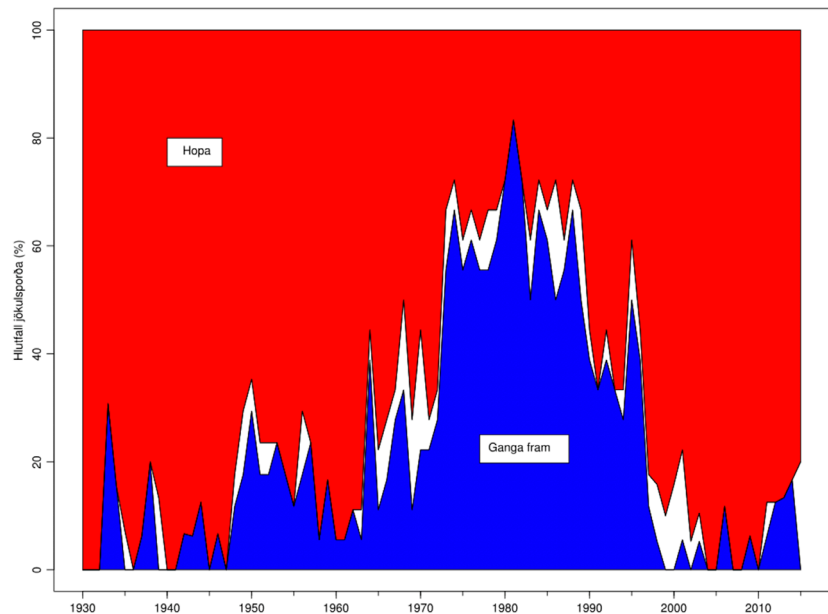


5 Breytingar á jöklum, vatnafari og sjávarstöðu

Samantekt

1. Íslenskir jöklar náðu mestri útbreiðslu í lok 19. aldar. Síðan hafa þeir hopað mikið og flatarmál þeirra dregist saman um nálægt 2000 km² sem er um 15% samdráttur. Hörfunin átti sér einkum stað á tveimur tímabilum, í hlýindum á 3. og 4. áratug síðustu aldar og frá 1995.
2. Á tímabilinu 2000 til 2014 nam samdrátturinn rúmlega 500 km², eða um 0.35% á ári.
3. Miklar breytingar hafa orðið á afrennslisleiðum frá jöklum. Við suðaustanverðan Vatnajökul rennur nú allt vatn sem kemur undan Skeiðarárjökli í Gígjukvísl.
4. Breytingar hafa víða orðið á jaðarlónum við jökla, ný lón hafa myndast, sum eldri hafa stækkað og önnur horfið.
5. Breytingar á farvegum jökuláa geta haft áhrif á samgöngumannvirki. Þannig stendur nú lengsta brú landsins, Skeiðarárbrú, að mestu á þurru.
6. Gera þarf ráð fyrir áframhaldandi breytingum á jökulám og jökullónum.
7. Niðurstöður reikninga með jöklafræðingum benda til þess að gangi sviðsmyndir um loftslagsbreytingar eftir muni íslenskir jöklar halda áfram að minnka.
8. Fram að miðbiki aldarinnar er líklegt að samdráttur Langjökuls verði á bilinu 20–40% en samdráttur Hofsjökuls 15–25%. Við lok aldarinnar gæti Langjökull hafa tapað 85% af rúmmáli sínu en Hofsjökull og syðri hluti Vatnajökuls um 60%.
9. Gangi hlýrri sviðsmyndir um loftslagsbreytingar eftir hverfa jöklar á Íslandi einn af öðrum á næstu tveimur öldum. Vatnajökull mun lifa lengst, a.m.k. á hæstu fjallatindum.
10. Afrennsli frá jöklum mun aukast og ná hámarki upp úr miðri öldinni en dragast saman á síðustu áratugum aldarinnar.
11. Þessar breytingar hafa áhrif á hönnunar- og rekstrarforsendur virkjana og ýmissa annarra innviða.
12. Mikill breytileiki er í vatnafari á landinu og mælingar sýna skammtíma- og áratugabreytingar samfara langtímahneigð.
13. Reikningar á afrennsli sýna að árstíðasveifla breytist þegar hlýnar.
14. Á hlýndaskeiði eftir aldamót nálgast mælt rennsli það sem sviðsmyndir með hlýnun gefa til kynna.
15. Gera má ráð fyrir að afrennsli aukist í takt við aukna úrkomu og bráðnun jökla, a.m.k. fram yfir miðja öldina.
16. Fyrst um sinn er líklegt að breytingar í árstíðasveiflu verði greinilegri en aukning afrennslis.
17. Betri þekking er nú á svæðisbundnum breytingum á sjávarstöðu en var þegar síðasta skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar var rituð. Meðal svæðisbundinna þátta má nefna varmaþenslu og breytingar í þyngdarsviði.
18. Bráðnun jökla hefur í för með sér breytingu á þyngdarsviði næst jöklunum sem dregur úr hækkun sjávar þar. Fyrir stór íshvel eru þessi áhrif meiri, jafnvel svo mikil að sjávarstaða getur lækkað á sumum svæðum. Hækkun sjávarstöðu fjær íshvelinu verður því meiri. Bráðnun Grænlandsjökuls dregur úr hækkun sjávar hér við land, bráðnun á Suðurskautslandinu hækkar sjávarstöðu við landið.
19. Rannsóknir á sjávarstöðubreytingum við Ísland benda til þess að sjávarstaða hafi hækkað meira á síðustu 500 árum en á 1500 árum þar á undan.
20. Utan Reykjavíkur er langtímamælingum á sjávarstöðu mjög ábótavant. Tryggja þarf að mælingar á sjávarstöðu nýtist til þess að fylgjast með langtímabreytingum.
21. Landris og landsig útskýra að nokkru þær sjávarstöðubreytingar sem nú verður vart við ströndina.
22. Mælingar á landhæðarbreytingum á Íslandi sýna að landsig er víða við ströndina vestanlands og fyrir miðju Norðurlandi en inn til landsins er landris. Frá

Mynd 5.1 Árlegt hlutfall (%) íslenskra jökla sem gengu fram og hopuðu á árunum 1931 til 2016. Aðeins eru taldir með jafngangsjöklar. Myndin sýnir gögn frá 10 til 20 jökulsporðum hvert ár. (Gögn frá Jöklarannsóknafélagi Íslands).



- Austurlandi og vestur eftir suðurströndinni er landris, ákafast suðaustanlands.
23. Þar sem landris er ákafast er líklegt að sjávarstaða falli á öldinni.
 24. Líklegt er að hækkun sjávarstöðu hér við land verði á bilinu 30–40% af hnattrænni meðalhækkun. Óvissumörk eru rífleg og hefur ísbráðnun á Grænlandi og Suðurskautlandi ráðandi áhrif á þetta hlutfall og getur aukið hækkun um tugi sentímetra.
 25. Óafturkræft hrun á jöklum á Suðurskautlandinu kann að vera hafið. Það getur á nokkrum öldum valdið margra metra hækkun á sjávarborði heimshafanna.
 26. Langtímahækkun sjávarstöðu er því óumflýjanleg víðast hvar við ströndina utan Suðausturlands.

5.1 Jöklar

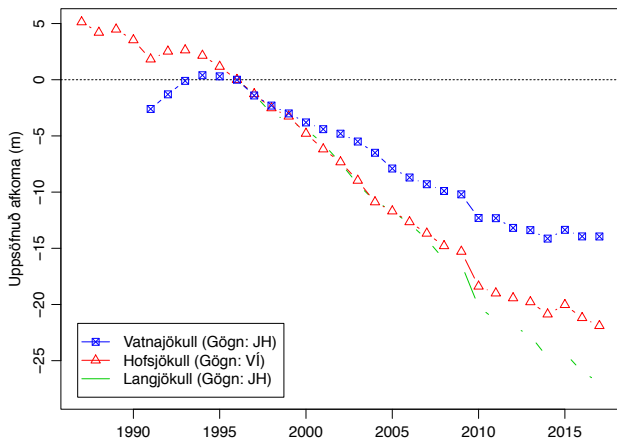
Fjallað var um breytingar á stærð íslenskra jökla á síðustu öld og líkleg afdrif þeirra í hlýnandi heimi í síðustu skýrslu vísindanefndar¹. Þar kom fram að frá upphafi Íslandsbyggðar hefðu jöklar líklega víðast náð mestri útbreiðslu undir lok 19. aldar. Skeið jökulhörfunar stóð frá þessum tíma fram yfir 1960. Þá tók við tók við skeið stöðnunar og jafnvel framrásar í rúma þrjá áratugi en frá 1995 hafa allir jöklar hopað. Fram til loka 21. aldar má gera ráð fyrir að jöklar haldi áfram að hörfa og af stóru jöklunum mun Langjökull líklega

rýrna mest og margir minni jöklar hverfa alveg, en nokkrir nafngreindir jöklar hafa þegar horfið.

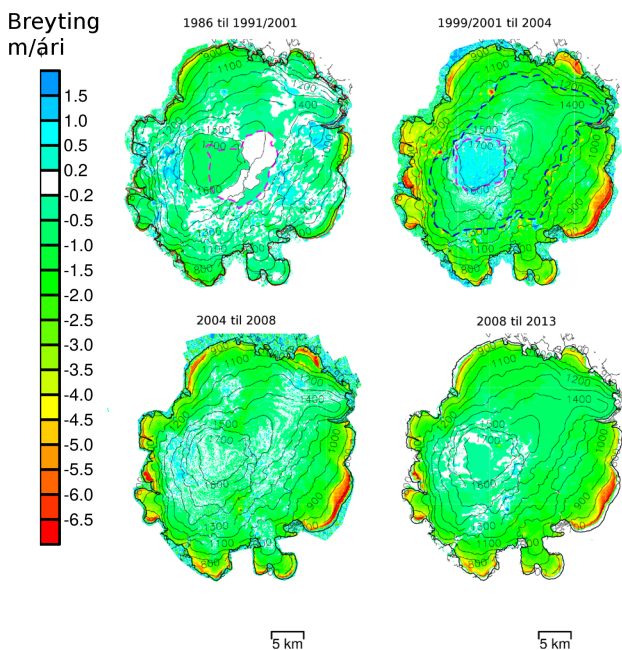
5.1.1 Ástand og breytingar frá lokum litlu ísaldar

Á vegum Jöklarannsóknafélags Íslands hafa verið tekin saman gögn um stöðu jökulsporða frá því á fyrri hluta síðustu aldar. Mynd 5.1 sýnir hlutfall jafngangsjökla, þ.e. jökla sem ekki eru framhlaupsjöklar, sem ganga fram eða hopa frá 1930². Myndin sýnir að flestir jöklar sem fylgst er með hopa, og sum árin á þessari öld hafa allir jöklarnir hopað. Greining jökuljaðra og ummerkja um stöðu jökulsporða frá fyrri tíð á gervihnattamyndum, flugmyndum og á vettvangi³ sýnir að flatarmál jökulhulins lands minnkaði úr u.þ.b. 12.5 þúsund km² í um 10.5 þúsund km², eða um nálægt 2000 km², frá mestu útbreiðslu jöklanna í lok 19. aldar til ársins 2014^{3,4,5}. Þar af minnkaði flatarmál jöklanna um tæpa 1000 km² á tímabilinu 1945/46 til 2014. Hörfunin hefur hert á sér síðustu áratuginu og jöklarnir minnkuðu um rúma 500 km² á tímabilinu 2000 til 2014 sem samsvarar um 35 km² eða 0.35% á ári.

Rannsóknir síðustu ára hafa varpað ljósi á rýrnun jöklanna frá hámarksútbreiðslu við lok 19. aldar. Nýjar rannsóknir á skriðjöklum Vatnajökuls í Austur-Skaftafellssýslu (frá Morsárjökli í vestri að Lambatungnajökli í austri)^{6,7} sýna að síðan þeir náðu lengst fram hefur flatarmálið minnkað um 278 km² og yfirborðið víða lækkað um 150–270 m nærri sporðunum og upp í 300–400 metralegu á Breiðamerkurjökli, ef



Mynd 5.2 Rýrnun stóru jöklanna (m), byggt á afkomumælingu. Frá 1995 er einungis eitt ár (2014–2015) með jákvæða afkomu. Mjög neikvæð afkoma ársins 2009–2010 er að mestu vegna ösku sem féll á jöklana í eldgosinu í Eyjafjallajökli. (Heimildir: sjá tilvísun 9. Eftir 2010 byggist myndin á óbirtum gögnum frá Jarðvísindastofnun HÍ, Landsvirkjun og Veðurstofu Íslands.)



Mynd 5.3 Árleg þynning (m/ári) Hofsjökuls 1986–1999/2001, 1999/2001–2004, 2004–2008 og 2008–2013. (Heimildir: sjá tilvísarnir 11 og 12.)

Nafn jökuls	Ísþykkt [m]	Rúmmál íss [km ³]	Hlutfallsleg rýrnun (%)	Breyting á ári [mvatns/ár]
Vatnajökull	15	121	4	-0.6
Hofsjökull	28	24	12	-1.2
Langjökull	30	27	14	-1.3

Tafla 5.1 Afkoma stóru jöklanna á tímabilinu 1995–2016. Fyrstu tveir dálkar sýna breytingar í þykkt (m) og rúmmáli (km³). Síðasti dálkurinn sýnir breytingu sem vatnsgildi (m_{vatns}/ári), en þar er búið að reikna breytingu á jökulís yfir í samsvarandi rúmmál af vatni. (Heimildir: sjá tilvísun 9 og texta við mynd 5.2.)

eingöngu er litið til þess hluta jökulsins sem er yfir sjávarmáli. Í dýpsta hluta Jökulsárlóns hefur þykkt jökulsins minnkað um yfir 500 m frá lokum 19. aldar ef tekið er tillit til íssins sem fyllti dalinn undir sjávarmáli þar sem lónið er nú. Í heildina er rýrnun þessara jökla, sem eru um 2000 km² að flatarmáli, metin 129±11 km³ íss sem jafngildir 114 km³ vatns. Hlutfallslegt rúmmálstap jöklanna síðan um 1890 er samkvæmt þessum rannsóknum 15–50%. Afkoma jöklanna var mjög neikvæð á árunum 2002–2010, eða -1.34±0,12 m að vatnsgildi á ári sem er með því mesta sem þekktist í heiminum á þessu tímabili⁸.

Greiningar á kortum, gervihnattamyndum, auk niðurstaðna afkomumælinga á Vatnajökli, Hofsjökli og Langjökli síðustu áratugi sýna að þessir jöklar hafa allir tapað verulegum massa frá því um 1890^{9,10}. Mynd 5.2 sýnir uppsafnað massatap á tímabilinu og tafla 5.1 sýnir ítarlegri upplýsingar.

Á árunum 2007–2013 var yfirborð íslenskra jökla og næsta nágrennis þeirra kortlagt með leysimælingum (lidar) í mikilli upplausn¹¹. Með því að bera þessi kort saman við eldri mælingar má kortleggja þynningu jöklanna og meta heildarrýrnun þeirra. Mynd 5.3 sýnir þynningu Hofsjökuls frá 1986 til 2013^{11,12}. Töflur 5.1 og 5.2 sýna samantekt á niðurstöðum fyrir nokkra jökla. Ljóst er að allir þessir jöklar hafa rýrnað á tímabilinu. Mynd 5.3 sýnir að Hofsjökull hefur þynnst langmest við sporðinn, þar sem hann er að hopa. Meðal áhrifa hopunar við jökulspórða má nefna farvega-breytingar jökuláa og myndun jaðarlóna.

Greining á loftmyndum af Drangajökli árin 1946, 1960, 1975, 1985, 1994 og 2005 bendir til þess að á tímabilinu 1946 til 2005 hafi jökullinn að jafnaði tapað 0.26 m_{vatns} á ári. Hann hefur því rýrnað minna en jöklar miðhálandisins (tafla 5.1), enda stækkaði Drangajökull á hluta tímabilsins, a.m.k. milli 1985 og 1994¹³. Beinar mælingar á afkomu Drangajökuls á

Mynd 5.4 Skeiðarárbrú árið 2010. Ný brú yfir Morsá hefur nú tekið við hlutverki Skeiðarárbrúar. (Ljósmynd: Halldór Björnsson.)



árunum 2004–2015 sýna lækkun að jafnaði um 0.3m/ári á þessu tímabili. Þær mælingar ná aðeins til hluta jökulsins en ber nokkuð vel saman við niðurstöður úr samanburði hæðarlíkana frá 1999 og 2011 (tafla 5.2).

Nafn jökuls	Tímabil	Afkoma, vatnsgildi [$m_{\text{vatns}}/\text{ár}$]
Snæfellsjökull	1999–2008	-1.4
Drangajökull	~1999–2011	-0.5
Eyjafjallajökull	1998–2010	-1.2
Torfajökull	1998–2011	-1.9
Tindfjallajökull	1998–2011	-1.3

Tafla 5.2 Afkoma nokkurra minni jökla ($m_{\text{vatns}}/\text{ári}$) reiknuð út frá samanburði leysimælinga 2007–2012 við eldri kort. (Heimildir: sjá tilvísanir, 11, 13, 14 og 15.)

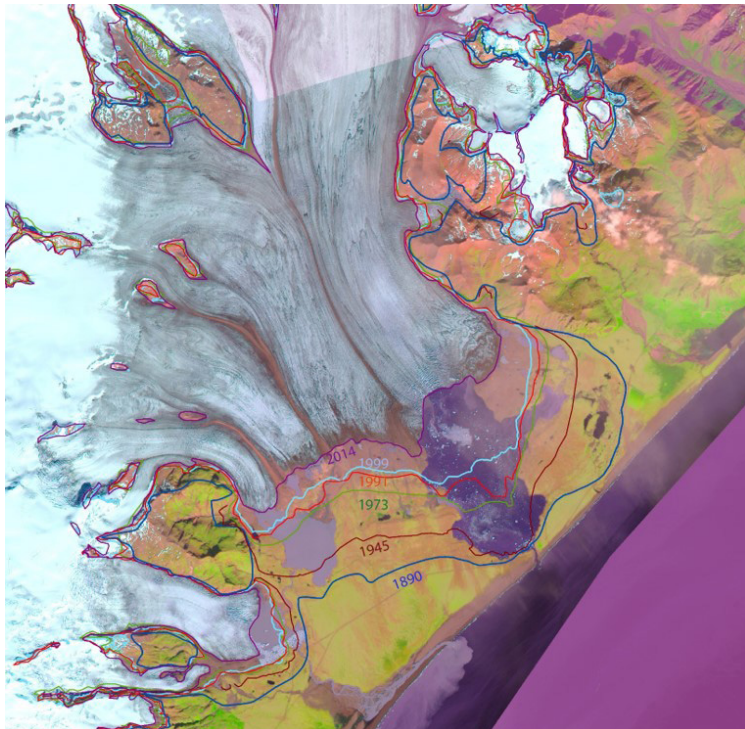
5.1.2 Breytingar á afrennsli frá jöklum og á jökullónum

Breytingar á farvegum jökuláa voru ræddar í V2008 og bent á að brúarmannvirki gætu staðið á þurru í kjölfarið. Í júlímánuði 2009 fann Skeiðará sér farveg framan við jökulinn og sameinaðist Gígjukvísl¹⁶. Fyrir vikið stendur brúin yfir Skeiðará að mestu á þurru eins og sjá má á mynd 5.4. Ný brú yfir Morsá leysti Skeiðarárbrúna af hólmi haustið 2017. Einnig flutti Súla sig yfir í Gígjukvísl í júlí 2016¹⁷ og nú er allt jökulvatn frá Skeiðarárjöklum í Gígjukvísl.

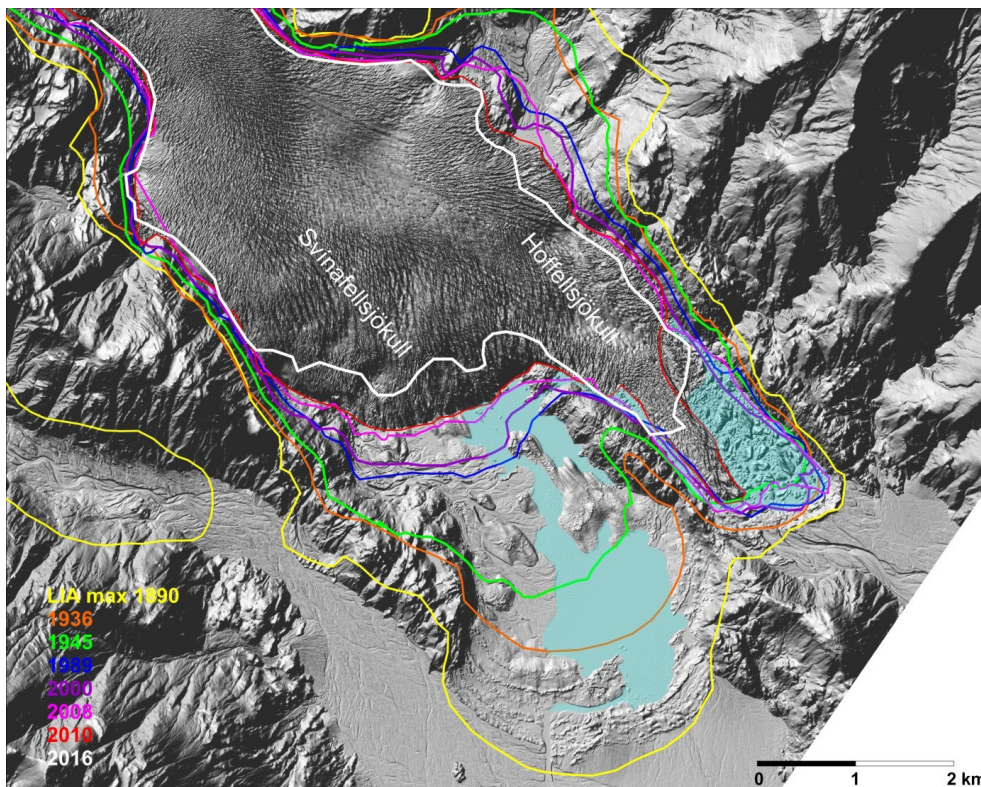
Tafla 5.3 sýnir yfirlit um þær breytingar á farvegum jökuláa sem skráðar eru í heimildum. Þessi listi er fjarri

því að vera tæmandi og finna má sagnir um farvegabreytingar í Landnámu.

Alþekkt er að þegar jöklar hörfa geta myndast lón fyrir framan þá. Mynd 5.5 sýnir dæmi um þetta en þar eru útlínur Breiðamerkurjökuls teiknaðar með nokkurra áratuga millibili eftir að jökullinn byrjaði að hörfa seint á 19. öld. Á söndunum fyrir framan jökulinn mynduðust stór jökullón. Í V2008 var bent á að jaðarlónum myndi fjölga á næstu árum og áratugum og má sem dæmi um ný jaðarlón nefna lón við Skeiðarárjökul og lón sem byrjaði að myndast um aldamótin 2000, í Fossdal í Esjufjöllum, en úr því hleypur til Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi. Mynd 5.6 sýnir skyggt hæðarlíkan byggt á leysimælingu á Hoffellsjökli og lóninu fyrir framan hann frá árinu 2010, en lónið hefur stækkað mikið síðan. Þá er líklegt að lítið lón fyrir framan Heinabergsjökul muni fara stækkandi og lón við Skeiðarárjökul stækka. Ný eða stærri lón geta dregið úr aurburði til sjávar sem hefur áhrif á aðstæður við ströndina og eins geta jökulhlaup fyllt ný lón af seti. Við hop jökla geta aðstæður til vatnssöfnunar breyst og því hafa sum jökullón tæmst endanlega og meðal þeirra má nefna Hnútlón við Brúarjökul, Háöldulón við Eyjabakkajökul, Fremra-Veðurárdalslón við Breiðamerkurjökul, Efstafellsvatn við Hoffellsjökul, Hvítalón við Köldukvíslarjökul og Hamarslón við Sylgjujökul. Auk þessa hafa Grænalón við Skeiðarárjökul, Gjávatn við Hoffellsjökul og Vatnsdalslón við Heinabergsjökul minnkað hratt á síðustu árum. Jökulstífluð lón, eins og Hnútlón og Háöldulón, geta myndast aftur ef gangur kemur í jökulinn.



Mynd 5.5 Breiðamerkurjökull árið 2014 og útlínur jökulsins 1890, 1945, 1973, 1991, 1999 og 2014. Gögn frá Veðurstofu Íslands. (Heimild: sjá tilvísun 18.)



Mynd 5.6 Skygging af yfirborði Hoffellsjökuls í suðaustanverðum Vatnajökli sem mældur var með leysimælitækjum úr flugvél í ágústmánuði 2010. Eftir venju heimamanna eru jökultungurnar merktar Svínafellsjökull og Hoffellsjökull. Hörfun Svínafellsjökuls speglar vel tíðarfarir á öldinni en sporður Hoffellsjökuls, sem liggur í djúpri lægð og tekur við meginhluta ísflæðis að ofan, hörfaði titið sem ekkert fram yfir síðustu aldamót. Þar hefur sporðurinn hins vegar þynnst svo síðustu ár að hluti hans er á floti og æ meir gætir kelfingar, einkum eftir að Austurfljót náðu fram í Suðurfljót 2008. Nú stækkar lónið þar hratt en jakar þekja enn hluta yfirborðsins. Sams konar atburðarás hefur einkennt Heinabergsjökul síðustu áratugi og vænta má að óbreyttu eða hlýnandi loftslagi að þróun Skeiðarárjökuls verði með þessum hætti á komandi áratugum. Lón við Skeiðarárjökul geta hins vegar fyllst af auri við jökulhlaup. Gögn frá Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands. (Kort byggt á leysimælingu sjá tilvísun 11.)

Nafn á vatnsfalli/færsla	Hvenær skipt um farveg
Jökulsá á Sólheimasandi breytir um farveg á kafla	Um 1650
Heinabergsvötn í Kolgrímu	Um 1948
Austurfljót Hornafirði í Suðurfljót	2008
Skeiðará í Gígjukvísl	1929, 1991 og 2009
Sæluhússvatn í Gígjukvísl	Um 1992
Veðurá tekur að renna í Stemmu	1930–1940
Stemma í Jökulsárlón	1990
Breiðá tekur að renna í Fjallsá	1954
Breiðá, upptök undan jökli flytjast til	2002
Eystri-Kvíá í Kvía	Óljóst hvenær
Kvíslar í Skaftá í Hverfisfljót	1991, 1994 og hugsanlega 2011
Neskvísl Svínafellsjökli í Svínafellsá	2007
Skráma í Svínafellsá	Óljóst hvenær
Sauðá og Kringilsá skiptast á	Oft
Hrútá í Öræfum í Fjallsárlón	Um 2007
Skaftá hættir að renna í Langasjó	1966
Vestari-Jökulsá í Skagafirði, upptakakvíslar flytjast til	Oft
Bleikálukvísl í Fossá	Líklega á 7. áratug 20. aldar
Leirá Mýrdalssandi í Skálm	2013
Súla í Gígjukvísl	2016

Tafla 5.3 Dæmi um jökulár sem hafa skipt um farveg (sjá tilvísun 19).

5.1.3 Líklegar breytingar jökla á komandi öld

Í V2008 var fjallað um líklegar breytingar á jökluum á næstu öldum. Niðurstöður úr sviðsmyndakeyrlum loftslagslíkana voru notaðar sem inntaksgögn fyrir kvik ísflæðilíkon og afkomuþróun Langjökuls, Hofsjökuls og suðurhluta Vatnajökuls hermd næstu tvær aldir.

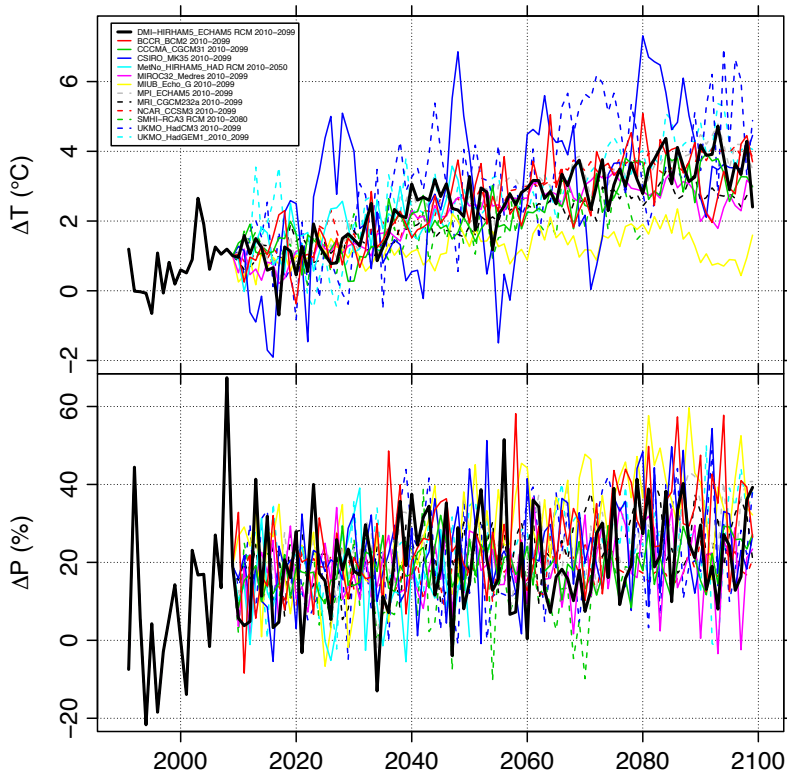
Niðurstöður benda til þess að við lok aldarinnar muni allir jökurnir hafa tapað verulegum massa. Um miðbik aldarinnar reiknast samdráttur Langjökuls, um 35% af rúmmáli hans árið 1990. Á sama tíma munu Hofsjökull og syðri hluti Vatnajökuls hafa minnkað um 25%. Við lok aldarinnar mun Langjökull, samkvæmt reikningunum, hafa tapað 85% af rúmmáli sínu en Hofsjökull og syðri hluti Vatnajökuls um 60%²⁰.

Þessir útreikningar hafa verið endurteknir tvívegis á síðustu árum en með ólíkum sviðsmyndum. Sambærileg niðurstaða fékkst^{21,24} þegar sömu jöklar voru endurleiknaðir með uppfærðri sviðsmynd frá CE verkefninu²², og eins þegar 13 sviðsmyndir, sem byggðust á greiningu á CMIP3 og svæðisbundnum loftslagslíkonum²³ voru notaðar. Í síðara tilvikinu voru sviðsmyndirnar kvarðaðar niður á veðurstöðvar í grennd við jöklana (mynd 5.7) og afkoma jöklanna reiknuð²⁴. Með því að nota nokkrar sviðsmyndir má fá hugmynd um óvissuna í niðurstöðum (mynd 5.8). Fram að miðbiki aldarinnar reiknaðist samdráttur Langjökuls á bilinu 20–40% og um 30% að meðaltali. Fyrir Hofsjökul voru sambærilegar tölur 15–25% og 20% að meðaltali.

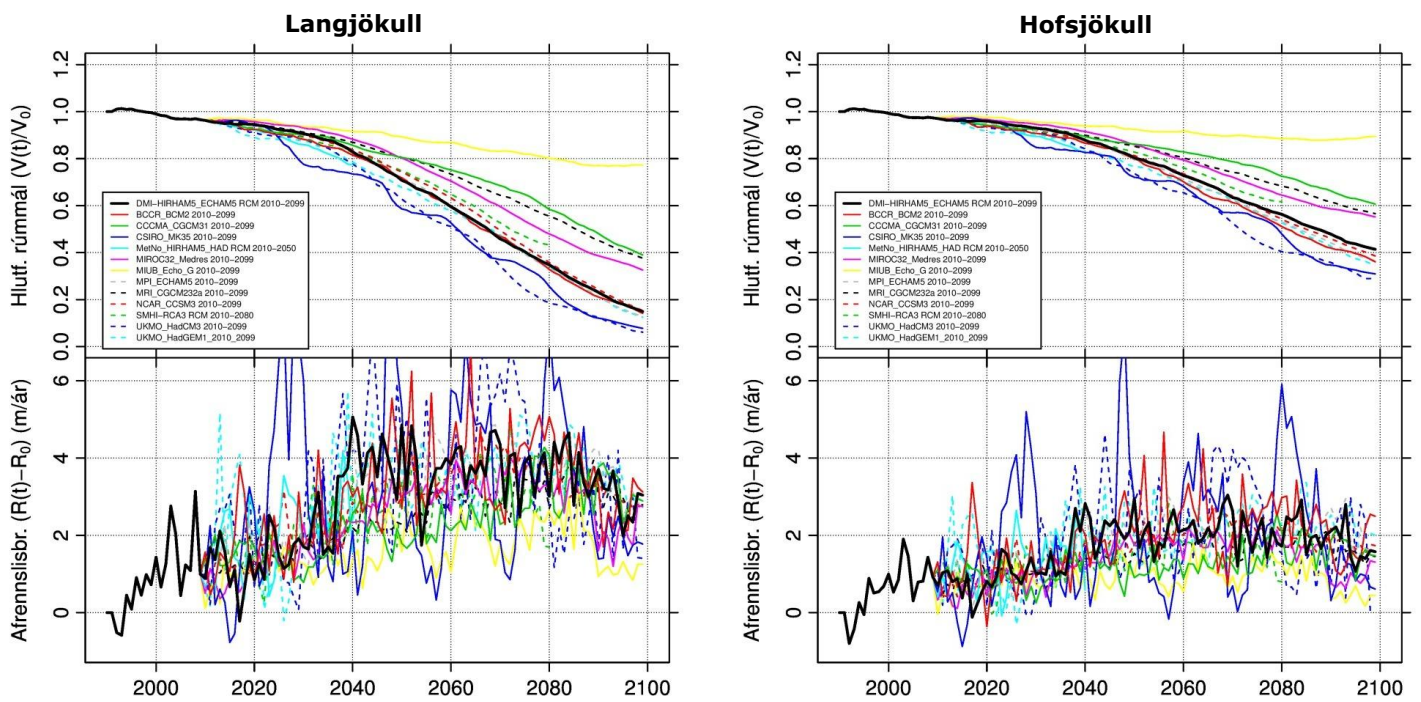
Breytingu afrennslis frá jöklunum er unnt að meta út frá árlegri rúmmálsbreytingu jöklanna. Mynd 5.8 sýnir að metið hámark afrennslis er mjög breytilegt eftir því hvaða sviðsmynd er notuð til að knýja líkanreikningana. Afrennslíð nær þó hámarki upp úr miðri öldinni og er afrennslisaukningin þá á bilinu 2–4 m á ári frá Langjökli en nær 2 m á ári frá Hofsjökli í meira en hálfa öld. Ástæða þess að Langjökull bregst ákafar við hlýnun er sú að hann stendur lægra.

Sviðsmyndirnar 13 voru einnig notaðar til þess að reikna þróun Hoffellssjökuls í líkani sem stillt var af þannig að það næði að herma afkomubreytingar og breytingar í stærð jökulsins frá 1895 til 2010²⁵. Niðurstöður sýndu að jafnvel þó að loftslag breyttist ekkert frá því sem það var á fyrsta áratug nýrrar aldar myndi jökullinn engu að síður dragast saman um 25% frá 2010 til loka aldarinnar. Í sviðsmyndum sem gerðu ráð fyrir loftslagsbreytingum var samdrátturinn um 30–45% fram að miðbiki aldarinnar, en við lok aldarinnar var minna en 20% af jöklinum eftir.

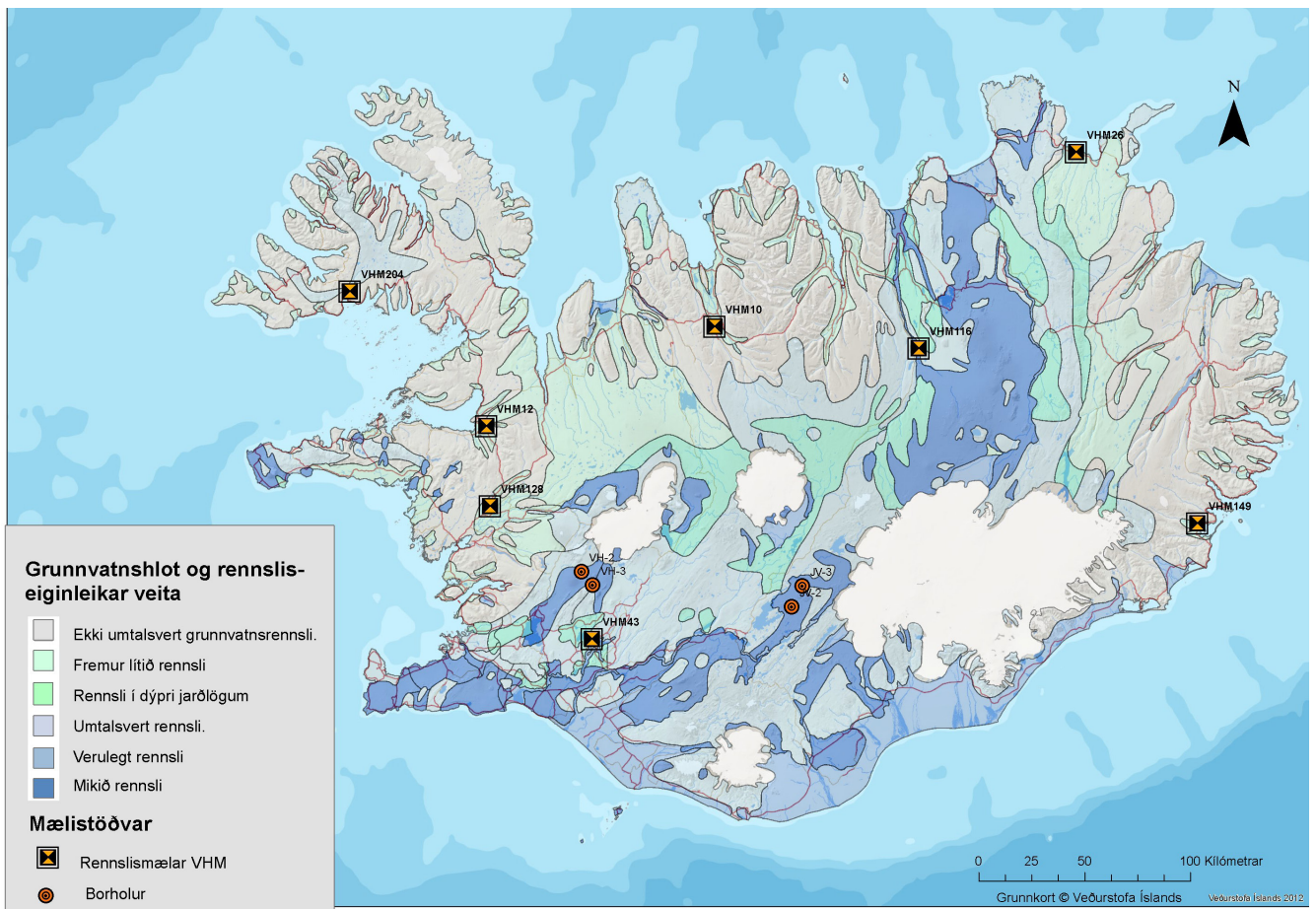
Loks hefur afkomuþróun suðausturhluta Vatnajökuls verið skoðuð sérstaklega með tilliti til breytinga á úrkomudreifingu og hlýnun²⁶. Kvíkt ísflæðilíkan var stillt af miðað við sögu þekktra jöklabreytinga, úrkomu og hita. Með því að lækka meðalhitann um 1°C og



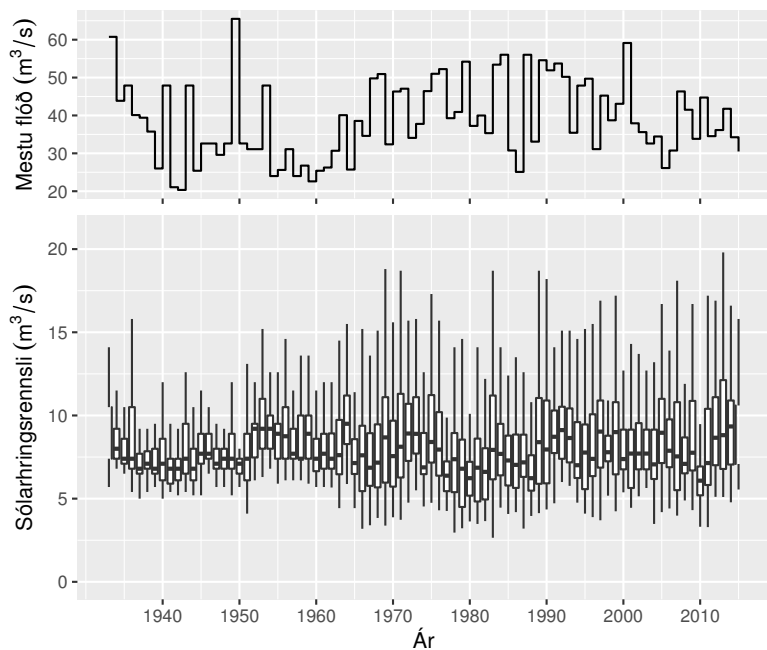
Mynd 5.7 Sviðsmyndir fyrir þróun hita og úrkomu fyrir Hveravelli miðað við niðurstöður 13 ólíkra loftslagslíkana. Sýndar eru breytingar á hita (ΔT , efri mynd) og úrkomu (ΔP , neðri mynd) miðað við tímabilið 1981–2000. (Heimild: sjá tilvísun 24.)



Mynd 5.8 Niðurstöður reikninga á breytingum Langjökuls og Hofsjökuls til 2100. Sýndar eru breytingar á rúmmáli og afrennsli miðað við árin 1981–2000 fyrir nokkur loftslagslíkön (sjá mynd 5.7). Dökka línan sýnir niðurstöður líkans dönsku veðurstofunnar sem liggur nærri miðju niðurstaðnanna. (Heimild: sjá tilvísun 24.)



Mynd 5.9 Grunnvatnshlot og rennsli-eiginleikar veita.



Mynd 5.10 Rennsli (m^3/s) í Svartá í Skagafirði yfir árabilið 1932–2016. Efri myndin sýnir mestu flóð hvers árs (það flóð sem hefur hlutfallsmarkið 99%) en neðri myndin sýnir kassarit fyrir sólarhringsrennsli hvers árs. Nánari lýsingu á kassaritum má sjá í athugasemd 7 í kafla 4. Gögn frá Veðurstofu Íslands.

draga úr úrkomu um 20% frá því sem var á tímabilinu 1981–2000 var hægt að herma hámarksútbreiðslu jökla um 1890, en ef gert var ráð fyrir 3°C hlýnun þá töpuðu jöklarnir á endanum 80–90% af rúmmáli sínu.

Þær niðurstöður sem hér hafa verið raktar byggjast á sviðsmyndum sem háðar eru verulegri óvissu. Ekki er ljóst hvort þær nái til fulls að spanna náttúrulegan breytileika á úrkomu og hita og hina raunverulegu óvissu um þróun loftslags. Því er erfitt að meta líkur tiltekinna rýrnunar jöklanna eða aukningar í afrennsli frá þeim. Rannsóknir síðustu ára hafa þó ekki breytt þeirri niðurstöðu V2008 að líklegast sé að jöklar á Íslandi hverfi að mestu á næstu fáum öldum gangi sviðsmyndir um loftslagsbreytingar eftir. Þessi niðurstaða er ekki séríslensk, gera má ráð fyrir að flestir jöklar á Norðurlöndum, utan Grænlands, hverfi að mestu á næstu 100–200 árum.

5.1.4 Afleiðingar fyrir afrennsli frá jöklum og á jökullón

Samdráttur jökla á Íslandi mun hafa verulegar breytingar á afrennsli í för með sér. Afrennsli frá svæðum, sem nú eru jökli hulin, kann að aukast um 25–100% á tímabilinu 2021–2050 miðað við meðaltal tímabilsins 1961–1990. Um helmingur þessarar breytingar er þegar kominn fram hér á landi. Um 2030–2040 er breyting í meðalafrennsli ársins frá svæðum sem nú eru jökli hulin talin geta orðið 1.5–2.5 m³ vatns á ári fyrir Langjökul, Hofsjökul og S-Vatnajökul²⁴. Þessar breytingar hafa áhrif á hönnunar- og rekstrarforsendur virkjana og ýmissa annarra innviða.

Miklar breytingar munu verða á árstíðasveiflu rennslis og dægursveiflu og í sumum tilvikum munu verða umtalsverðar afrennslisbreytingar vegna hnikunar á vatnaskilum á jökli og utan hans. Gera þarf ráð fyrir áframhaldandi breytingum á farvegum jökuláa og hefur stöðugleiki vatnaskila Skaftár og Hverfisfljóts á jökli þegar verið kannaður sérstaklega²⁷. Líklegt er að vatn sem kemur frá hluta núverandi vatnasviðs Skaftár fari smám saman til Hverfisfljóts á næstu áratugum og afrennsli þar aukist. Fleiri ár þarf að hafa sérstaklega til athugunar og sýnir tafla 5.4 ár þar sem farvegabreytingar geta orðið á næstu árum.

Einnig verður að gera ráð fyrir að jaðarlónum haldi áfram að fjölga. Þau myndast helst þar sem jökulbotn er verulega lægri en landið fyrir framan og framburður undan jökli ekki nægur til að fylla í lægdina. Þegar

þannig háttar til og jökullinn hörfar þá hlýtur dældin sem hann skilur eftir að fyllast af vatni. Eins og rakið var hér að framan eru þegar ný lón að myndast víða við jökulröndina og eldri lón að stækka²⁸.

Nafn á vatnsfalli
Skaftá
Tungnaá – Sylgja
Hverfisfljót
Djúpá í Fljótshverfi
Brunná í Fljótshverfi
Kerlingardalsá í Mýrdal
Hafursá í Mýrdal
Kreppa

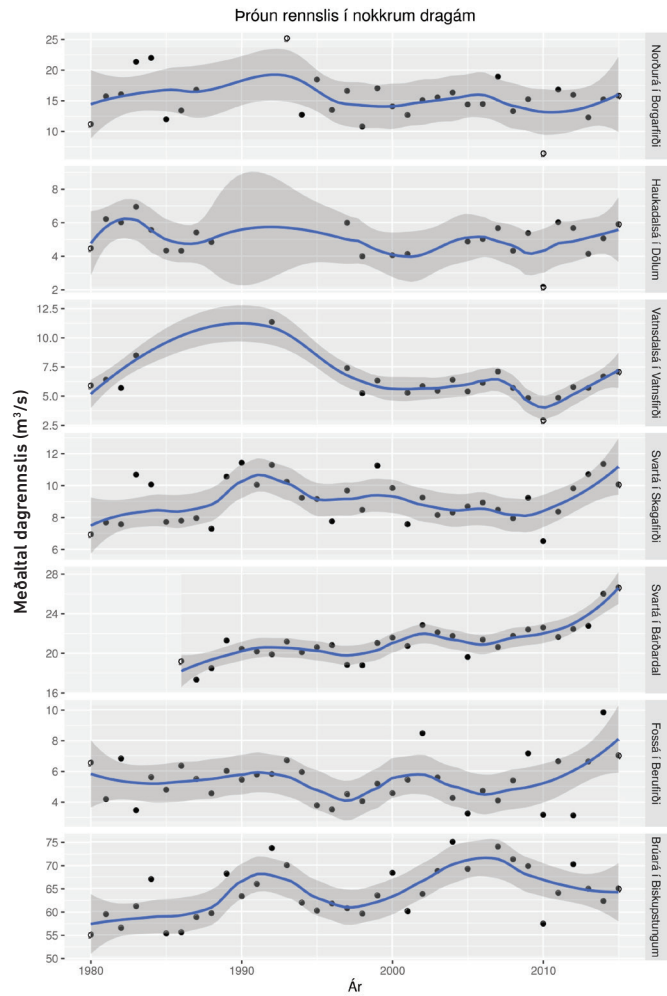
Tafla 5.4 Ár þar sem breytingar á farvegum eru yfirvoðandi.

5.2 Vatnafar

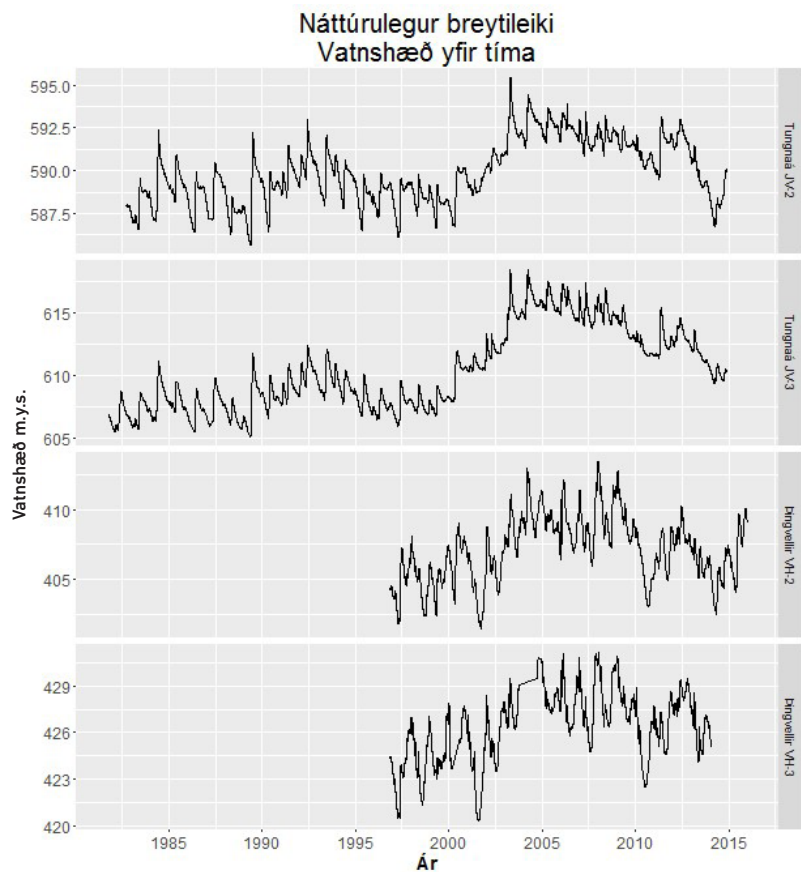
Í skýrslu vísindanefndar frá 2008 er skipting fallvatna niður í dragár, lindár og jökulár rakin og sérkenni hvers flokks skýrð²⁹. Mynd 5.9 sýnir skiptingu landsins í grunnvatnshlot eins og þau eru skilgreind í vatnatilskipun Evrópusambandsins. Flokkunin endurspeglar hvernig jarðvegur og berggrunnur hafa áhrif á rennsli fallvatna. Dragár koma fram þar sem berggrunnur er elstur og þéttur en lindár eiga uppruna sinn á lekum svæðum þar sem yfirborðsvatn á auðvelt með að hripa niður og safnast fyrir í grunnvatnsgeymum. Jökulárnar eru, eins og nafnið ber með sér, afrennsli af jöklum. Grunnvatnsþáttur þeirra ræðst algjörlega af lekt jarðlaga þar sem áin rennur. Í dragám og jökulám er nokkur árstíðasveifla á rennsli þar sem sumarrennslið er meira en vetrarrennslið. Rennslið í dragám er yfirleitt mest í vorleysingum, en í jökulám eru rennslistopparnir að jafnaði tveir, einn að vori meðan snjó síðasta vetrar er að leysa og síðsumars verður yfirleitt annar hærri rennslistoppur þegar jökulbráð eykst. Árstíðasveifla á rennsli í lindám er alla jafna verulega minni en í jökulám og dragám.

5.2.1 Langtímabreytingar í vatnafari

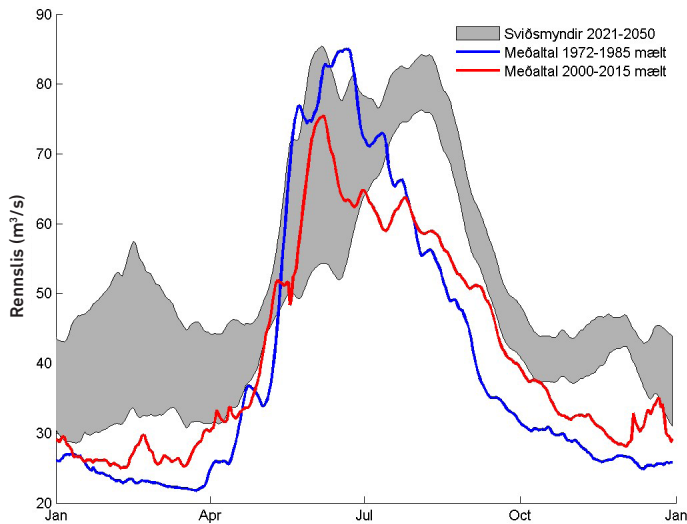
Ýmis gögn benda til verulegra langtímabreytinga í vatnafari. Mynd 5.10 sýnir rennsli Svartár í Skagafirði yfir á árabílinu 1933–2015, efri myndin sýnir mestu flóð og sú neðri dreifingu sólarhringsrennslis yfir árið.



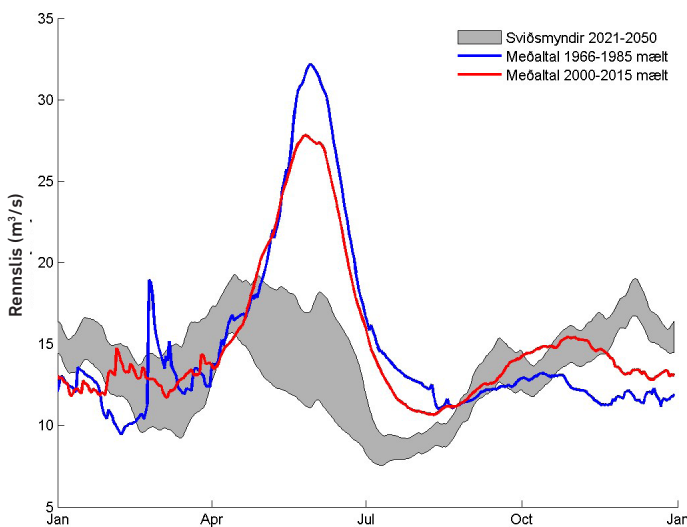
Mynd 5.11 Langtímaþróun í nokkrum vatnsföllum á tímabilinu 1980 til 2015. Sýnt er ársmeðaltal dagrennslis og útjafnaður ferill (m^3/s). Skyggða svæðið sýnir óvissumat á útjafnaða ferlinum og óvissan er meiri á gagnarýrum tímabilum. Gögn frá Veðurstofu Íslands.



Mynd 5.12 Langtímabreytingar á vatnshæð (m.y.s.) í nokkrum borholum. Gögn frá Veðurstofu Íslands.



Mynd 5.13 Árstíðabreytingar rennslis (m^3/s) í Austari-Jökulsá. Sýnd eru meðaltöl mælinga frá 1972–1985 og 2000–2015. Skyggða svæðið sýnir niðurstöður líkanreikninga á afrennsli með nokkrum sviðsmyndum um hlýnun.



Mynd 5.14 Árstíðabreytingar rennslis (m^3/s) í Sandá í Þistilfirði. Sýnd eru meðaltöl mælinga frá 1966–1985 og 2009–2015. Skyggða svæðið sýnir niðurstöður líkanreikninga á afrennsli með nokkrum sviðsmyndum um hlýnun.

Lítið samband er á milli dæmigerðs rennslis og stærstu flóða. Það dregur úr rennsli á 8. áratugnum en á sama tíma verða flóðin stærri. Eins dregur úr stærð flóða undir lok síðustu aldar, án þess að sólarhringsrennsli breytist mikið. Sambærilegar áratugabreytingar á stærð flóða og tíðni sjást þegar rennslisraðir fyrir fleiri straumvötn eru skoðuð. Breytingin er ekki samstíga yfir allt landið heldur kemur fram á mismunandi tímum eftir landshlutum. Verulegur munur er t.d. á tíma-setningu flóðatímabíla í Geithellnaá og Svartá í Skagafirði. Nánar er fjallað um flóð og flóðahættu í grein 12.1.2.

Langtímabreytingar á rennsli reyndust einnig verulegar í rannsókn þar sem landinu var skipt upp í þrjú svæði og hiti, úrkoma og afrennsli skoðuð á hverju fyrir sig³⁰. Verulegar sveiflur voru í afrennsli sunnan- og vestanlands en ekki marktæk langtímahneigð í heildarrennsli. Frekari dæmi um langtímabreytingar á afrennsli má sjá á mynd 5.11 sem sýnir þróun afrennslis

í nokkrum dragám. Myndin sýnir að langtímabreytingar á rennsli eru verulegar og getur munað tugum prósentu milli áratuga. Myndin sýnir einnig að það er ekki mikil langtímahneigð í rennslisferlunum ef frá eru taldar lindárnar Svartá í Bárðardal og Brúará í Biskupstungum en þar er langtímahneigðin á heildarrennsli marktæk. Það að rennsli flestra straumvatna hér á landi sýni ekki langtímahneigð er í allgöðu samræmi við rannsóknir fyrir tímabilið 1961–2000 sem leiddu ekki í ljós neina marktæka hneigð rennslis fyrir tímabilið³¹.

Frekari dæmi um langtímabreytingu má sjá á mynd 5.12 sem sýnir vatnshæð í fjórum borholum á Suður- og Suðvesturlandi. Breytingar á grunnvatnshæð eru yfirleitt frekar dempaðar og því oft auðveldara að túlka langtímabreytileika í borholum en breytingar á rennsli í ám. Alla jafna stafar hærra grunnvatnsborð af meiri úrkomu eða leysingu. Myndin sýnir verulega hækkun grunnvatnsborðs frá miðjum 10. áratug liðinnar aldar fram yfir miðbik fyrsta áratugar nýhafinnar aldar, en á

siðustu árum hefur hækkunin að einhverju leyti gengið til baka. Þótt í heildina sé hneigðin upp á við eru þessar mæliraðir of stuttar til að hægt sé að fullyrða að til lengri tíma megi búast við að grunnvatnsyfirborð á svæðinu hækki.

5.2.2 Áhrif loftslagsbreytinga

Í síðustu skýrslu Vísindanefndar frá 2008 kemur fram að líklegt er að með hlýnandi loftslagi aflagist árstíðasveifla afrennslis, hlutfall rigningar í úrkomu aukist að vetri og leysingafloð að vori minnki að sama skapi²⁹. Afrennslis frá jökulum mun aukast, sérstaklega yfir sumartímann, auk þess sem það mun líklega hefjast fyrr að vori og ná lengra fram á haust. Í dragám geta orðið veruleg vetrarfloð og gera má ráð fyrir að slík floð geti tekið breytingum ef hlýnar að vetri. Þetta fer þó nokkuð eftir landsvæðum. Síðustu áratugi hafa mestu vetrarfloðin orðið vestanlands þar sem hálendi er í um 400 m hæð yfir sjávarmáli. Mestu leysingafloð að vori eru hins vegar af Sprengisandi en þar liggur land að mestu í um 600–800 m hæð. Með hlýnun að vetri gætu floð á því svæði færst yfir á vetrartímann þegar leysing nær inn á svæðið fyrr en áður.

Á síðustu árum hafa áhrif loftslagsbreytinga á árstíðasveiflu afrennslis í dragám og jökulám verið skoðuð nánar³². Sérstaklega voru skoðaðar árnar Sandá í Pistilfirði, sem hin dæmigerða dragá, og Austari-Jökulsá í Skagafirði sem er dragá með jökul- og grunnvatnsþátt. Líkanreiknaðar framtíðarsviðsmyndir rennslis benda til þess að hámark vorflóða minnki um 5–70% fram á miðja öldina, þau eigi sér stað um mánuði fyrr en áður, en á móti komi aukning í afrennslis að vetri. Þessarar þróunar er þegar farið að gæta í rennslisröðum, bæði í Austari-Jökulsá (mynd 5.13) og Sandá (mynd 5.14) þar sem sést að dregið hefur úr vorflóðum og afrennslis að vetri hefur aukist. Í Austari-Jökulsá breyttist tímasetning hámarksflóða upp úr aldamótum og færðist a.m.k. tímabundið framár í árið, en slíkra breytinga hefur þó enn ekki orðið vart í Sandá. Breytingar í tímasetningu og rúmtaki vorleysinga má þó greina í öðrum ám, t.d. Svartá í Skagafirði og Vatnsdalsá í Vatnsfirði. Breytingar á árstíðasveiflu afrennslis á Íslandi hafa verið skoðaðar í samhengi við breytingar á flóðatíðni í Evrópu, en þar má einnig greina breytingar í árstíðasveiflu afrennslis, sem rekja má til loftslagsbreytinga³³.

Myndir 5.13 og 5.14 sýna rennslis, bæði á frekar köldu tímabili fyrir 1990 og hlýrra tímabili eftir aldamótin. Á báðum myndum leitar árstíðasveifla rennslis á hlýja skeiðinu upp úr aldamótum í átt til þess sem sviðsmyndirnar spá í hlýrra loftslagi. Þó verður að gera þann fyrirvara við þessa túlkun að raðirnar eru stuttar og ekki ljóst að hversu miklu leyti breytingar sem þær sýna endurspeglar langtímabreytingar.

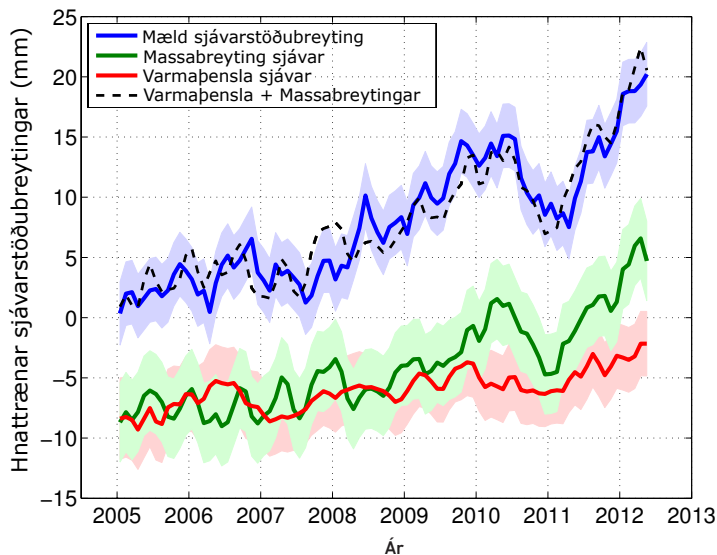
5.2.3 Samantekt

Mikill breytileiki er í vatnafari á landinu og mælingar sýna skammtíma- og áratugabreytingar samfara langtímahneigð. Enn er erfitt að greina þar á milli enda eru mæliraðirnar ekki langar. Hins vegar er ljóst að grunnvatn á gropnum og lekum svæðum hefur verið að aukast, sem líklega er tilkomið vegna meiri úrkomu og/eða leysingar jökla. Þá má merkja að á hlýjum áratugum nálgast mælt rennslis það rennslis sem reiknað er út í sviðsmyndum þar sem gert hefur verið ráð fyrir hlýnun.

Líklegt er að úrkoma á landinu aukist í takt við hlýnandi veðurfar á þessari öld (sjá grein 4.4.3) og að vetri til verði rigning algengari. Gera má ráð fyrir að afrennslis aukist með aukinni úrkomu og bráðnun jökla (sjá grein 5.1.3). Fyrst um sinn er líklegt að breytingar í árstíðasveiflu verði greinilegri en aukning afrennslis.

5.3 Sjávarstöðubreytingar

Stuttlega er fjallað um sjávarstöðubreytingar í skýrslu vísindanefndar frá 2008³⁴ og um hnattrænar sjávarstöðubreytingar í kafla 3 hér að framan. Í 13. kafla skýrslu milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC, 2013) er þekking á sjávarstöðubreytingum á ritunartíma skýrslunnar dregin saman³⁵ og helstu niðurstöðum er lýst í grein 3.4. Stór hluti hnattrænnar hækkunar sjávarstöðu orsakast af varmaþenslu vegna hlýnunar hafisins en einnig skipta massabreytingar máli, þ.e. bráðnun jökla og á síðustu árum, massatap stóru ísbreiðanna, þ.e. Grænlandsjökuls og Suðurskautsjökulsins. Tekist hefur að draga verulega úr óvissu um framlag stóru ísbreiðanna og leggja tölulegt mat á framlag hvers þáttar. Tafla 5.5 sýnir samantekt á mælingum einstakra orsakaþátta og þar kemur fram að fyrir tímabilið 1993–2010 er mismunur á mældri sjávarstöðuhækkun og heildarframlagi þekktra áhrifaþátta innan óvissumarka.



Mynd 5.15 Samanburður á mældum hnattrænum sjávarstöðubreytingum, massabreytingum sjávar (umreiknaðar yfir í sjávarstöðubreytingar) og varmaþenslu. Brotalínan sýnir að samanlagðar massabreytingar, og varmaþensla útskýra hnattrænar sjávarstöðubreytingar. (Sjá nánari umfjöllun í heimild 37.)

Áhrifaþáttur	1901–1990	1971–2010	1993–2010
Varmaþensla		0.8 [0.5–1.1]	1.1 [0.8–1.4]
Jöklar, nema á Suðurskautslandi og Grænlandi	0.54 [0.47–0.61]	0.62 [0.25–0.99]	0.76 [0.39–1.13]
Jöklar á Grænlandi, utan meginísbreiðunnar	0.15 [0.10–0.19]	0.06 [0.03–0.09]	0.10 [0.07–0.13]
Ísbreiðan á Grænlandi			0.33 [0.25–0.41]
Ísbreiðan á Suðurskautslandi			0.27 [0.16–0.38]
Vatnsgeymslur á landi	-0.11 [-0.16–-0.06]	0.12 [0.03–0.22]	0.38 [0.26–0.49]
Heildarframlag			2.8 [2.3–3.4]
Sjávarstöðuhækkun samkvæmt mælingum	1.5 [1.3–1.7]	2.0 [1.7–2.3]	3.2 [2.8–3.6]

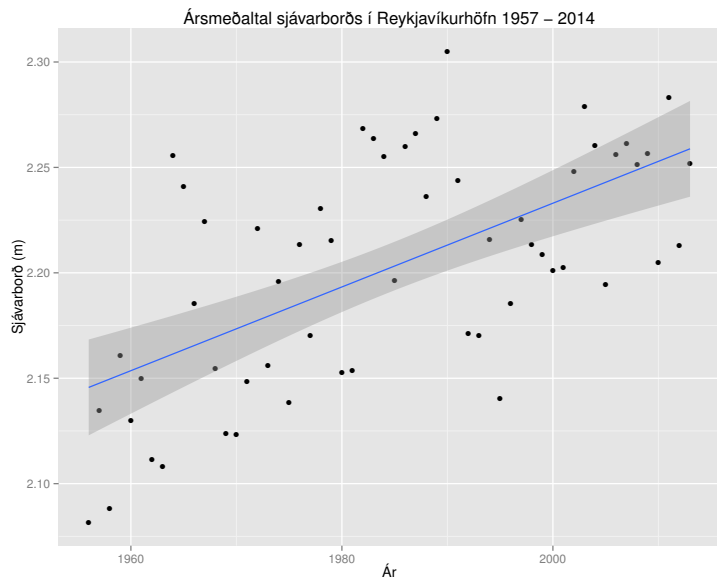
Tafla 5.5 Hnattrænar sjávarstöðubreytingar frá upphafi 20. aldar til 2010 í mm á ári. Tölur innan hornklofa sýna 5 til 95% óvissumörk. Sýnd eru þrjú tímabil og hraði hækkunarinnar er mestur á því síðasta. Á síðasta tímabilinu skarast óvissubíl heildarframlags allra áhrifaþátta og mælinga á sjávarstöðuhækkun. (Sjá nánari heimild 36.)

Bera má saman beinar mælingar á sjávarstöðu með gervihnöttum, mælingum á massabreytingum í sjó sem gerðar eru með gögnum frá GRACE gervitunglum og reiknaðri varmaþenslu sjávar, byggðum á hitamælingum með Argo mælum³⁷. Mynd 5.15 sýnir niðurstöður slíks samanburðar og greinilega sést að samanlagðar breytingar á sjávarstöðu vegna massabreytinga og varmaþenslu falla mjög vel að mældum breytingum á sjávarstöðu. Myndin sýnir því að útskýra má hnattrænar

breytingar á sjávarstöðu á síðasta áratug, en einnig sýnir hún hversu mikið framlag massabreytinga (isbráðnun) hefur aukist á allra síðustu árum.

Á síðustu árum hefur skilningur á svæðisbundnum breytileika sjávarstöðu aukist verulega. Margar rannsóknir sýna að svæðisbundinn breytileiki er verulegur, á sumum svæðum rís sjávarborð mun hraðar en hnattræna meðaltalið, en á öðrum svæðum stendur það í stað eða jafnvel fellur³⁸.

Mynd 5.16 Afstæð sjávarstaða (m) í Reykjavík frá 1956–2014. Ekki er leiðrétt fyrir loftþrýstingi, sjávarhita eða landsigi. Einnig er sýnd besta lína, en halli hennar nemur 2.0 [1.4–2.6] mm á ári. Skyggða svæðið sýnir óvissumat á línunni. (Gögn frá Siglingasviði Vegagerðarinnar, sjá nánar umfjöllun í heimild 49.)



Svæðisbundin frávik geta stafað af nokkrum þáttum sem stytast að mestu út þegar hnattrænt meðaltal er reiknað. Í fyrsta lagi má nefna aflræna þætti, þ.e. breytingar á loftþrýstingi, vindi og hafstraumum sem geta aukið við hækkun á einum stað, en dregið úr henni á öðrum. Svæðisbundnar breytingar á eðlismassa sjávar (sérstaklega varmaþensla vegna hlýnunar, en í minna mæli vegna seltubreytinga) valda einnig breytingum á sjávarstöðu. Bráðnun jökla bætir vatni í heimshöfin, en bráðnunin hefur einnig áhrif á þyngdarsviðið í nágrenni jöklanna sem lækkar sjávarstöðu næst þeim en eykur hækkunina fjær³⁹. Loks hefur staðbundið landris eða landsig áhrif á það hvort mælingar sýna hækkun eða lækkun sjávarborðs.

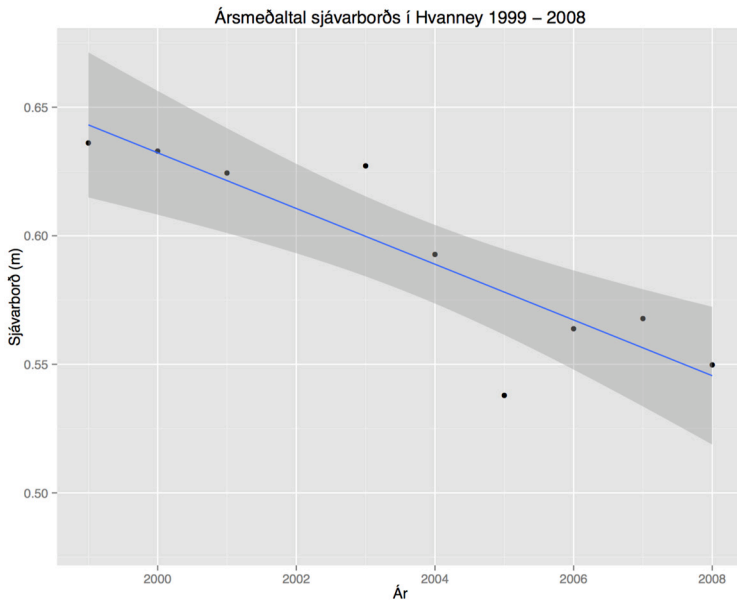
5.3.1 Sjávarstöðubreytingar við Ísland

Rannsóknir víða á Norður-Atlantshafi benda til þess að þar hafi hækkun sjávarstöðu hert á sér á 19. öld⁴⁰, en einnig sýna gögn frá strandsvæðum víða um heim að á fyrri hluta síðustu aldar hækkaði sjávarstaða hraðar en að meðaltali síðustu árþúsund⁴¹.

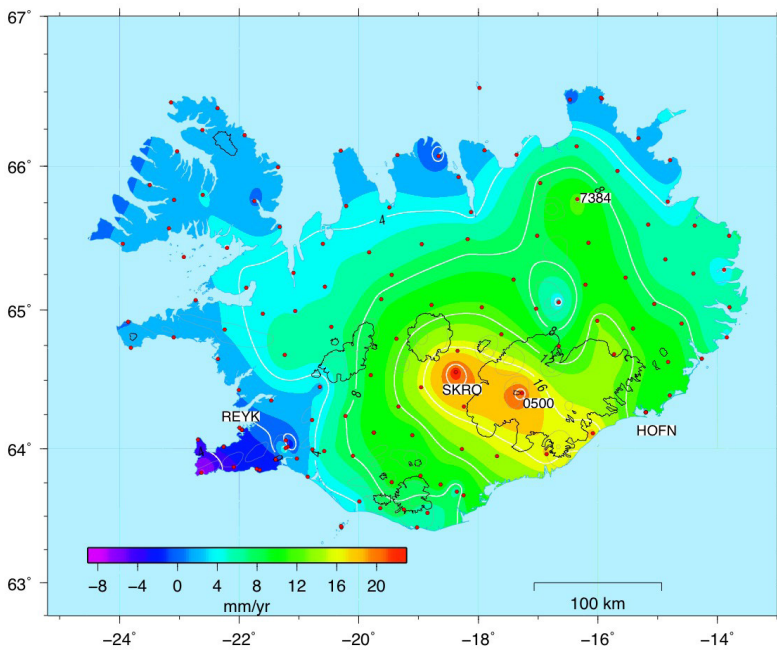
Ýmsar vísbendingar eru um sjávarstöðubreytingar við Ísland á síðari hluta nútíma. Rannsóknir á sjávarseti í Flóanum nærri Stokkseyri og Eyrarbakka og við Garðskagavita⁴² benda til hárrar sjávarstöðu fyrir um 3200, 2800 og 2300 árum en lægri sjávarstöðu þess á milli, en einnig að í heildina hafi afstæð sjávarstaða á nokkrum svæðum hækkað um rúma tvo metra á 1000 ára tímabili frá því fyrir 3200 til 2200 árum síðan. Til að setja þetta í samhengi þá næmi þessi hækkun til jafnaðar um 20 cm á öld sem er sambærilegt við hnattræna hækkun á 20. öldinni.

Niðurstaða einnar fyrstu rannsóknar á sjávarstöðubreytingum á vestanverðu landinu var sú „að landið hafi um langt skeið verið að smá síga og sjórinn að ganga á land fyrir sunnan Breiðafjörð og austur eftir Suðurlandi til Vestmannaeyja, en í norðanverðum Breiðafirði, Vesturlandi og umhverfis Húnaflóa hafi breyting sjávarhæðarinnar farið í gagnstæða átt, það lítil sem hún kann að hafa verið“⁴³. Hvað Vesturland varðar benda rannsóknir á setlagakjarna frá Viðarhólma á sunnanverðu Snæfellsnesi^{44,45} til þess að sjávarstaða á Vesturlandi hafi lengst af breyst tiltölulega hægt á síðustu 2000 árum, en á tímabilinu reis sjávarstaða í heildina um 1.3 m sem samsvarar um 6.5 cm á öld. Á síðasta hluta tímabilsins hækkaði staðan þó hraðar og greining á síðustu 500 árum bendir til þess að hækkunarskeið hafi gengið yfir milli áranna 1620–1650, 1780–1850 og 1950–2000. Þegar hraði hækkunar var hvað mestur á þessum skeiðum er líklegt að hann hafi samsvarað um 30 cm á öld, sem er tæplega fimmfalt hraðar en árþúsundin þar á undan. Í heildina virðist sjávarstaða á síðustu 500 árum hafa hækkað um 0.6 m. Þessar niðurstöður eru í nokkuð góðu samræmi við niðurstöður rannsókna fyrir Norður-Atlantshafið.

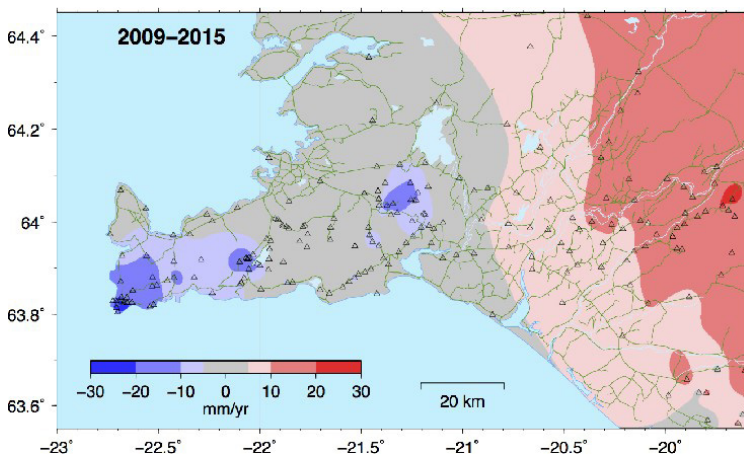
Lengsta mæliröð sjávarstöðu við Ísland er frá Reykjavík en þar hefur verið mælt frá árinu 1956. Mynd 5.16 sýnir ársmeðaltöl sjávarstöðu á þessum tíma⁴⁶, og ljóst er að sjávarstaða í Reykjavík hefur hækkað nokkuð. Halli bestu línu í gegnum punktastafnið sýnir að hækkunin nemur um 2.0 [1.4–2.6] mm á ári, eða um 20 [14–26] cm á öld⁴⁷. Hækkunin er þó ekki jöfn, hún er meiri á fyrri hluta tímabilsins en síðari hluta þess. Sveiflur milli áratuga geta stafað af hita- og



Mynd 5.17 Afstæð sjávarstaða (m) í Hvanney við Höfn í Hornafirði milli árunna 1999 og 2008. Sýnd eru ársmeðaltöl og besta lína. Halli línunnar er -11.0 [-6.3 til -15.8] mm á ári. Skyggða svæðið sýnir óvissumat á línunni. Ekki er leiðrétt fyrir loftþrýstingi, sjávarhita eða landsigi. (Gögn frá Siglingasviði Vegagerðarinnar, sjá nánar umfjöllun í heimild 49.)

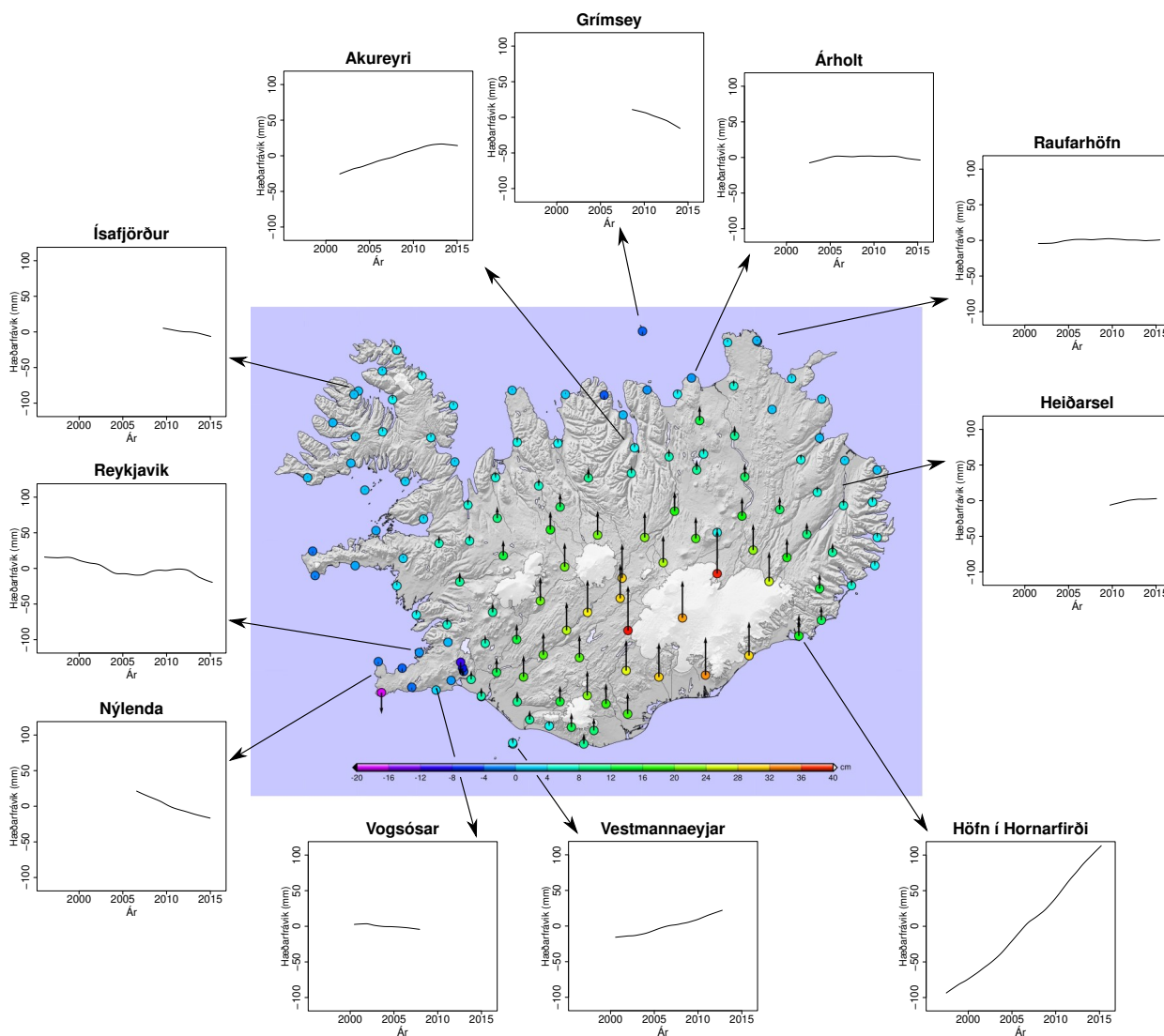
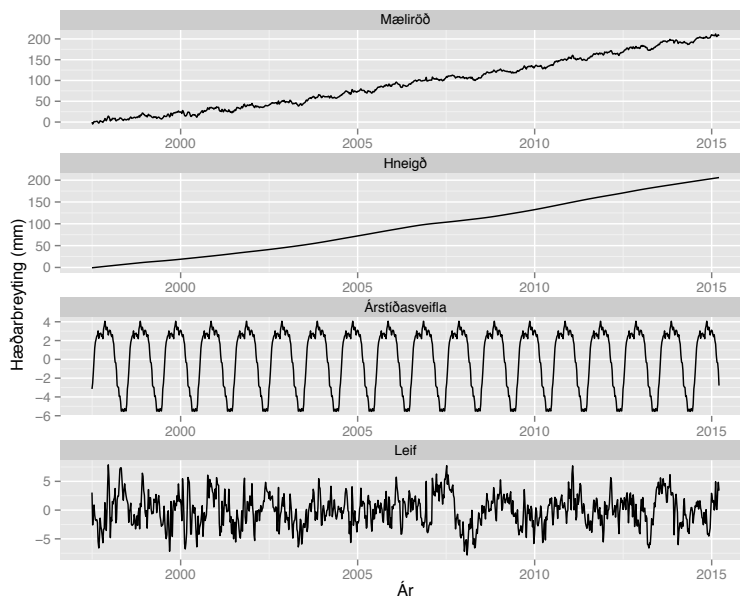


Mynd 5.18 Kort af lóðréttri hreyfingu lands á Íslandi fyrir tímabilið 1993 til 2004 byggt á GPS-mælingum. Tölur eru í mm á ári. (Sjá nánar heimild 50.)



Mynd 5.19 Lóðrétta hreyfing jarðskorpu SV-lands á tímabilinu 2009 til 2015, byggt á GPS mælingum. Breytingar í mm á ári. (Sjá nánar heimild 51.)

Mynd 5.20 Landhæðarbreytingar (mm) á Höfn í Hornarfirði frá 1997 til 2015. Efst er mæliröðin en neðri myndirnar þrjár sýna skiptingu mæliraðarinnar í hneigð, árstíðasveiflu og leif (sjá nánar í texta). Athugið að lóðrétti ásinn er ekki sá sami á öllum myndum. (Gögn frá Veðurstofu Íslands, sjá nánar heimild 53.)



Mynd 5.21 Fyrir miðju: lóðréttar færslur á mælistöðvum grunnstöðvanets LMÍ á tímabilinu 2004 til 2016. Litir á punktum sýna hæðarbreytingu í mm, en einnig er tilfærslan sýnd með örvum. Línurit umhverfis: Niðurstöður frá GPS stöðvum nærri ströndinni en með þeim hefur verið mælt samfellt hluta tímabilsins 1996–2015. (Kort frá LMÍ, sjá heimild 54, GPS gögn frá Veðurstofu Ísland, sjá nánar heimild 53.)

loftþrýstibreytingum en gögnin á myndinni eru ekki leiðrétt fyrir hita og þrýstingi. Rannsóknir sýna að þótt tekið sé tillit til slíkra þátta verða ekki marktækar breytingar á langtímahækkun raðarinnar⁴⁸.

Nýleg greining á sjávarstöðu í Grindavík (fyrir tímabilið 1997 til 2015) bendir til þess að þar hækki sjávarstaða um 9 mm á ári⁴⁹. Sjávarstaða fer þó ekki alstaðar hækkandi, því samkvæmt sömu rannsókn féll sjávarstaða í Hvanney við Höfn í Hornafirði. Mynd 5.17 sýnir fall sjávarstöðu í Hvanney áratuginn 1999 til 2008. Til jafnaðar nemur lækkun sjávarstöðu á myndinni 11.0 [6.3–15.8] mm á ári á þessu árabili.

5.3.2 Landhæðarbreytingar við Ísland

Þegar reynt er að rekja ástæður þess að sums staðar við Ísland rís sjávarborð en annars staðar fellur það skipta löðréttar jarðskorpuhreyfingar máli. Niðurstöður úr GPS mælineti sýna að á tímabilinu 1993 til 2004 var löðrétt hreyfing lands mjög ólík milli landshluta⁵⁰. Mynd 5.18 sýnir samantekt á þessum niðurstöðum og sjá má verulegt landris inn til landsins og við suðausturströndina. Annars staðar á suðurströndinni og einnig við austurströnd landsins var nokkurt landris, en þó ekki jafnáft og suðaustanlands. Við strandir norðanlands og vestan eru niðurstöður ekki jafn-afgerandi, en á hluta Reykjanesskaga er verulegt landsig. Niðurstöður útreikninga benda til þess að landrisið við miðbik landsins og suðaustanlands stafi af þynningu jökla frá því í lok 19. aldar⁵⁰.

Landsig á Reykjanesskaga þarf ekki að koma á óvart, en þar er gliðnunarbelti á flekaskilum auk þess sem mjög staðbundið landssig getur fylgt jarðvarmavinnslu. Mynd 5.19 byggist á nýjum mælingum og sýnir ítarlegri mynd af jarðskorpuhreyfingu á suðvesturhorninu á síðustu árum⁵¹. Mesta landsigið er greinilega nærri jarðhitasvæðum í vinnslu, en víðast á Reykjanesskaganum er löðrétt hreyfing lítil.

Samfelldar GPS mælingar eru nú gerðar á tugum staða á landinu á vegum nokkurra rannsókn- og vöktunaraðila. Samfelldar mæliraðir við ströndina eru þó færri, en tvær lengstu raðirnar eru frá 1996 (Reykjavík) og 1997 (Höfn í Hornafirði). Unnið hefur verið úr samfelldum GPS mæliröðum með svo kallaðri STL greiningu⁵² sem gerir kleift að aðskilja hneigð mæliraðarinnar, árstíðasveiflu og slembikennda leið⁵³. Mynd 5.20 sýnir niðurstöðu þessarar greiningar fyrir Höfn í Hornafirði. Efsta línuritið sýnir mæliröðina og

augljóst er að eindregin hækkun einkennir hana. Næsta mynd sýnir langtímahneigð raðarinnar og hinar tvær sýna árstíðasveiflu og óreglulegar sveiflur. Þótt útslag árstíðasveiflu (um 10 mm) sé verulegt er það minna en landrisið, sem er til jafnaðar um 12 mm á ári. Ef grannt er skoðað kemur í ljós að hraði á landrisi hefur aukist á tímabilinu, fyrstu átta ár mælinga var landrisið rúmlega 8 mm á ári en síðustu átta ár er landrisið tæpir 14 mm á ári.

Á árinu 2016 luku Landmælingar Íslands og samstarfsaðilar þeirra endurmælingu á grunnstöðvannetinu. Kortið á mynd 5.21 sýnir landhæðarbreytingar á Íslandi frá 2004 til 2016 en umhverfis það er raðað niðurstöðum frá samfelldum GPS mælingum við ströndina⁵⁴. Í grófum dráttum sýnir myndin landsig víða við ströndina vestanlands og við miðbik Norðurlands, en inn til landsins er landris. Landris er einnig á Norðvesturlandi og á hluta Norðausturlands. Annars staðar norðaustanlands og austan eru litlar landhæðarbreytingar en suðaustanlands og vestur með suðurströndinni er landris sem er ákafast næst jökklunum suðaustanlands. Tafla 5.6 sýnir nánari upplýsingar um landhæðarbreytingar á völdum stöðvum nærri ströndinni þar sem samfelldar GPS raðir eru nægilega langar. Orsakir landsigs fyrir miðju Norðurlandi (á austanverðum Tröllaskaga, á Flateyjarskaga og í Grímsey) eru ókunnar, sigið getur mögulega tengst flekahreyfingum, en ástæður þarf að rannsaka betur.

Haldist þessar breytingar stöðugar út öldina verður landris meira en metri við suðausturströndina, en annars staðar við suður- og austurströndina, og á Norðvesturlandi verður það á bilinu 10–40 cm. Á sama hátt og á sama tíma yrði landsig um vestanvert landið á bilinu 10–30 cm, víðast nær lægri mörkunum. Á stöku stað gæti landsigið orðið meira, þetta á sérstaklega við afmörkuð svæði á Reykjanesi, á norðaustanverðum Tröllaskaga og í Grímsey. Loks ber að hafa í huga að víða á Íslandi eru bæir byggðir á seteyrum en þar getur land sigið umfram hreyfingu berggrunnins í nágrenninu, m.a. af völdum fargs vegna byggðar, og eru slíkar landhæðarbreytingar ekki inni í þessum tölum⁵⁵

5.3.3 Spár um hnattræna hækkun sjávarborðs

Í samantektarskýrslu Milliríkjanevndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC) eru teknar saman spár um hnattrænar sjávarstöðubreytingar á komandi öld⁵⁶. Hvað varðar hlýnun sjávar, breytingar á

Staður	Tímabil	Landhæðarbreyting (mm/ári)
Reykjavík	1996–2015	-1.49 [-1.56– -1.42]
Ísafjarðarbær	2009–2015	-1.82 [-2.08– -1.56]
Siglufjörður	2008–2012	-2.32 [-2.65– -2.00]
Grimsey	2008–2014	-4.72 [-4.97– -4.48]
Akureyri	2001–2015	3.39 [3.31–3.47]
Flatey á Skjálfanda	2007–2014	-1.47 [-1.65– -1.30]
Árholt á Tjörnesi	2002–2015	0.15 [0.07–0.23]
Kópasker	2007–2014	0.05 [-0.14–0.24]
Raufarhöfn	2001–2015	0.27 [0.22–0.33]
Heiðarsel á Fljótsdalshéraði	2009–2015	1.64 [1.39–1.88]
Höfn í Hornafirði	1997–2015	12.03 [11.96–12.11]
Vestmannaeyjar	2000–2012	3.18 [3.12–3.24]
Vogsósar í Selvogi	2000–2007	-1.04 [-1.18– -0.91]
Nýlenda á Reykjanesi	2006–2014	-4.62 [-4.71– -4.53]

Tafla 5.6 Landhæðarbreytingar á undanförunum árum á stöðum þar sem samfelldar GPS mælingar fara fram. Að Heiðarseli undanskildu eru allar stöðvarnar nærri ströndinni og þeim er raðað í röð réttsælis umhverfis landið frá Reykjavík að Nýlendu (vestast á Reykjanesi). Stöðvarnar voru valdar með tilliti til lengdar óslitinna mælirada og fjarlægðar frá sjó og eru sumar þeirra á Mynd 5.21. Tölur eru reiknaðar sem halli bestu línu gegnum gagnasafnið fyrir hvern stað, eftir að búið er að fjarlægja árstíðasveifluna með STL greiningu. Þær eru í mm á ári og neikvæðar tölur merkja landsig en jákvæðar landris (gögn frá Veðurstofu Íslands, sjá nánar heimild 53).

loftþrýstingi, vindi og hafstraumum byggjast þessar spár á útreikningum margra loftslagslíkana fyrir fjórar sviðsmyndir (RCP2.6–8.5)⁵⁷. Niðurstöður loftslagslíkananna eru síðan notaðar til þess að reikna líklega bráðnun jökla og ísbreiða. Loks eru samanlagðar

Sviðsmynd	Hnattræn hækkun frá 1986–2005 til 2081–2100 (m)	Hækkun árið 2100 (m)
RCP2.6	0.40 [0.26–0.55]	0.44 [0.28–0.61]
RCP4.5	0.47 [0.32–0.63]	0.53 [0.36–0.71]
RCP6.0	0.48 [0.33–0.63]	0.55 [0.38–0.73]
RCP8.5	0.63 [0.45–0.82]	0.74 [0.52–0.98]

Tafla 5.7 Hnattræn hækkun sjávarborðs (m) samkvæmt fjórum sviðsmyndum IPCC. Fyrri dálkurinn ber saman meðaltöl tveggja tímabila, en sá síðari sýnir hækkun frá meðaltali 1986–2005 til ársins 2100. Sjá einnig mynd 3.7.

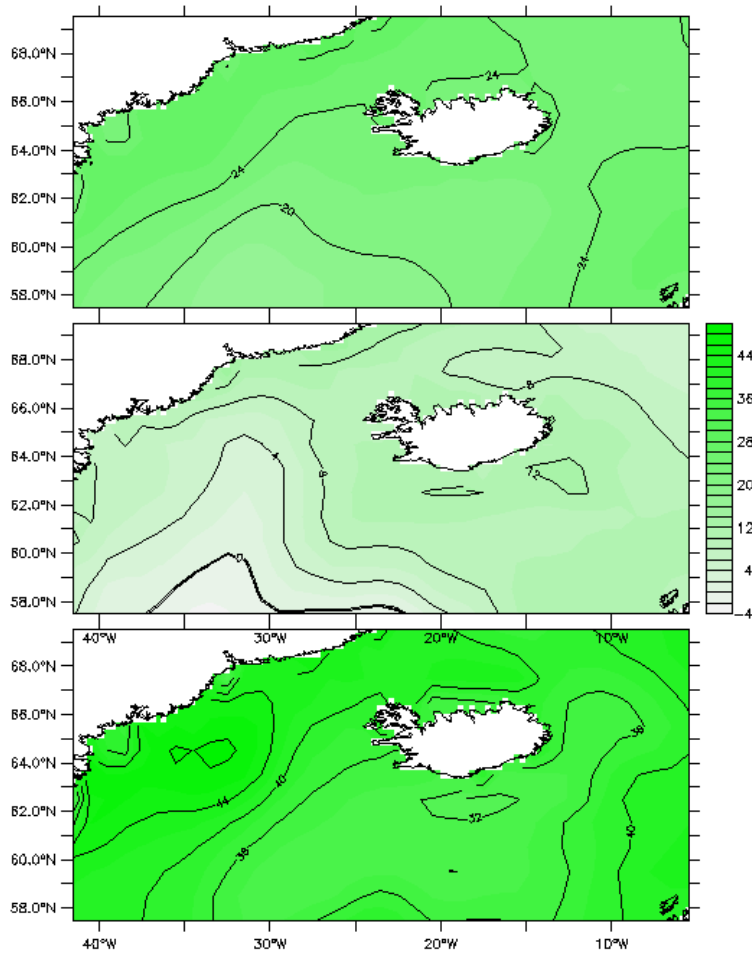
niðurstöður loftslags- og íslíkana notaðar til þess að leggja mat á líklega hækkun sjávarstöðu. Mynd 5.27 sýnir samantekt á hækkun sjávarstöðu sem hlutfall af hnattrænni hækkun samkvæmt þessum útreikningum og tölulegar upplýsingar eru sýndar í töflu 5.7.

Í hlýjstu sviðsmyndinni (RCP8.5) er hnattræn hækkun sjávarstöðu við lok 21. aldar á bilinu 52 til 98 cm en í þeirri köldustu (RCP2.6) er hækkunin 28 til 61 cm. Í hinum sviðsmyndunum er hækkun sjávarstöðu 36–71 cm (í RCP4.5) og 38–73 cm (í RCP6.0).

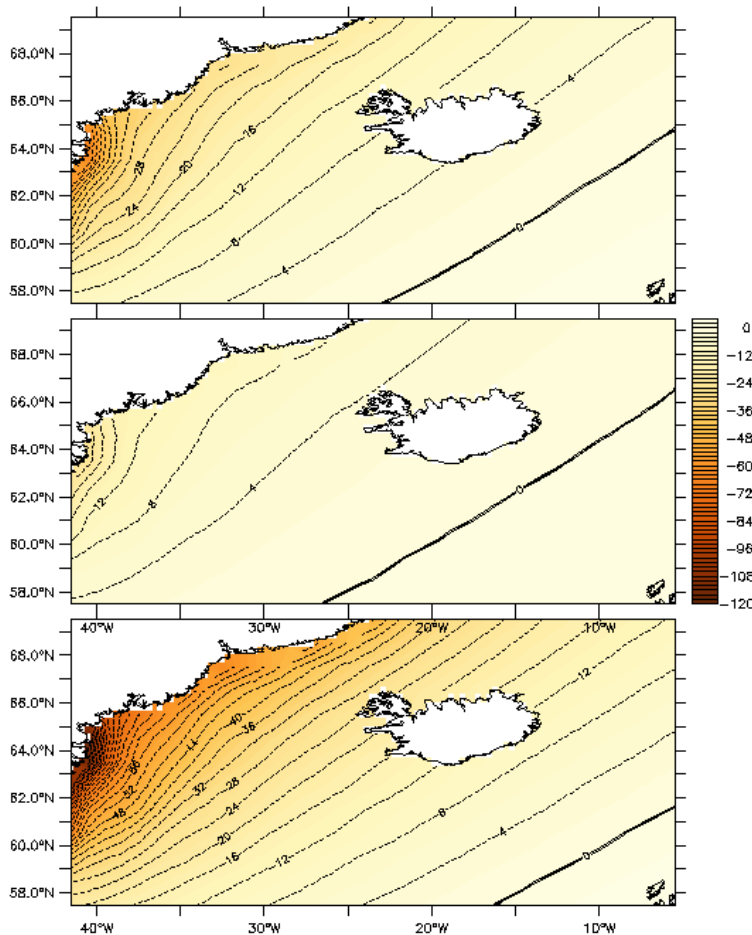
Tafla 5.7 byggist á niðurstöðum eðlisfræðilegra líkana. Tölfræðilíkon sem nota samband hnattrænna breytinga í hita og sjávarstöðu hafa einnig verið notuð til þess að spá fyrir um hækkun sjávarstöðu⁵⁶. Í sumum þessara tölfræðilegu líkana er spáð mun meiri hækkun, eða rúmlega metra, í sviðsmynd RCP4.5.

5.3.4 Svæðisbundnar breytingar á sjávarstöðu í spám IPCC

Til þess að leggja mat á svæðisbundnar breytingar á sjávarstöðu þarf að taka tillit til þeirra þátta sem valda svæðisbundnum frávikum og minnst var á hér að framan. Til þess að sýna þessi áhrif verður í myndum notast við sviðsmynd RCP4.5 (nokkur hlýnun). Til að skoða breytingar á sjávarstöðu vera meðaltöl tveggja tímabila, 1985–2005 og 2081–2100 reiknuð og meðaltal fyrra tímabilsins dregið frá því síðara. Mynd 5.22 byggist á niðurstöðum 21 loftslagslíkans og sýnir áhrif aflrænna þátta og breytinga á eðlismassa (aðallega varmaþenslu) fyrir norðanvert Norður-Atlantshaf⁵⁸. Efst myndin sýnir kort af meðalhækkun en hinar

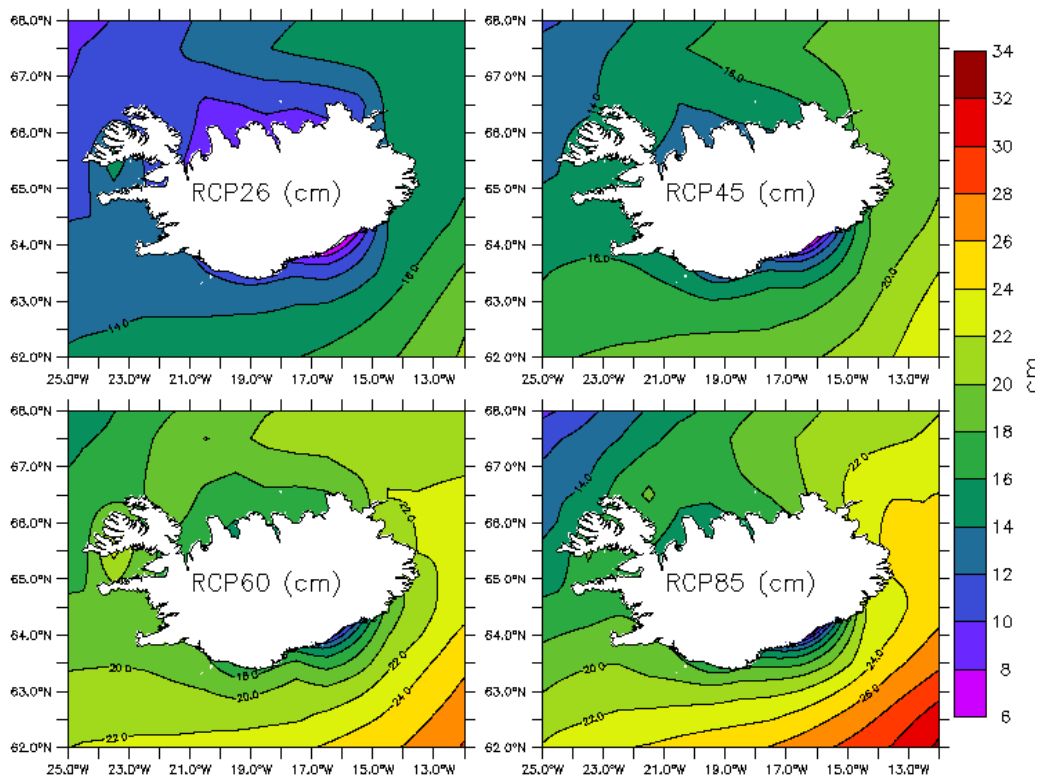
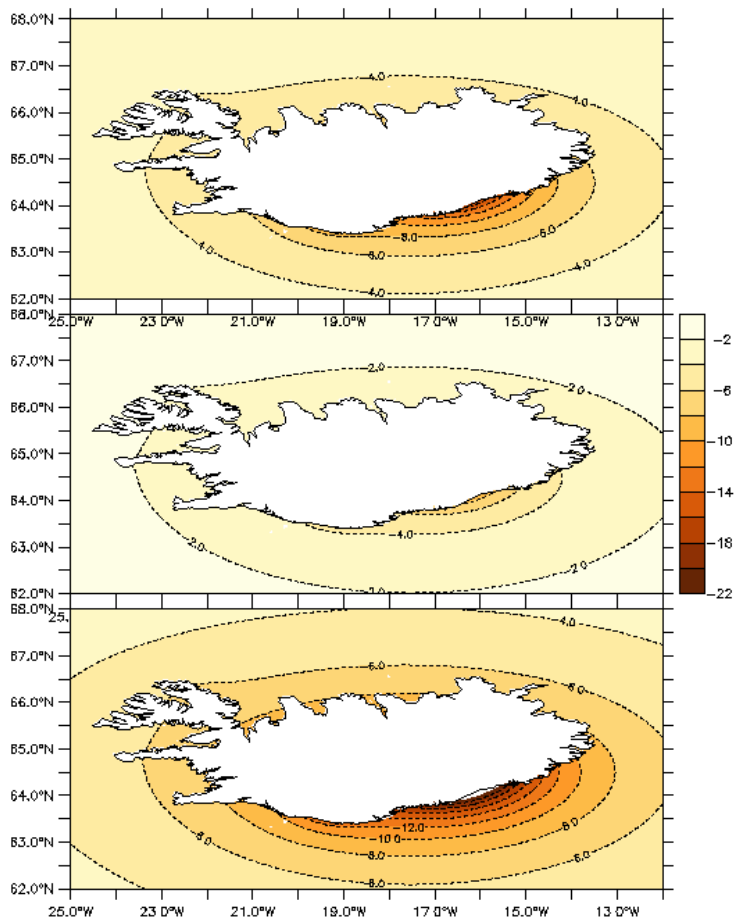


Mynd 5.22 Hækkun sjávarborðs í sviðsmynd RCP4.5 á Norður-Atlantshafssvæðinu vegna aflrænna þátta og breytinga á eðlismassa sjávar (aðallega varmaþenslu). Sýnd er breyting (í cm) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100. Efsta myndin sýnir meðaltal 21 loftslagslíkans, hinar myndirnar sýna neðri og efri vikmörk áhrifa aflrænna þátta. Vikmörkin eru reiknuð þannig að 5–95% af dreifingu gildanna liggja á milli neðri og efri marka. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)

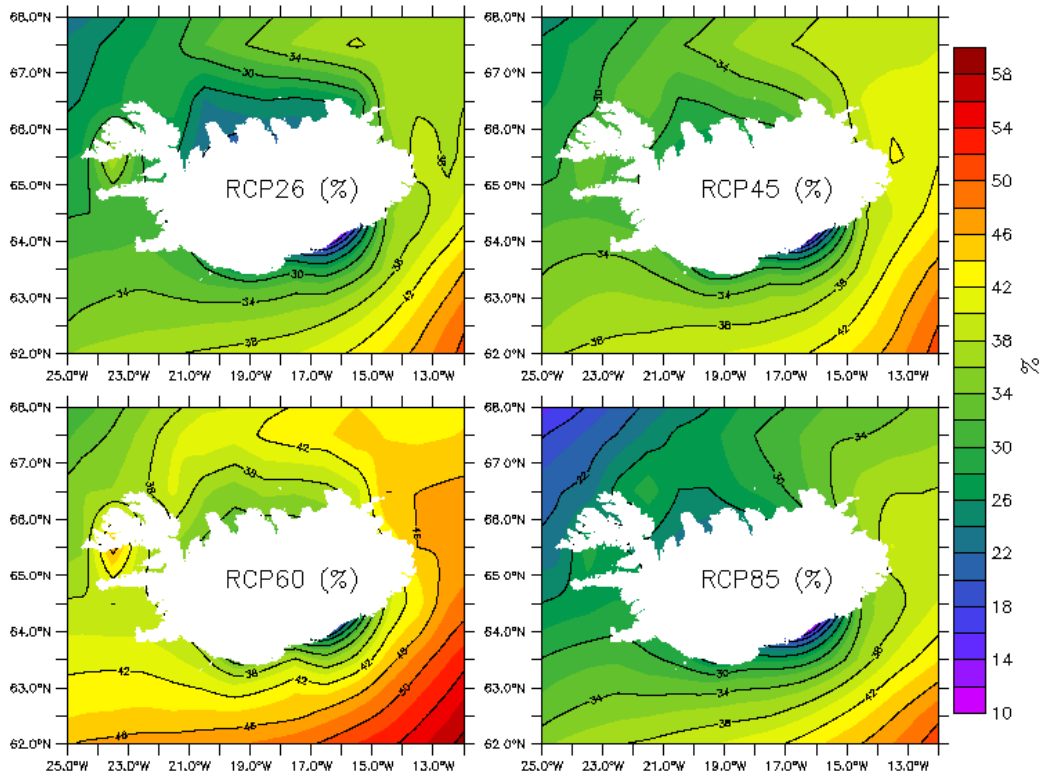


Mynd 5.23 Áhrif massataps ísbreiða á Grænlandi og Suðurskautslandinu á sjávarstöðu nærri Íslandi í sviðsmynd RCP4.5. Ráðandi þáttur á því svæði sem myndin sýnir er fingrafar bráðnunar íshvellsins á Grænlandi, þ.e. áhrif taps ísmassa Grænlandsjökuls á þyngdarsvið jarðar. Sýndar eru breytingar (í cm) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100. Efsta myndin sýnir meðaltal 21 loftslagslíkans, hinar myndirnar sýna neðri og efri vikmörk fingrafarsins. Vikmörkin eru reiknuð þannig að 5–95% af dreifingu gildanna liggja á milli neðri og efri marka. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)

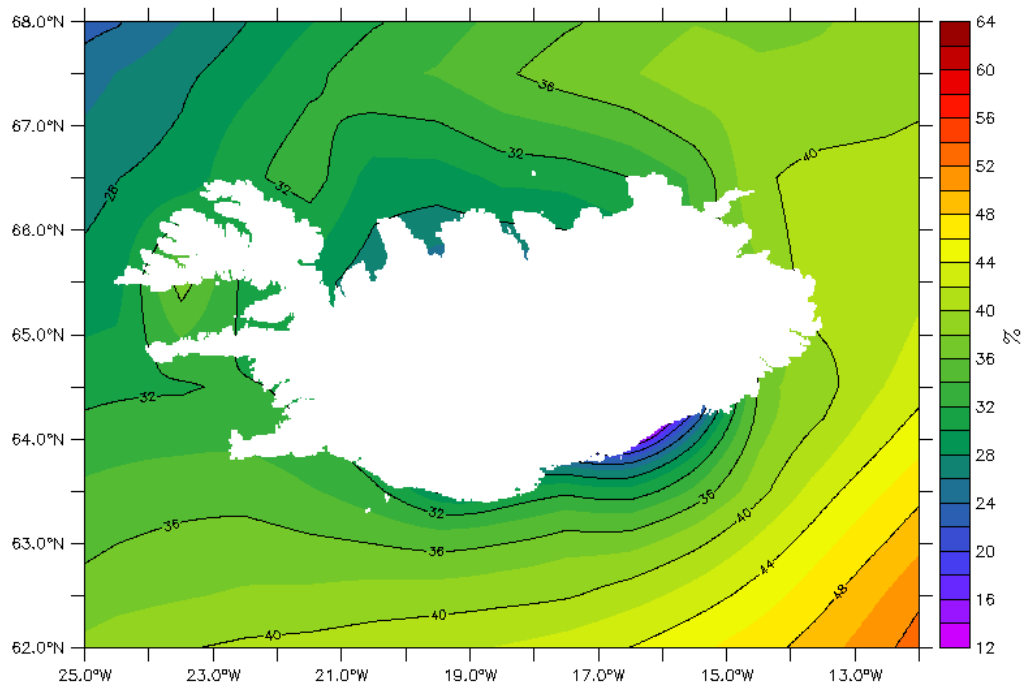
Mynd 5.24 Fingrafar massataps íslenskra jökla á sjávarstöðu nærri Íslandi í sviðsmynd RCP4.5. Myndin er byggð á gögnum frá IPCC sem hafa verið lagfærð eins og lýst er í texta. Sýndar eru breytingar (í cm) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100. Efsta myndin sýnir meðalfrávik, neðri myndirnar sýna efri og neðri vikmörk fingrafarsins. Vikmörkin eru reiknuð þannig að 5–95% af dreifingu gildanna liggja á milli neðri og efri marka. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)



Mynd 5.25 Sjávarstöðubreytingar (í cm) umhverfis Ísland frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100, í fjórum sviðsmyndum IPCC. Myndin sýnir summu mynda 5.9 til 5.11. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)



Mynd 5.26 Sjávarstöðubreytingar umhverfis Ísland sem hlutfall (%) af meðaltali hnattrænna breytinga frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100 í fjórum sviðsmyndum IPCC. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)



Mynd 5.27 Meðaltal hlutfallslegra breytinga í fjórum sviðsmyndum IPCC. Tölur eru prósentur af hnattrænni meðalhækkun sjávarstöðu. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og grein 5.3.8 um aðferðir.)

myndirnar sýna óvissuna, þ.e. efri (95%) og neðri (5%) vikmörk. Að meðaltali er hækkunin við Ísland í þessari sviðsmynd (RCP4.5) um 21–22 cm á tímabilinu, en fyrir neðri mörk óvissubilsins sýnir kortið um 9–11 cm við landið (mynd 5.22, miðjumynd) og á bilinu 35–40 cm fyrir efri mörkin landið (mynd 5.22, neðsta mynd).

Til þess að reikna áhrif loftslagsbreytinga á jökla og ísbreiðurnar á Grænlandi og á Suðurskautslandinu eru notuð sérstök líkön fyrir jökla og ísbreiður. Þessi líkön eru notuð til að kvarða niðurstöður loftslagslíkana svo nota megi þær til þess að reikna líklegt massatap⁵⁹. Mynd 5.23 sýnir hvaða áhrif massatap ísbreiða mun hafa á sjávarstöðu nærri Íslandi. Fingrafar massataps Grænlandsjökuls yfirgnæfir aðra þætti á myndinni, en það hefur áhrif til lækkunar sjávarstöðu við landið um -7 ± 3 cm, mest við Vestfirði en minnst við Suðausturland. Ef skoðuð eru mörk 90% óvissu sést að útslag og halli

fingrafarsins er meiri í efri mörkum þeirra (-18 ± 8 cm) en mun minni í neðri óvissumörkum (-2.5 ± 1.5 cm).

Gögn IPCC um fingrafar líklegar jöklaþróunar á Íslandi hafa ónóga upplausn til þess að staðsetja rétt jökla á Íslandi og fingrafar líklegs massataps jökla landsins er því ekki trúverðugt⁶⁰. Til að lagfæra þetta var fingrafar jöklaþróunar við Ísland reiknað í meiri upplausn þannig að jöklar væru rétt staðsettir. Notast var við sama heildarmassatap jökla á landinu og í sviðsmyndum hjá IPCC, en því dreift jafnt yfir alla jökla landsins⁶¹. Mynd 5.24 sýnir leiðrétt fingrafar líklegar jöklaþróunar á Íslandi. Ef suðurströnd landsins er undanskilin veldur jökulþróunin að meðaltali um 4 cm lækkun á sjávarstöðu. Við suður- og suðausturströndina er lækkunin meiri og er um 14 cm þar sem hún er mest. Ef skoðuð eru mörk 90% óvissu sést að við suður- og suðausturströndina er lækkunin á bilinu 8 til 20 cm en annars staðar 2–8 cm.

Landshluti	Landhæðar- breyting (cm)	Hækkun sem hlutfall af hnattrænni	Hnattræn hækkun 50 cm	Hnattræn hækkun 75 cm	Hnattræn hækkun 100 cm
			Staðbundin hækkun sjávarstöðu (cm)		
Suðvesturland að Norðvesturlandi	-20 til -10	30 til 34 %	25 til 37	33 til 45	40 til 54
Norðvestanlands og innarlega í fjörðum norðanlands	10 til 30	28 til 30 %	-16 til 5	-9 til 13	-2 til 20
Austanverður Tröllaskagi að Flateyjarskaga	-30 til -10	28 til 30%	24 til 45	31 til 53	38 til 60
Skjálfaflói og Öxarfjörður	0 til 20	30% til 32%	-5 til 16	3 til 24	10 til 32
Melrakkaslétta að Langanesi	0 til 10	32 til 38%	6 til 19	14 til 29	22 til 38
Austurland	0 til 20	38 til 40%	-1 til 20	9 til 30	18 til 40
Suðausturland	100 til 200	20 til 28%	-190 til -86	-185 til -79	-180 til -72
Suðurland	20 til 40	30 til 32%	-25 til -4	-18 til 4	-10 til 12
Sunnan- og vestanverður Reykjaneskagi	-30 til -10	32 til 34%	26 til 47	34 til 56	42 til 64

Tafla 5.8 Sjávarstöðubreytingar (cm) eftir landshlutum að gefnum sviðsmyndum um hnattræna hækkun og að viðbættum lóðréttum landhreyfingum. Hækkun sem hlutfall af hnattrænni hækkun og landhæðarbreytingar byggjast á mynd 5.27 og töflu 5.6, og gert er ráð fyrir að landris og landsig haldi áfram á sama hátt út öldina. Í dálkum fyrir landsig og hlutfallslega hækkun endurspeglar talnabilið dæmigerð gildi á viðkomandi svæði, í dálkunum fyrir staðbundna hækkun sýnir talnabilið mestu og minnstu sjávarstöðubreytingu sem hægt er að fá með tölunum í hinum tveimur dálkunum. **Talnabilið er því ekki óvissumat.** Nánar er fjallað um óvissumat í grein 5.3.7 og þar er rakið að skekkja vegna óvissu um hlutfall þróunar á Suðurskautslandi og Grænlandi í hnattrænni hækkun getur numið allt að 50 cm sem legðist þá við tölurnar í töflunni.

Ef breytingarnar á myndum 5.22 til 5.24 eru lagðar saman fæst mat á líklegri breytingu sjávarstöðu. Niðurstaða þessa er sýnd á mynd 5.25, bæði fyrir sviðsmynd RCP4.5 og einnig hinar þrjár sviðsmyndirnar. Í köldustu sviðsmyndinni hækkar sjávarstaða um 6–15 cm en um 10–20 cm í þeirri hlýjustu. Í öllum sviðsmyndum er hækkin minnst suðaustanlands, þar sem áhrifa jöklabráðnunar á Íslandi gætir, hækkin er mest austast á landinu (þar sem áhrif fingrafars Grænlandsjökuls eru minni). Vestanlands og norðan er hækkin svipuð, í kaldari sviðsmyndunum er hækkin norðan til 2–4 cm minni, en um 2 cm meiri í þeim hlýrri.

Mynd 5.26 sýnir sjávarstöðubreytingar við Ísland sem hlutfall af hnattrænum breytingum í sviðsmyndunum fjórum (sjá töflu 5.7). Hlutfallsleg hækkin er mjög áþekk í sviðsmyndunum fjórum og mynd 5.27 sýnir meðaltal þeirra. Líta má á myndina sem samantekið mat á líklegum svæðisbundnum breytileika á sjávarstöðuhækkin við strendur landsins. Vestanlands er hækkin sjávarstöðu rúmlega 30% af hnattrænni hækkin, norðanlands er hækkin tæplega 30%, en eykst austur með landinu og er um 40% austast á landinu. Minnst er hækkin suðaustanlands, eða 15–20% af hnattrænni hækkin. Hlutfallið umhverfis landið er að meðaltali um 33%.

5.3.5 Samantekt á líklegum sjávarstöðubreytingum við Ísland á 21. öldinni

Í útreikningum á sjávarstöðuhækkin hér að framan var ekki tekið tillit til landhæðarbreytinga. Með því að nota upplýsingar frá mynd 5.27 og töflu 5.6 má leggja mat á staðbundnar breytingar á strandsvæðum umhverfis landið⁶². Tafla 5.8 sýnir niðurstöður slíks útreiknings fyrir nokkur strandsvæði og þrjár ólíkar sviðsmyndir um sjávarstöðuhækkin. Sú lægsta þeirra samsvarar líklegri hækkin í sviðsmyndum RCP4.5 og RCP6.0, en sú hæsta er valin með tilliti til þess að tölfræðileg líkön benda til þess að hnattræn hækkin sjávarstöðu geti orðið 1 m eða meira.

Tafla 5.8 sýnir að á Suðurlandi og Suðausturlandi verður sjávarstöðuhækkin vart til vandræða, jafnvel þó að til verulegrar hnattrænnar hækkinar komi. Í öðrum landshlutum getur hækkin orðið nokkur, og þar sem landsigs gætir nemur það tugum cm, jafnvel þó að hnattræn hækkin verði ekki nema hálfur metri. Slík hækkin er með því mesta sem gögn frá síðustu

árþúsundum sýna. Nálgest hnattræn hækkin einn metra verður sjávarstöðuhækkin óvenjumikil í sögulegu tilliti á öllum svæðum þar sem landris er ekki verulegt.

Rétt er að hafa í huga varnagla sem slá má við töflu 5.8. Í fyrsta lagi ríkir óvissa um það hvort mælingar á landhæðarbreytingum á síðustu áratugum endurspegli líklegar breytingar á öldinni. Í öðru lagi er veruleg óvissa í spám um hækkin sjávarstöðu við Ísland (sjá grein 5.3.7 um meðhöndlun óvissu). Loks er mikilvægt að hafa í huga að hnattræn hækkin mun halda áfram á næstu öldum og árabilið 2081 til 2100 (sem mynd 5.27 byggist á) er einungis varða á þeirri leið.

5.3.6 Horfur eftir 2100

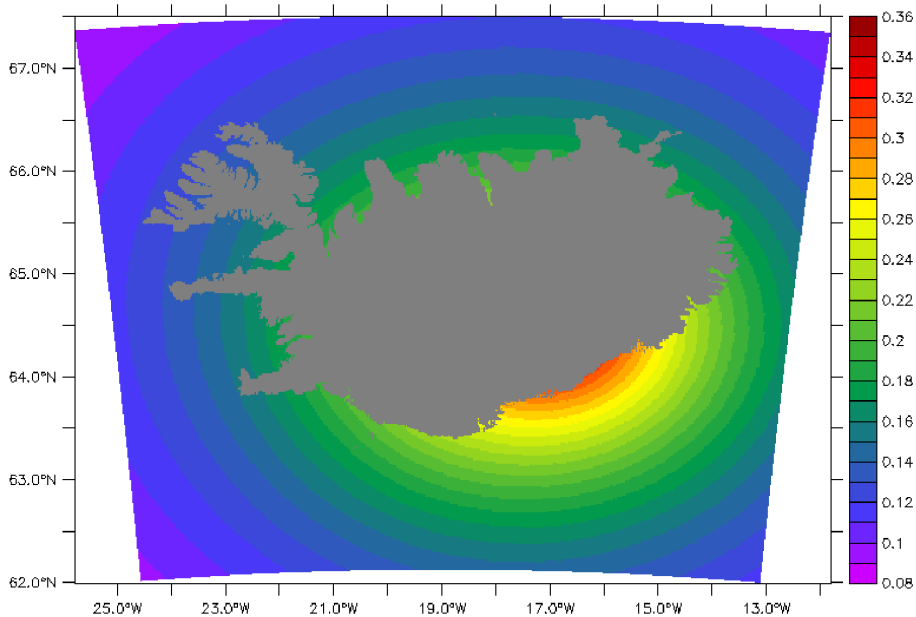
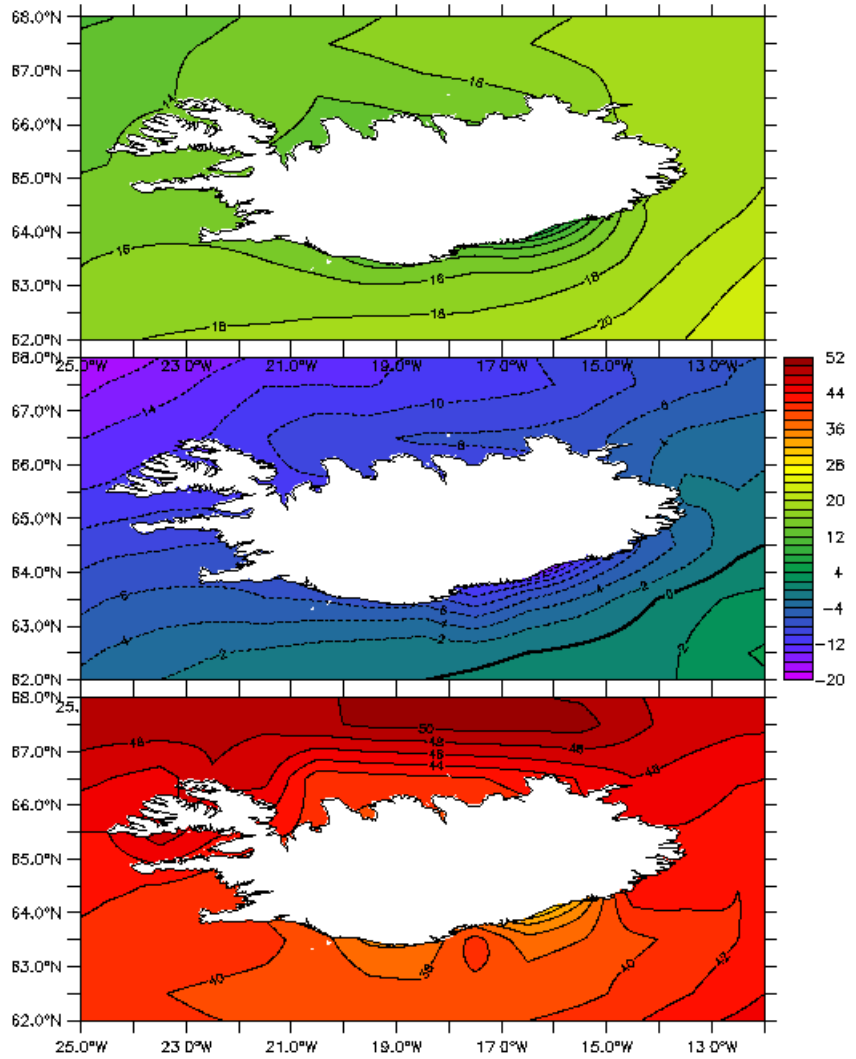
Í skýrslu Milliríkjanefndar er hækkin sjávarstöðu á næstu öldum eftir 2100 rædd. Fram kemur að það sé nánast öruggt að hnattræn sjávarborðshækkin muni halda áfram eftir 2100, en umfang hennar verði mjög háð losun gróðurhúsalofttegunda. Ef losun verður mikil gæti hækkin numið meira en metra á öld til ársins 2500, í hógværi losunarsviðsmyndum er hækkin einungis rúmir tveir metrar á sama tíma⁶³.

Rannsóknir síðan skýrslan kom út benda til þess að hækkin sjávarborðs verði líklega meiri en þar kemur fram. Vitað er að á síðasta hlýskeiði (fyrir 130 til 115 þúsund árum) var hnattræn sjávarstaða um 5–10 m hærri en hún er nú⁶⁴. Líklega var framlag Grænlandsjökuls til þessarar hækkinar einungis um 2 m sem þýðir að stóran hluta sjávarstöðuhækkinarinnar verður að útskýra með massatapi ísbreiðunnar á Suðurskautslandi⁶⁵. Nýlegri líkanreikningar benda til þess að ísbreiðan á vestanverðu Suðurskautslandinu geti verið óstöðugri en áður var talið og geti lagt meira en metra til sjávarstöðuhækkinar á þessari öld og marga metra á næstu öldum⁶⁶.

Síðan skýrsla IPCC kom út hafa rannsóknir sýnt að óafturkræft hrun jökla við Amundsen-flóa á vestanverðu Suðurskautslandinu sé líklega hafið, en þar hefur þynning jökla og hlýnun sjávar leitt til þess að sífellt hraðar kelfir af jöklinum⁶⁷. Hætta er á að þetta leiði til hruns á stórum hluta vestanverðs Suðurskautslandsins sem myndi að lokum hækka sjávarstöðu um meira en 3 metra⁶⁸. Þó að slík atburðarás tæki mörg hundruð ár myndi hún valda langtímahækkin sjávarstöðu á við Ísland⁶⁹.

Nýlegar mælingar á sjávarstöðu benda til þess að á

Mynd 5.28 Sjávarstöðubreytingar í sviðsmynd RCP4.5, meðaltal og vilmörk. Sýndar eru sjávarstöðubreytingar (í cm) frá tímabilinu 1986–2005 til 2081–2100. Efst myndin sýnir meðaltal allra líkana (sama og fyrir RCP4.5 á mynd 5.12) en hinar tvær myndirnar sýna vilmörkin. Vilmörkin eru reiknuð þannig að 5–95% af dreifingu gildanna liggi á milli neðri og efri marka. (Byggt á gögnum frá IPCC, sjá nánar heimild 72 og greinar 5.3.7 um meðhöndlun óvissu og 5.3.8 um aðferðir.)



Mynd 5.29 Áhrif aðlögunar að flotjafnvægi á sjávarstöðu við Ísland. Tölur eru í mm á ári. Myndin sýnir áhrif þess að bæta 5.5 Gt af massa við skorpuna undir Íslandi. Gert er ráð fyrir að kort af landrasi á Íslandi endurspegli dreifingu viðbótarmassans. (Sjá nánar heimild 74.)

undanförnum árum hafi hækkað örar í sjónum og því er ólíklegt að þær sviðsmyndir IPCC sem sýna minnstu sjávarstöðuhækkun gangi eftir⁶⁹. Af framanskráðu má einnig vera ljóst að gera þarf ráð fyrir að sjávarstöðuhækkun muni halda áfram á næstu öldum. Ef framlag Suðurskautslandsins verður hlutfallslega meira en Grænlandsjökuls mun sjávaryfirborð við Ísland hækka meira en myndir 5.26 og 5.27 gefa til kynna. Þessi óvissuþáttur er ræddur frekar í næstu grein.

5.3.7 Meðhöndlun óvissu

Nokkrar mismunandi leiðir eru til þess að leggja mat á óvissu tengda sjávarstöðubreytingum nærri Íslandi. Eins og myndir 5.22 til 5.24 sýna er veruleg óvissa um sjávarstöðubreytingar vegna einstakra þátta sömu sviðsmyndar, og mynd 5.25 sýnir einnig nokkurn mun milli sviðsmynda. Fyrir hverja sviðsmynd á mynd 5.25 er því óvissa um meðalhækkunina. Mynd 5.28 sýnir þetta nánar fyrir sviðsmynd RCP4.5, efsta myndin sýnir meðalhækkunina (sama og sviðsmynd RCP4.5 á mynd 5.25), en neðri myndirnar tvær sýna mörk 95% óvissubilsins⁷⁰. Það bil sem óvissan spannar við landið er að meðaltali 49 cm og þar sem meðalhækkunin er nærri 16 cm sýna lægri óvissumörkin sjávarstöðu falla við landið. Þessi spönn er einnig í samræmi við aðrar niðurstöður um óvissu í mati á svæðisbundinni hækkun sjávarstöðu⁷¹.

Færa má fyrir því rök að óvissan sé mjög líklega ósamhverf, þ.e. ekki megi skrifa hana sem 16 ± 25 cm. Í fyrsta lagi gerir útreikningurinn sem mynd 5.28 byggist á ráð fyrir að óvissa aflrænna þátta og massataps jökla og íshvela séu óháðar stærðir. Þessi forsenda er ekki alls kostar rétt á svæðinu umhverfis Ísland, þar sem litlar líkur eru til þess að varmaþensla og fingrafar Grænlandsjökuls lækki (eða hækki) sjávarstöðu samtímis. Kólnun hefði minni varmaþenslu í för með sér sem myndi lækka mat á líklegri sjávarstöðuhækkun, en jafnframt drægi líklegast úr fingrafari bráðunar Grænlandsjökuls sem myndi auka mat á sjávarstöðuhækkun.

Hvað efri mörk óvissubilsins varðar hefur á síðustu árum komið í ljós að bráðnun ísbreiða getur lagt meira til sjávarstöðubreytinga á næstu öldum en ætla má út frá skýrslu IPCC. Fyrir sjávarstöðu við Ísland skiptir miklu hvort ísbreiða Suðurskautslandsins tapi hlutfallslega meiri massa en íshvel Grænlands. Sviðsmyndareikningar, þar sem hlutfall bráðunar frá

Suðurskautslandinu er aukið en að sama skapi dregið úr massatapi á Grænlandi, sýna að þetta gæti aukið hækkun sjávarstöðu við Ísland um allt að 50 cm⁷¹, sem legðist þá við tölur um staðbundna hækkun í töflu 5.8.

Loks er mikilvægt að hafa í huga að umræða um óvissu á hækkun sjávarstöðu er ekki bara spurning um hækkun, heldur einnig spurning um tíma. Hugsum okkur stað þar sem gert er ráð fyrir að sjávaryfirborð hækki um 50 cm á öldinni með óvissubílinu 35 til 75 cm. Ef reyndin verður 75 cm hækkun á öldinni mun 50 cm hækkun hafa verið náð eftir 66 ár, en ef langtímahækkun verður 35 cm á öld er 50 cm hækkun náð eftir 140 ár. Einnig er vert að hafa grein 5.3.6 í huga, en þar kemur fram að sjávarstöðubreytingar halda áfram öldum saman.

5.3.8 Aðferðir

Gögnin sem notuð eru í þessum kafla fylgja 13. kafla skýrslu IPCC (2013)⁷². Upprunalegu gögnin voru á einnar gráðu neti sem var ófullnægjandi fyrir Ísland. Þau voru því brúuð á einnar bogmínútu net. Fyrir hafsvæðið umhverfis Ísland (25-12°V og 62-68°N) lækkaði fingrafar jöklabráðunar sjávarstöðu í lok þessarar aldar að meðaltali um tæpa 4.8 cm í sviðsmynd RCP4.5. Metið var að um 20% af því stafaði frá strandjökulum utan meginísbreiðunnar á Grænlandi en afgangurinn af þessari lækkingun væri vegna massaminnkunar íslenskra jökla. Reiknað var út hvað þetta fingrafar samsvaraði mikilli bráðnun íslenskra jökla og var niðurstaðan 1550 Gt. Þetta er helmingur þess massa sem nú er bundinn í íslenskum jökulum (um 3100 Gt) og samsvarar 152 m meðalhækkun yfirborðs jöklanna. Til samanburðar myndi núverandi bráðnun íslenskra jökla lækka yfirborð þeirra um 100 m að meðaltali til loka aldarinnar og er þessi tala því ekki ótrúverðug ef loftslag hlýnar enn frekar. Með því að bera þessa niðurstöðu saman við meðaltal fingrafarsjökulbráðunar í hinum sviðsmyndunum var hægt að reikna hversu mikið massatap var að baki fingrafari hverrar sviðsmyndar. Niðurstöðuna má sjá í töflu 5.9.

Betrumbætt fingrafar jökulbráðunar var síðan reiknað fyrir hvert tilvik í töflunni með því að dreifa jökulbráðnuninni jafnt yfir alla jökla landsins og reikna breytingar á þyngdarsviði sem þessi bráðnun veldur. Dæmi um niðurstöðu má sjá á mynd 5.24. Það er mikilvægt að hafa í huga að þessar niðurstöður byggjast ekki á líkanreikningum á íslenskum jökulum heldur eru

Tilvik Sviðsmynd, lággildi (L), miðgildi (M) og hággildi (H)	Meðallækkun íslenskra jökla (m)
RCP2.6 L	55
RCP2.6 M	126
RCP2.6 H	198
RCP4.5 L	79
RCP4.5 M	152
RCP4.5 H	300
RCP6.0 L	79
RCP6.0 M	151
RCP6.0 H	228
RCP8.5 L	112
RCP8.5 M	196
RCP8.5 H	287

Tafla 5.9 Bráðnun íslenskra jökla (m) reiknuð frá meðaltali fingrafars jökulbráðunar umhverfis Ísland. Tölurnar í töflunni eru reiknaðar til þess að lagfæra dreifingu fingrafars jökulbráðunar við Ísland í skýrslu IPCC. Þær eru ekki fengnar með líkanreikningum á íslenskum jöklum.

þær niðurkvörðun á sviðsmyndarreikningum hnattræns líkans. Því er óvarlegt að fullyrða að niðurstöðurnar í töflu 5.9 endurspegli í smáatriðum þær niðurstöður sem fengjust með eiginlegum líkanreikningum á íslenskum jöklum. Nánar má lesa um rannsóknir á líklegri bráðnun íslenskra jökla í grein 5.1.3.

Þegar betrubætt fingrafar var reiknað var áhrifum strandjökla á Grænlandi sleppt. Þetta veldur að meðaltali um 1 cm vanmati á fingrafari jökla og þá er sjávarstöðuhækkun ofmetin að sama skapi. Þessar stærðir eru ekki verulegar miðað við aðra óvissu í þessari greiningu (sjá grein 5.3.7 um óvissu).

Í 13. kafla skýrslu IPCC er tekið tillit til breytinga á þyngdarsviði vegna aðlögunar að flotjafnvægi frá lokum síðasta jökulskeiðs. Eins og rakið er í hliðargrein (5A Fingrafar jökulbráðunar og aðlögun að flotjafnvægi) eru þessi áhrif hverfandi hér við land en það endurspeglast ekki vel í hnattrænum samantektum á þessum áhrifum. Á Íslandi gætir hins vegar áhrifa aðlögunar vegna massataps íslenskra jökla frá lokum 19. aldar. Þessu fylgir innstreymi möttulefnis undir Íslandi og lagt hefur verið mat á að það sé á bilinu 4.5–6.5 Gt á ári⁷³. Ef gert er ráð fyrir að kort af landrasi endurspegli hvernig þessi möttulmassi dreifist undir

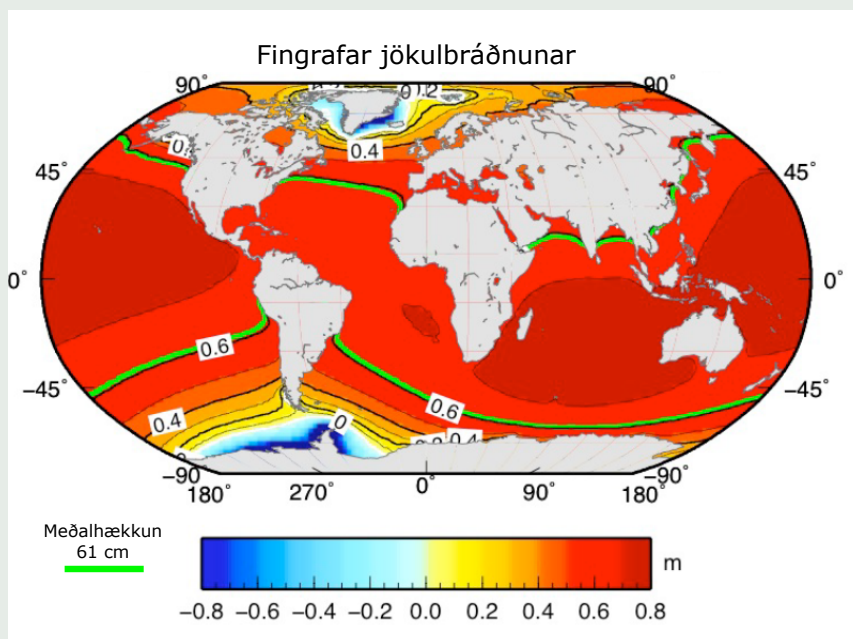
landið má reikna áhrif þessa viðbótarmassa á þyngdarsviðið og sjávarstöðu á sama hátt og gert var fyrir massatap jökla. Niðurstöðu slíks útreiknings má sjá á mynd 5.29 sem sýnir hækkun sjávarstöðu (1 mm á ári) vegna 5.5Gt viðbótarmassa á ári⁷⁴. Myndin sýnir að mest eru áhrifin um 0.3 mm á ári við suðausturströnd Íslands, en víðast við ströndina eru þau um 0.2 mm á ári. Ef þessar tölur eru framreiknaðar til loka 21. aldar myndi þessi viðbótarmassi valda 2–3 cm hækkun á sjávarstöðu.

Í ljósi óvissu um massa sem er að bæstast við undir Íslandi og dreifingu hans var ekki talið tilefni til þess að framreikna niðurstöðurnar á mynd 5.29 fyrir samantektina á mynd 5.25. Þetta þýðir að hækkun sjávarstöðu á mynd 5.25 gæti verið vanmetin um 2–3 cm.

Mynd 5.29 sýnir að fingrafar bráðunar íslenskra jökla á sjávarstöðu gengur til baka þegar landið leitar flotjafnvægis. Við lok síðasta jökulskeiðs tók megnið af þeirri aðlögun skemmri tíma en þúsund ár, og gera má ráð fyrir að ef núverandi jöklar hverfi muni áhrif fingrafarsins hverfa á nokkrum öldum. Sama ferli á sér stað á Grænlandi, en aðlögun að flotjafnvægi þar tekur líklega lengri tíma.

Niðurstöður þessa kafla sýna að gögn frá IPCC um líklegar sjávarstöðubreytingar má aðlaga til þess að meta líklegar sjávarstöðubreytingar við Ísland. Í þessum reikningum hefur niðurstöðum IPCC einungis verið hnikað að litlu leyti, ekki er um hnattræna lausn sjávarstöðulíkans að ræða⁷⁵. Greiningin, sem gerð var fyrir þennan kafla, takmarkaðist við það að túlka niðurstöður IPCC (2013) með tilliti til íslenskra aðstæðna.

Af þessum niðurstöðum og óvissu þeirra má vera ljóst að veruleg þörf er á frekari rannsóknum á framtíðarbreytingum sjávarstöðu í kringum Ísland, þar sem massatap íslenskra jökla er reiknað beint á grundvelli loftslagslíkana og niðurstöðurnar svo notaðar til þess að reikna fingrafar jökulbráðunar. Einnig er þörf á áframhaldandi mælingum á lóðréttum jarðskorpuhreyfingum og mati á áhrifum aðlögunar að flotjafnvægi á sjávarstöðu. Loks er mikilvægt að við mælingar á sjávarstöðu sé tryggt að mæliradir séu nýtilegar til þess að fylgjast með langtímabreytingum. Til þess þarf breytingar á skipulagi mælikerfis. Æskilegast er að langtímamælingar á sjávarstöðu væru gerðar á nokkrum stöðum á landinu og samfelldar landhæðarbreytingar mældar á sama stað með GPS.



Mynd 5.30 Fingrafar jökulbráðnunar (m) í sviðsmynd þar sem gert er ráð fyrir að bráðnun íshvela og jökla hækki sjávarstöðu hnattrænt um 61 cm. Í hitabeltinu og annars staðar milli grænu línanna hækkar sjávarstaða umfram hnattræna meðalhækkun, en utan grænu línanna er sjávarstöðuhækkunin minni og næst íshvelunum fellur sjávarstaða. Hafa ber þó í huga að myndin sýnir einungis fingrafar jökulbráðnunar, ekki eru sýnd önnur áhrif, t.d. áhrif varmaþenslu sem breytir lokaniðurstöðunni. Myndin er þýdd frá heimild 78 með leyfi höfunda.

5A Fingrafar jökulbráðnunar og aðlögun að flotjafnvægi

Fingrafarið

Styrkur þyngdarsviðsins er ekki jafn alls staðar á jörðinni, hann er aðeins minni við miðbaug en við heimskautin og auk þess hefur dreifing massa á og í jörðinni áhrif á þyngdarsviðið. Þannig geta stór fjöll eða fjallgarðar aflagað þyngdarsviðið í nágrenni sínu. Strax um miðbik 18. aldar voru gerðar tilraunir til þess að nota þessi áhrif til þess að veða einstök fjöll⁷⁶ en bættur skilningur á þeim þróaðist ekki fyrr en á 19. öld með hugmyndum um flotjafnvægi jarðskorpunnar⁷⁷.

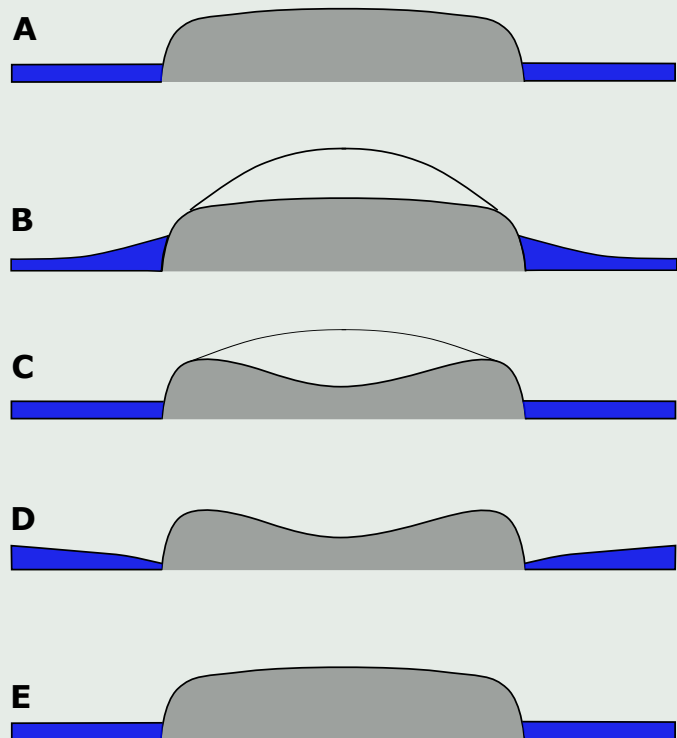
Rétt eins og fjallgarðar innihalda jökla mikinn massa sem aflagar þyngdarsviðið í nágrenninu og þetta viðheldur hærri sjávarstöðu næst jöklinum. Þegar jökulísinn bráðnar gerist því tvennt. Í fyrsta lagi bætist vatn við heimshöfin svo að í þeim hækkar. Í öðru lagi dregur úr aflögun þyngdarsviðsins sem lækkar sjávarstöðu næst jöklinum, en sjávarstöðuhækkun verður þá því meiri fjær jöklinum. Svæðisbundna breytingin sem af þessu leiðir er kölluð fingrafar bráðnunarinnar. Mynd 5.30 sýnir fingrafar jökulbráðnunar í einni sviðsmynda Ice2Sea verkefnisins⁷⁸. Til þess að reikna þessa mynd var gert ráð fyrir að

bráðnun jökla og ísbreiða myndi hækka hnattræna sjávarstöðu um 61 cm að meðaltali, og bráðnuninni var dreift á vesturhvel Suðurskautslandsins og Grænlandsjökul, auk jökla utan heimskautasvæða (m.a. á Íslandi). Grænar línur á kortinu sýna hnattræna meðalhækkunina. Á svæðum innan grænu línanna hækkar sjávarstaða umfram hnattræna meðaltalið en utan þeirra hækkar minna. Næst ísbreiðum heimskautanna lækkar sjávarstaðan. Mikilvægt er að hafa í huga að fingrafarið er einungis einn þátta sem valda svæðisbundum mun á sjávarstöðuhækkun. Mynd 5.30 sýnir þannig ekki áhrif varmaþenslu sjávar, breytingar á vindum og hafstraumum eða aðlögun að flotjafnvægi.

Aðlögun að flotjafnvægi

Þegar jökla bráðna léttir fargi af jarðskorpunni og þrýstingur í möttli jarðar fellur undir ísnum. Þrýstifallið knýr massaflæði undir skorpunni sem leitast við með tíð og tíma að jafna út áhrif fargléttingarinnar. Jarðskorpan leitar því aftur flotjafnvægis og landið rís undir jöklinum og nærri honum. Þetta landris getur

Mynd 5.31 Einfölduð skýringarmynd af áhrifum jökla og aðlögunar að flotjafnvægi á sjávarstöðu (nánari útskýring í megin-texta). Myndin sýnir einungis áhrif breytinga á þyngdarsviði á sjávarstöðu, en ekki þau áhrif sem landris, landsig, varmaþensla eða aðrar breytingar á rúmmáli sjávar hafa á sjávarstöðu við ströndina.



haldið áfram löngu eftir að jökullinn er horfinn. Þannig eru svæði við Eystrasalt og í norðurhluta Kanada enn að rísa eftir að hinir stóru jöklar síðasta jökulskeiðs bráðnuðu fyrir um tíu þúsund árum.

Á Íslandi er jarðskorpan hins vegar þynnri og möttullinn undir henni deigari svo aðlögun að flotjafnvægi eftir ísöldina lauk fyrir mörg þúsund árum. Á móti kemur að áhrifa aðlögunar að flotjafnvægi vegna massataps jökla frá lokum 19. aldar gætir núna á Íslandi.

Það er ólíklegt að þeirri aðlögun að flotjafnvægi sem nú gætir á Íslandi ljúki með því að sjávarstaða umhverfis jökulvana landið verði sú sama og hún var áður en jöklar byrjuðu á ný að myndast á Íslandi, á síðari hluta nútíma. Eftir sem áður er ágætt að hafa þessa upphafs- og lokastöðu sjávarborðs í huga þegar hugsað er um hringrás jökulmyndunar, fingrafars jökla og aðlögun að flotjafnvægi.

Mynd 5.31 sýnir einfaldaða skýringarmynd af áhrifum þyngdarsviðsbreytinga vegna jökuls og aðlögunar að flotjafnvægi. Efsta myndin (A) sýnir íslaut land og sjávarstöðu. Þegar jökull vex á landinu (B) aflagar massi þess þyngdarsviðið svo sjávarstaða hækkar við strönd landsins. Á nægilega löngum tíma leitar landið og jökulfargið flotjafnvægis og sjávarstaða við ströndina lækkar í fyrra horf (C). Þegar jökullinn minnkar aflagast þyngdarsviðið og nú lækkar sjávarstaðan við ströndina (D). Loks þegar jökulvana landið hefur aftur náð flotjafnvægi er sjávarstaðan komin í sama horf og í upphafi. Þótt líklegast myndi landris og landsig við ströndina hafa veruleg áhrif á afstæða sjávarstöðu í þessari hringrás eru þau áhrif ekki sýnd á myndinni.

Tilvísanir

- 1 Sjá nánar um síðustu skýrslu (V2008) í athugasemd 3 í kafla 3. Sjá greinar 2.4.2 og 4.2.1 í V2008.
- 2 Myndin er uppfærsla byggð á mynd 2.17 í V2008. Sjá nánar á vef Jökklarannsóknafélagsins spordakost.jorfi.is.
- 3 Oddur Sigurðsson, Richard S. Williams, Jr. og Skúli Víkingsson 2013. Jöklakort af Íslandi. Veðurstofa Íslands. Sjá einnig heimildir 8 og 9 hér að neðan auk Brynjólfsson, S., ofl., 2014 Geomorphology and the Little Ice Age extent of the Drangajökull ice cap, NW-Iceland, with focus on its three surge-type outlets, *Geomorphology* 213, 2014, 292–304.
- 4 Daði Björnsson 2015. Heildarstærð jökla á Íslandi 2014. Loftmyndir ehf., minnisblað dags. í mars. 2015.
- 5 Gögn frá Jökklarannsóknafélagi Íslands auk óbirtra gagna frá Veðurstofu Íslands.
- 6 Hrafnhildur Hannesdóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir og Snævarr Guðmundsson 2014. Variations of SE-Vatnajökull ice cap (Iceland) 1650–1900 & reconstruction of the glacier surface geometry at the Little Ice Age maximum. *Geogr. Ann. A, Phys. Geogr.*, 97(2), 237–264. doi:10.1111/geoa.12064.
- 7 Snævarr Guðmundsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson 2017. Changes of Breiðamerkurjökull glacier, SE-Iceland, from its late nineteenth century maximum to the present. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 10.1080/04353676.2017.1355216, ddx.doi.org/10.1080/04353676.2017.1355216.
- 8 Hrafnhildur Hannesdóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Sverrir Guðmundsson. 2015. Changes in the southeast Vatnajökull ice cap, Iceland, between – 1890 & 2010. *The Cryosphere*, 9, 565–585, doi:10.5194/tc-9-565-2015. Sjá einnig Hrafnhildur Hannesdóttir 2014. Variations of southeast Vatnajökull – past, present & future. PhD ritgerð, Raunvísindadeild, Háskóli Íslands, 197 bls.
- 9 Finnur Pálsson, Sverrir Guðmundsson, Helgi Björnsson, E. Berthier, Eyjólfur Magnússon, Snævarr Guðmundsson og Hannes H. Haraldsson 2012. Mass & volume changes of Langjökull ice cap, Iceland, ~1890 to 2009, deduced from old maps, satellite images & in situ mass balance measurements. *Jökull*, 62, 81–96.
- 10 Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Sverrir Guðmundsson, Eyjólfur Magnússon, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, E. Berthier, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson. 2013. Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: trends & variability since the Little Ice Age. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1–5, doi:10.1002/grl.50278.
- 11 Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson og E. Berthier 2013. Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements & changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Ann. Glaciol.*, 54(63), 63–74. doi:10.3189/2013AoG63A422.
- 12 Gögn frá Veðurstofu Íslands, Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands og Háskólanum í Innsbruck.
- 13 Eyjólfur Magnússon, Joachin Muñoz-Cobo Belart, Finnur Pálsson, Hálfán Ágústsson og Philippe Crochet. 2015. Geodetic mass balance record with rigorous uncertainty estimates deduced from aerial photographs and lidar data – Case study from Drangajökull ice cap, NW-Iceland. *The Cryosphere*, 10, 159–177, 2016 doi:10.5194/tc-10-159-2016.
- 14 Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson 2011. LiDAR mapping of the Snæfellsjökull ice cap, western Iceland. *Jökull*, 61, 19–32.
- 15 Sverrir Guðmundsson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Etienne Berthier, Finnur Pálsson, Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir & Jorgen Dall. 2011. Response of Eyjafjallajökull, Torfajökull and Tindfjallajökull ice caps in Iceland to regional warming, deduced by remote sensing. *Polar Research*, 30, 7282.
- 16 Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson & Helgi Björnsson. 2009. Breytingar á austanverðum Skeiðarárjökli og farvegi Skeiðarár 1997–2009 og framtíðarhorfur. Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands, greinargerð RH-08-2009, 22 p.
- 17 Tímasetning höfð eftir landeiganda Núpsstaðaskógar, Hannesi Jónssyni.
- 18 Oddur Sigurðsson dró útlínur eftir Landsat gervihnattamyndum 1975, 1991, 1999 og 2014 á samsettan myndgrunn Landmælinga Íslands, byggðum á Landsatmyndum frá 2014. Útlínur 1890 byggjast á ystu mörkum jökuls á litlu-ísöld og útlínur 1945 byggjast á AMS kortum 1:50000 Series C762. Myndin sýnir ekki breytingar á ströndinni á þessum tíma. Sambærilega, en ítarlegri úttekt á hopi Breiðamerkurjökuls, má sjá í heimild 7, og í Helgi Björnsson, Finnur Pálsson & Sverrir Guðmundsson 2001. Jökulsárlón at Breiðamerkursandur, Vatnajökull, Iceland: 20th century changes and future outlook. *Jökull* 50, 1–18.
- 19 Óbirt gögn: Oddur Sigurðsson, Veðurstofa Íslands. Sjá einnig: Finnur Pálsson og Helgi Björnsson 2007, Könnun á lögun og lengd Öldutanga undir jökulis á mótum Hoffells- og Svínafellsjökla í Hornafirði, Jarðvísindastofnun Háskólans, mars RH-28-2007.
- 20 Sjá einnig Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Helgi Björnsson, P. Crochet, Elías B. Eliasson, Sverrir Guðmundsson, Jóna F. Jónsdóttir, Haraldur Ólafsson, Finnur Pálsson, Ólafur Rögnvaldsson, Oddur Sigurðsson, Árni Snorrason, Óli G. Blöndal Sveinsson og Þorsteinn Þorsteinsson. 2007. Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. Reykjavík, Orkustofnun, skýrsla OS-2007/011.
- 21 Sverrir Guðmundsson, Helgi Björnsson, Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson og Oddur Sigurðsson 2009. Similarities and differences in the response to climate warming of two ice caps in Iceland. *Hydrology Research*, 40, 495–502. doi: 10.2166/Nh.2009.210. Sjá einnig kafla 6.5 í Fenger ofl. 2007 (heimild 22).
- 22 Rummukeinen, M., K. Ruosteenoja og K. Kjellstrom. 2007. Climate Scenarios. Í: Fenger, J. (ritstj.): Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources – Their role in the Nordic Energy System. Kaupmannahöfn, 2007:005.
- 23 Nawri, N., og Halldór Björnsson. 2010. Air Surface and Precipitation Trends for Iceland in the 21st Century. Veðurstofa Íslands, skýrsla 2010-005.

- 24 Myndir 5.7 og 5.8 eru íslenskaðar útgáfur af mynd 5.7 í Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, A. Ahlström, L. M. Andreassen, S. Beldring, Helgi Björnsson, P. Crochet, Bergur Einarsson, H. Elvehøy, Sverri Guðmundsson, R. Hock, H. Machguth, K. Melvold, Finnur Pálsson, V. Radi, Oddur Sigurðsson og Þorsteinn Þorsteinsson 2011. *Hydropower Snow and Ice*. Í: Þorsteinn Þorsteinsson og Halldór Björnsson (ritstj.): *Climate Change and Energy Systems – Impacts, Risks and Adaptation in the Nordic and Baltic Countries*. Norðurlandaráð, Kaupmannahöfn. TemaNord 2011:502. Myndirnar byggjast á útreikningum Sverris Guðmundssonar hjá Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands.
- 25 Aðalgeirsdóttir, G., Guðmundsson, S., Björnsson, H., Pálsson, F., Jóhannesson, T., Hannesdóttir, H., Sigurðsson, S.P. & Berthier, E. 2011. Modelling the 20th and 21st century evolution of Hoffellsjökull glacier, SE-Vatnajökull, Iceland. *Cryosphere*, 5, 961–975. doi:10.5194/tc-5-961-2011.
- 26 Hrafnhildur Hannesdóttir, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Sverrir Guðmundsson, Philippe Crochet, Hálf dán Ágústsson, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Sven P. Sigurðsson, Helgi Björnsson. 2015. Downscaled precipitation applied in modelling of mass balance and the evolution of southeast Vatnajökull, Iceland. *J. Glaciol.* 61 (229), doi:10.3189/2015JG15J024.
- 27 Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon og Helgi Björnsson 2016. Greinargerð um könnun á legu vatnaskila Skaftár og Hverfisfljóts og stöðugleika þeirra þegar jökullinn hörfar. Raunvísindastofnun Háskóla Íslands, Reykjavík, skýrsla RH-06-2016.
- 28 Sjá t.d. Benediktsson, I. O., Jonsson, S. A., Schomacker, A., Johnson, M. D., Ingólfsson, O., Zoet, L., Iverson, N. R. & Stotter, J. 2016 Progressive formation of modern drumlins at Mulajökull, Iceland: stratigraphical and morphological evidence. *Boreas*, 45, bls. 567–583. auk Magnússon, E., F. Pálsson, H. Björnsson & S. Guðmundsson. 2012. Removing the ice cap of Öræfajökull central volcano, SE-Iceland: Mapping and interpretation of bedrock topography, ice volumes, subglacial troughs and implications for hazards assessments. *Jökull*, 62, 131-150 og einnig Schomacker, A. 2010, Expansion of ice-marginal lakes at the Vatnajökull ice cap, Iceland, from 1999 to 2009. *Geomorphology*, 119, 232-236.
- 29 Sjá almenna umfjöllun um vatnafar í grein 2.4.1 og umfjöllun um líklega þróun á öldinni í grein 4.2.2 í V2008.
- 30 Lawrence D., Barthelmie R., Crochet, P., Lindström G., Kolcova T., Kriauciuniene J., Larsen S., Pryor S., Reihan A., Roald L., Tietavainen, H, og Wilson, D. 2011 Analysis of historical hydroclimatological time series for the Nordic and Baltic regions, í Thorsteinsson T. og Björnsson, H. (ritstj.) *Climate Change and Energy Systems, Impacts Risk and Adaptation in the Nordic and Baltic countries*, ThemaNord 2011:502 Norræna Ráðgjafarfélagið, Kaupmannahöfn.
- 31 Jónsdóttir, J. F., Uvo, C. B. & Clarke, 2008. R. T. Trend analysis in Icelandic discharge, temperature and precipitation series by parametric methods. *Nordic Hydrology* 39(5-6), 425-436.
- 32 Einarsson, B. & Jonsson, S. 2010. The effects of climate change on runoff from two watersheds in Iceland. IMO Report 2010-016, Reykjavík, Iceland.
- 33 Blöschl, G. ofl. 2017, Changing climate shifts timing of European floods, *Science*, 357, 6351., 588-590 doi: 10.1126/science.aan2506
- 34 Skýrsla vísindanefndar frá 2008 fjallaði um orðnar sjávarstöðubreytingar í kafla 2.3.2 og spár um breytingar í kafla 4.5. Spár voru ræddar í samhengi við hnattrænar breytingar, ekki var reynt að taka tillit til svæðisbundinna frávíka á Norður-Atlantshafi.
- 35 Sjá Church ofl. 2013. Sea level Change. Kafli 13 í IPCC 2013; sjá tilvitnun 2 í kafla 3.
- 36 Taflan er stýtt útgáfa af töflu 13.1 í heimild 35.
- 37 Í Grace verkefninu (2002–2017) voru þyngdarsvið jarðar og breytingar kortlagðar með meiri nákvæmni en áður hafði verið gert. Sjá nánar á vefsvæðinu grace.jpl.nasa.gov. Innan Argo verkefnisins (www.argo.ucsd.edu) eru gerðar mælingar í hafi með ótal baujum. Mynd 5.2 byggist á mynd 13.6 í AR5 skýrslu IPCC 1 í heimild 35 hér að ofan, en sú mynd er uppfærð frá mynd 2 í Boening, C ofl. 2012. The 2011 La Nina: So Strong the Oceans fell. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L19602. doi:10.1029/2012GL053055.
- 38 Roelof Rietbroek o.fl. 2016. Revisiting the contemporary sea level budget on global and regional scales. *PNAS*. doi:www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1519132113.
- 39 Sjá undirkafla 5A Fingrafar jöklabráðunar og aðlögun að flotjafnvægi.
- 40 Gerhrels R. o.fl. 2006. Rapid sea-level rise in the North Atlantic Ocean since the first half of the nineteenth century. *The Holocene* 16(7) 949–965.
- 41 Gehrels R., Woodworth P. L. 2012. When did modern rates of sea-level rise start?, *Global and Planetary Change*, 100: 263–277.
- 42 Simonarson, L.A. & Leifsdóttir, O.E. 2002. Late-Holocene sea-level changes in south and southwest Iceland reconstructed from littoral molluscan stratigraphy. *The Holocene* 12, 149-158.
- 43 Guðmundur G. Bárðarson. 1923. Fornar sjávarminjar við Borgarfjörð og Hvalfjörð. *Rit Vísindafjelags Íslendinga* I, 119. bls. 74-75.
- 44 Gehrels, W.R., Marshall, W.A., Gehrels, M.J., Larsen, G., Kirby, J.R., Eiriksson, J., Heinemeier, J., Shimmiel, T. 2006. Rapid sea-level rise in the North Atlantic Ocean since the first half of the nineteenth century. *Holocene* 16, 949–965.
- 45 Margot H. Saher, W. Roland Gehrels, Natasha L. M. Barlow, Antony J. Long, Ivan D. Haigh, Maarten Blaauw. 2015. Sea-level changes in Iceland and the influence of the North Atlantic Oscillation during the last half millennium. *Quaternary Science Reviews* 108. 23–36, doi:10.1016/j.quascirev.2014.11.005.
- 46 Myndin sýnir sjávarstöðu í hnitakerfi Sjósmælinga Íslands, en það hnitakerfi er 1.82 m hærra en hnitakerfi Reykjavíkurborgar. Þetta hefur ekki áhrif á þær breytingar á sjávarstöðu sem myndin sýnir.
- 47 Tölur innan hornklofa sýna 5–95% vikmörk matsins.
- 48 Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson. 2006. Úrvinnsla sjávarfallagagna: Sjávarföll og hægfara sjávarborðsbreytingar í Reykjavíkurborg. Jarðvísindastofnun Háskólans.

- 49 Ef sjávarstaða í Grindavík er borin saman við Reykjavík kemur í ljós að miðað við fast sjávarborð í Reykjavík ris sjávarstaða í Grindavík um 7 mm á ári. Það þýðir að ef sjávarstaða í Reykjavík ris um 2 mm á ári er risið í Grindavík u.þ.b. 9 mm á ári. Sjá nánar Guðjón Scheving Tryggvason. 2016. Sjávarborðsrannsóknir, – Úrvinnsla sjávarborðsmælinga frá Grindavík, Landeyjahöfn og Hornafirði. Vegagerðin, útgáfa A – júní 2016.
- 50 Þóra Árnadóttir ofl. 2009. Glacial rebound and plate spreading: results from the first countrywide GPS observations in Iceland *Geophysical Journal*, 177, 691–716. GPS netið er samvinnuverkefni Landmælinga Íslands, Jarðvísindastofnunar Háskóla Íslands, Veðurstofu Íslands og erlendra háskóla.
- 51 Sigrún Hreinsdóttir og Þóra Árnadóttir. 2016. óbirt gögn.
- 52 R. B. Cleveland, W. S. Cleveland, J.E. McRae & I. Terpenning. 1990. STL: A Seasonal-Trend Decomposition Procedure Based on Loess. *Journal of Official Statistics*, 6, 3–73.
- 53 Úrvinnsla á GPS mæliröðunum var unnin af Simone Zonetti, Veðurstofu Íslands, á vegum norræna öndvegissætursins SVALI. Úrvinnslan byggist á sk. STL greiningu (sjá tilvitnun 52 hér að framan). Tímaraðirnar á myndum 5.7 og 5.8 byggjast á óbirtum gögnum Veðurstofu Íslands.
- 54 Kvarðinn, Janúar 2017. Samanburður á niðurstöðum grunnstöðvanetsmælinganna ISNET2004 og ISNET2016, Landmælingar Íslands.
- 55 Þorsteinn Jóhannesson. 2010. Spá um hækkuð sjávarborð á Siglufirði og Ólafsfirði. Verkfræðistofa Siglufjarðar.
- 56 Sjá einnig umfjöllun um hnattrænar sjávarstöðubreytingar í grein 3.8 hér að framan. Umfjöllun hér byggist á 13. kafla IPCC 2013, sjá heimild 35 hér að framan), sérstaklega greinum 13.6 og 13.7 og töflum 13.5 og 13.6. Ítarlega umræðu um tölfræðileg líkön má finna í 13.6. Sú umfjöllun er ekki rakin hér, en samantekt á niðurstöðum tölfræðilegra líkana má sjá í töflu 13.6 í skýrslu IPCC.
- 57 Sjá undirkafla 3C Sviðsmyndir og líkankeyrslur CMIP5. Eins og í fyrri köflum þýðir „frá 1986–2005 til 2081–2100“ að meðaltal fyrra tímabilsins er dregið frá meðaltali þess seinna.
- 58 Myndir 5.9 til 5.16 byggjast á gögnum sem fylgja 13. kafla IPCC skýrslunnar, en fyrir þessa samantekt var hafsvæðið nærri Íslandi teiknað sérstaklega. Sjá nánar grein 5.3.8 um aðferðir.
- 59 Sjá nánar í Church, J.A. ofl. 2013. Sea Level Change Supplementary Material. Kafli 13SM í IPCC 2013, sjá heimild 35 hér að framan.
- 60 Sjá t.d. mynd 13.18b í IPCC 2013, sjá einnig heimild 35 hér að framan.
- 61 Sjá nánar um aðferðir í undirkafla 5.3.8.
- 62 Til að reikna reitina í töflunni er sjávarstöðuhækkun reiknuð frá hnattrænu hækkuðum og hlutfallinu. Síðan er landsigi bætt við þá tölu, en landris dregið frá. Sem dæmi má taka að ef hnattræn hækkuð verður 1 m er hún á bilinu 38 til 40 cm við Austurland. Þar er landris á bilinu 0 til 20 cm svo að lægsta mögulega staða er 38–20 = 18 cm en hæsta staða er 40 cm.
- 63 Hér er byggt á töflu 13.8 í heimild 35 hér að framan, en hún sýnir mögulega hækkuð á næstu öldum fyrir þrjár ólíkar sviðsmyndir. Fram kemur að taflan kunni að vera vanmat, og því er hér byggt á efri mörkum þess bils sem gefið er í henni. Sjá einnig Gollledge, N.R. ofl. 2015. The multi-millennial Antarctic commitment to future sea-level rise. *Nature* 562, 421–425. doi:10.1038/nature15706.
- 64 Sjá umfjöllun í grein 3.4.
- 65 Sjá Dahl-Jensen D ofl. 2013. Eemian interglacial reconstructed from a Greenland folded ice core. *Nature*, 493, 489–493. doi:10.1038/nature11789.
- 66 DeConto R. & Pollard D. 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531, 591–597 doi:10.1038/nature17145.
- 67 Rignot E, ofl. 2014. Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011. *Geophysical Research Letters*, 41, 3502–3508.
- 68 Feldmann J & Levermann A. 2015. Collapse of the West Antarctic Ice Sheet after local destabilization of the Amundsen Basin. *PNAS*, 112, 14191–14196, 10.1073/pnas.1512482112.
- 69 Sjá umfjöllun í undirkafla 3D Rýrnun jökla og hækkuð á sjávarborði heimshafanna.
- 70 Til að gæta samræmis við mynd 13.19a í heimild 35 hér að framan er óvissan reiknuð á sama hátt og lýst er í heimild 35, jöfnu 13.SM.1. Með þessari aðferð er óvissan háð summu fervika ólíkra áhrifaþátta. Forsendur aðferðarinnar um óháða áhrifaþætti eru þó líklega ekki réttar nærri Ísland eins og lýst er í texta.
- 71 Sjá mynd 12c í: Perrette, M., Landerer, F., Riva, R., Frieler, K., og Meinshausen, M. 2013. A scaling approach to project regional sea level rise and its uncertainties, *Earth Syst. Dynam.*, 4, 11–29, doi:10.5194/esd-4-11-2013. Ef ekki er tekið tillit til óvissu um hlutfallslegt framlag íshvelanna verður heildaróvissan minni, sjá t.d. greiningu Slangen A.B.A ofl. 2012. Towards regional projections of twenty-first century sea-level change based on IPCC SRES scenarios. *Clim. Dyn.*, 38, 1191–1209. doi:10.1007/s00382-011-1057-6.
- 72 Sjá viðauka með gögnum í heimild 35 hér að framan. Gögnunum var hlaðið niður frá vefsvæði loftslagsgagnaseturs Hamborgarháskóla (icdc.zmaw.de).
- 73 Sørensen, L. S., A. H. Jarosch, G. Aðalgeirsdóttir, V. R. Barletta, R. Forsberg, F. Pálsson, H. Björnsson, T. Jóhannesson. 2017. The effect of signal leakage and glacial isostatic rebound on GRACE-derived ice mass changes in Iceland. *Geophys. J. Int.*, doi: doi.org/10.1093/gji/ggx008.
- 74 Mynd 5.16 er byggð á niðurstöðum greinar Sørensen ofl. (sjá heimild 73 hér að ofan) og korts af landrisi sem A. H. Jarosch lét nefndinni góðfúslega í té.

- 75 Mikilvægt er að á næstu árum verði líklegt massatap íslenskra jökla reiknað með jöklalíkani og fingrafarsáhrif þess reiknuð í sjávarstöðulíkani, t.d. SELEN, sjá Spada G, o.fl, 2013. The gravitationally consistent sea-level-fingerprint of future terrestrial ice loss. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 1-5. doi: 10.1209/2012GL053000.
- 76 Bouguer, Pierre, 1749. La figure de la terre, déterminée par les observations de Messieurs Bouguer & de la Condamine, de l' Académie Royale des Sciences, envoyes par ordre du Roy au Pérou, pour observer aux environs de l' Equateur : avec une relation abrégée de ce voyage, qui contient la description du pays dans lequel les opérations ont été faites. Sjá umfjöllun á bls 223 – 227 í Jeffries, H. 1976. *The Earth, Its Origin History and Physical Constitution*. 6th Ed. Cambridge University Press.
- 77 Í kjölfar landmælinga á Indlandi gerðu John H. Pratt og George. B. Airy sér grein fyrir því að til að vinna rétt úr niðurstöðum þyrfti að taka tillit til massa Himalayafjalla og þeirri aflögun jarðskorpunnar sem stafaði af fargi þeirra. Sjá t.d.: Gilluly, J. Waters. A.C & Woodford, A.O, 1968. *Principles of Geology* (3rd Ed) . W. H. Freeman & Co. 687 s.
- 78 Mynd 5.30 er byggð á niðurstöðum útreiknings með líkani sem tekur tillit til breytinga á þyngdarsviði. Sjá: Spada, G., Bamber, J.L. & Hurkmans, R.T.W.L., 2013. The gravitationally consistent sea level fingerprint of future terrestrial ice loss. *Geophysical Research Letters*, 40(3) 482-486.