <https://cordex.org/>.
- Crochet, Philippe (2020). *Flood frequency analysis in a changing climate - Climate change impact on design flood*. Tæknileg skýrsla Report 2020-1. Prepred for Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar.
- (2021). *Impact of climate change on mean and high streamflow characteristics in Icelandic watersheds: a case study*. Tæknileg skýrsla Report 2021-RD01. Prepared for Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar.
- (2022). *Hydrological response of Icelandic river basins to projected climate change during the 21st century: A case study*. Tæknileg skýrsla Report 2022-RD01. Prepared for Rannsóknarsjóður Vegagerðarinnar.
- Douville, H, K Raghavan, J Renwick, R P Allan, P A Arias, M Barlow, R Cerezo-Mota, A Cherchi, T Y Gan, J Gergis, D Jiang, A Khan, W Pokam Mba, D Rosenfeld, J Tierney og O Zolina (2021). „Water Cycle Changes“. 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. 1055–1210. DOI: 10.1017/9781009157896.010.
- Drouin, Vincent og Freysteinn Sigmundsson (2019). „Countrywide observations of plate spreading and glacial isostatic adjustment in Iceland inferred by Sentinel-1 radar interferometry, 2015–2018“. Í: *Geophysical Research Letters* 46.14, bls. 8046–8055.
- Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Joaquín M.C. Belart og Helgi Björnsson (2020). *Áhrif breytinga Skeiðarárjökuls á farvg og rennsli Súlu*. Tæknileg skýrsla. Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans. RH-5-20, bls. 17.
- Eythorsson, Darri, Sigurdur M Gardarsson, Andri Gunnarsson og Oli Gretar Blondal Sveinsson (2023). „Observed and predicted trends in Icelandic snow conditions for the period 1930–2100“. Í: *The Cryosphere* 17.1, bls. 51–62.
- Finnur Pálsson og Eyjólfur Magnússon (2021). *Greinargerð vegna styrks af tilraunafé árið 2020: Samvinna um rannsóknir í Grímsvötnum*. Tæknileg skýrsla. Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans. Júní 2021, bls. 18.
- (2022). *Greinargerð vegna styrks af tilraunafé árið 2021: Samvinna um rannsóknir í Grímsvötnum*. Tæknileg skýrsla. Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans. RH-03-22, bls. 18.
- Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Eyjólfur Magnússon, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Sveinbjörn Steinþórsson, Karl Eiríksson og Andri Björnsson (2022a). *Vatnajökull: Mass balance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2021 - 22*. Tæknileg skýrsla. Institute of Earth Sciences University of Iceland og National Power Company.
- Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Sveinbjörn Steinþórsson, Karl Eiríksson og Þorbjörg Anna Sigurbjörnsdóttir (2022b). *Afkomu- og hraðamælingar á Langjökli, jökulárið 2021–2022*. Tæknileg skýrsla. Jarðvísindastofnun Háskólans og Landsvirkjun.
- Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon og Hrafnhildur Hannesdóttir (2019). *Könnun á legu vatnaskila við jökulbotn milli Skaftár og Hverfisfljóts á Tungnaárjökli sunnan Skaftárkatla*. Tæknileg skýrsla. RH-01-2019, bls. 83.
- Foresta, L, N Gourmelen, F Pálsson, P Nienow, H Björnsson og A Shepherd (2016). „Surface elevation change and mass balance of Icelandic ice caps derived from swath mode CryoSat-2 altimetry“. Í: *Geophysical Research Letters* 43.23, bls. 12, 112–138, 145. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GL071485>.

- Fox-Kemper, B, H T Hewitt, C Xiao, G Aðalgeirsdóttir, S S Drijfhout, T L Edwards, N R Golledge, M Hemer, R E Kopp, G Krinner, A Mix, D Notz, S Nowicki, I S Nurhati, L Ruiz, J.-B. Sallée, A B A Slangen og Y Yu (2021). „Ocean, Cryosphere and Sea Level Change“. 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. 1211–1362. DOI: 10.1017/9781009157896.011.
- Geirsdóttir, Áslaug, Gifford H. Miller, John T. Andrews, David J. Harning, Leif S. Anderson, Christopher Florian, Darren J. Larsen og Thor Thordarson (2019). „The onset of neoglaciation in Iceland and the 4.2 ka event“. Í: *Climate of the Past* 15, bls. 25–40.
- Geirsdóttir, Áslaug, Gifford H. Miller, Darren J. Larsen og Steinunn Ólafsdóttir (2013). „Abrupt Holocene climate transitions in the northern North Atlantic region recorded by synchronized lacustrine records in Iceland“. Í: *Quaternary Science Reviews* 70, bls. 48–62.
- Guðmundsson, Snævarr, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Thorsteinn Saemundsson og Tómas Jóhannesson (2020). „Terminus lakes on the south side of Vatnajökull ice cap, SE-Iceland“. Í: *Jökull* 69, bls. 1–34. DOI: 10.33799/jokull12019.69.001.
- Gunnarsson, A, S M Gardarsson, F Pálsson, T Jóhannesson og Ó G B Sveinsson (2021). „Annual and inter-annual variability and trends of albedo of Icelandic glaciers“. Í: *The Cryosphere* 15.2, bls. 547–570. DOI: 10.5194/tc-15-547-2021.
- Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson og Trausti Jónsson (2018). *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018*. Veðurstofa Íslands. URL: <https://www.vedur.is/media/loftslag/Skyrsla-loftslagsbreytingar-2018-Vefur-NY.pdf>.
- Halldór Björnsson, Árný E Sveinbjörnsdóttir, Anna K Daniélsdóttir, Árni Snorrason, B D Sigurdsson, Einar Sveinbjörnsson, Gísli Viggósson, Jóhann Sigurjónsson, Snorri Baldursson, Sólveig Þorvaldsdóttir og Trausti Jónsson (2008). „Hnattrænar loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi“. Í: *Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar, Umhverfissráðuneyti*.
- Hersbach, Hans, Bill Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, Carole Peubey, Raluca Radu, Dinand Schepers, Adrian Simmons, Cornel Soci, Saleh Abdalla, Xavier Abellan, Gianpaolo Balsamo, Peter Bechtold, Gionata Biavati, Jean Bidlot, Massimo Bonavita, Giovanna De Chiara, Per Dahlgren, Dick Dee, Michail Diamantakis, Rossana Dragani, Johannes Flemming, Richard Forbes, Manuel Fuentes, Alan Geer, Leo Haimberger, Sean Healy, Robin J. Hogan, Elías Hólm, Marta Janisková, Sarah Keeley, Patrick Laloyaux, Philippe Lopez, Cristina Lupu, Gabor Radnoti, Patricia de Rosnay, Iryna Rozum, Freja Vamborg, Sebastien Villaume og Jean-Noël Thépaut (2020). „The ERA5 global reanalysis“. Í: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146.730, bls. 1999–2049. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Hersbach, Hans, Brian Bell, Paul Berrisford, Shoji Hirahara, András Horányi, Joaquín Muñoz-Sabater, Julien Nicolas, Carole Peubey, Raluca Radu, Dian Schepers, Adrian Simmons, Cornel Soci, Saleh Abdalla, Xavier Abellan, Gianpaolo Balsamo, Peter Bechtold, Giovanni Biavati, Jean Bidlot, Massimo Bonavita, Giovanna De Chiara, Per Dahlgren, Dick Dee, Michail Diamantakis, Rossana Dragani, Johannes Flemming, Richard Forbes, Manuel Fuentes, Alan Geer, Leopold Haimberger, Sean Healy, Robin J. Hogan, Elias Hólm, Martina Janisková, Sarah Keeley, Patrick Laloyaux, Pablo Lopez, Ciprian Lupu, Gabor Radnoti, Patricia de Rosnay, Iryna Rozum, Freja Vamborg, Sebastien Villaume og Jean-Noël Thépaut (2017). „Complete ERA5 from 1940: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate“. Í: *Copernicus Climate Change Service (C3S) Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.143582cf.
- Hilmar Björn Hróðmarsson og Tinna Þórarinsdóttir (2018). *Flóð íslenskra vatnsfalla flóðagreining rennslisraða*. Tæknileg skýrsla 2018-003. VÍ Skýrsla.



- Hock, Regine, Andrew Bliss, Ben Marzeion, Rianne H. Giesen, Yukiko Hirabayashi, Matthias Huss, Valentina Radić og Aimée B. A. Slangen (2019). „GlacierMIP - A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections“. Þýð. P5658. Í: *Journal of Glaciology* 65.251, bls. 453–467. ISSN: 0022-1430. DOI: 10.1017/jog.2019.22. URL: [https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022143019000224/type/journal\\_article](https://www.cambridge.org/core/product/identifier/S0022143019000224/type/journal_article).
- Hrafnhildur Hannesdóttir (2022). „Jöklabreytingar 1930-1970, 1970-1995, 1995-2020 og 2020-2021“. Í: *Jökull* 72, bls. 71–80. DOI: 10.33799/jokull2022.72.071o.
- Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Ragnar H Þrastarson, Snævarr Guðmundsson, Joaquín M C Belart, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Skúli Víkingsson, Ingibjörg Kaldal og Tómas Jóhannesson (2021). „A national glacier inventory and variations in glacier extent in Iceland from the Little Ice Age maximum to 2019“. Í: *Jökull* 2020.70, bls. 1–34. DOI: 10.33799/jokull2020.70.001.
- Huang, Boyin, Peter W. Thorne, Viva F. Banzon, Tim Boyer, Gennady Chepurin, Jay H. Lawrimore, Matthew J. Menne, Thomas M. Smith, Russell S. Vose og Huai-Min Zhang (2017). *NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST), Version 5*. NOAA National Centers for Environmental Information. URL: <https://doi.org/10.7289/V5T72FNM> (skoðað 14.06.2023).
- Hugonnet, Romain, Robert McNabb, Etienne Berthier, Brian Menounos, Christopher Nuth, Luc Girod, Daniel Farinotti, Matthias Huss, Ines Dussailant, Fanny Brun og Andreas Kääb (2021). „Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century“. Þýð. P8473. Í: *Nature* 592.7856, bls. 726–731. DOI: 10.1038/s41586-021-03436-z.
- Ingólfsson, Ó (2011). „Fingerprints of Quaternary glaciations on Svalbard“. Í: *Geological Society, London, Special Publications* 354.1, bls. 15–31.
- IPCC (2021). „Summary for Policymakers“. 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, 3-32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.
- Jiang, Hao, Raimund Muscheler, Svante Björck, Marit-Solveig Seidenkrantz, Jesper Olsen, Longbin Sha, Jesper Sjolte, Jón Eiríksson, Lisheng Ran, Karen Luise Knudsen og Mads Faurschou Knudsen (2015). „Solar forcing of Holocene summer sea-surface temperatures in the northern North Atlantic“. Í: *Geology* 43.3, bls. 203–206.
- Josey, Simon A, Joel J-M Hirschi, Bablu Sinha, Aurélie Duchez, Jeremy P Grist og Robert Marsh (2018). „The recent Atlantic cold anomaly: Causes, consequences, and related phenomena“. Í: *Annual Review of Marine Science* 10, bls. 475–501.
- Jóhannesson, T, G Aðalgeirsdóttir, H Björnsson, P Crochet, E B Elíasson, 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.
- Jóhannesson, Tómas, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, A. Ahlstrøm, L. M. Andreassen, S. Beldring, Helgi Björnsson, P. Crochet, Bergu Einarsson, H. Elvehøy, Sverrir Guðmundsson, R. Hock, H. Machguth, K. Melvold, Finnur Pálsson, V. Radic, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson (2011). „Hydropower, snow and ice“. Í: *Climate Change and Energy Systems. Impacts, Risks and Adaptation in the Nordic and Baltic Countries*. Gefið út af Þorsteinn Þorsteinsson og Halldór Björnsson. TemaNord 2011:502. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, bls. 91–111.
- Jóhannesson, Tómas, Bolli Pálmason, Árni Hjartarson, Alexander H Jarosch, Eyjólfur Magnússon, Joaquín M C Belart og Magnús Tumi Guðmundsson (2020). „Non-surface mass balance of glaciers in Iceland“. Í: *Journal of Glaciology* 66.258, bls. 685–697. DOI: 10.1017/jog.2020.37.

- Kierulf, Halfdan, Gunnar Valsson, Karl-Uwe Evers, Martin Lidberg, Pekka Häkli, Dalia Prizgiene, Geir Hjelle, Olav Vestøl, Maria Håkansson og Markku Poutanen (2019). „Towards a Dynamic Reference Frame in Iceland“. Í: *Geophysica* 54, bls. 3–17.
- Marcott, Shaun A, Jeremy D Shakun, Peter U Clark og Alan C Mix (2013). „A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years“. Í: *Science* 339.6124, bls. 1198–1201.
- Marzeion, Ben, Regine Hock, Brian Anderson, Andrew Bliss, Nicolas Champollion, Koji Fujita, Matthias Huss, Walter W. Immerzeel, Philip Kraaijenbrink, Jan Hendrik Malles, Fabien Maussion, Valentina Radić, David R. Rounce, Akiko Sakai, Sarah Shannon, Roderik van de Wal og Harry Zekollari (2020). „Partitioning the Uncertainty of Ensemble Projections of Global Glacier Mass Change“. Þýð. P9192. Í: *Earth's Future* 8.7, e2019EF001470. DOI: 10.1029/2019EF001470.
- 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.
- Miller, G. H., Á. Geirsdóttir, Y. Zhong, D. J. Larsen, B. L. Otto-Bliesner, M. M. Holland, D. A. Bailey, K. A. Refsnider, S. J. Lehman, J. R. Southon, C. Anderson, H. Björnsson og T. Thordarson (2012). „Abrupt onset of the Little Ice Age triggered by volcanism and sustained by sea-ice/ocean feedbacks“. Í: *Geophysical Research Letters* 39, bls. L02708. DOI: 10.1029/2011GL050168.
- NASA (2021). *Sea Level Projection Tool*. URL: <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>.
- Nawri, Nikolai, Bolli Pálmason, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson og Sigurður Þorsteinsson (2017). *The ICRA-2016 Atmospheric reanalysis project for Iceland*. Tæknileg skýrsla VÍ-2017-005. Veðurstofa Íslands.
- Noël, Brice, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson, Bert Wouters, Stef Lhermitte, Jan M Haacker og Michiel R van den Broeke (2022). „North Atlantic Cooling is Slowing Down Mass Loss of Icelandic Glaciers“. Í: *Geophysical Research Letters* 49.3, e2021GL095697. DOI: <https://doi.org/10.1029/2021GL095697>.
- Petrini, Michele, Florence Colleoni, Nina Kirchner, Anna LC Hughes, Angelo Camerlenghi, Michele Rebesco, Renata G Lucchi, Emanuele Forte, Renato R Colucci, Riko Noormets o.fl. (2020). „Simulated last deglaciation of the Barents Sea Ice Sheet primarily driven by oceanic conditions“. Í: *Quaternary Science Reviews* 238, bls. 106314.
- PISM (2010). *Parallel Ice Sheet Model*. URL: <https://www.pism.io/>.
- PSMSL (2023). *Permanent Service for Mean Sea Level*. URL: <https://psmsl.org/>.
- Rounce, David R, Regine Hock, Fabien Maussion, Romain Hugonnet, William Kochtitzky, Matthias Huss, Etienne Berthier, Douglas Brinkerhoff, Loris Compagno, Luke Copland, Daniel Farinotti, Brian Menounos og Robert W McNabb (2023). „Global glacier change in the 21st century: Every increase in temperature matters“. Í: *Science* 379.6627, bls. 78–83. DOI: 10.1126/science.abo1324.
- Schmidt, Louise Steffensen, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson, Peter L Langen, Sverrir Gudmundsson og Helgi Björnsson (2020). „Dynamic simulations of Vatnajökull ice cap from 1980 to 2300“. Í: *Journal of Glaciology* 66.255, bls. 97–112. DOI: 10.1017/jog.2019.90.
- Schyberg, Harald, Xiaohua Yang, Morten A.Ø. Køltzow, Bjørn Amstrup, Ásmund Bakketun, Eric Bazile, Jana Bojarova, Jason E. Box, Per Dahlgren, Sverre Hagelin, Maria Homleid, Andrés Horányi, Jacob Høyer, Áke Johannsson, Mari Anne Killie, Heiner Körnich, Patrick Le Moigne, Magnus Lindskog, Terhikki Manninen, Poul Nielsen Englyst, Klaus P. Nielsen, Erik Olsson, Bjorn Palmason, Carlos Peralta Aros, Roger Randriamampianina, Patrick Samuelsson, Robert

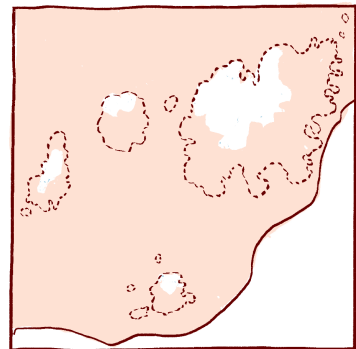
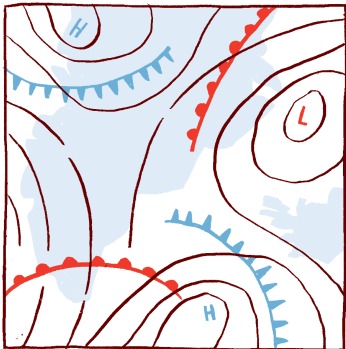
- Stappers, Eyvind Støylen, Steinþór Thorsteinsson, Teresa Valkonen og Zhen-Qing Wang (2020). „Arctic regional reanalysis on height levels from 1991 to present“. Í: *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.8679900d.
- Seager, Richard, David S. Battisti, Jianjun Yin, Neil Gordon, Naomi Naik, Amy C. Clement og Mark A. Cane (2002). „Is the Gulf Stream responsible for Europe’s mild winters?“ Í: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography* 128.586, bls. 2563–2586. DOI: 10.1256/003590002320603584.
- 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>.
- Smeed, David, Gerard McCarthy, Darren Rayner, Ben I Moat, William E Johns, Molly O Baringer og Christopher S Meinen (2016). „Atlantic meridional overturning circulation observed by the RAPID-MOCHA-WBTS (RAPID-Meridional Overturning Circulation and Heatflux Array-Western Boundary Time Series) array at 26N from 2004 to 2015“. Í.
- Spada, G. og D. Melini (2019). „SELEN<sup>4</sup> (SELEN version 4.0): a Fortran program for solving the gravitationally and topographically self-consistent sea-level equation in glacial isostatic adjustment modeling“. Í: *Geoscientific Model Development* 12.12, bls. 5055–5075. DOI: 10.5194/gmd-12-5055-2019. URL: <https://gmd.copernicus.org/articles/12/5055/2019/>.
- Steingrímur Jónsson (2023). „The role of the ocean circulation in melting the glaciers in Iceland“. Í: *EGU General Assembly 2023*. EGU23-12667. Vienna, Austria. URL: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-12667>.
- Weertman, Johannes (1974). „Stability of the junction of an ice sheet and an ice shelf“. Í: *Journal of Glaciology* 13.67, bls. 3–11.
- Wouters, Bert, Alex S Gardner og Geir Moholdt (2019). „Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002–2016)“. Þýð. P7593. Í: *Frontiers in Earth Science* 7, bls. 96. DOI: 10.3389/feart.2019.00096.
- Wuite, Jan, Ludivine Libert, Thomas Nagler og Tómas Jóhannesson (2022). „Continuous monitoring of ice dynamics in Iceland with Sentinel-1 satellite radar images“. Í: *Jökull* 72, bls. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.33799/jokull12021.72.001>.
- Þorsteinn Þorsteinsson, Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson og Bergur Einarsson (2017). *Afkomumælingar á Hofsjökli 1988–2017*. Tæknileg skýrsla. Veðurstofa Íslands, bls. 82. URL: [https://vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2017/2017\\_016\\_hofsajokull130\\_rs.pdf](https://vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2017/2017_016_hofsajokull130_rs.pdf).
- Þorvaldur Thoróddsen (1911). *Lýsing Íslands*. Kaupmannahöfn: Hið Íslenska Bókmenntafélag.



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	Samánburður á niðurstöðum þriggja síðustu skýrslna . . . . .	92
3.5	Sviðsmyndir og óvissa . . . . .	94
3.6	Langtímasamhengi líklegra hitabreytinga . . . . .	95

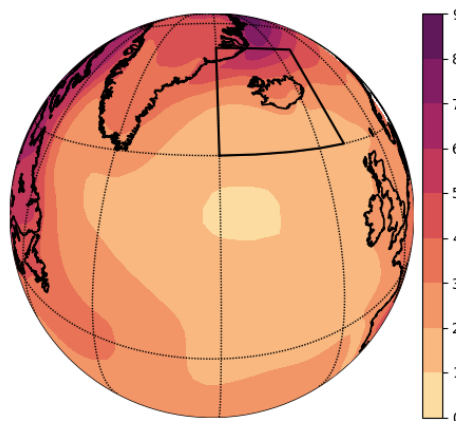
## Samantekt

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*<sup>1</sup>.

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<sup>a</sup> 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<sup>b</sup> 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<sup>c</sup> 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

<sup>1</sup>Geislunarálag 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-verkefninu 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<sup>d</sup>. 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<sup>e</sup> 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.

<sup>a</sup>Reikniverkefnið eru kölluð *Climate Model Intercomparison Project*, sem er skammstafað CMIP.

<sup>b</sup>Á ensku voru þessar sviðsmyndir nefndar *Radiative Concentration Pathways*, skammstafað RCP.

<sup>c</sup>Sviðsmyndir CMIP6 eru fimm ólíkar brautir samfélags- og hagrænnar þróunar, á ensku nefndar *Shared Socioeconomic Pathways*, skammstafað SSP1 til SSP5 (sjá nánar í viðauka C)

<sup>d</sup>Með 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 *jafnvægissvörun* (*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.

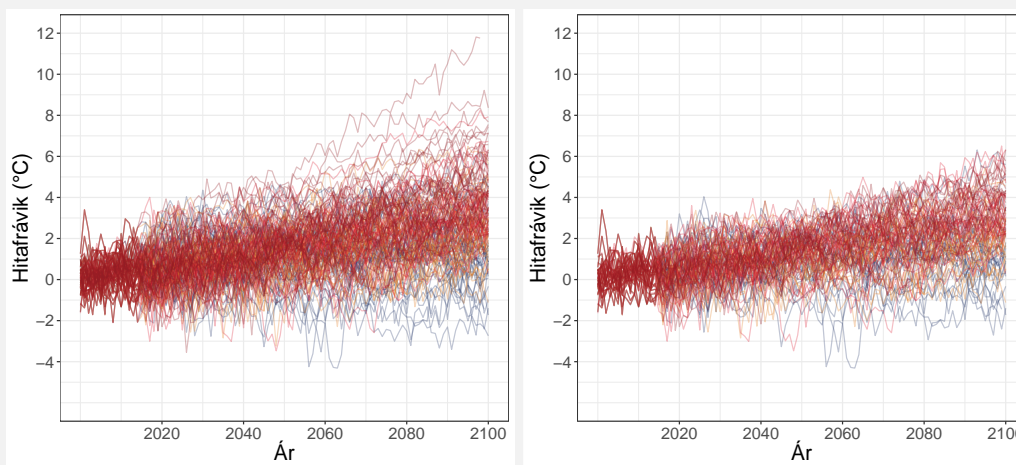
<sup>e</sup>Sjá CMIP6 climate projections á Copernicus Climate Data Store (Copernicus Climate Change Service, 2022).

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 iðnbyltingu.

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

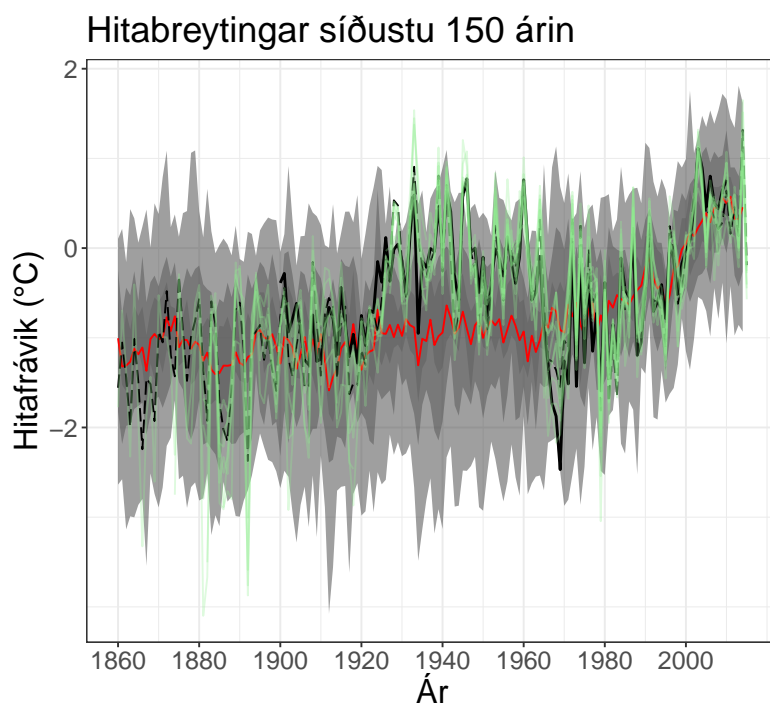


Mynd 3.2: Þróun meðalhita í Íslandsreitnum samkvæmt niðurstöðum CMIP6-líkana. Myndin til vinstri sýnir niðurstöður fyrir allar SSP sviðsmyndir og öll CMIP6-líkön, en myndin til hægri sýnir einungis niðurstöður fyrir þau líkön sem hafa TCR á bilinu 1.4-2.2 °C sem talið er líklegt (66% líkindi) af IPCC.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

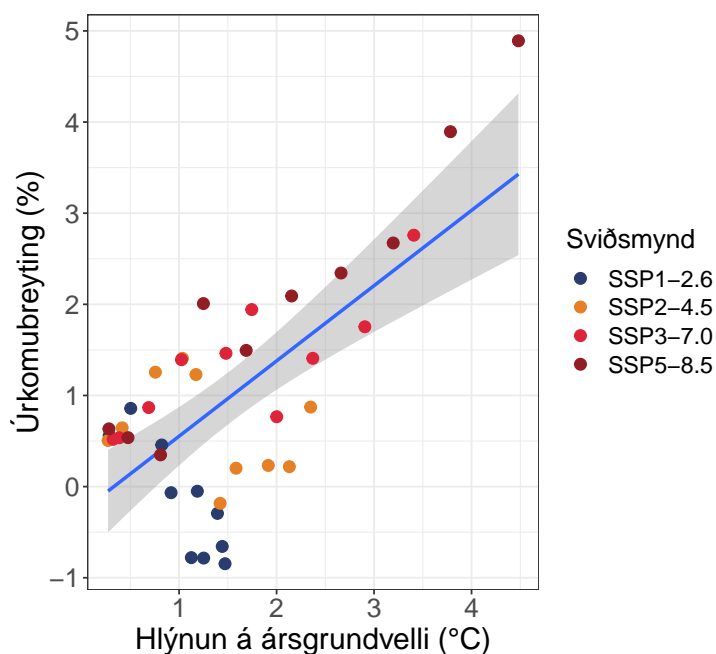
Hita- og úrkomubreytingar á Íslandsreitnum voru reiknaðar sem vik frá meðaltali árána 1985 til 2015. Fyrir úrkomu var hlutfallslegt frávik reiknað. Myndir 3.5 og 3.6 sýna niðurstöður fyrir ársmeðaltöl.

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 jafnhvætt 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.

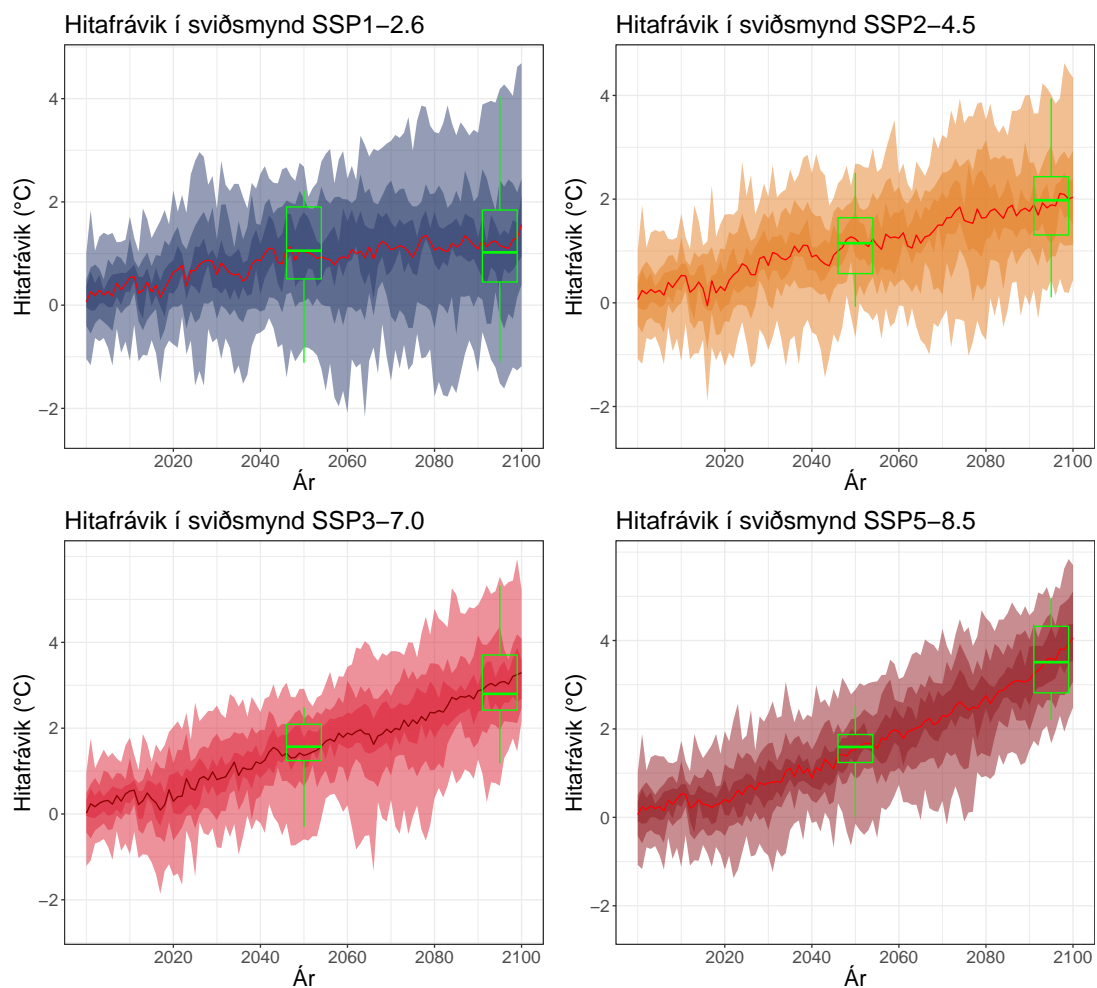
Að meðaltali eykst úrcoma lítilllega í flestum sviðsmyndum við lok aldarinnar en aukningin er þó ekki mikil og dreifing niðurstaðna slík að tölfraðilegur munur finnst ekki á milli sviðsmynda.

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.

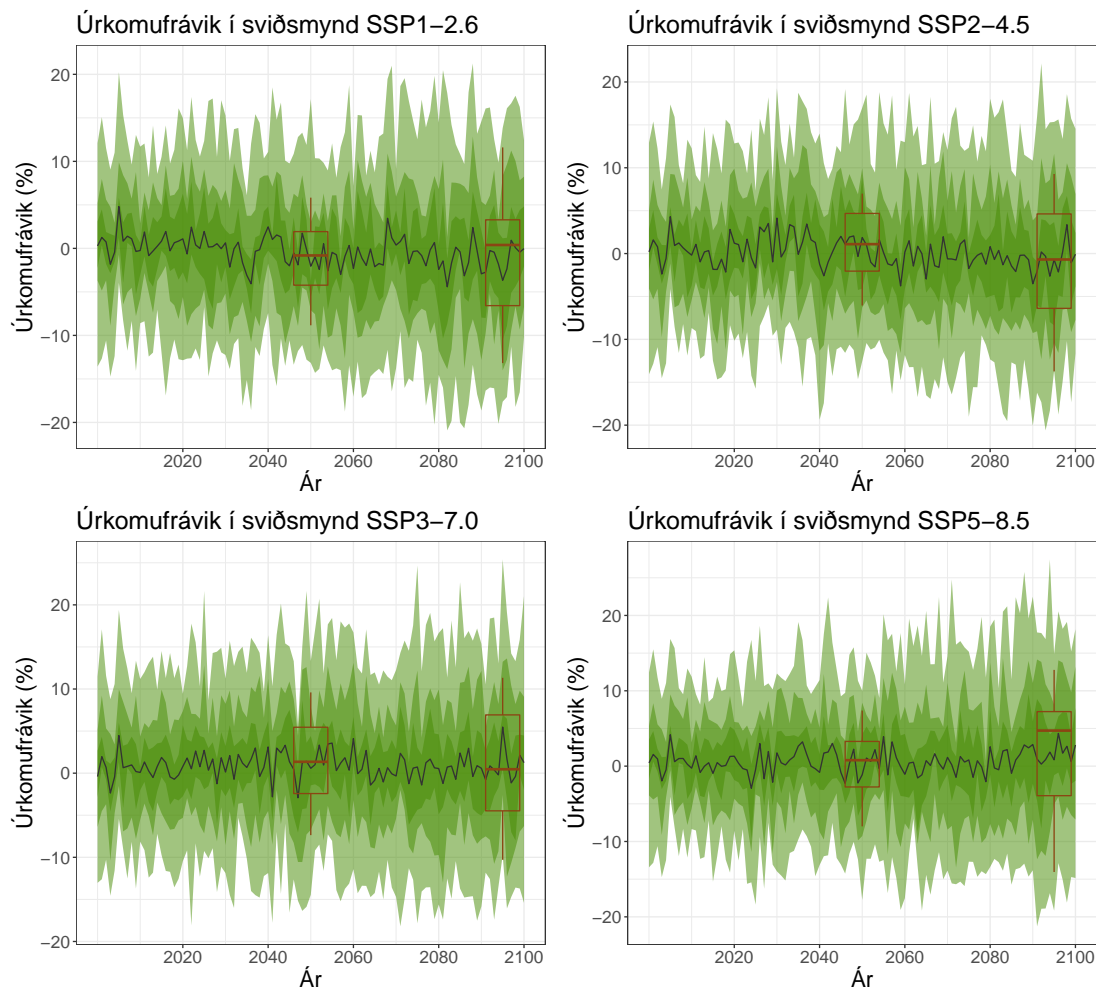
Sviðsmynd	5%	25%	50%	75%	95%
SSP1-2.6	-1.02	0.39	1.01	1.91	4.11
SSP2-4.5	0.12	1.31	1.97	2.47	4.00
SSP3-7.0	1.17	2.45	2.81	3.75	5.38
SSP5-8.5	2.29	2.85	3.53	4.42	5.04

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 rannsóknnum 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

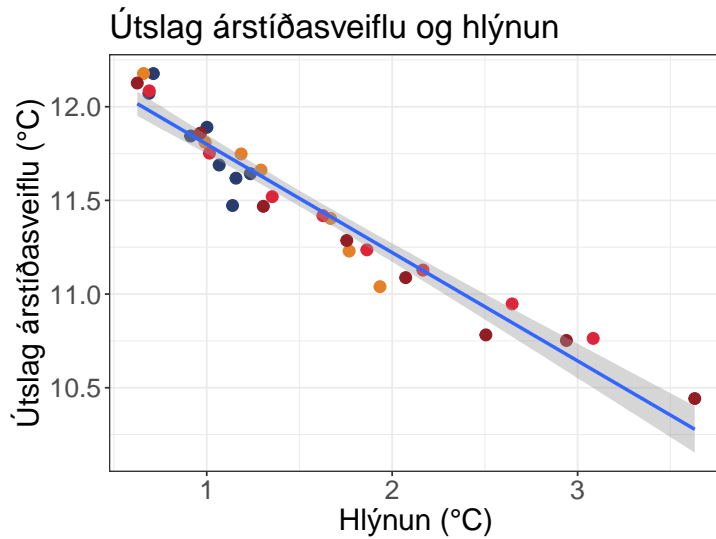
Tafla 3.9: Endurkomutími (í árum) þeirrar úrkomu sem hafði 100 ára endurkomutíma í sögulegu keyrslunni við lok aldarinnar í ólíkum sviðsmyndum.

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 hámark 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



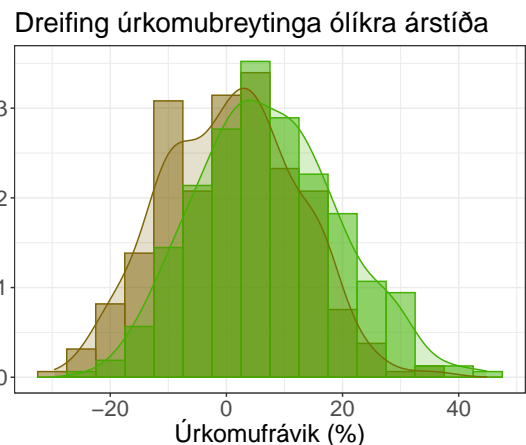
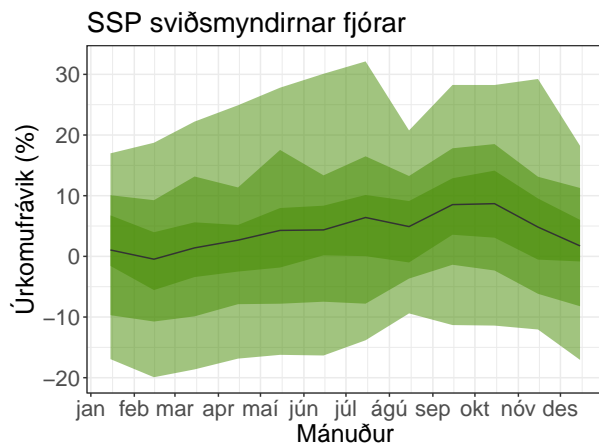
bilinu 70-100 mm fyrir flestar stöðvar á láglandi en getur verið hærri á sumum stöðvum og er almennt hærri austan- og suðaustanlands og til fjalla. Hækkun á 100 ára úrkomu um 5-15% nemur því allt að 4-15 mm á sólarhring fyrir flestar stöðvar, en er mun hærri tala fyrir þær stöðvar þar sem úrkoma er mest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



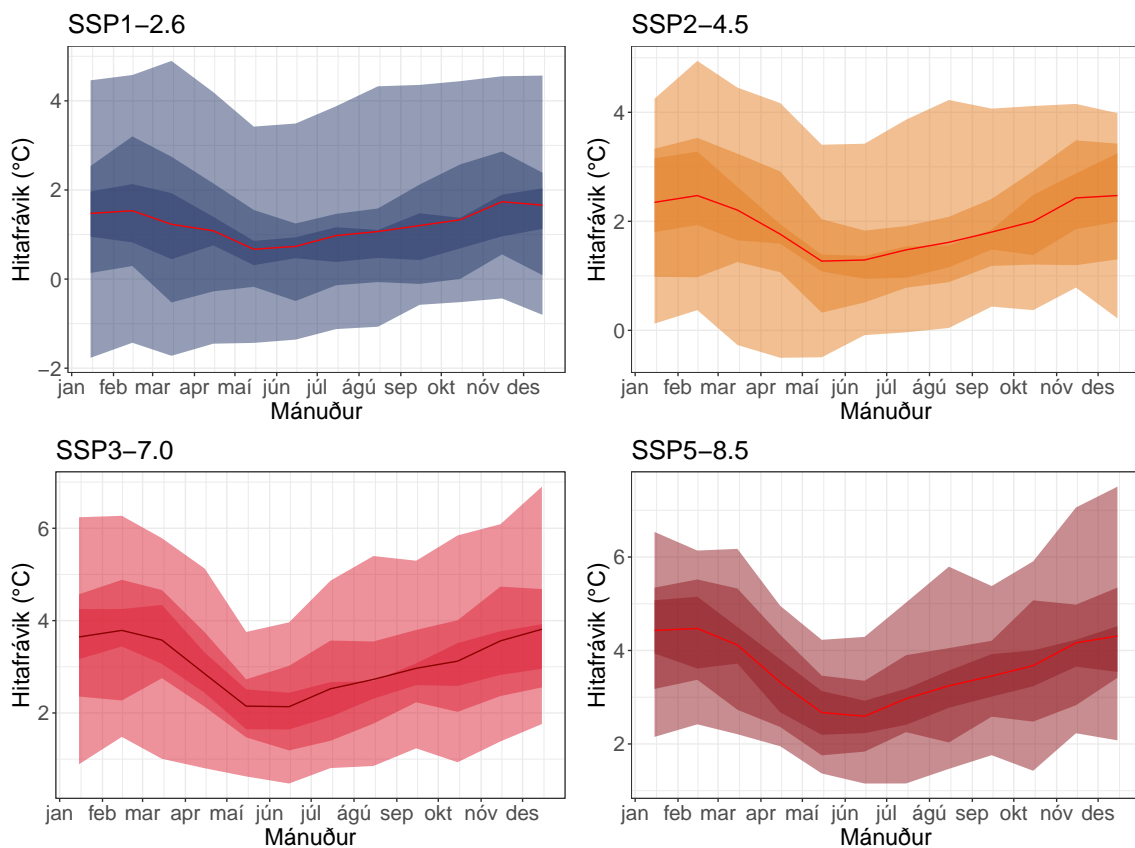
Mynd 3.8: Þróun árstíðasveiflu úrkomu í Íslandsreitnum í sameinuðum gögnum frá öllum SSP-sviðsmyndunum. Myndin til vinstri sýnir breytingar á árstíðasveiflu úrkomu (%) frá tímabilinu 1986-2015 til 2091-2100. Myndin til hægri sýnir dreifingu frávíka vetrarmánaða (janúar til mars, brúnleitt) og haustmánaða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

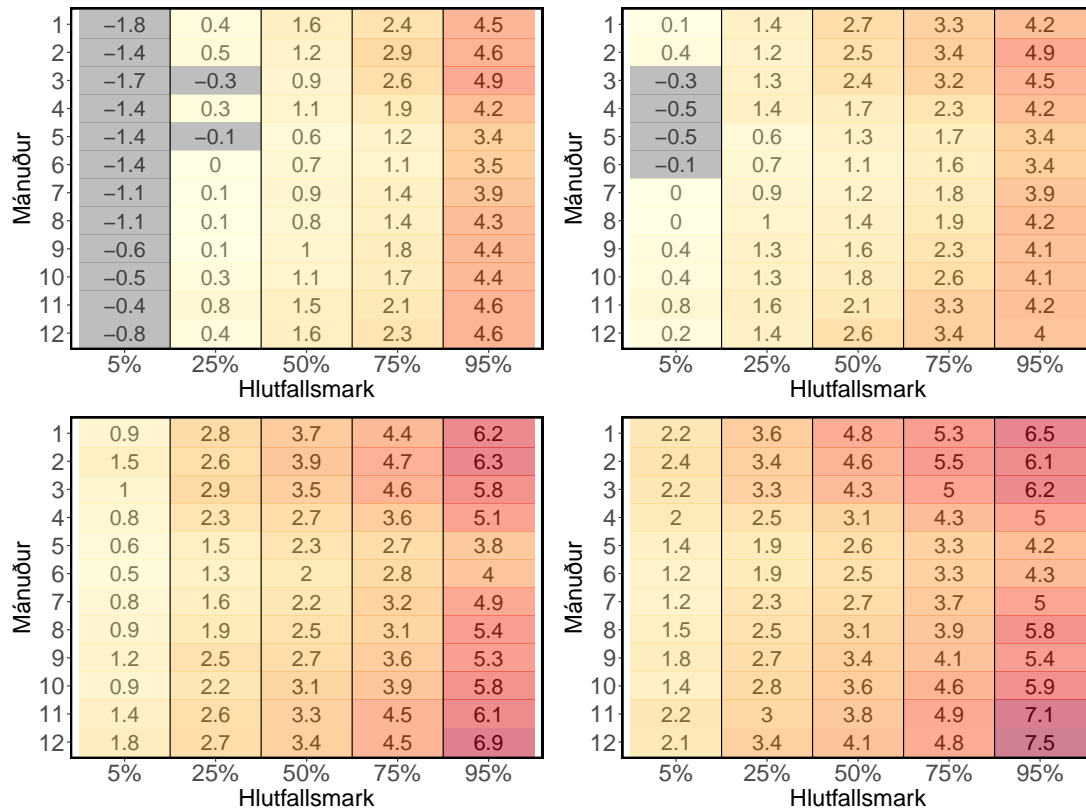
Mynd 3.9 sýnir hitabreytingar frá viðmiðunartímabilinu 1986-2015 til 2091-2100 fyrir hvern mánuð í SSP-sviðsmyndum. Mest hlýnar að vetri til, en minnst að sumri. Í sviðsmynd SSP1-2.6 hlýnar þannig um rúmlega 1.5 °C að vetri en 0.8 °C að sumri og í sviðsmynd SSP5-8.5 hlýnar um 4.5 °C að vetri en 2.5 °C 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 tilhneingingu 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 hlýjustu 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 hlýskeyði síðustu aldar. Eins og fram kemur í grein 2.1.2 liggur munurinn í að á hlýindaskeyði síðustu aldar komu einnig köld ár, ólíkt því sem verið hefur síðustu áratugi.

Mynd 3.3 sýnir að í loftslagslíkönunum 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.

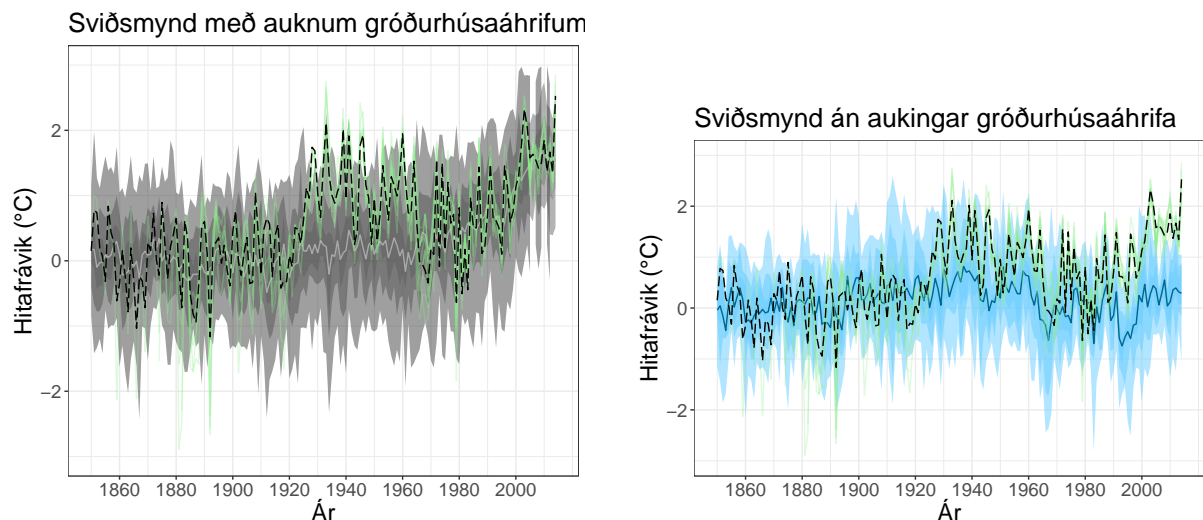
Mynd 3.11 sýnir slíkan samanburð fyrir Íslandsreitinn á tímabilinu 1850–2015. Hitavik eru reiknuð miðað við tímabilið 1850–1900, en þá gætti áhrifa losunar gróðurhúsalofttegunda lítið. Efri myndin byggist á mynd 3.3 og sýna gráskyggðir borðar dreifingu niðurstaðna ólíkra líkana fyrir sögulegu sviðsmyndina 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 loftslagslíkönunum að mestu leyti að spanna náttúrulegan breytileika í mælingum, þó að hlýskeyði 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.

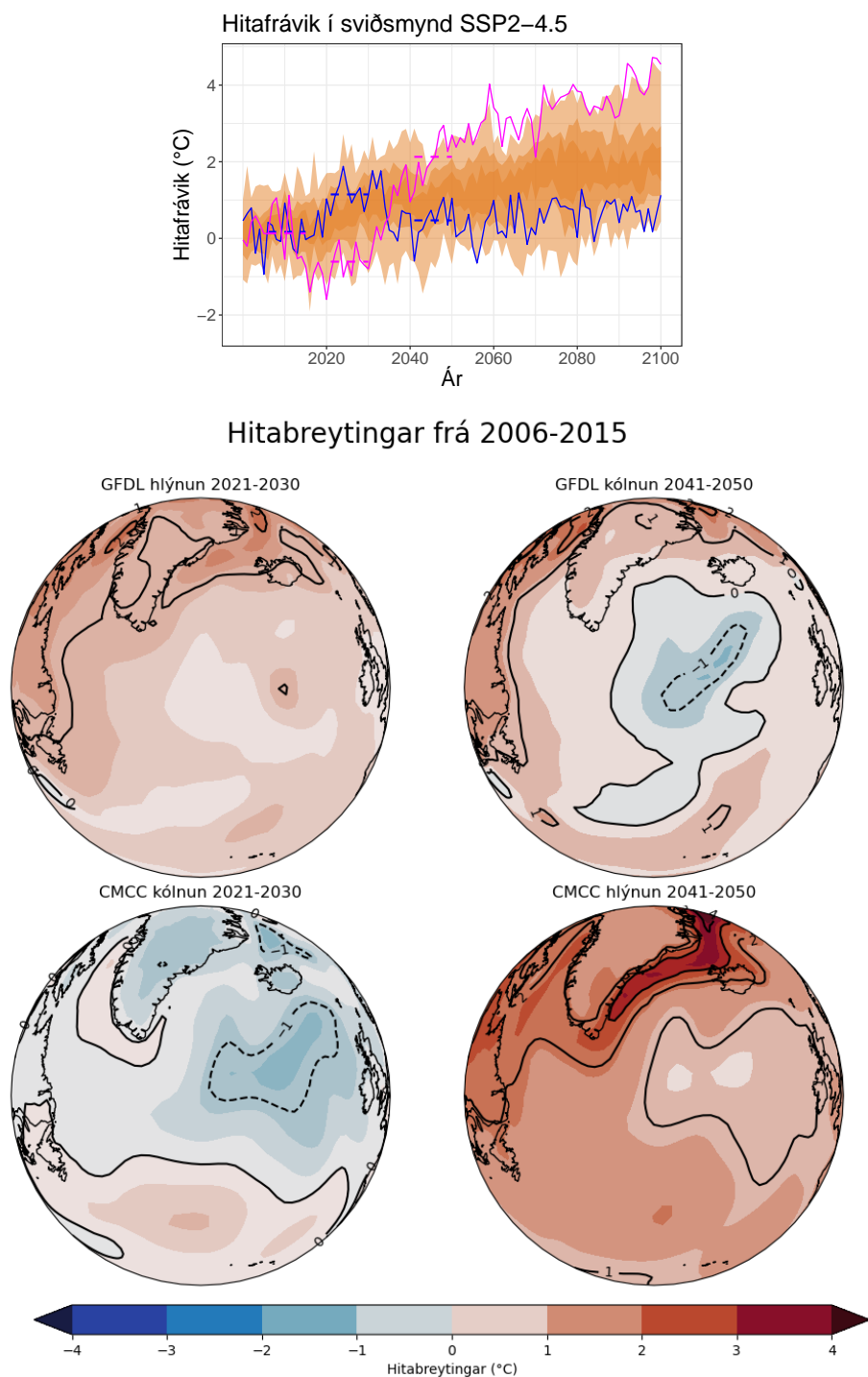
Arias o.fl., 2021). Sú staðreynd passar illa við hugmyndir um að hlýnunin á Íslandi sé dæmi um náttúrulegan breytileika eingöngu. Það liggur því beinast við að gera ráð fyrir áhrifum aukinna gróðurhúsalofttegunda til að útskýra hlýnun á Íslandi og niðurstöðurnar á mynd 3.11.

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.

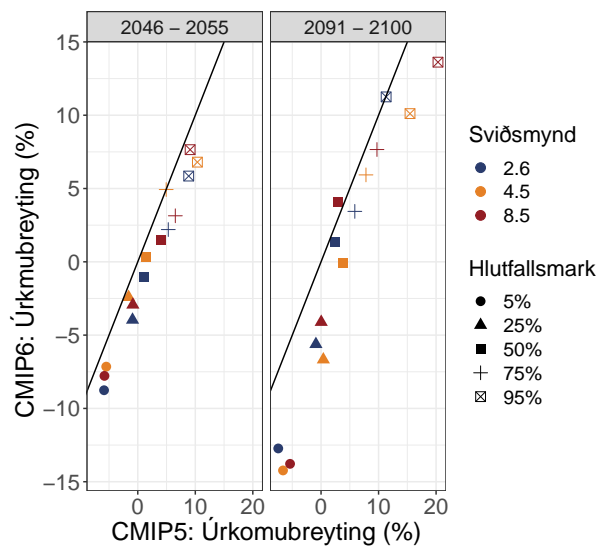


Mynd 3.12: Efri mynd: Dæmi um hlýnda- og kuldaskið í tveimur líkönum á 21. öldinni í sviðsmynd SSP2-4.5 teiknuð ofan á dreifingu allra líkana (sjá SSP2-4.5 í 3.5). Hitaþróun GFDL-líkansins í Íslandsreitnum er merkt blálituð, en þróun í CMCC-líkaninu er merkt með rauðleitum ferli. Á myndinni eru þrjú 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.

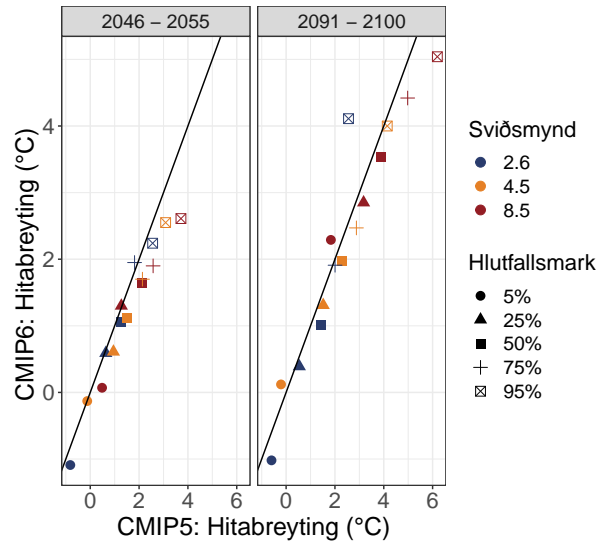
Þrátt fyrir þetta hlýnar í öllum líkön-um og öllum sviðsmyndum á Norður-Atlantshafssvæðinu í heild sinni. Ástæðan er sú að í flestum tilvikum er kólnunin staðbundin og þótt kólni á einu svæði hlýna nærliggjandi svæði. Ef talningin er einskorðuð við þau tilvik þar sem víðtæk staðbundin kólnun nær Íslandsströndum 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 geislunarálág í lok aldarinnar (2.6, 4.5 og 8.5 W/m<sup>2</sup>). 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 gætir 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 geislunarálág í lok aldarinnar (2.6, 4.5 og 8.5 W/m<sup>2</sup>). Ólík tákni eru notuð fyrir hvert hlutfallsmark. Skálínan sýnir hvar reikniverkefni gefa sömu niðurstöðu.

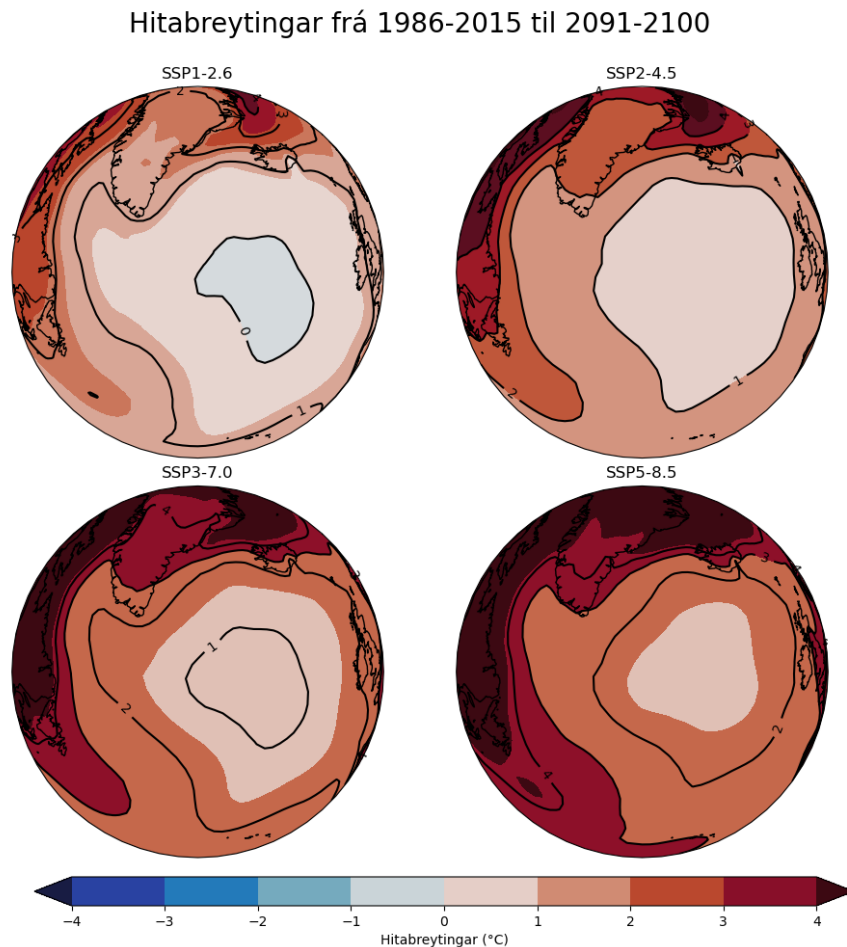
Í þeim niðurstöðum sem sýndar eru á mynd 3.5 er í öllum líkön-um breytileiki milli ára og áratuga. Í sumum tilvikum, sérstaklega framan af 21. öldinni, sýna niðurstöður kólnun frá viðmiðunartímabilinu 1986–2015. Einföld talning leiddi í ljós að fyrir tímabilið 2016 til 2100 sýndu 22% allra líkana einhver 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% tilvika 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 gætir 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.

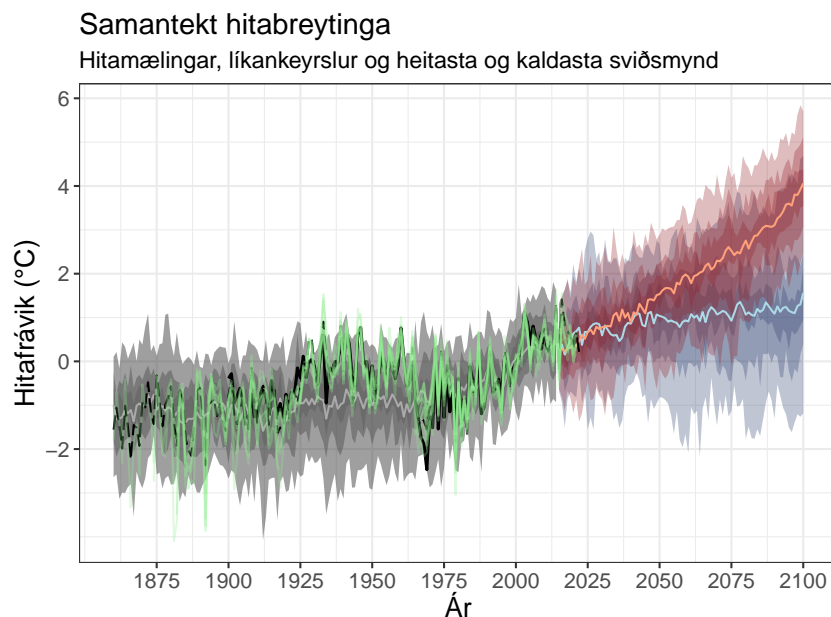
Skýrsla (CMIP)	Kaldasta sviðsmynd	Miðlungs sviðsmynd	Heitasta sviðsmynd
Vísindanefnd 2008 (CMIP3)	B2	A1B	A2
Hraði hlýnnunar ( $^{\circ}\text{C}/\text{áratug}$ )	0.16 [0, 0.33]	0.23 [0.08, 0.33]	0.27 [0.11, 0.41]
Vísindanefnd 2018 (CMIP5)	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Hraði hlýnnunar ( $^{\circ}\text{C}/\text{áratug}$ )	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.

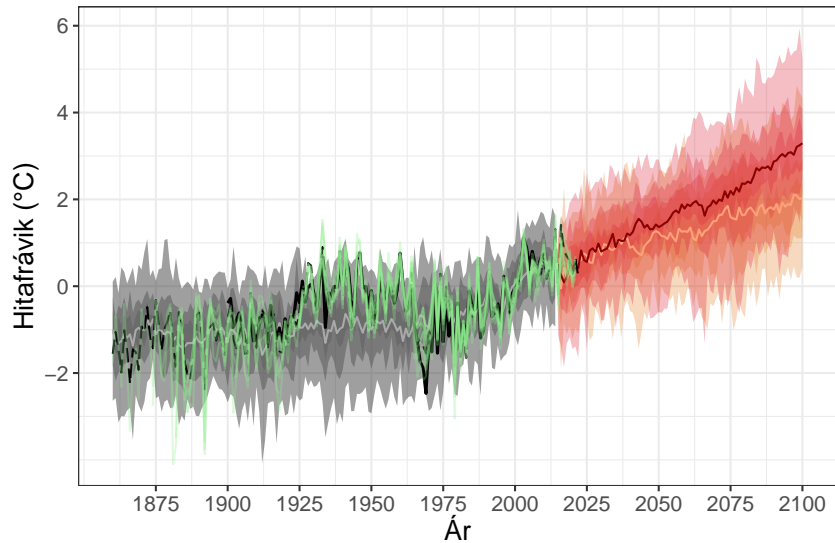
Mynd 3.16 sýnir samantekt á niðurstöðum CMIP6-líkana fyrir Íslandsreitinn. Myndin, sem er hliðstæð við mynd 4.23 í V2018, sýnir hitabreytingar líkana í sögulegu keyrslunni og í sviðsmyndum SSP1-2.6 og SSP5-8.5. Eins og á mynd 3.3 sýnir svört lína niðurstöður ERA20C-greiningarinnar, brotalína sýnir niðurstöður 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



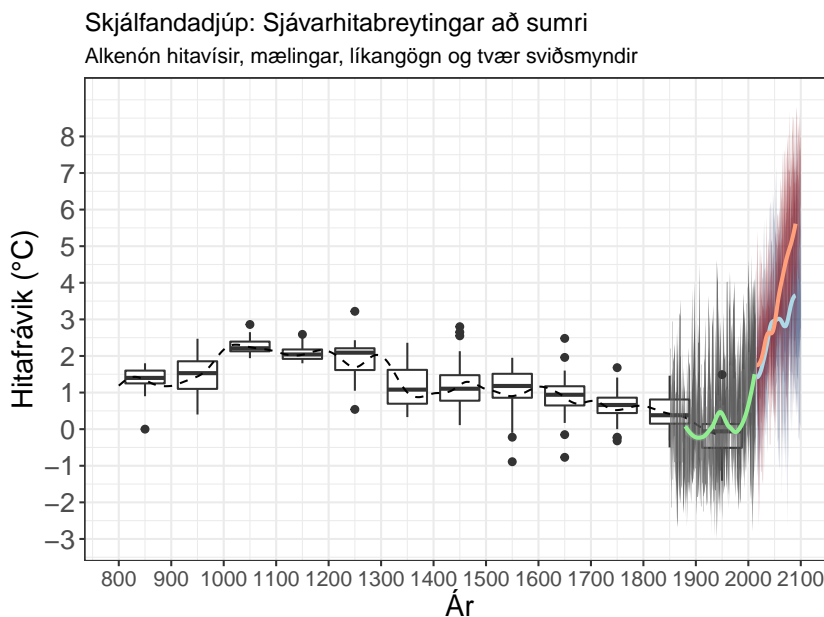
Mynd 3.17: Samantekt hitabreytinga í Íslandsreitnum. Sögulegar keyrslur, og hitagögn. Eins og mynd 3.16 en með miðlungs-sviðsmyndirnar tvær (SSP2-4.5 og SSP3-7.0) þar sem hlýnun er minni en í þeirri heitustu, en meiri en í þeirri köldustu.

## 3.6 Langtímasamhengi líklegra hitabreytinga

Ólíkir óvissubættir fylgja þessum gögnum og þeir draga úr því hversu trúverðugan sam-  
anburð 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 sam-  
anburð 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 vítað 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.