



Afkomumælingar á Hofsjökli 1988–2017

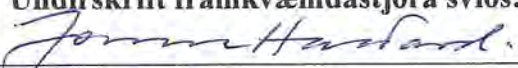

Þorsteinn Þorsteinsson
Tómas Jóhannesson
Oddur Sigurðsson
Bergur Einarsson

Forsíða: Hásteinarí Hofsjökli. Þjórsárjökull í baksýn. Myndin er tekin í vorferð á Hofsjökul 2011.
Ljósmynd: Þorsteinn Þorsteinsson.

Afkomumælingar á Hofsjökli 1988–2017

Þorsteinn Þorsteinsson
Tómas Jóhannesson
Oddur Sigurðsson
Bergur Einarsson

Lykilsíða

Skýrsla nr. VÍ 2017-016	Dags. Desember 2017	ISSN: 1670-8261	Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Afkomumælingar á Hofsjökli 1988–2017		Upplag: 15 Fjöldi síðna: 82 Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir	
Höfundar: Þorsteinn Þorsteinsson, Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson og Bergur Einarsson		Verkefnisstjóri: Þorsteinn Þorsteinsson Verknúmer: 4642-0-0001	
Gerð skýrslu/verkstig:		Málsnúmer: 2014-182	
Unnið fyrir: Landsvirkjun			
Samvinnuaðilar:			
Útdráttur: Í skýrslu þessari er gerð grein fyrir gagnasafni um afkomu Hofsjökuls og langtímabreytingar á rúmmáli jökulsins sem aflað hefur verið á Veðurstofu Íslands og Vatnamælingum Orkustofnunar 1988–2017. Afkoma jökulsins hefur verið mæld árlega í 26 punktum á þremur ísasviðum sem samtals spanna um 40% af flatarmáli jökulsins. Vetrarafkoma er mæld að vori með snjóborunum og vigtun kjarna en sumarafkoma er lesin af leysingarstikum við lok sumars. Ársafkoma Hofsjökuls hefur verið neikvæð 26 ár af þeim 30 sem mælingarnar spanna. Landlíkön byggð á loftmyndum, gervitunglamyndum og flugleysimælingum gefa kost á að meta rúmmálsbreytingar jökulsins yfir 2–13 ára löng tímabil frá 1986. Líkönin ná yfir allan jökulinn með allt að 2x2 m upplausn og veita því betri hugmynd um rúmmálsbreytingar en hefðbundnar afkomumælingar. Misræmi milli afkomu sem reiknuð er með landlíkönunum og niðurstaðna hefðbundinna afkomumælinga nemur 0.25–0.5 m _{vg} á ári á ísasviðum Sátu-, Þjórsár- og Blágnjúpjökuls. Samfelldar sniðmælingar á snjóþykkt með snjósjá hafa leitt í ljós að margir bor- og stikupunktur hafa frá upphafi verið í staðbundnum snjóþykktarhámörkum og hefur þetta leitt til ofmats á vetrarafkomu. Þá hefur ekki verið tekið tillit til bráðunar jökulíss af völdum hitaflæðis um jökulbotninn, leysingarvatns sem fellur um sprungur, svelgi og gangakerfi í jökli og við botn hans og varma sem losnar við flæði jökulíss. Skýrslan birtir nýjar tölur um afkomu ísasviðanna þriggja og jökulsins alls með leiðréttingu fyrir ofangreindri hliðrun í stikumælingunum. Á 30 ára tímabilinu 1988–2017 rýrnaði jökullinn 0.9 m _{vg} á ári að jafnaði, en um 1.2 m _{vg} á ári á tímabilinu 1995–2014 þegar afkoman var neikvæð 20 ár í röð.			
Lykilorð: Hofsjökull, afkoma, snjósjá		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs: 	
		Undirskrift verkefnisstjóra: 	
		Yfirfarið af: SG	

Efnisyfirlit

1 Inngangur	7
1.1 Upphaf afkomumælinga á íslenskum jöklum.....	7
1.2 Tildrög skýrslu	7
1.3 Þýðing afkomumælinganna	8
2 Hofsjökull	10
2.1 Yfirlit um afkomumælingar á Hofsjökli frá upphafi	10
2.2 Túlkun afkomumælinga og líkanreikningar.....	11
2.3 Aðrar mælingar og sérstök verkefni	11
3 Afkomumælingar og úrvinnsla þeirra	15
3.1 Skilgreiningar	15
3.2 Aðferðir við afkomumælingar.....	16
3.3 Reikniaðferðir	19
3.4 Óvissuþættir	22
3.5 Samræming úrvinnslu árið 2017	23
4 Landlíkön	25
5 Ísaskil og ísasvið	31
6 Hæðardreifing	32
7 Niðurstöður hefðbundinna afkomumælinga	35
7.1 Snjóþykkt á Sátujökli frá upphafi mælinga.....	35
7.2 Breytileiki eðlisþyngdar með hæð og með tíma	35
7.3 Athugun á mögulegu stikusigi í jökulís og hjarni.....	36
7.4 Afkoma á ísasviðum Sátu-, Þjósár- og Blágnípujökuls 1988–2017.....	41
8 Flatarmáls- og rúmmálsbreytingar	46
9 Snjósjármælingar	52
9.1 Snjósjáin og mælilínur	52
9.2 Niðurstöður	52
10 Samanburður hefðbundinna afkomumælinga og rúmmálsbreytinga jökulsins	58
11 Landlíkanleiðrétt afkoma, túlkun og umræður	61
12 Niðurstaða	66
13 Þakkir	67
14 Heimildir	68
Viðaukar	
I Tölur og myndir	75

1 Inngangur

1.1 Upphaf afkomumælinga á íslenskum jöklum

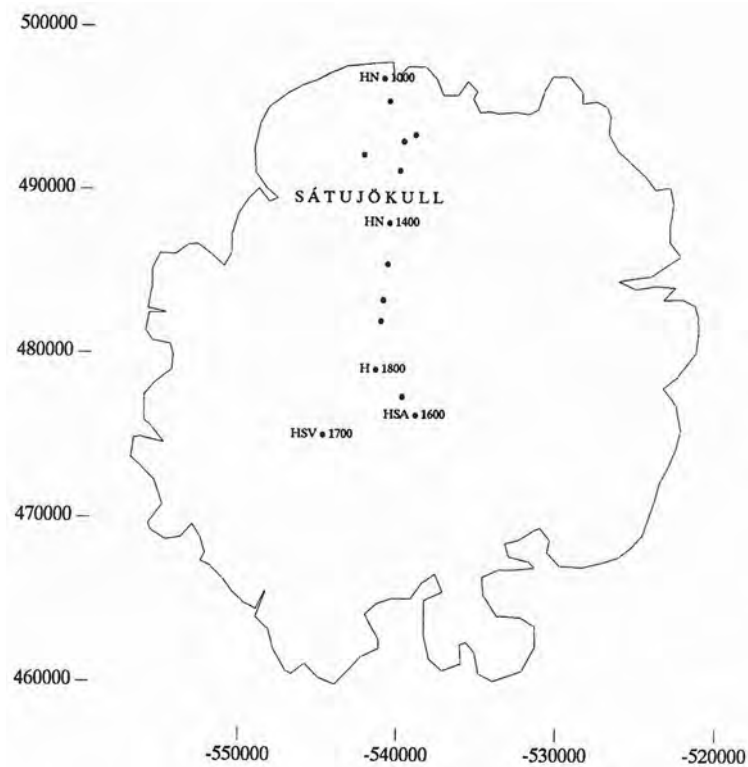
Afkomumælingar á jöklum hérlendis hófust með rannsóknum sænsk-íslensku Vatnajökulsleiðangrana 1936–1938 (Ahlmann, Hans W:son, & Sigurður Þórarinsson, 1937–1943). Voru þeir leiðangrar einn þáttur í brautryðjandastarfi Hans Ahlmanns við þróun aðferða til mælinga á jökulafkomu á Norður-Atlantshafssvæðinu (Ahlmann, 1940). Ungir íslenskir vísindamenn, þeir Jón Eyþórsson og Sigurður Þórarinsson, áttu veigamikinn þátt í vísindalegum árangri sænsk-íslensku leiðangrana og eftir 1950 hófu þeir ásamt fleirum reglubundnar mælingar á vetrarafkomu í Grímsvötnum (Sigurður Þórarinsson, 1953). Sigurjón Rist (1952) mældi vetrarafkomu á Vatnajökli í fransk-íslenska leiðangrinum 1951 og einnig voru snjóalög mæld á Mýrdalsjökli sumarið 1955 (Sigurjón Rist, 1956). Breskir stúdentalleiðangrar stóðu fyrir stöku mælingum á jökulafkomu hérlendis eftir 1950 (sjá t.d. Ives & King, 1955) og Helgi Björnsson (1971, 1972) mældi afkomu Bægisárjökuls á tímabilinu 1966–1968.

Árið 1988 hófust á Hofsjökli fyrstu skipulegu afkomumælingar hérlendis, sem byggjast á reglubundnum mælingum á vetrarafkomu og sumarleysingu í föstum punktum um margra ára skeið og ná yfir heil ísasvið (Oddur Sigurðsson, 1989). Afkomumælingar á Þrándarjökli og Eyjabakkajökli hófust á vegum Orkustofnunar árið 1991 (Oddur Sigurðsson & Ólafur Jens Sigurðsson, 1998) og á vegum Raunvísindastofnunar Háskólans og Landsvirkjunar á Vatnajökli árið 1992 og Langjökli árið 1997 (Helgi Björnsson o.fl., 1998, 2002, 2013). Óreglulegar afkomumælingar á vegum Jöklarannsóknafélags Íslands hafa verið stundaðar á Mýrdalsjökli síðan 2001 (Hálfván Ágústsson o.fl., 2013).

Fyrsta ár mælinganna á Hofsjökli náðust eingöngu mælingar á norðanverðum jöklinum, nánar tiltekið á ísasviði Sátujökuls, sem nær yfir tæpan tíunda hluta af heildarflatarmáli Hofsjökuls. Var notast við lórantæki til staðsetningar en GPS-tæki tóku við nokkrum árum síðar. Mynd 1 sýnir stanganetið á fyrsta ári mælinganna úr fyrstu skýrslu um þær (Oddur Sigurðsson, 1989). Á næstu árum var svo bætt við mælipunktum á Þjórsárjökli og Blágnípujökli og frá árinu 1992 hefur verið mælt í þeim 26 punktum, sem enn eru í notkun á ári hverju og sýndir eru á mynd 2 í kafla 2 (Oddur Sigurðsson, 1989, 1991, 1993; Oddur Sigurðsson o.fl., 1998, 2004; Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2005, 2006, 2008, 2009, 2010, 2014). Öðru hverju hefur verið mælt á öðrum svæðum jökulsins. Við mælingar og útreikninga á jökulafkomunni hefur verið notast við alþjóðlega staðlaðar aðferðir, sem lýst er í leiðbeiningabók Østrem og Brugman (1991). Vísað er til nánari lýsingar í kafla 3.

1.2 Tildrög skýrslu

Í skýrslu þessari er afkomumælingunum og aðferðum við þær lýst og settar fram aðalniðurstöður frá ísasviðunum þrem. Gerð er grein fyrir helstu óvissuþáttum og takmörkunum mælinganna. Sagt er frá breytingum á flatarmáli Hofsjökuls frá lokum litlu ísaldar og fram til ársins 2015. Þá er lýst gerð hæðarlíkana af jöklinum og rúmmálsbreytingum sem reikna má út frá þeim. Þær niðurstöður eru notaðar til að meta hliðrun, sem vart hefur orðið við í niðurstöðum stikumælinganna. Niðurstöður snjóþykktarmælinga með snjósjá eru síðan notaðar til að leiða rök að orsökum hliðrunarinnar, auk þess sem aðrir þættir eru teknir til skoðunar í því sambandi. Afkoma hvers árs frá upphafi mælinga er reiknuð að nýju með samræmdri aðferð og uppfærðum hæðardreif-



Mynd 1. Stikur til afkomumælinga á Sátujökli á fyrsta ári mælinganna 1988.

ingum, sem reiknaðar hafa verið fyrir út frá hinum nýju hæðarlíkönunum. Í lokin er rúmmálsrýrnun Hofsjökuls frá upphafi mælinga metin og rædd í samhengi við veðurfar á tímabilinu.

1.3 Þýðing afkomumælinganna

Árið 2017 voru 30 ár liðin frá upphafi afkomumælinganna á Hofsjökli og veita þau tímamót tækifæri til að líta um öxl og meta árangur þessa verkefnis. Afkoma allra meginjökla landsins er nú mæld á vegum Veðurstofu Íslands, Jarðvísindastofnunar Háskólans og Jöklarannsóknafélags Íslands og áhugi vísindamanna og almennings á niðurstöðunum er mikill, enda eru þær eitt skýrasta dæmið um áhrif hlýnandi loftslags hér á landi og almennt á norðurslóðum. Þá er þýðing afkomumælinga á jöklum landsins ótvíræð fyrir hagnýtingu vatnsorku, því jöklarnir eru langstærstu vatnsgeymar landsins og árferði hefur mikil áhrif á afrennsli til uppistöðulóna.

Við upphaf mælinganna fyrir 30 árum voru reglubundnar afkomumælingar sem náðu yfir a.m.k. 20 ára tímabil stundaðar á um 40 jöklum á jörðinni (Dyurgerov & Meier, 1997). Á heimasíðu Alþjóðlegu jöklavaktarinnar, WGMS (World Glacier Monitoring Service, www.wgms.ch), er nú (2017) getið um að skilað hafi verið inn gögnum um afkomu 130 jökla á jökulárinu 2014/15 og þar af nái 40 mæliraðir meira en 30 ár aftur í tímann. Flestir eru hinir mældu jöklar á norðurhveli og mestum gögnum um jöklabreytingar hefur verið safnað í Alpafjöllunum, á Norður-Atlantshafssvæðinu og á jöklum nærri Kyrrahafsströnd Alaska og Kanada.

Gögnum um afkomu Hofsjökuls og um framgang eða hop jökulsporða hefur verið skilað til WGMS á hverju ári. Þá er Hofsjökull og umhverfi hans nú eitt vöktunarsvæða nýs samvinnu-

verkefnið um vöktun á snjó og ís á jörðinni: Global Cryosphere Watch (GCW), sem stofnsett var af Alþjóðasambandi veðurfræðinga (WMO) árið 2011.

Vöktun meginjökla miðhálandisins er framlag Íslendinga til mats á þætti jöklaleysingar til hækkandi sjávarborðs heimshafanna (Helgi Björnsson o.fl., 2013), auk vöktunar á mikilvægum þætti í náttúrufari landsins, sem nú breytist ört í hlýnandi veðurfari. Með nýrri tækni þróast nýjar mæliaðferðir og nú er svo komið að unnt er að meta rýrnun jöklanna með endurteknum mælingum úr flugvélum og gervitunglum (Tómas Jóhannesson o.fl., 2013). Þær mælingar hafa þó ekki enn komið í stað mælinga á jörðu niðri, auk þess sem reglubundnar ferðir að jöklunum og um yfirborð þeirra gefa kost á að fylgjast náið með árlegum breytingum sem þar verða.

2 Hofsjökull

Hofsjökull er þriðji stærsti jökull landsins og flatarmál hans er nú rúmlega 820 km². Jökullinn er nær hringlaga og mesta þvermál hans er 35 km. Neðst nær jökullinn í 620 m hæð en hæst í 1790 m og er hann fimmta hæsta fjall landsins. Skriðjökla ganga frá hábungunni til allra átta og er Þjórsárjökull þeirra stærstur. Hofsjökull er samfelldur hveljökull og aðgreining er því óvída skýr milli einstakra skriðjökla. Múlajökull er þekktastur skriðjökla og er hann oft sýndur sem skýrt dæmi um svonefnda rótarjökla (e: piedmont glaciers).

Sporðamælingar við sunnanverðan Hofsjökul hófust árið 1932 (sjá www.jorfi.is/spordakost) og þykkt jökulsins var mæld með íssjá árið 1983 (Helgi Björnsson, 1988, 2009). Íssjarmælingarnar staðfestu það sem gervihnattamyndir höfðu áður sýnt að jökullinn hvílir á mikilli gosöskju sem er ein stærsta eldstöð á Íslandi að rúmmáli. Hæsti kollur jökulsins er yfir austurbarmi öskjunnar, sem er um 40 km² að flatarmáli. Vitað er um hraun runnin á nútíma (þ.e. eftir ísöld), sem upptök hafa átt á því svæði sem nú er undir jökli og talið er að jökullinn hafi tekið að myndast á fremur köldu skeiði, sem hófst fyrir um 2500 árum (Helgi Björnsson, 2009).

Frá jöklinum rennur leysingarvatn til nokkurra helstu jökulfljóta landsins: Þjórsár, Hvítár eystri (um Jökulfall), Blöndu og Jökulsánnu í Skagafirði. Vatnasviðin á jökli (Helgi Björnsson, 1988) eru sýnd á mynd 2.

2.1 Yfirlit um afkomumælingar á Hofsjökli frá upphafi

Eins og nefnt var í inngangi hófust afkomumælingar á Hofsjökli á vegum Vatnamælinga Orkustofnunar árið 1988 og færðust þær til Veðurstofu Íslands við sameiningu þessara tveggja stofnana árið 2009. Aðferðir byggðust einkum á reynslu Norðmanna (Østrem & Stanley, 1969; Østrem & Brugman, 1991) og hafa samstarfstengsl við norsku orku- og vatnafræðistofnunina (NVE) haldist frá upphafi mælinganna. Byrjað var á norðanverðum jöklinum enda er aðkoma þar auðveldust jeppum og vélsleðum. Oftast hafa leiðangursmenn hafst við í Ingólfsskála í Lambahrauni, sem er aðeins 4 km frá jökli. Frá upphafi hafa þrír menn farið á sleðum til mælinganna vor og haust. Stundum hefur verið unnið að viðbótarverkefnum á jöklinum og hafa þá fleiri tekið þátt. Samtals hafa um 40 manns tekið þátt í alls um 75 leiðöngrum á jökulinn frá upphafi þessara mælinga.

Vorið 1988 var vetrarákoma mæld með snjóborunum og gryfjugreftri á Sátujökli á hæðarbilinu 850–1790 m. Leysing á vatnasviði Vestari-Jökulsár var mæld fyrsta sumarið og hefur frá upphafi verið notast við 6 m langar álstikur. Frá 1989 var mælt á Sátujökli, Þjórsárjökli og Blágnípujökli og ná þessi þrjú ísasvið samtals yfir um 40% af flatarmáli Hofsjökuls. Aðrir hlutar jökulsins eru viðsjárverðir yfirferðar vegna sprungna og hefur t.d. ekki reynst unnt að setja upp stikunet á þeim hlutum jökulsins, sem tilheyra vatnasviðum Blöndu og Austari Jökulsár. Frá 1992 var mælt í þeim 26 punktum, sem enn er vitjað um árlega, sjá töflu 1 með yfirliti yfir stikur sem notaðar hafa verið og yfirlitskort á mynd 2. Óreglulegar mælingar hafa verið gerðar víðar um jökulinn, m.a. á Illviðrajökli, Miklafelli og Blautukvíslarjökli og í nokkrum punktum á Sátujökli.

Fram til 1995 voru fjórar ferðir farnar á jökulinn árlega: Vorferð í apríl–maí, sumarferð seint í júlí, haustferð í september og vetrarferð í febrúar. Voru stikur þá framlengdar í hverri ferð og miðað við að toppur þeirra væri ofan yfirborðs snævar í næstu mæliferð. Slíkt sparaði vinnu við boranir. Frá 1996 hafa verið farnar tvær ferðir árlega, vorferð til mælinga á vetrarákomu og

haustferð til mælinga á sumarleysingu. Jökuljaðarinn hefur víða hopað meir en 1 km frá upphafi afkomumælinganna 1988, eins og nánar er lýst í kafla 8, og sumir þeirra punkta sem þá voru næst jökulrönd eru nú aflagðir.

2.2 Túlkun afkomumælinga og líkanreikningar

Afkomumælingarnar frá Hofsjökli ásamt afkomumælingum frá öðrum jöklum landsins hafa verið notaðar við ýmis konar líkanreikninga og rannsóknir á áhrifum loftslagsbreytinga á jökla og vatnafar (sjá m.a. Tómas Jóhannesson o.fl., 1995, 1997, 2006; Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2006; Guðfinna Aðalgeirsdóttir o.fl., 2006; Sverrir Guðmundsson o.fl., 2009; Bergur Einarsson & Sveinbjörn Jónsson, 2010). Yfirlitsgreinar og skýrslur um áhrif loftslagsbreytinga á jökla, þar sem afkomumælingarnar á Hofsjökli koma við sögu, hafa komið út í tengslum við mörg norræn og íslensk samstarfsverkefni (CCEP, CWE/VVO, CE/VO og CES/LOKS) (Tómas Jóhannesson, 1991; Sælthun o.fl., 1998; Tómas Jóhannesson o.fl., 2004a,b; Fenger, 2007; Bergström o.fl., 2007; Tómas Jóhannesson o.fl., 2007; Þorsteinn Þorsteinsson & Halldór Björnsson, 2011; Tómas Jóhannesson o.fl., 2011). Þessar rannsóknir hafa leitt í ljós að jöklar landsins hverfa væntanlega að mestu á næstu 150–200 árum. Það mun hafa mikil áhrif á vatnafar með ýmsum afleiðingum sem taka þarf tillit til við hönnun og rekstur margs konar mannvirkja, meðal annars vatnsaflsvirkjana.

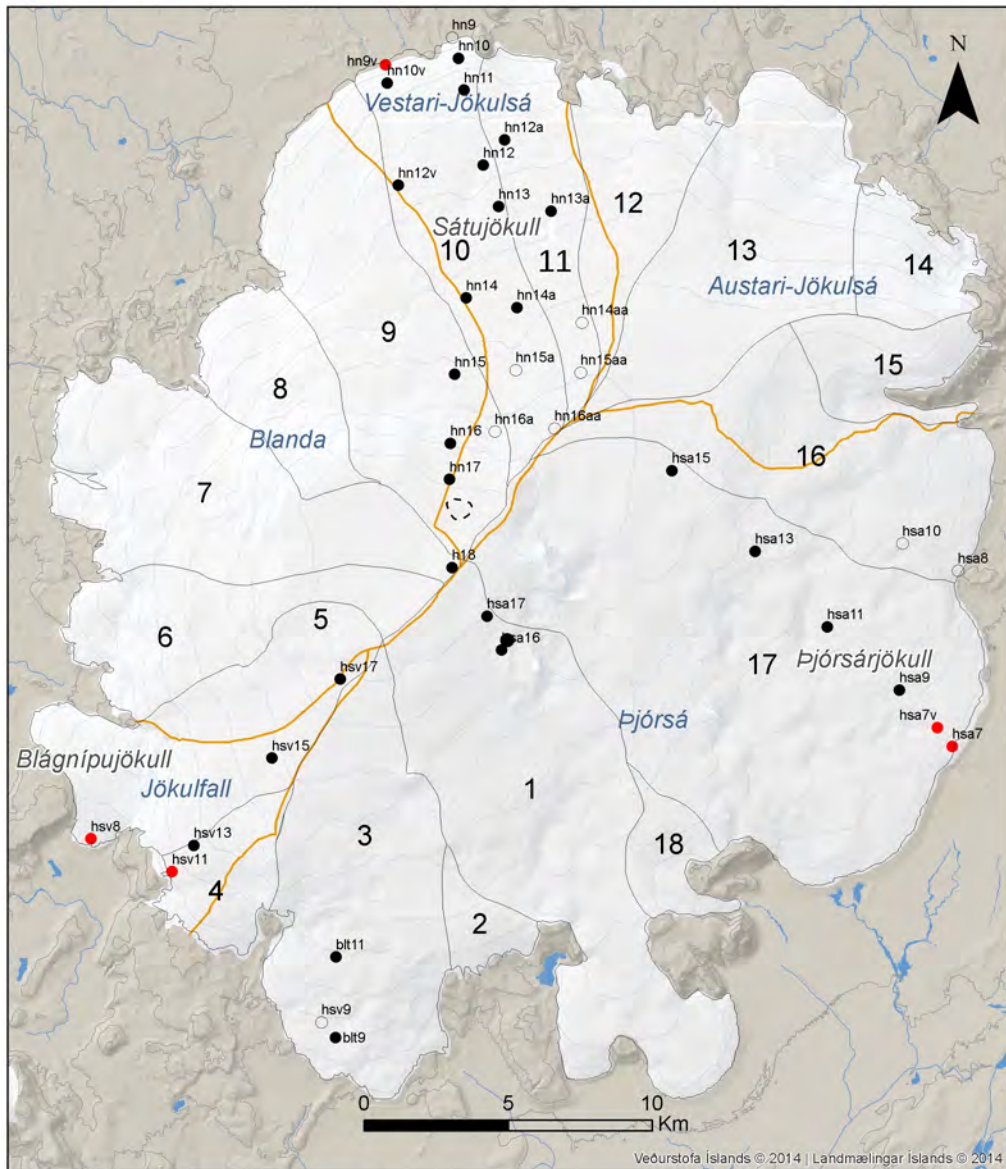
2.3 Aðrar mælingar og sérstök verkefni

Þreifingar. Á fyrri árum afkomumælinganna var snjóþykkt oft mæld með þreifingum á stórum hluta leysingarsvæðanna. Er raunhæft að mæla allt að 3 m þykkun snjó með þessum hætti. Þegar komið var fram á fyrsta áratug 21. aldar fór að bera meira á allþykkum íslinum í neðri hluta vetrarlagsins, mynduðum við haustblota. Linsurnar reyndust oft þykkari en svo að unnt væri að höggva þreifingastöng í gegnum þær og kom því fram óvissa í þykktarmælingunum. Hefur því verið dregið úr umfangi þreifinga miðað við það sem áður var, þótt enn sé þeim talsvert beitt, t.d. til samanburðar við niðurstöður snjósjármælinga (sjá kafla 9).

TEM-viðnámsmælingar. Í haustferð 1994 var TEM (Transient Electro Magnetic) viðnámsmæling reynd á Hofsjökli. Megintilgangurinn var að kanna viðnám jarðlaga undir jöklinum og leita þar með vísbendinga um jarðhita. Niðurstöður sýndu fremur lágt viðnám sem benti til ummyndaðs móbergs undir jöklinum, en ekki komu fram skýr merki jarðhita (Knútur Árnason, 1995). Þess skal getið að í mæliferðum hefur orðið vart við lítinn jarðhitaketil neðarlega á Blágnjúkjökli (skömmu eftir aldamótin 2000) auk þess sem lítill sigketill myndaðist innan norðanverðrar Hofsjökulsöskjunnar síðla sumars 2013 (sjá mynd 2).

Snjóhitamælingar. Í vorferðum hefur snjóhiti verið mældur nokkuð reglulega í vetrarlaginu með broddhitamæli. Mælt hefur verið á 10–20 cm fresti á snjókjörnum og kemur kuldaþylgja vetrarins vel fram í gögnunum. Á Veðurstofu Íslands er áætlað að nota gögn sem Harmonie-veðurlíkanið reiknar við yfirborð Hofsjökuls sem inntak í Crocus snjólíkan, sem reiknar þróun eðlisþyngdar, snjóhita og lagskiptingar í vetrarlaginu. Hin mældu hitagögn munu nýtast til að stilla snjólíkanið.

Rykmælingar á snjókjörnum. Ryklag af hálendinu er oft sýnilegt í hausthvörfum hvers árs,



Mynd 2. Stikur til afkomumælinga (sjá töflu 1), ísasvið og vatnasvið á Hofsjökli. Afkomumælingar á Sátujökli sýna afkomu ísasviða 10 og 11, þ.e. Eystri-Sátujökuls og Tvífellsjökuls samanlagt, mælingar á Blágnípujökli sýna afkomu ísasviðs 5 og á Þjórsárjökli afkomu ísasviða 16 og 17, þ.e. Háöldujökuls og Þjórsárjökuls samanlagt, sbr. töflu 5 í viðauka I þar sem fram koma nöfn ísasviða.

eins og getið var um í kafla 3. Í sérstöku verkefni samhliða vorferð á Hofsjökul 2003 voru boraðir 26 snjókjarnar á um 40 km² svæði yfir Hofsjökulsöskjunni (Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2003) og rykinnihald þeirra allra mælt með þar til gerðu tæki (MoniLog L, framleitt 2003 af Metrisa GmbH í Düsseldorf). Niðurstöður gáfu til kynna gott samræmi milli ákvörðunar haustvarfa með skoðun kjarnanna og legu ryktoppa sem mældust með tækinu. Bakgrunnsstyrkur ryks í snjókjörnum í 1600–1800 m hæð mældist 5 ppmv (rúm-málshlutfall) en algengur styrkur í ryktoppunum var 10–20 ppmv.

Ískjarni frá hábungunni. Árið 2001 var ískjarnabor fenginn að láni frá Alfred Wegener Institut (AWI) í Bremerhaven og notaður til að bora 100 m ískjarna á hábungu Hofsjökuls. Kjarninn var sagaður í sýni við AWI og m.a. rykgreindur með sama tæki og nefnt er hér á undan. Tókst að greina í honum 33 árlög auk þess sem Hekluöggin 1991 og 1980 fundust í kjarnanum (Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2002). Niðurstöðum um afkomu einstakra ára bar vel saman við hinar árlegu afkomumælingar aftur til 1988 (Oddur Sigurðsson o.fl., 2002).

Tilraun með ísbræðslubúnað. Vísindamenn frá Tækniháskólanum í Aachen og háskólum í Tennessee og Kaliforníu (UCSC) tóku þátt í haustferð á Hofsjökul 2012 og prófuðu þá búnað, sem bræðir sig niður í jökulís, mælir efnainnihald og flytur sýni til yfirborðs. Verkefnið var hluti undirbúnings fyrir prófun þessa búnaðar á Suðurskautslandinu.

Snjósjármælingar. Tilraun var gerð með snjósjá (GPR-radar) í haustferð á Hofsjökul 2003, í samvinnu við Arctic Centre í Rovaniemi, Finnlandi. Með snjósjánni greindust hausthvörf fyrra árs auk þess sem snjósjáin nam endurkast frá vatnsborði á 20–40 m dýpi. Orkurannsóknasjóður Landsvirkjunar veitti styrki til sniðmælinga á snjóþykkt í vorferðum á Hofsjökul 2015 og 2016 (Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2016a,b). Niðurstöðurnar hafa stóruaukið þekkingu á dreifingu vetrarafkomu á jöklinum og verður nánar fjallað um þær síðar í þessari skýrslu.

Greining á úrkomudreifingu. Afkomumælingar á Hofsjökli voru notaðar við kvörðun úrkomulíkana af landinu með svokölluðu LT-úrkomulíkani (Crochet o.fl., 2007) og MM5-veðurlíkani (Ólafur Rögnvaldsson o.fl., 2004, 2007). Þessi líkön reyndust vel við jökullíkanreikninga fyrir Hofsjökul og aðra jökla landsins í rannsóknum á áhrifum loftslagsbreytinga á jökla og vatnafar eins og lýst var hér að framan.

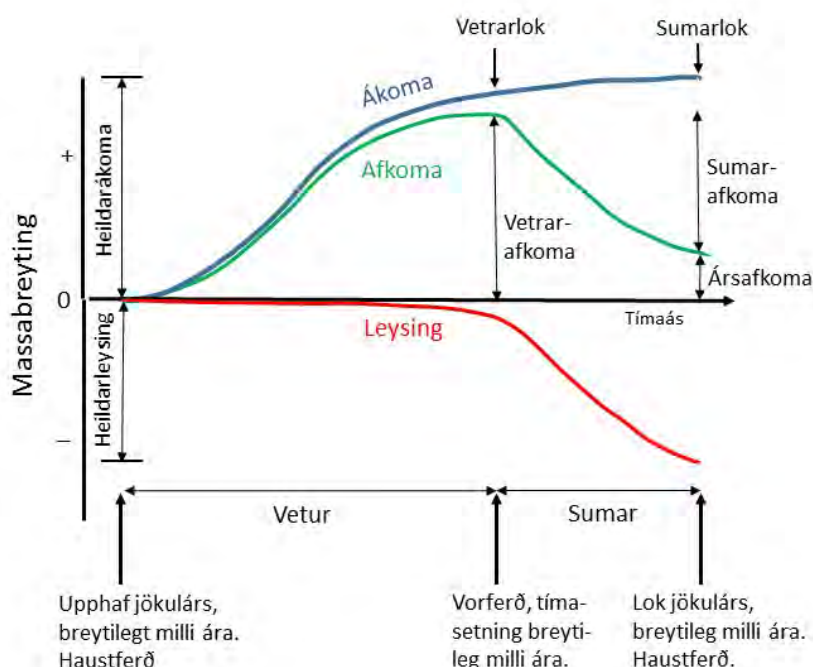
Tafla 1. Afkomumælistikur á Hofsjökli, 1988–2017. Aflagðar stikur og stikur, sem aðeins voru notaðar um nokkurra ára skeið, og ekki eru meðal þeirra 26 sem nú eru mældar árlega, eru merktar með „–“ í sviga aftan við nafnið. Stika hsa7v var mæld í síðasta sinn 2017 vegna þess að jökuljadarinn hefur nú hörfað inn fyrir hana. Stikurnar blt9 og blt11 á Blautkvíslarjökli voru mældar í fyrsta sinn 2017 og tóku við af neðstu stikunum hsv8 og hsv11 á Blágnjúpjökli sem hafa breyst í snjóakistu og erfitt hefur verið að komast í síðustu ár og eru nú aflagðar. Ekki er getið um nokkrar stikur sem aðeins var vitjað einu sinni og athugasemdir um mælingar sem fallið hafa niður eru ekki tæmandi.

Stika	Frá	Til	x	y	Hæð ₁₉₈₈	Hæð ₂₀₁₇	Athugasemd
Sátujökull og hájökullinn							
hn9 (–)	1989	1990	506209	497100	898	866	
hn9v (–)	1991	2008	503886	496162	935	857	
hn10v	2009	2017	503944	495536	987	914	
hn10	1988	2017	506429	496391	1007	939	
hn11	1988	2017	506612	495289	1081	1035	
hn12v	1988	2017	504342	491983	1173	1146	
hn12	1988	2017	507278	492681	1186	1155	
hn12a	1988	2017	508019	493558	1172	1137	
hn13	1988	2017	507822	491243	1264	1236	
hn13a	1991	2017	509644	491091	1290	1262	
hn14	1988	2017	506691	488070	1353	1337	
hn14a	1991	2017	508454	487742	1382	1363	
hn14aa (–)	1995	2003	510713	487200	1451	1434	
hn15	1988	2017	506293	485418	1443	1429	
hn15a (–)	1995	2004	508411	485561	1456	1444	
hn15aa (–)	1996	2001	510670	485474	1504	1490	
hn16	1988	2017	506144	483023	1598	1591	
hn16a (–)	1996	2001	507689	483417	1528	1519	
hn16aa (–)	1996	1996	509752	483528	1549	1537	
hn17	1988	2017	506112	481773	1694	1687	
h18	1988	2017	506208	478717	1792	1786	sumarafk. metin 2014 og 2015
Þjósárjökull							
hsa7 (–)	1992	2008	523565	472505	745	662	
hsa7v (–)	2009	2017	523058	473158	776	676	aflögð 2017
hsa8 (–)	1995	2000	523757	478589	848	764	
hsa9	1989	2017	521738	474456	884	836	
hsa10 (–)	1995	2000	521834	479535	1023	987	
hsa11	1989	2017	519222	476657	1047	1030	
hsa13	1989	2017	516723	479274	1249	1231	
hsa15	1989	2017	513834	482080	1456	1447	sumarafk. metin 2012
hsa16	1989	2017	507919	475845	1613	1607	
hsa17	1989	2017	507421	477028	1702	1692	sumarafk. metin 2012 og 2015
Blágnjúpjökull							
blt9	2017	2017	502152	462399	893	823	
blt11	2017	2017	502170	465188	1095	1074	
hsv8 (–)	1999	2007	493672	469295	842	727	afkoma metin 2008–2016
hsv9 (–)	1990	1997	501669	462911	918	858	
hsv11 (–)	1990	2016	496476	468152	1162	1121	afkoma metin 2011
hsv13	1989	2017	497242	469064	1281	1261	afkoma metin 2011
hsv15	1989	2017	499955	472097	1479	1465	
hsv17	1989	2017	502314	474839	1674	1665	

3 Afkomumælingar og úrvinnsla þeirra

3.1 Skilgreiningar

Með afkomu jökuls er átt við hvort massi hefur bætst á jökulinn (jákvæð afkoma) eða tapast af honum (neikvæð afkoma) á tilteknu tímabili. Sé mælt árlega er jafnan miðað við að jökulárið hefjist að hausti, þegar snjóa tekur á jökul. Við afkomumælingar hérlandis er í reikningum venjulega miðað við dagsetningu haustferðar og vetrarafkoma reiknuð frá þeim tíma og fram til vorferðar að vetri loknum. Sumarafkoma er svo mæld og reiknuð fyrir tímabilið milli vor- og haustferðar og hefst nýtt jökulár við lok þess tímabils. Ársafkoma fæst með því að leggja saman vetrarafkomu og sumarafkomu. Mynd 3 skýrir þessi hugtök nánar.



Mynd 3. Myndin sýnir samspil ákomu og leysingar yfir eitt jökulár, sem er breytilegt að lengd skv. reikningsaðferð þeirri, sem notuð er við úrvinnslu afkomugagna frá Hofsjökli (e: floating date system, sjá undirkafla 3.3). Ákoma er mest um veturinn og bætist þá verulegur massi á jökulinn, því leysing er lítil sem engin á því tímabili. Vetrarafkoma jökuls er því nánast ávallt jákvæð. Ákoma getur orðið að sumarlagi (einkum ofarlega á jökli), en þá nær leysing yfirhöndinni og massi tapast af jöklinum. Það ræðst svo af árferði hvort ársafkoman verður jákvæð eða neikvæð. Hér er sýnt dæmi um jökulár með jákvæðri ársafkomu. Myndin er teiknuð eftir sambærilegum myndum í Østrem og Brugman (1991) og Cuffey og Paterson (2010).

Orðin *ákoma* og *ákomutímabil* eru oft notuð í daglegu tali, en þau vísa þó eingöngu til þess að snjócoma bætir massa á jökulinn og eru ekki nákvæm hugtök. Orðið *vetrarafkoma* felur hins vegar í sér uppsafnaða summu þess sem bætst hefur á og tapast á tilteknu tímabili yfir veturinn og tekur t.d. tillit til þess að nýsnævi sem fallið hefur eftir haustferð getur leyst og runnið burt í skammvinnnum hlýindakafli að hausti. Svipað má segja um hugtökin *leysing* og *leysingartímabil*; með notkun þeirra er fyrst og fremst vísað til sumarsins þegar leysing er ríkjandi. Þó getur snjóað á jökul á þeim tíma (einkum ofan jafnvægislínu) og er hugtakið *sumarafkoma* því nákvæmara því það tekur til þeirrar nettóbreytingar, sem verður um sumarið.

Tiltekinn jökull (eða ísasvið) skiptist í *ákomusvæði* og *leysingarsvæði*, sem aðgreinast af *jafnvægislínu*. Á ákomusvæði bætist að jafnaði meira á jökulinn að vetri en leysir að sumri en á leysingarsvæði er þessu öfugt farið, þar tapast massi árlega. Hæð jafnvægislínu getur þó sveiflast 3–400 m eftir árferði.

Vetrar- og sumarafkoma er reiknuð fyrir hvern mælipunkt á jökli og þar sem punktarnir liggja mjög mishátt á jöklinum (á hæðarbilinu 680–1790 m á Hofsjökli) eru afkomutölur mjög breytilegar eftir hæð á tiltekinni mælinu. Á Hofsjökli eykst t.d. snjóþykkt að jafnaði um 20% við 100 m hækkun. Að sumarlagi leysir snjóa fyrst af jökulís neðarlega á leysingarsvæðinu og *snælína* færast uppávið um sumarið og fellur saman við *jafnvægislínu* við lok sumars. Ef snælína færast ofar en sumarið á undan kemur eldra *hjarn* fram undan snjó frá liðnum vetri og eru þá *hjarnmörk* á milli jökulíss og hjarns.

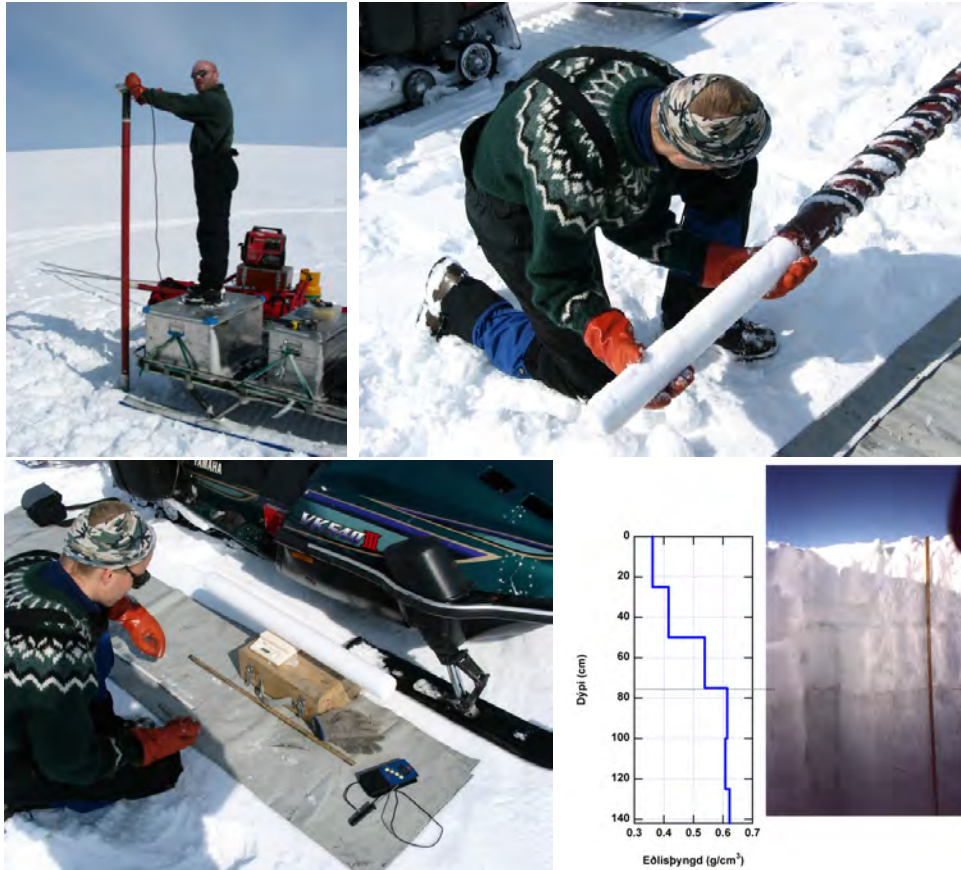
3.2 Aðferðir við afkomumælingar

Vetrarafkoma. Í hefðbundnum mælingum á afkomu jökla er notast við sk. *jöklafræðilega aðferð* (e. glaciological method). Við lok vetrar er snjóþykkt mæld með borunum og massi hvers kjarnabúts mældur ásamt lengd hans og þvermáli, sjá mynd 4. Þá má reikna eðlisþyngd og vatnsgildi hvers búts og jafnframt heildarvatnsgildi vetrarlagsins og meðaleðlisþyngd á hverjum mælistað. Enginn vafi er á greiningu snjóþykktar á leysingarsvæði jökulsins, því þar er komið niður á jökulís undir vetrarlaginu. Jökulyfirborðið getur þó verið nokkuð ójafnt og smásprungið og er því æskilegt að meta meðalsnjóþykkt á nokkru stærra svæði kringum borpunktinn. Slíkt má gera með sk. *þreifingum*; þ.e. með því að stinga snjóflóðastöng niður gegnum vetrarlagið á 10–20 stöðum kringum borpunktinn.

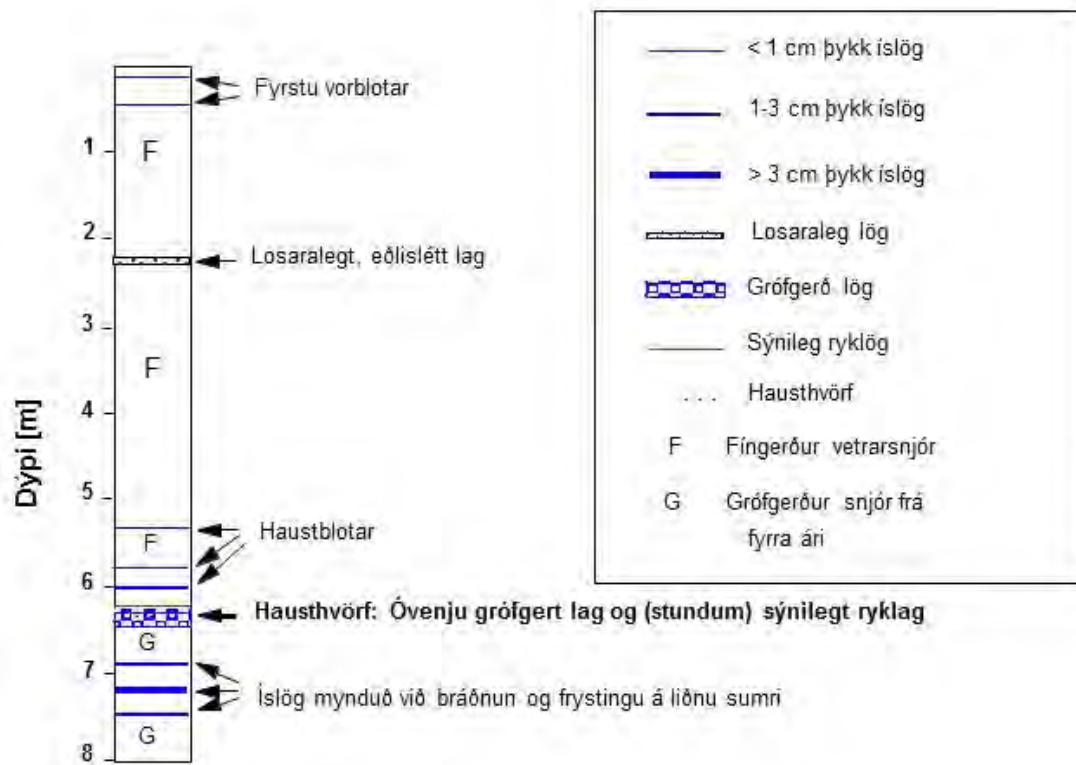
Á ákomusvæðinu er eldra hjarn undir hinu nýja vetrarlagi og þarf þá að greina skilin þar á milli, svokölluð *hausthvörf*, með nákvæmri skoðun snjókjarnanna. Hið nýja vetrarlag er yfirleitt fínkorna og greinist því oft auðveldlega frá hinu eldra, grófkorna hjarni. Oft er 2–5 cm þykkt íslag á skilunum og einnig má stundum greina ryk, sem vindar hafa feykt af eyðisöndum hálendisins upp á hæstu kolla jöklanna á liðnu sumri. Stundum eru hausthvörf ekki auðgreinanleg og getur óvissa í ákvörðun á þykkt vetrarlags þá numið allt að 10%.

Til viðbótar við greiningu hausthvarfa og mælingu eðlisþyngdar hefur lagskipting í snjókjörnum verið skráð, sbr. mynd 5, og snjóhiti mældur með stunguhitamæli, sjá myndir 6 og 7.

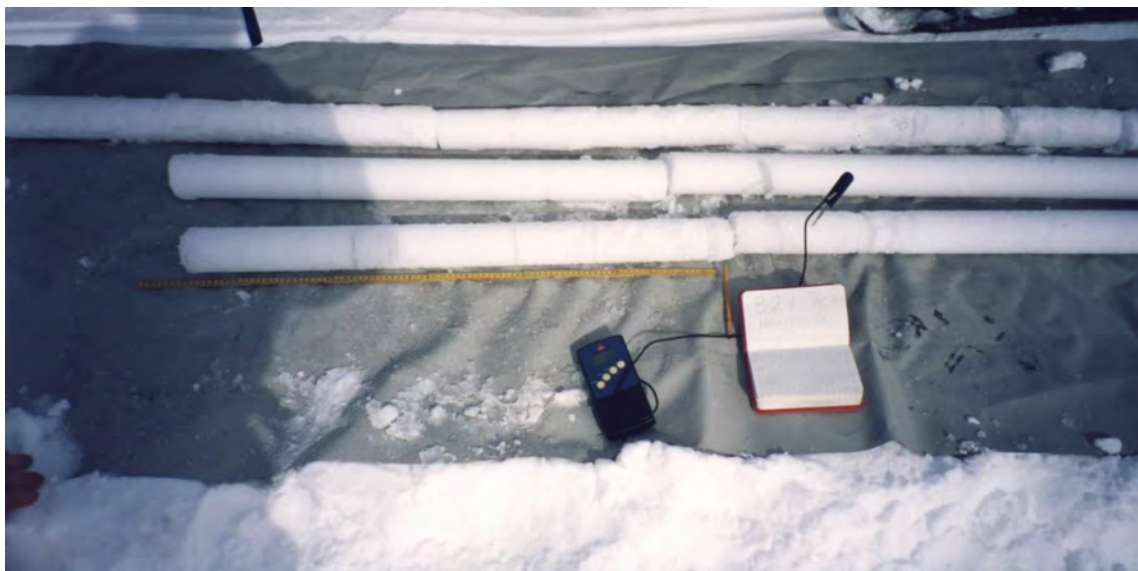
Í vorferðum á tímabilinu 1988–2003 voru grafnar allt að 2 m djúpar gryfjur á 5 stöðum á Hofsjökli til nákvæmra mælinga á eðlisþyngd. Grafið var í 1000 m og 1400 m hæð á Sátujökli, í 1000 m hæð á Þjórsárjökli og 1300 m hæð á Blágnípujökli og svo á hábungu jökulsins í 1790 m hæð. Meðaleðlisþyngd í gryfjunum var notuð til að áætla meðaleðlisþyngd alls vetrarlagsins,



Mynd 4. Efst t.v.: Borun snjókjarna. Lítil rafstöð knýr snittvél, sem fest er ofan á efstu borstöng. Þetta knýr snúning kjarnarörs í borholunni. Tveir skurðhnífar eru neðst á kjarnarörinu og spænir færast upp eftir snigli utan á rörinu og safnast fyrir ofan á kjarnanum. Efst t.h.: Kjarni tekinn úr rörinu. Mest er hægt að bora um 1.3 m í hverri færú. Við bestu aðstæður má bora 8–10 m á 1 klst. Neðst t.v.: Kjarni vigtaður. Neðst t.h.: Myndin er tekin í snjógrýfju á hábungu Hofsjökuls nálægt septemberlokum. Greinileg eru skilin milli nýsnævis, sem fallið hefur í september og hins eldri snævar frá fyrra vetri, sem hefur umbreytst og þjappast um sumarið, auk þess sem ryk hefur sest í hann. Línuritið í miðju sýnir eðlisþyngd í gryfjunni, sem náð hefur um 0.6 g/cm³ neðan hinna nýju hausthvarfa.



Mynd 5. Dæmigerð lagskipting í snjókjarna, sem boraður er ofarlega á ákomusvæði Hofsjökuls við lok vetrar.



Mynd 6. Snjókjarnar mældir með stunguhitamæli. Sjá 1m tommustokk við hlið eins kjarnans.

auk þess sem stöku kjarnar voru mældir niður að hausthvörfum. Frá 2004 hefur eðlisþyngd vetrarlagsins verið mæld á öllum snjókjörnum í hverri vorferð. Efsti hluti snjólagsins er oft laus í sér og lítt þjappaður og er því oftast erfitt að mæla eðlisþyngd á kjarnabútum úr þessum hluta vetrarlagsins. Þessi vandi er leystur með því að grafa 50 cm djúpa gryfju rétt hjá borstaðnum og taka þar sívalningsmælingu á eðlisþyngd með þeim búnaði, sem notaður er við gryfjumælingar. Auk þess hefur eðlisþyngd áfram verið mæld í 2 m djúpri gryfju á hábungunni (í punktinum H18) í flestum vorferðum.

Við kjarnaboranir kemur fyrir að einstakir bútar tapast eða kurlast og kemur þá fram skekkja ef ekki er leiðrétt fyrir kjarnatapinu. Einkum getur borun orðið erfið ef hlýtt er í lofti og borinn snarkólnar þegar hann er settur ofan í vetrarlagið. Með því að mæla dýpi niður á holubotn við lok hverrar borunar má áætla kjarnatapið og bæta inn viðeigandi vatnsgildistölum til leiðréttingar.

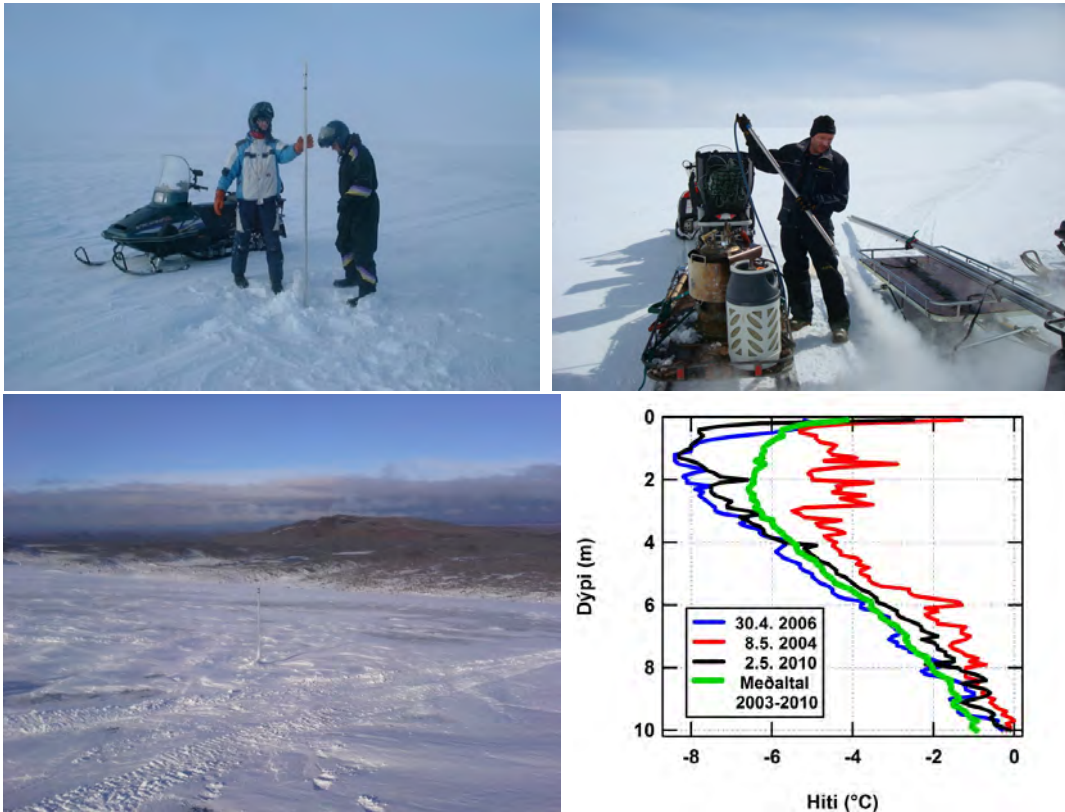
Sumarafkoma. Á leysingarsvæði bráðnar fyrst allur vetrarsnjór ofan af jökulísnum og síðan tekur við leysing jökulíssins frá miðju sumri fram á haust. Oft bráðna 4–6 m íss neðan við 1000 m hæð á Hofsjökli en leysing fer vitanlega minnkandi er ofar dregur. Ofan jafnvægislínu leysir einungis hluta vetrarlagsins og rennur bráðvatnið burt úr laginu, sem einnig þjappast vegna vaxandi eðlisþyngdar yfir sumarið. Sumarafkoma er því metin út frá breytingu á vatnsgildi vetrarlagsins yfir sumarið. Getur hún verið jákvæð ofan við 1600 m hæð á Hofsjökli, því þar snjóar iðulega á sumrin.

Sumarafkoman er mæld með aflestrum af 6 m löngum álstikum, sem boraðar eru í jökulinn, sjá myndir 7 og 8. Stikurnar eru settar í kjarnaholurnar á ákomusvæðinu og miðað við að þær standi 0.5–2.5 m upp úr snjó að hausti. Í þeim tilvikum tynast þær ekki í nýsnævi og sligast heldur ekki af hrími. Nýlega var tekin upp sú venja að festa sk. Recco-snjóflóðaleitarflögur við stikutoppinn að vori og má þá finna stikurnar með leitartæki að hausti, ef þær hafa fallið eða horfið á kaf í snjó. Æskilegast er að stikur á ákomusvæði standi með neðri enda í hausthvörfum fyrra árs, því þá gefa aflestrar að vori og hausti besta mynd af þynningu vetrarlags um sumarið. Ef neðri endi stiku er ofan hausthvarfanna verður við útreikninga að taka tillit til þjöppunar þess hluta vetrarlagsins, sem liggur milli neðri enda stiku og hausthvarfa.

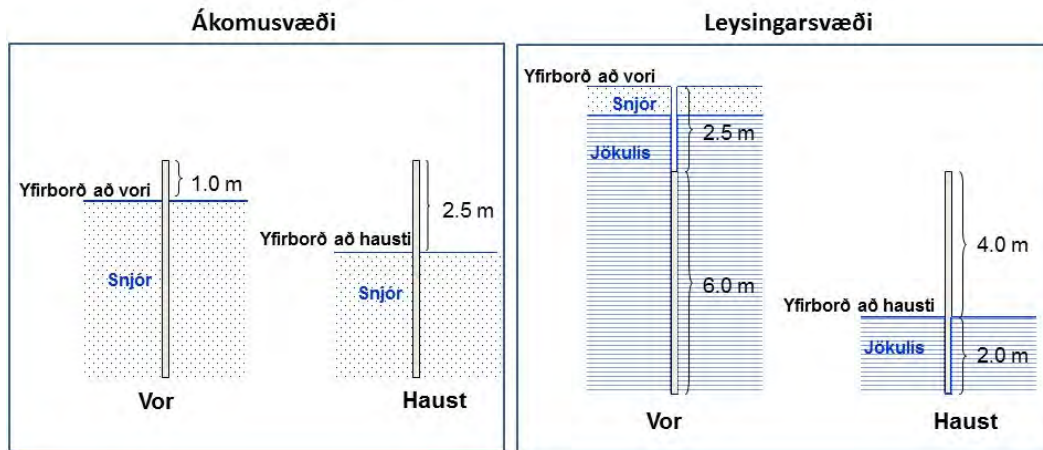
Gufubor er notaður til að bora fyrir stikum, sem settar eru í jökulís á leysingarsvæðinu. Þarf þar að bora allt að 10 m djúpar holur svo stikan falli ekki um sumarið. Um 30–45 mínútur tekur að bora eina slíka holu.

3.3 Reikniaðferðir

Mismunandi aðferðir eru í notkun við útreikning afkomu í hverjum mælipunkti (Østrem & Brugman, 1991; Cogley o.fl., 2011). Eðlilegast virðist við fyrstu sýn að notast við þá reikniaðferð sem á ensku nefnist „stratigraphic system“. Er þá miðað við að ársafkoma ákvarðist af massabreytingunni milli tveggja lágilda í ferli þeim, sem sýnir árstíðasveiflu snjó- og ísmagns á viðkomandi stað. Ekki hefur reynst mögulegt að nota þetta kerfi hérlendis, því sjaldnast er mögulegt að fara mæliferðir nákvæmlega um það leyti sem hámörkum (vetrarlok) og lágörkum (sumarlok/vetrarbyrjun) ferilsins er náð. Við mælingarnar á Hofsjökli hefur því verið notast við svo kallað „floating date system“, þ.e. breytilegar dagsetningar eru hafðar á vor- og haustferðum, sjá mynd 3. Þarf oftast að sæta lagi þegar veður gefur til ferðanna, einkum á haustin. Er nokkuð algengt að nýsnævi hafi þá þegar fallið á jökul og er vatnsgildi nýsnævisins þá reiknað sérstaklega og bætt við sumarafkomuna með jákvæðu formerki. Þetta sama vatnsgildi þarf svo



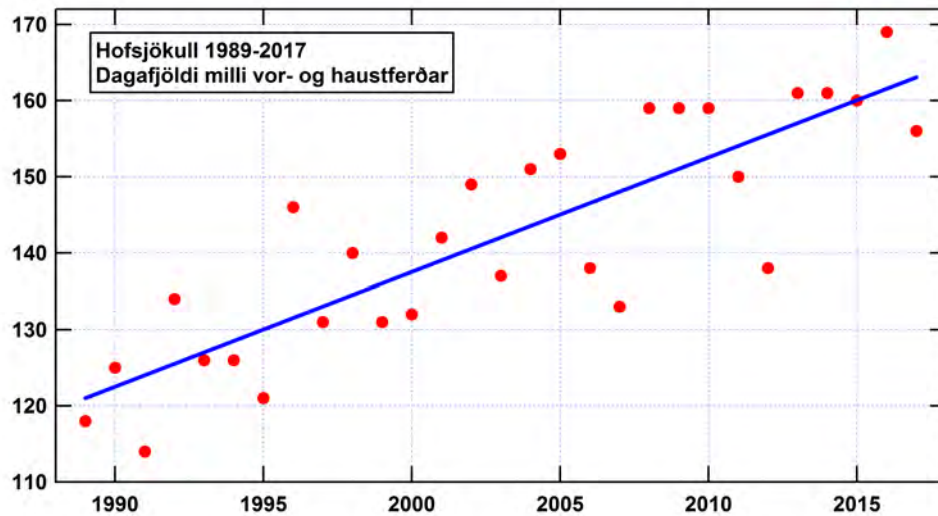
Mynd 7. Efst t.v.: Stiku komið fyrir í borholu á ákomusvæði. Efst t.h.: Gufuborun að hefjast. Um 10 lítrar vatns eru hitaðir að suðu í katli. Gufan er svo leidd um slöngu og út um mjótt op fremst á spjótinu. Með gufubornum má bora 10 m djúpa holu í jökulís á 30–45 mínútum. Neðst t.v.: Stika, sem stóð með toppinn á 4 m dýpi í gufuholu er hér við sumarlok komin 1.5 m upp úr yfirborði jökulíss neðst á Sátujökli. Neðst t.h.: Mældur snjóhiti í efstu 10 m á hábungu Hofsjökuls. Græni ferillinn sýnir meðaltal áranna 2003–2010. Rauði ferillinn sýnir það tilvik þegar snjóhiti mældist hæstur í vorferð á þessu árabili (2004) og sá blái þegar hann mældist lægstur (2006). Einnig er sýnd mæling frá 2010 (neðan meðaltalslínu niður á 4 m dýpi en ofan hennar á 4–10 m dýpi).



Mynd 8. Í vorferðum eru 6 m langar leysingarstikur settar niður í öllum punktum. Á ákomusvæði jökulsins (þ.e. ofan við 1350 m hæð, u.þ.b.) eru stikurnar láttnar standa með toppinn 0–1.5 m ofan við yfirborð snævar við upphaf sumarleysingar. Snjólag vetrarins er yfirleitt 4–8 m þykkt og samþjöppun lagsins um sumarið og leysing úr því leiðir þá til þess að stikutoppurinn er kominn 1–3 m upp úr yfirborðinu að hausti og er stíkan þá auðfundin. Hún er þá ekki komin það hátt upp úr snjónum að hún taki að sligast til hliðar undan vindi og hrími og ekki heldur týnd í nýsnævi haustsins, sem oft nær 1 m þykkt eða meira efst á ákomusvæðinu við septemberlok. Á leysingarsvæðum leggst oftast 0.5–3 m þykkt snjólag yfir jökulís um veturinn og eru stikurnar boraðar niður í jökulísinn þannig að toppur þeirra sé 2–4 m neðan yfirborðs. Þetta er nauðsynlegt vegna hinnar miklu sumarleysingar, sem verður neðan við 1200 m hæð á jöklinum. Í neðstu punktum í 800–1000 m hæð er t.d. algengt að auk alls snjólags vetrarins bráðni 3–5 m af jökulís yfir sumarið. Þessar stikur koma því smám saman uppúr ísnum er á sumarið líður og eru aðgengilegar til aflestrar þegar að þeim er komið um haustið.

að draga frá mældri vetrarafkomu næsta vor, því upphaf vetrar miðast við dagsetningu haustmælingar í þessu kerfi. Vetrar- og sumarafkomutímabil eru mislöng milli ára í þessu kerfi og ef haustferðir eru farnar seint geta tölur um vetrar- og sumarafkomu hliðrast talsvert frá hinum raunverulegu mælitölum. Áhrif á uppsafnaða (e. cumulative) afkomu yfir margra ára tímabil eru hins vegar engin.

Á hlýindatímabilinu sem staðið hefur linnulítið frá 1995 hefur ákomutímabilið að jafnaði staðið frá seinni hluta september og fram undir miðjan maí (um 8 mánuðir), en leysingartími frá maí til september (um 4 mánuðir). Breytileiki milli ára hefur þó verið umtalsverður og einnig er lengd ákomu- og leysingartíma mismunandi eftir hæð á jöklinum. Mynd 9 sýnir dagafjölda tímabilsins milli vor- og haustferða 1989–2017. Tímabilið hefur lengst um u.þ.b. 40 daga frá upphafi mælinganna og skýrist þetta að nokkru af lengingu leysingartímabilsins í hlýnandi loftslagi. Tvær ástæður til viðbótar fyrir lengingunni þarf þó einnig að nefna: i) Vorferðir eru farnar heldur fyrr til að losna við erfið ferðalög um krapablár utan jökuls, og ii) haustferðir eru farnar þegar nokkuð er áliðið hausts og nægjanlegt nýsnævi hefur fallið á neðanverðan jökulinn. Það auðveldar sleðaakstur um jökulinn og hlífir tækjunum, auk þess sem aðkoma á jeppum að jökli verður auðveldari. Við úrvinnslu afkomugagna er völ á tveim aðferðum til þess að reikna heildar- eða meðalafkomu yfir stærri svæði eins og ísa- eða vatnasvið. Setja má gögnin á kort af jöklinum



Mynd 9. Dagafjöldi milli vor- og haustferðar á Hofsjökul 1989–2017.

og draga skv. þeim jafnþykktarlínur vetrar- og sumarafkomu. Þessi aðferð hentar stundum vel á afmörkuðum daljökklum, ekki síst ef einnig er mælt á þverlínunum til viðbótar við meginmælilínu um miðbik jökulsins, og einnig á stórum hveljökklum þar sem miklar láréttar breytingar eru í afkomudreifingu. Viðbótargögn úr snjóþykktarþreifingum eru einnig mjög hjálpleg við gerð slíkra afkomukorta. Þessi aðferð hentar hins vegar ekki eins vel til framsetningar mæligagna frá Hofsjökli, því þar hefur verið notast að mestu við eina mælilínu á hverju hinna þriggja ísasviða. Hefur því sk. „profile method“ verið notuð við vinnslu mæligagnanna; þ.e. vetrar- og sumar- og ársafkoma er dregin upp sem fall af hæð á jöklinum skv. niðurstöðum frá mælilínunum og gert ráð fyrir að afkoma með hæð sé sú sama alls staðar á ísasviðinu. Síðan eru tölur um hæðardreifingu flatarmáls notaðar til að reikna afkomu fyrir tiltekin hæðarbil innan ísasviðanna og fást þá heildartölur um vatnsgildi þess snævar sem bættist á jökulinn um veturinn og það sem tapaðist að sumri. Með því að deila flatarmáli ísasviðs upp í rúmmálið reiknast svo meðaltal afkomunnar, sem fengist ef henni væri jafndreift yfir viðkomandi ísasvið. Afkomutölur eru jafnan gefnar upp í metrum vatnsgildis.

3.4 Óvissupættir

Við mælingu á vetrarafkomu verður að gera ráð fyrir óvissu í mælingu á þykkt vetrarsnævarins, sem þó er mismikil eftir svæðum á jöklinum eins og getið var um hér að framan. Nokkur óvissa er einnig í mælingu á lengd einstakra kjarnabúta (± 1 cm) og verður hún hlutfallslega meiri eftir því sem einstakir bútar eru styttri. Þvermál búta er mælt með tommustokk eða skífumáli og við velheppnaða borun í þéttum snjó er þvermál kjarna úr SIPRE-bornum 7.8 cm með um 1–2% óvissu. Stundum kurlast þó kjarnar og brotna í ólöguleg stykki og getur óvissa í áætluðu þvermáli þá orðið allt að 7%. Staðlaðar vigtir hafa verið notaðar við mælingar á massa kjarnabúta og er óvissa í massamælingu metin innan við 1%. Trufanir geta þó orðið á nákvæmri vigtun í hvassviðri og hríð vegna snarpra vindhviða og snævar, sem safnast vill neðan á pall vigtarinnar. Reynt er eftir fremsta megni að mæla í veðri sem ekki spillir niðurstöðunum. Verður að gera ráð fyrir 2–3% óvissu í massatölum við slíkar aðstæður. Veruleg óvissa getur verið um dýpi á

hausthvörf á ákomusvæðum þó oftast séu þau auðgreinanleg í snjókjörnum. Þessa óvissu er erfitt að meta en hún getur numið tugum cm og jafnvel meiru við erfiðar aðstæður. Að lokum er rétt að nefna að yfirborð jökuls að hausti getur verið mjög hrjúft bæði á ákomusvæðum en þó einkum á leysingarsvæðum. Þegar borað er niður á hausthvörf eða jökulís er ekki víst að staðurinn sem fyrir vali verður sé dæmigerður fyrir næsta nágrenni, t.d. ef borað er niður á hrygg eða hæð eða rás sem leysingarvatn hefur runnið eftir árið áður. Þessa óvissu er einnig erfitt að meta en hún getur vafalaust numið tugum cm.

Leysing snævar og íss er lesin af 6 m löngum álstikum, sem komið er fyrir í borholum á hverjum mælistað. Gera verður ráð fyrir a.m.k. 1 cm óvissu í aflestri á hæð stikutopps yfir eða undir yfirborði. Þá er og sá möguleiki fyrir hendi að stikur sígi í hjarn eða jökulís, nema þeim sé komið fyrir á stikufæti, sem hindrar slíkt sig. Greint er frá athugunum varðandi þetta atriði í kafla 7. Sama gildir um aflestur af stikum og nefnt var um mælingar á snjókjörnum að ekki er víst að staðurinn þar sem stikan er boruð niður sé dæmigerður fyrir næsta nágrenni vegna hrjúfleika yfirborðs jökulsins. Óvissan sem af þessu leiðir nemur tug eða tugum cm en þegar litið er til margra mælinga ætti hún að jafnast út þegar tekið er meðaltal.

Þegar vetrar- og sumarafkoma er dregin upp sem fall af hæð á jökli er oftast reiknuð besta lína gegnum punktastafnið og hún notuð ásamt hæðardreifingu til að reikna framlög til heildarafkomu á 100 m eða 25 m hæðarbilum. Sumarafkomuferli er oftast skipt í tvo hluta með mismunandi hallatölur, því leysing er örari á neðri hluta jökuls. Ástæðan er minna endurkast sólgeislunar frá yfirborði jökulíss þegar vetrarsnjór neðantil hefur bráðnað af jökulísnum, auk áhrifa hlýrra lofts neðantil á jöklinum. Nokkur óvissa er ávallt í hallatölum þessara lína, auk óvissu í flatarmáli hvers hæðarbils á viðkomandi ísasviði. Í þessum reikningum er miðað við að stikumælingarnar gefi óbjagaða mynd af afkomu jökulsins í viðkomandi hæð þó óvissa sé um hverja einstaka mælingu. Eins og nánar er rætt í kafla 10 er talsverð staðbundin skekkja í stikumælingum sem er svipuð frá ári til árs fyrir hverja stiku. Þetta leiðir til einhliðaskekkju í mati á afkomu í viðkomandi hæð og getur haft í för með sér einhliðaskekkju í mati á heildar- og meðalafkomu yfir heilu ísasviðin ef mælistaðir liggja óheppilega með tilliti til staðbundinnar afkomudreifingar. Leiðréttingu fyrir þessum skekkjuvaldi er lýst í köflum 10 og 11.

Í samantektargrein um afkomu jökla á Íslandi (Helgi Björnsson o.fl., 2013) var óvissa í lokatölum um afkomu tiltekins jökuls metin $\pm 0.15 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ (vatnsgildi). Það þýðir að óvissan verður hlutfallslega meiri því lægri sem lokatala afkomunnar er.

3.5 Samræming úrvinnslu árið 2017

Árið 2017 voru frumgögn afkomumælinga yfirfarin og niðurstöður fyrri úrvinnslu bornar saman við landlíkanafkomu, sjá kafla 8. Hæð hvernar stiku yfir sjó var reiknuð fyrir hvert ár með samræmdum hætti með landlíkönunum, reiknaðar voru árlegar hæðardreifingar ísasviðanna þriggja þar sem afkoman er mæld, og vetrar-, sumar- og ársafkoma var endurreiknuð með samræmdri aðferð. Jafnframt var reiknuð leiðrétting á niðurstöðum hefðbundnu afkomumælinganna fyrir hvert ísasvið, og fyrir jökulinn allan, þannig að þær gæfu sem best mat á afkomu jökulsins, þ.e. endurspegluðu hinar raunverulegu breytingar á massa eða vatnsgildi jökulíss á hverju ísasviði og fyrir allan jökulinn, sjá kafla 10. Samræming úrvinnslunnar fólst í þremur meginþáttum.

Hæð stika og mælistaða var reiknuð fyrir hvert ár út frá landlíkönun þannig að afkomumælingin endurspeglar afkomu í réttri hæð yfir sjó. Stikur hafa í flestum tilfellum verið mældar

inn með GPS-mælingum hin síðari ár en allmörg göt eru í þeim mælingum og einnig er veruleg óvissa í hæð sem mæld er með GPS-mælitækjum af þeirri gerð sem notuð hafa verið í afkomumælingunum. Á fyrstu árum mælinganna var staðsetning stíka mæld grófllega með lóran-tækjum og notast við hæð skv. yfirborðskorti sem unnið var í tengslum við íssjármælingu jökulsins árið 1983 (Helgi Björnsson, 1988). Yfirborð jökulsins nærri jaðrinum þar sem neðstu stikurnar standa hefur lækkað um 50–100 m síðan afkomumælingar hófust árið 1988 og skiptir því verulegu máli að tekið sé tillit til breytinga í hæð þeirra á tímabilinu.

Hæðardreifing jökulsins var reiknuð fyrir hvert ár út frá landlíkönum frá 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015. Í úrvinnslu fyrri ára voru ekki tiltæk nákvæm landlíkön sem sýna breytingar á hæðardreifingu ár frá ári og breytingar á flatarmáli jökulsins. Þessar breytingar eru ekki miklar milli ára en þegar saman kemur á þremur áratugum eru þær verulegar, t.d. minnkaði flatarmál jökulsins úr 919 km² niður í 824 km² frá 1986 til 2015. Áhrif breytinga í flatarmáli eru gagnstæð áhrifum þeim sem breytingar á stíkuhæð og hæðardreifingu hafa á útreikning afkomu þannig að þessar breytingar hafa ekki jafn mikil áhrif á meðalafkomu yfir heil ísasvið og ætla mætti. Mikilvægt er þó að rétt sé farið með þessar breytingar og samræmdar reikniaðferðir notaðar yfir allt tímabilið.

Samræmt stíkunet var sett upp við endurskoðun á úrvinnslu afkomumælinganna þannig að notast væri við sömu stíkunum allt tímabilið. Snjósjármælingar sýna að miklar breytingar eru í þykkt vetrarsnjóalaga á jöklinum og hefur snjóþekjan tilhneigingu til þess að dreifast með svipuðum hætti milli ára, sjá kafla 9. Þetta hefur í för með sér einhliðaskekkju í hefðbundnu mælingunum eins og lýst er í kafla 10, en einnig að óheppilegt er að ákveðnar stíkur detti út úr úrvinnslunni þó mæling á þeim misfarist af einhverjum ástæðum. Það veldur því að einhliðaskekkja getur orðið breytileg milli ára eftir því hvaða stíkur voru tiltækar og hvernig stíkunetið endurspegladi afkomudreifingu á jöklinum á viðkomandi jökulári. Við þessu var brugðist með því að beita tölfræðilegum aðferðum til þess að meta gögn sem upp á vantaði, þegar mælingar á ákveðnum stíkum höfðu fallið niður, þannig að alltaf væri notast við sama stíkunet til útreiknings á heildar- eða meðalafkomu yfir heil ísasvið.

4 Landlíkön

Breytingar á rúmmáli íss á ísasviðum Hofsjökuls síðan 1986 er unnt að meta á grundvelli landlíkana frá árunum 1986 (DMA), 1999/2001 (Loftmyndir/GPS), 2004 (SPOT5), 2008 (leysimæling), 2013 (leysimæling) og 2015 (ArcticDEM).

Leysimælingin 2008 fór fram 3. og 4. september og náði til um 80% af flatarmáli jökulsins en ekki náðist að mæla norðausturhluta hans þá. Norðausturjökullinn var mældur 18. og 19. júlí 2010. Þeirri mælingu var hliðrað lóðrétt, með breytilegri hæðarleiðréttingu sem fall af hæð yfir sjó, og þannig útbúið heildarlíkan af öllum jöklinum sem á að sýna yfirborðið þegar fyrri mælingin fór fram í byrjun september 2008. Mynd 33 sýnir mörk svæðanna sem mæld voru 2008 og 2010. Leysimælingin 2013 fór fram 13. og 14. október og náðist þá að mæla allan jökulinn.

Gervitunglamyndir WorldView tungla, sem ArcticDEM landlíkanræmur (e. „strips“) frá haustinu 2015 byggja á, voru teknar 10. október (miður jökullinn) og 9. nóvember (austurhluti jökulsins) 2015 en ná ekki til svæðis þess nærri vesturjaðrinum sem markast af lóðréttu línunni á mynd 33. Vestast á jöklinum var landlíkanið 2015 metið á grundvelli leysimælingarinnar 2013 með því að draga frá hæðarbreytingu milli ára 2008 og 2013 sem hliðrað var á hverju hæðarbili miðað við samhengi á milli hæðarbreytinga tímabilanna 2013–2015 og 2008–2013 annars staðar á jöklinum. Nokkru meira nýsnævi var þann 9. nóvember 2015 þegar eystri gervihnattamyndin var tekin en þann 10. október þegar myndin sem nær til miðs jökulsins var tekin. Þessi snjódýptarmunur var reiknaður sem fall af hæð yfir sjó og dreginn frá landhæðinni þann 9. nóvember þegar landlíkönunum var skeytt saman í eitt samhangandi líkan af öllum jöklinum. Snjódýptarmunurinn var óverulegur neðan 1000 m y.s. og jókst línulega upp í um 1.25 m í 1800 m y.s.

ArcticDEM landlíkönin eru unnin með stafrænni stereó-myndvinnslu sem nefnist SETSM (e. „Surface Extraction from TIN-Based Search Minimization“, sjá Noh og Howat, 2015) og afhent í „ræmum“ sem eru um 16–18 km breiðar (A–S) og allt að 110–120 km langar (N–S) (PGC, 2016). Hver slík ræma getur verið hliðruð lárétt og lóðrétt og þarf að leiðrétta fyrir hliðruninni áður en unnt er að bera landlíkönin saman innbyrðis eða við önnur landlíkön. Þetta var gert með því að reikna innbyrðis hliðrun milli ræmanna tveggja og leysimælinganna með tölulegri aðferð sem byggist á lágmarkun á summu á tölugildi hæðarmismunar þar sem líkönin skarast utan jökuls. Þessi aðferð hefur þann kost að breytingar á dauðissvæðum og sköflum utan jaðarsins hafa minni áhrif á niðurstöðuna en þegar aðferð minnstu kvaðrata er notuð. Hliðrun landlíkananna miðað við ISN93 landshnitakerfi var reiknuð með aðferð minnstu kvaðrata á grundvelli innbyrðis hliðrunar hvers pars landlíkananna.

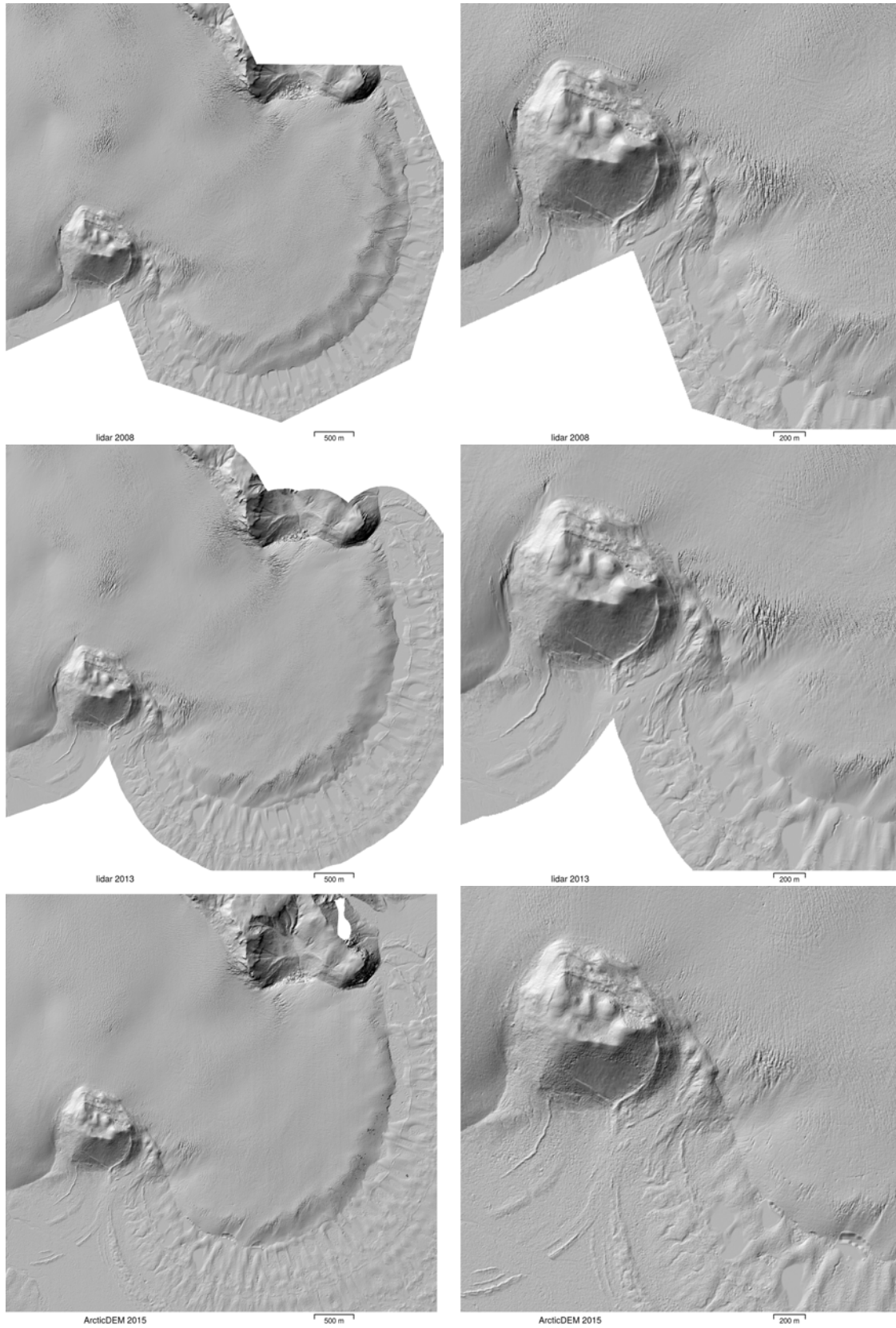
Landlíkanið frá 1999/2001 byggist að mestu á háflugsmýndum Loftmynda ehf. frá árinu 1999 en á GPS-mælingum sumarið 2001 nærri toppi jökulsins. Efst á jöklinum breytist hæð yfirborðsins hægt og er því í fyrstu nálgun unnt að gera ráð fyrir að þetta landlíkan sýni jökulyfirborðið eins og það var í sumarlok árið 1999. Á nokkru svæði milli jafnvægislínu og svæðisins sem GPS-mælingarnar sumarið 2001 ná til (sjá mynd 33) var ekki unnt að reikna hæð jökulyfirborðs út frá myndum Loftmynda. Þar var hæð jökulyfirborðsins metin á grundvelli landlíkansins frá 1986, SPOT5-landlíkansins frá 2004 og leysimælingarinnar frá 2008 með því að gera ráð fyrir samfelldri lækkingu með tíma sem fall af hæð yfir sjó. Eyjólf Magnússyni á Jarðvísindastofnun HÍ setti saman SPOT5-landlíkanið frá 2004 með gervihnattamælingum frá ágúst 2004 í samvinnu við Etienne Berthier við CNRS og háskólann í Toulouse í Frakklandi. Landlíkanið frá 1986 er unnið út frá 20 m hæðarlínu DMA-korta af Eyjólf Magnússyni á Jarðvísindastofnun HÍ að

frátöldu 85 km² svæði nærri miðju jökulsins (sjá mynd 33) þar sem hæð jökulyfirborðsins árið 1986 var metin á grundvelli hinna landlíkananna. Nánari upplýsingar um landlíkönin og óvissu í mælingunum er að finna í greinum Tómasar Jóhannessonar o.fl. (2011, 2013).

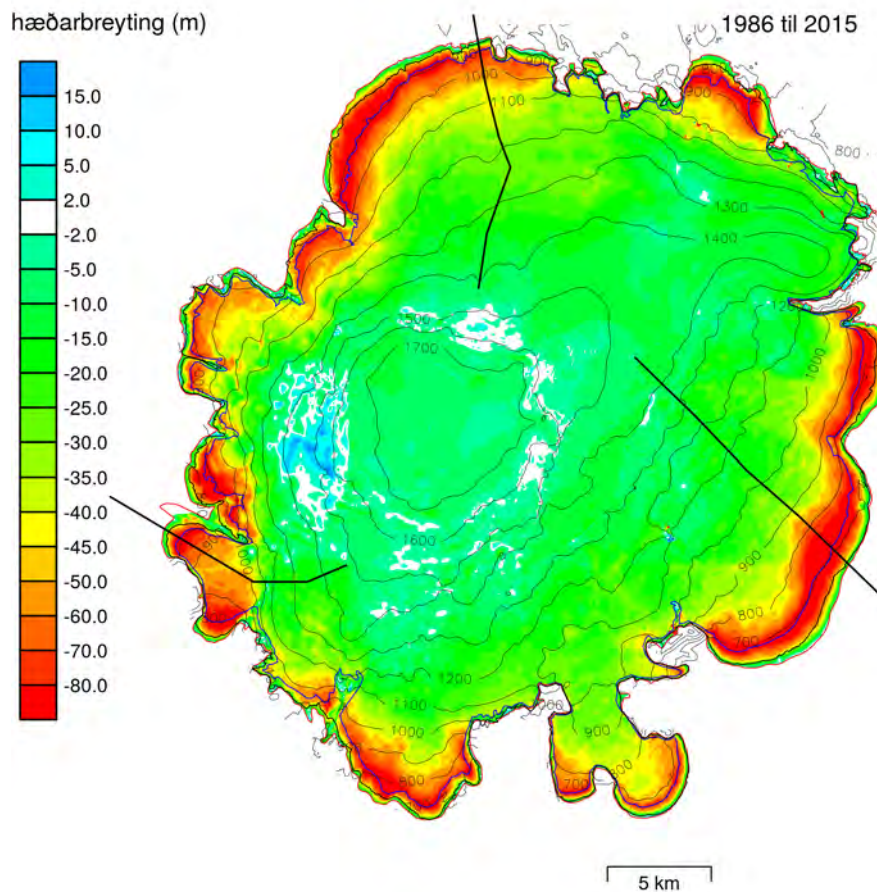
Mynd 10 sýnir skyggingar af Múla- og Nauthagajöklum byggðar á lidarkortunum frá 2008 og 2013 og ArcticDEM landlíkani frá 2015 hlið við hlið og sést skýrt hvernig jökullinn hefur hropað og lækkað nærri jaðrinum. Mælingunum ber mjög vel saman utan jaðarsins og staðfestir endur-mælingin 2013 á því svæði að lóðrétt nákvæmni leysimælingarinnar er vel innan við 0.5 m sem miðað var við í skipulagningu á leysimælingu íslensku jöklanna 2008–2012 (Tómas Jóhannesson o.fl., 2011, 2013). Þannig ber miðgildum mælinganna utan jökuljaðrana 2008 og 2013 saman upp á innan við 0.10 m og yfir 50% mælinga þar ber saman upp á innan við 0.2 m. Meiri skekkja er í ArcticDEM landlíkönunum en leysimælingum, bæði staðbundin skekkja í einstökum punktum og einhliðaskekkja sem getur náð yfir stærri svæði. Hér er gert ráð fyrir að lóðrétt, einhliða skekkja í ArcticDEM landlíkaninu sé um eða innan við 0.5 m eftir samræmingu við leysilandlíkönin sem lýst er að ofan.

Landlíkönin frá 1996, 1999/2001 og 2004 eru með 20 m möskvastærð, leysilandlíkönin frá 2008 og 2013 eru með 5 m möskvastærð og ArcticDEM landlíkanið frá 2015 er með 2 m möskvastærð. Landlíkönin voru jöfnuð og brúuð yfir á sameiginlegt 20x20 m net fyrir reikninga á hæðardreifingu og afkomu sem lýst er hér að neðan. ArcticDEM landlíkanið er víðast mjög gott en svolítið er um grófar skekkjur sem geta numið tugum metra eins og oft kemur fyrir í landhæðarreikningum sem byggjast á stereó-greiningu loftmynda. 20x20 m ArcticDEM landlíkanið var reiknað út frá upprunalega 2x2 m landlíkaninu með því að taka miðgildi hæðargildanna í hverjum 20x20 m reit í stað þess að nota hlaupandi meðaltal sem oft er gert við slíka útjöfnun yfir í stærri möskva. Miðgildisaðferðin hentar betur við útjöfnun á gögnum með grófum skekkjum og tryggir að hæðargildin í 20x20 m ArcticDEM landlíkaninu verða fyrir litlum áhrifum af grófum skekkjum í upprunalega háupplausnarlíkaninu.

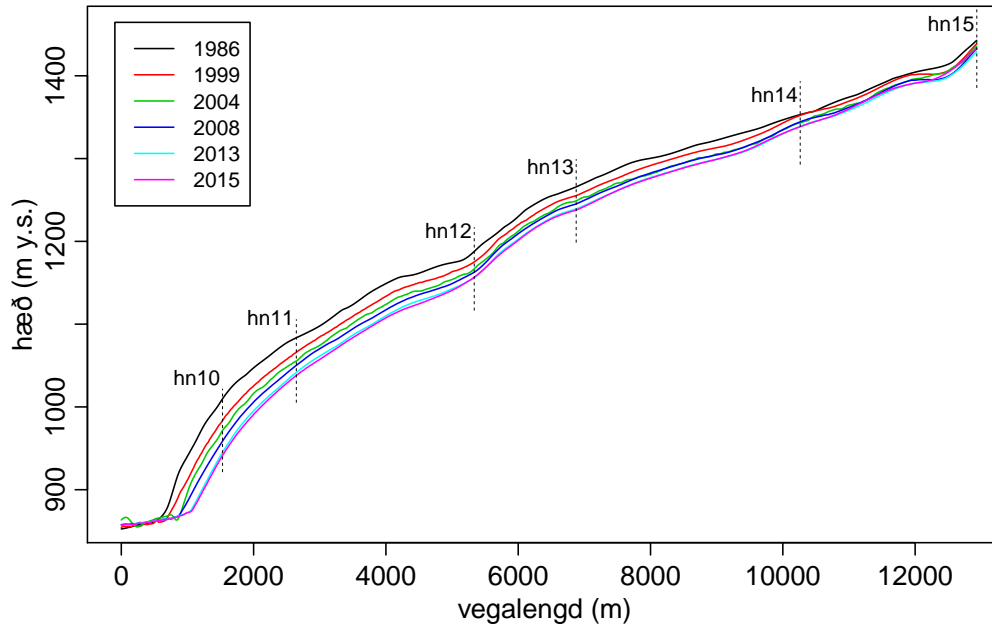
Mynd 11 sýnir breytingu á hæð yfirborðs jökulsins frá 1986 til 2015 samkvæmt DMA og ArcticDEM landlíkönunum. Víðáttumikil svæði við jökuljaðarinn hafa lækkað um tugi metra á þessu árabili, mest á 2–4 km breiðu beltinu við jaðarinn. Lækkun yfirborðsins nemur meira en 50 m á 116 km² svæði og 38 km² hafa lækkað um meira en 75 m á tímabilinu. Myndir 12, 13 og 14 sýna langsnið neðan við um 1500 m y.s. niður Sátujökul (um stikuröðina hn15–hn14–hn13–hn12–hn11–hn10), Blágnípujökul (frá hsv15) og Þjórsárjökul (um stikuröðina hsa15–hsa13–hsa11–hsa9–hsa8) skv. landlíkönunum sex (lega sniðanna er sýnd á mynd 11). Myndirnar sýna skýrt lækkun jökulsins sem fyrr var rædd og jafnframt að jaðar Sátujökuls hefur á þessum stöðum hropað um ~500 m á tímabilinu, jaðar Blágnípujökuls um ~1000 m og jaðar Þjórsárjökuls um ~1500 m.



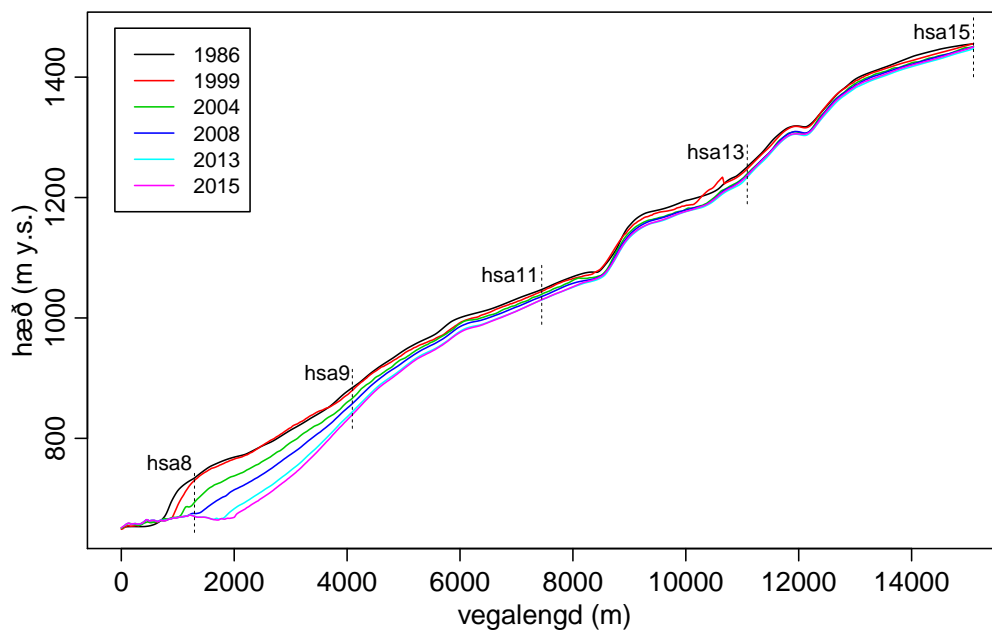
Mynd 10. Skyggingar byggðar á lidar- og ArcticDEM-kortum af Múlajökli og Nauthagajökli frá 2008, 2013 og 2015. Skyggingarnar þrjár til hægri þysja inn á svæði í grennd við Hjartafell sem er til vinstri og neðan við miðju í skyggingunum til vinstri.



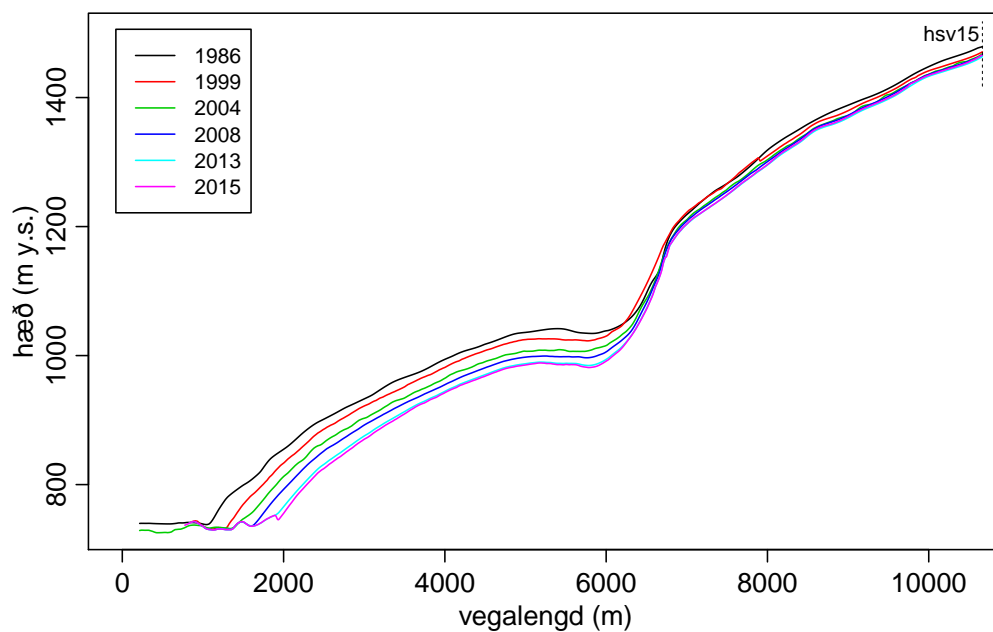
Mynd 11. Breyting á yfirborðshæð á Hofsjökli frá 1986 til 2015 samkvæmt DMA og ArcticDEM. Myndin sýnir jafnframt legu sniða niður Sátujökul, Þjórsárjökul og Blágnípujökul þar sem hæðarbreytingar eru sýndar á myndum 12, 14 og 13. Línurnar á Sátujökli og Þjórsárjökli ligga eftir mælistikuröðunum á þeim jöklum. Línan niður Blágnípujökul fylgir afkomustikunum niður í 1300 m h.y.s. en sveigir til norðurvesturs neðar á jöklinum niður á jökuljaðar norðan Blágnípu til þess að sýna hæðarbreytingar jökulsins yfir allt hæðarbilið sem hann spannar.



Mynd 12. Langsnið eftir mælilínu niður Sátuþjókul (hn15–hn10) skv. landlíkönum frá 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015. Lóðréttar slitnar línur sem merkja staðsetningu afkomustika spanna 100 m hæðarbil.



Mynd 13. Langsnið eftir mælilínu niður Þjórsárjökul (hsa15–hsa8) skv. landlíkönum frá 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015. Lóðréttar slitnar línur sem merkja staðsetningu afkomustika spanna 100 m hæðarbil.

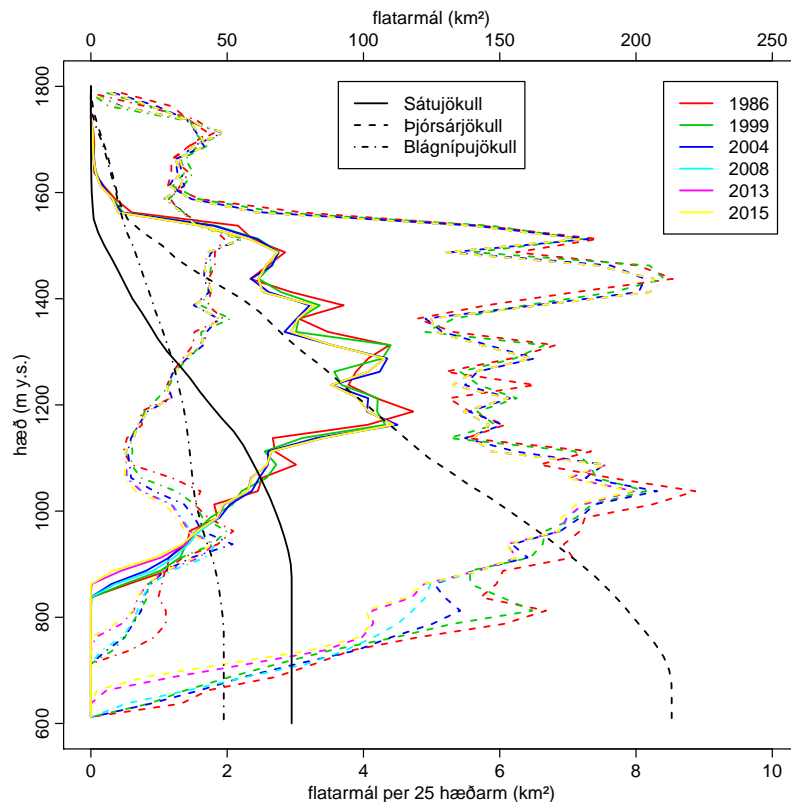


Mynd 14. Langsnið niður Blágnípujökul frá afkomustiku hsv15 niður að jökuljaðri skv. landlíkönunum frá 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015. Lóðrétt slitin lína sem merkir staðsetningu stiku hsv15 spanna 100 m hæðarbil.

5 Ísaskil og ísasvið

Ísaskil hafa verið metin á grundvelli landlíkansins frá 2008 og eru í aðalatriðum þau sömu og áður hafa verið notuð í greiningu á afkomumælingum á Hofsjökli (Tómas Jóhannesson o.fl., 2006; Tómas Jóhannesson, 2012, 2015). Þau eru sýnd á mynd 2 og á myndum 47–52 í viðauka I. ásamt upplýsingum um afkomu á grundvelli landlíkana sem fjallað er síðar í þessari skýrslu. Ísaskilin og þar með ísasvið (e. „ice flow basin“, hefur einnig verið kallað ísflæðisvæði á íslensku) breytast lítið í tímans rás og tilfærslur á þeim milli 2008 og 2015 eru óverulegar að því frátöldu að jaðar jökulsins hopaði að sjálfsgöðu á þessu tímabili. Gera má ráð fyrir að ísaskilin hafi lítið breyst á tímabilinu 1986–2015. Ísaskilin frá 2008 voru jafnframt framlengd út í jökuljaðarinn frá 1986, 1999 og 2004 og notuð til þess að skipta jöklinum á þessum tímum upp í ísasvið sem unnt er að bera saman við sömu svæði frá 2008, 2013 og 2015. Ísaskilin voru dregin hornrétt á hæðarlínur skv. útfjöfnuðu korti með 100 m möskvastærð og lega skilanna metin þannig að þau fylgja ekki lögun jökulyfirborðsins í smáatriðum sökum þess að flæði jökulsins á hverjum stað verður fyrir áhrifum af yfirborðslögun á allstóru svæði í hlutfalli við þykkt jökulíssins. Flatarmál ísasviðanna 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015 kemur fram í töflu 5 í viðaukanum.

Mælingar á afkomu á stikum eru túlkaðar með hæðardreifingu yfir í meðal- eða heildarafkomu yfir viðkomandi ísasvið. Fyrir mælingarnar á Sátujökli eru notuð ísasvið 10 og 11, þ.e. Eystri-Sátujökull og Tvífellsjökull samanlagt, fyrir mælingar á Blágnípujökli ísasvið 5 og fyrir Þjórásarjökul ísasvið 16 og 17, þ.e. Háöldujökull og Þjórásarjökull samanlagt, sbr. kafla 3. Ísasvið eru notuð í þessu samhengi fremur en vatnasvið vegna þess að afkoma jökuls í jafnvægi er núll yfir ísasvið en getur verið frábrugðin núlli á vatnasviðum þar sem vatn sem flæðir með botni streymir yfir ísaskil.

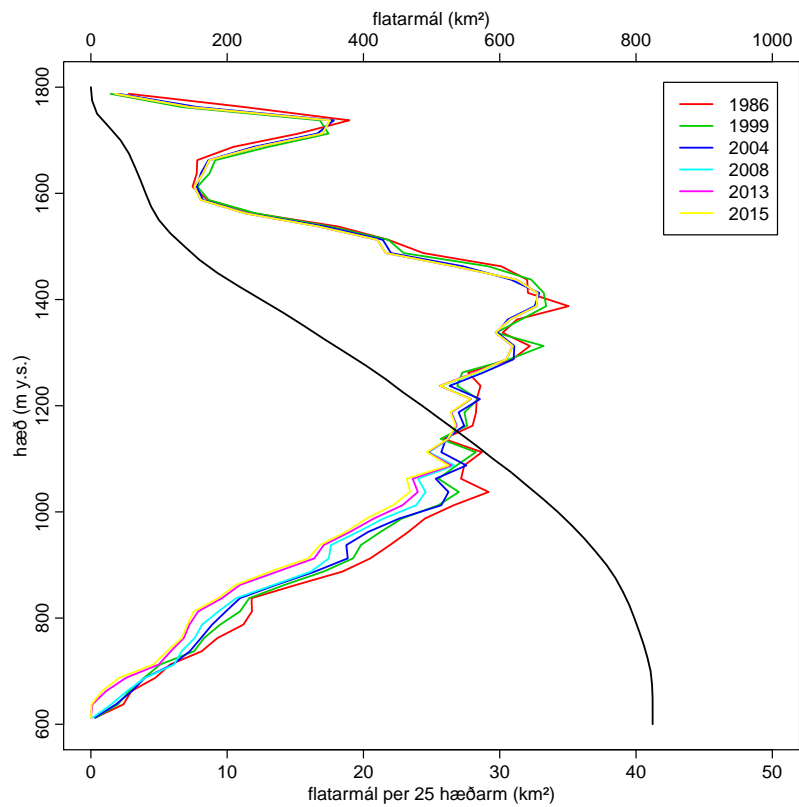


Mynd 15. Hæðardreifing sem notuð er við túlkun afkomumælinga á Sátujökli (ísasvið 10 og 11, þ.e. Eystri-Sátujökull og Tvífellsjökull samanlagt), Blágnípujökli (ísasvið 5) og Þjórsárjökli (ísasvið 16 og 17, þ.e. Háöldujökull og Þjórsárjökull samanlagt), sbr. mynd 2 og töflu 5), skv. landlíkönum frá 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015. Svartir ferlar sýna uppsafnað flatarmál frá hæsta stað á hverju ísasviði. Á neðri x-ás er sýndur kvarði fyrir hæðardreifingu á 25 m hæðarbilum en efri x-ásinn sýnir kvarða fyrir uppsafnað flatarmál.

6 Hæðardreifing

Landlíkönin frá 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015 voru notuð til þess að reikna hæðardreifingu á hinum mismunandi ísasviðum (sjá mynd 2 og töflu 5 í viðauka I) og fyrir jökulinn allan. Dreifingin er annars vegar sett fram sem flatarmál á hverju 25 m hæðarbili og hins vegar uppsafnað flatarmál frá hæsta stað á hverju ísasviði, hvoru tveggja í km^2 , sjá hæðardreifingu afkomumælisvæðanna á Sátujökli (ísasvið nr. 10 og 11 samanlagt), Blágnípujökli (ísasvið nr. 5) og Þjórsárjökli (ísasvið nr. 16 og 17 samanlagt) á mynd 15 og fyrir jökulinn allan á mynd 16. Dreifingarnar voru vistaðar í ASCII-skrám sem fylgja gögnum sem dreift er með þessari skýrslu. Sjá má að hæðardreifingarnar breytast mest á hæðarbilum neðan u.þ.b. 1000–1100 m y.s. þar sem flatarmálið á hverju hæðarbili minnkar verulega en ofar er breytingin mun minni og felst einkum í því að sveiflur í hæðardreifingunni færst niður á við.

Reiknaðar voru hæðardreifingar fyrir hvert ár frá 1986 til 2017 með því að brúa línulega uppsafnað flatarmál sem reiknað var með landlíkönum fyrir hverja hæð. Fyrir árin 2016 og 2017 var dreifingin frá 2015 notuð óbreytt en ekki urðu miklar hæðarbreytingar á jöklinum á þessum



Mynd 16. Hæðardreifing Hofsjökuls skv. landlíkönnum frá 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015, sjá skýringar við mynd 15.

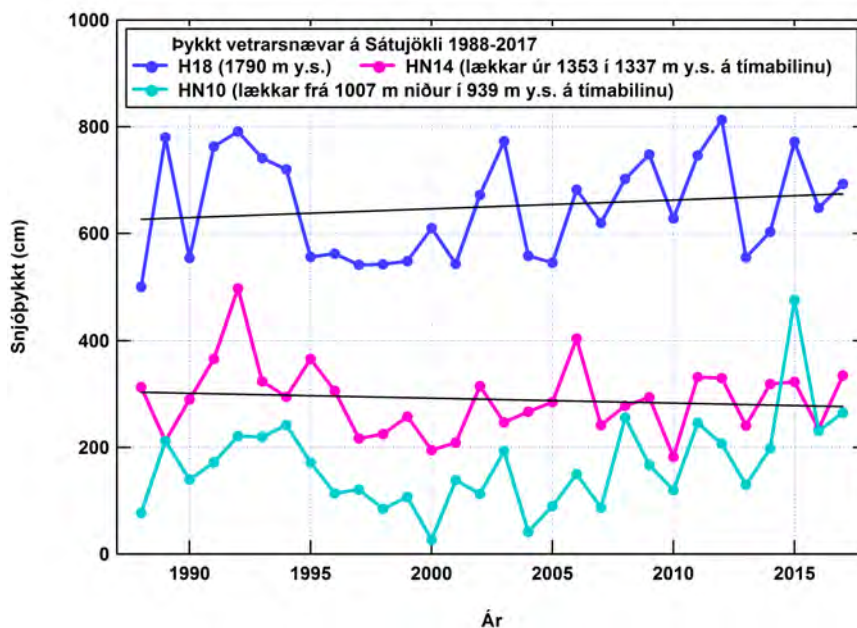
árum vegna þess að afkoman jökulárið 2014/15 var jákvæð og hefur þetta því óveruleg áhrif á reiknaða heildarafkomu.

Athyglisverður munur á þróun hæðardreifinga Sátu-, Þjórsár og Blágnípujökuls kemur fram á mynd 15. Flatarmál á hæðarbilinu 600–1100 m y.s. minnkar verulega á Blágnípu- og Þjórsárjökli á tímabilinu 1986–2015 en þessi breyting er mun minni á Sátujökli sem hörfar ekki eins mikið. Þannig minnkar flatarmál Blágnípujökuls um 12% og Þjórsárjökuls um 10% á tímabilinu en Sátujökull minnkar aðeins um 6% að flatarmáli eða hartnær helmingi minna hlutfallslega. Fyrir Sátujökul breytist hæðardreifingin fyrst og fremst þannig að yfirborðið lækkar víðast hvar neðan um 1400 m y.s., sem kemur fram sem hliðrun niður á við í hæðardreifingunni, og staða sporðsins breytist ekki eins mikið og á hinum jöklunum tveimur. Þessi mismunur kemur fram í mismunandi áhrifum hörfunar og breytingar hæðardreifingar á þróun afkomu þessara jökla eins og nánar verður vikið að í kafla 7. Fyrir Blágnípu- og Þjórsárjökul dregur úr áhrifum neikvæðrar afkomu með tíma vegna þess að svæðið neðst á jöklinum þar sem leysing er langmest dregst mikið saman. Þessi aðlögun jökulsins að neikvæðri afkomu er hægari fyrir Sátujökul þar sem lækkun yfirborðsins eykur á leysingu sökum gagnvirkra áhrifa afkomu og yfirborðshæðar (e. mass-balance–elevation feedback) en minnkun flatarmálsins vegur þar ekki eins mikið á móti og á hinum jöklunum tveimur.

7 Niðurstöður hefðbundinna afkomumælinga

7.1 Snjóþykkt á Sátujökli frá upphafi mælinga

Árið 2017 var fengin samfelld 30 ára mæliröð frá Sátujökli og er áhugavert að athuga breytileika í þykkt vetrarsnævar á jöklinum á tímabilinu 1988–2017. Mynd 17 sýnir snjóþykkt að vori í punktum HN10, HN14 og H18 í um 1000 m, 1350 m og 1790 m hæð. Hæstu gildin mælast á hábungunni (H18) og mest hefur þykkt vetrarsnævar mælst þar 813 cm vorið 2012, en minnst 500 cm vorið 1988 (talsverð óvissa er reyndar um það gildi). Meðalþykkt vetrarsnævar í H18 yfir þetta tímabil er 650 cm og staðalfrávikðið 97 cm. Á línuritinu er dregin besta lína gegnum punktastafnið og gefur hún til kynna dálitla leitni til aukinnar ákomu á tímabilinu, sem nemur um 0.5 m á hinu 30 ára tímabili. Athyglisverð eru umskiptin sem verða eftir 1994 þegar vetrarákoman minnkar um 2 m og verður stöðug í um 5.5 m snævar um 5 ára skeið. Í punktinum HN14 er meðaltal snjóþykktar 290 cm og staðalfrávikðið 67 cm. Skv. leitnilínu virðist þykktin heldur minnka er á líður, sem nemur 27 cm á 30 árum. Minnst snjóar í neðsta punktinum (HN10) sem er innan við 2 km frá jökuljaðri við upphaf mælinganna og er nú (2017) í brekku nærri jaðrinum. Vegna hörfunar og rýrnunar jökulsins hefur þessi punktur lækkað um nær 70 m á tímabilinu og er snjór tekinn að safnast þar fyrir af völdum skafrennings. Sú snjósöfnun er greinileg á línuritinu eftir árið 2007 og gefur ekki til kynna aukna ákomu í þessari hæð.



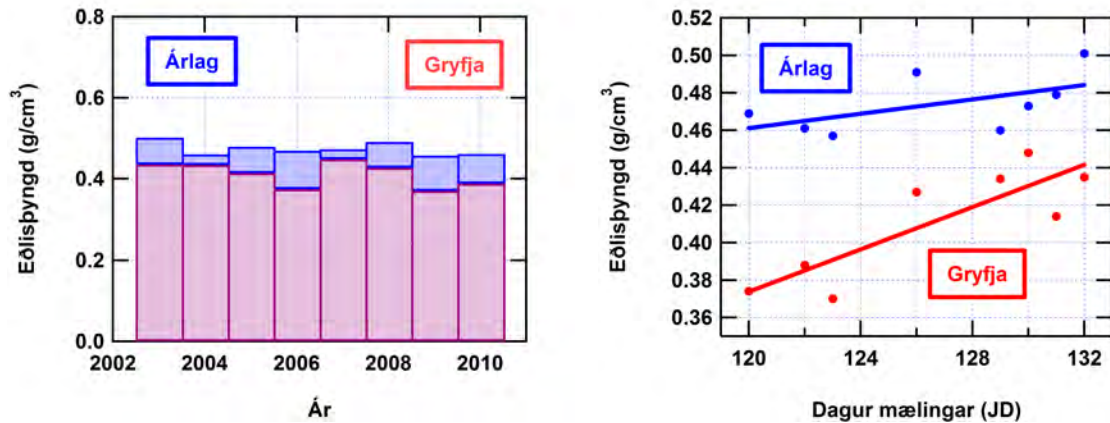
Mynd 17. Þykkt vetrarsnævar á Sátujökli 1988–2017.

7.2 Breytileiki eðlisþyngdar með hæð og með tíma

Eins og fram kemur í kafla 3 hefur meðaleðlisþyngd vetrarlags verið mæld á öllum snjókjörnum sem boraðir hafa verið í vorferðum frá 2004. Þar á undan var eðlisþyngd mæld í 2 m djúpum gryfjum á 5 stöðum á jöklinum og meðaleðlisþyngd vetrarlagsins oftast áætluð út frá þeim gögnum líkt og venja hefur verið við afkomumælingar á jöklum í Noregi.

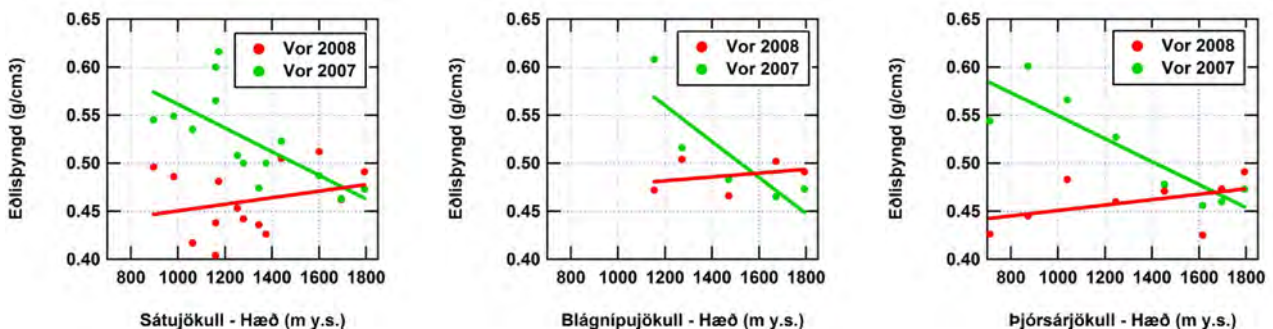
Á mynd 18 (til vinstri) er sýnt (vegið) meðaltal eðlisþyngdar í vetrarlaginu og 2 m gryfjunni

á hábungu Hofsjökuls á árunum 2003–2010. Eðlisþyngd í gryfjunni er að meðaltali 87% af eðlisþyngd vetrarlagsins og breytileiki hlutfallsins er verulegur milli ára (lágmark: 80%, hámark: 95%). Mynd 18 (til hægri) sýnir meðaleðlisþyngd snævar í gryfju og vetrarlaginu sem fall af dagsetningu (JD) mælingarinnar. Tímamunur mælinga í H18 í mismunandi leiðöngurum er að hámarki 12 dagar og benda leitnilínur til um 5% aukningar í eðlisþyngd árlagsins á þessum 12 dögum, en um 18% aukningar í eðlisþyngd efstu 2 metranna. Má búast við að aukningin sé meiri eftir því sem neðar dregur á jöklinum og staðfesta þessi gögn því nauðsyn þess að mæla eðlisþyngd vetrarlagsins alls í hverri vorferð í stað þess að nota eðlisþyngdargögn frá fyrri árum.



Mynd 18. Eðlisþyngd í 2 m gryfju og vetrarlagi í H18 2003–2010.

Í þessu samhengi er einnig áhugavert að bera saman niðurstöður eðlisþyngdarmælinga á vetrarlaginu í vorferðum árin 2007 og 2008. Mynd 19 sýnir meðaleðlisþyngd vetrarlags 2007–2008 sem fall af hæð á jöklunum þrem í samanburði við árið á undan. Er breytileikinn nokkuð óvenjulegur veturinn 2007–2008, því aðhvarfslínur benda til dálíttillar aukningar á eðlisþyngdinni með hæð. Skýrist þetta af því að á jöklinum var allmikið nýsnævi með lága eðlisþyngd, einkum neðantil, þegar mælingar fóru fram.

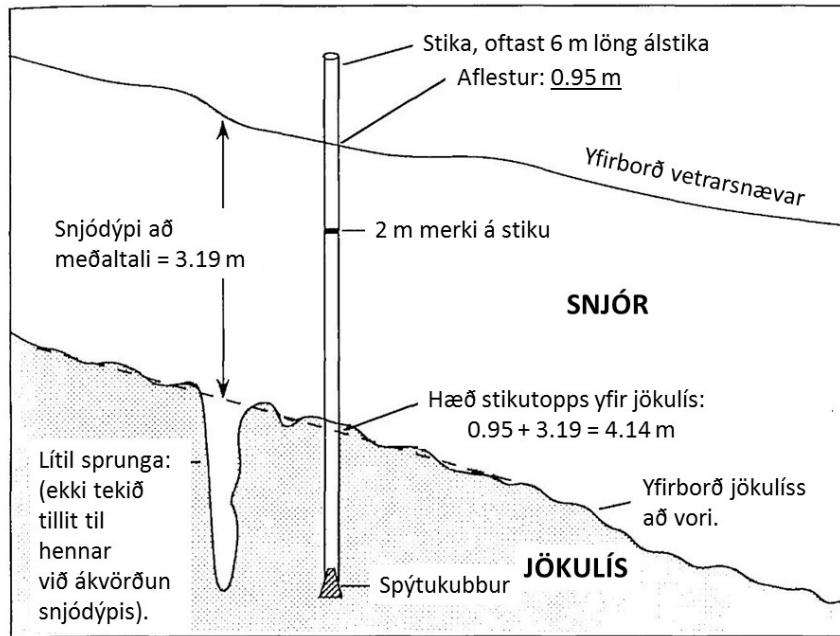


Mynd 19. Eðlisþyngd vetrarlags í vorferðum 2007 og 2008.

7.3 Athugun á mögulegu stikusigi í jökulís og hjarni

Eins og nánar er rætt í kafla 10 um landlíkanafkomu benda líkur til þess að stikumælingar á Hofsjökli vanmeti rýrnun jökulsins undanfarna 3 áratugi. Eitt atriði, sem tekið hefur verið til

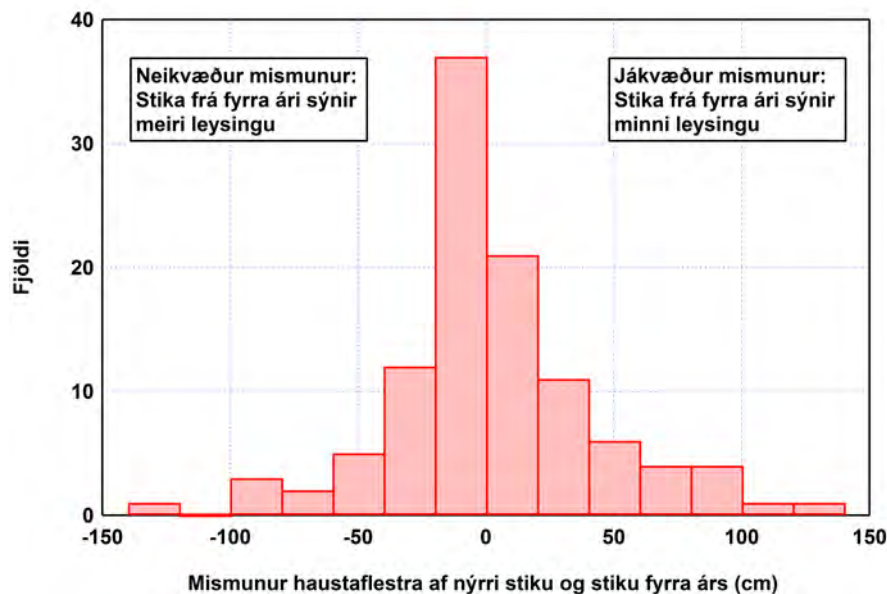
athugunar í því samhengi, er hvort leysingarstikur geti sigið í hjarn á ákomusvæðinu (sbr. Østrem & Haakensen, 1999) eða í jökulís á leysingarsvæðinu. Ef slíkt sig á sér stað er sumarleysing vanmetin og ársafkoma reiknast því hærri (þ.e. minna neikvæð en ella). Sjá afstöðumynd af leysingarstiku á mynd 20.



Mynd 20. Álstika með botn í jökulís en topp upp úr vetrarlagi ofan á ísnum. Myndin er fengin úr Østrem og Brugman (1991).

Stikugagnasafnið frá Hofsjökli var kannað til þess að sjá hvort stikusig gæti átt þátt í vanmati á rýrnun jökulsins. Þess eru allmörg dæmi að stikur, sem boraðar hafa verið í jökulís, lifi af tvö sumur og fæst þá að hausti samanburðaraflestur á móti aflestri nýrrar stiku sem sett var niður um vorið. Í gagnasafninu fundust dæmi um 108 slík tilvik á 8 ára tímabili en hafa ber í huga að í mörgum tilvikum er um að ræða 4–5 stikur á sama stað, nærri jafnvægislínu. Mynd 21 sýnir tíðnirit af mismun stikuaflastra fyrir þessi 108 tilvik. Fram kemur að stika frá fyrra ári sýnir oft meiri leysingu en nýja stikan en einnig oft minni leysingu (seinna tilvikið gæti bent til stikusigs). Hins vegar er meðaltalsmunur aflestra einungis 2.0 cm og er hann ekki marktækur vegna óvissu í mælingunum. Staðalfrávikin er furðu mikið eða 42.5 cm og munur aflestra er yfir 1 m í einstökum tilvikum. Þessar tölur benda ekki til að stikusig sé vandamál, enda er þess jafnan vandlega gætt að setja tréfót undir stikurnar áður en þeim er komið fyrir í borholunum. Hið háa staðalfrávik gæti skýrst af ójöfnum og smásprungum á jökulyfirborðinu. Athyglisvert er að flest tilvik á tíðniritinu lenda á bilinu –20 til 0 cm. Líklegasta skýring þess er viðbótarleysing að hausti eftir haustferð fyrra árs.

Mögulegt stikusig á ákomusvæðinu var kannað sumarið 2014 með tilraun í punktinum HN16 á ísasviði Sátujökuls. Þar var borað að vanda í gegnum vetrarlagið í vorferðinni og sett niður 6 m löng álstika. Til viðbótar voru settar þrjár stikur nálægt aðalstikunni og var tilgangurinn m.a. að kanna hvaða áhrif það hefði að láta stikur standa á krossviðarplötu í stað trékeilu. Einnig var kannað hvort einhver munur væri á (mögulegu) sigi plaststiku og álstiku. Samanburðarstikurnar



Mynd 21. Niðurstöður athugunar á mögulegu stikusigi á Hofsjökli þar sem sumarleysing var mæld á fleiri en einni stiku á sama stað.

Þrjár voru allar 4.6 m langar. Eftir að stikurnar voru komnar í borholur var snjó mokað í holurnar og honum þjappað saman meðfram stikunum. Einnig var sett sag í hverja holu og dýpi niður á neðra borð sagsins mælt. Neðra borðið var hugsað sem viðmiðunarflötur neðarlega í árlaginu sem miða mætti við þegar kannað væri hvort stikurnar hefðu mögulega hliðrast í lóðréttu stefnu yfir sumarið miðað við legu haustvarfa 2013.

Tilraun þessi var í upphafi hugsuð þannig stikubotn stæði í hausthörfum fyrra árs (2013). Þá mundi stikubotninn fylgja færslu haustvarfanna niðrávið vegna þjöppunar eldri árlaga og aflestur af stikunni vor og haust gæfi því nákvæma mynd af þynningu hins nýja vetrarlags (2013–14) vegna bráðunar og þjöppunar um sumarið. Þetta reyndist ekki raunhæft því hausthörfin voru á 620 cm dýpi í vorferð. Þau reyndust svo á um 415 cm dýpi neðan nýrra haustvarfa í októberbyrjun og þar sem 100 cm nýsnævis höfðu fallið á þessum stað snemma hausts var dýpið neðan yfirborðs orðið $415 + 100 = 515$ cm. Ekki er raunhæft að grafa 5 m djúpa gryfju á þeim stutta tíma sem til umráða er í haustferðum, við ótrygg veðurskilyrði. Var því í vorferðinni ákveðið að hafa neðri enda viðmiðunarstikanna á rúmlega 3.5 m dýpi og miða við að ekki þyrfti að grafa gryfju dýpri en 3 m í haustferðinni.

Myndir 22–26 sýna ljósmyndir af stikunum, teknar í haustferð, og í töflu 2 eru lykiltölur varðandi tilraunina. Helstu niðurstöður voru þessar:

Aflestrar af stikunum fjórum gefa mjög svipaða niðurstöðu um þynningu vetrarlagsins og er niðurstaðan fyrir viðbótarstikurnar þrjár innan óvissumarka aflesturs af aðalstikunni. Sú athyglisverða niðurstaða fæst að stikurnar tvær sem standa á krossviðarplötum virðast síga 6–8 cm um sumarið og aflestrar af þeim varðandi þynningu vetrarlags eru að sama skapi lægri. Þegar mynd 26 er grandskoðuð sést að holrými hefur myndast ofan við krossviðarplöturnar, sem tvær stikanna standa á, og bendir það til sigs þessara stika líkt og tölurnar, sem nefndar voru hér að ofan. Ekki sjást þess hins vegar merki að stikurnar tvær, sem standa á hinum hefðbundnu trékeilum,



Mynd 22. Stikurnar fjórar, sem settar voru niður í punktinum HN16 þann 1. maí 2014. Myndin er tekin í haustferðinni, þann 10. okt. Myndin er tekin til norðurs og er aðalstíkan lengst t.v. en samanburðarstíkurnar hægra megin við hana. Tvær þeirra eru álstíkur samskonar og aðalstíkan en ein er gul plaststíka og er nýsnævi um haustið tekið að slíga hana.



Mynd 23. Ein samanburðarstíkanna var látin standa á trékeilu (stíkan t.v.) en hinar tvær á kringlóttri krossviðarplötu (álstíkan í miðið og plaststíkan til hægri). Þvermál trékeilu er hið sama og álstíkunnar, 3.2 cm, en þvermál krossviðarskífunnar 6 cm. Aðalstíkan stóð á trékeilu líkt og stíkur í öðrum mælipunktum á jöklinum.



Mynd 24. Horft ofan í 2.5 m djúpa gryfju sem grafin var í haustferðinni 2014 til þess að kanna mögulega hliðrun á stikunum uppávið eða niðurávið um sumarið.



Mynd 25. Hausthvörfin 2014 í gryfjunni, um miðbik myndarinnar. Neðan þeirra er vetrarlagið 2013–2014, sem sýnir ummerki hlýnunar og umbreytingar snævarins um sumarið, auk bráðnunar á yfirborði sem myndar íslinsur í snjónum. Ofan hausthvarfa er nýsnævi sem féll í september og í októberbyrjun 2014. Á myndinni má sjá sag, sem sett var í borholurnar að vori og er það mest áberandi kringum stikuna lengst t.h. Sjá nánari skýringar í texta.



Mynd 26. Stikufætur í haustferð 2014. Greina má holrými ofan við báðar krossviðarskífurnar (plaststíkan t.v. og álstíkan í miðið).

Tafla 2. Niðurstöður stikutilraunar. Allar tölur eru í cm. Stíkur 1–3 eru úr áli en stíka 4 er úr plasti.

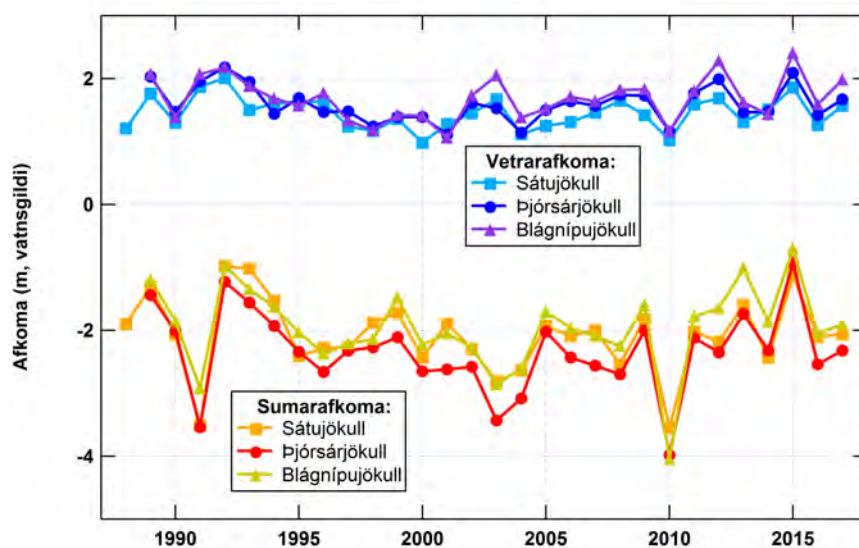
Stíka	Hæð stíku- topps yfir jökulyfir- borði í vorferð	Dýpi á neðri enda stíku	Frágangur neðri enda	Hæð stíku topps í haust- ferð	Aðstæður við neðri enda í haust- ferð	Lækkun vetrarlags skv. aflestrum vor og haust
1	104	496	Trékeila	310		206
2	98	362	Trékeila	306		208
3	106	354	Tréplata	307	holrými	201
4	107	353	Tréplata	307	holrými	200

hafi sigið um sumarið. Þess ber þó að geta að trékeilurnar hafa sama þvermál og álstíkurnar og því er mun erfiðara að greina möguleg merki þess að þær hafi sigið.

Ekki verða að sinni dregnar víðtækar ályktanir af þessari fyrstu tilraun, enda heppnaðist hún ekki að öllu leyti. Hún bendir þó ekki til að stíkusig sé umtalsvert vandamál á ákomusvæðinu.

7.4 Afkoma á ísasviðum Sátu-, Þjórsár- og Blágnjúkjökuls 1988–2017

Mynd 27 sýnir mælda vetrar- og sumarafkomu á ísasviðunum þrem á Hofsjökli frá upphafi mælinga. Allar tölur tákna vatnsgildi í metrum. Breytileiki í vetrarafkomu er áþekkur á mismunandi svæðum jökulsins en virðist þó áberandi minnstur á Sátujökli; þar er vatnsgildi vetrarafkomu



Mynd 27. Vetrar- og sumarafkoma Sátu-, Þjórsár- og Blágnípujökuls frá upphafi mælinga 1988 og 1989 til 2017.

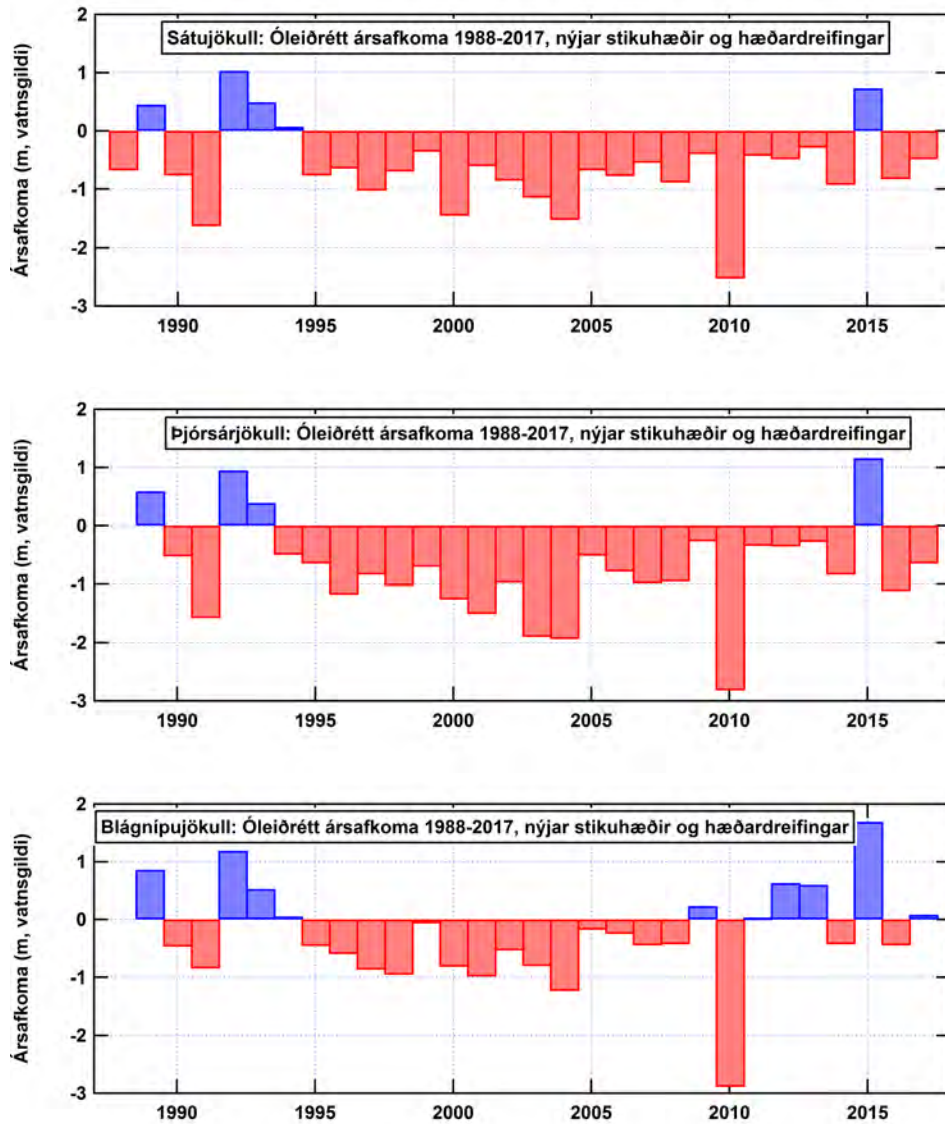
á bilinu $1-2 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$ yfir allt tímabilið. Vetrarafkoman mælist 6 sinnum um eða yfir 2 metrar á Blágnípujökli, mest 2.7 m. Að jafnaði er vetrarafkoma mest á Þjórsárjökli. Vetrarafkoma er í meira lagi m.v. langtímameðaltalið á árabílinu 1989–1993 en fer svo heldur minnkandi til 2000. Eftir 2000 verður vart lítils háttar aukningar, þótt ekki sé hún stöðug.

Breytileiki sumarafkomu er nokkuð meiri og tvö ár skera sig úr: 1991 og 2010. Þessi sumur voru bæði hlý og einnig gætur þarna verulegra aukinnar leysingar af völdum eldfjallagjóska sem féll á jökulinn, frá Heklu 1991 og Eyjafjallajökli 2010. Að jafnaði er leysing mest á Þjórsárjökli en minnst á Sátujökli, sem snýr á móti norðri.

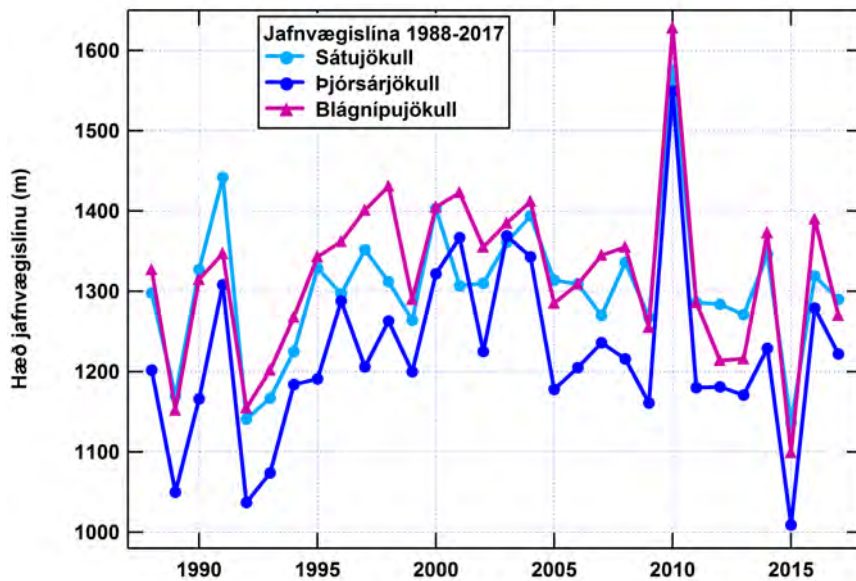
Á mynd 28 hefur svo vetrar- og sumarafkoma verið lögð saman á ísasviðunum þrem og fæst þá ársafkoma hvers jökulárs fram til 2017. Afkoman er jákvæð á öllum ísasviðunum árin 1989, 1992 og 1993 en frá 1995 er afkoman neikvæð eða mjög nálægt núlli á 20 ára skeiði fram til 2014. Þá kemur áberandi jákvætt jökulár 2014–2015 sem skýrist af óvenju mikilli vetrarákomu og lítilli leysingu sumarið á eftir. Árin 2016 og 2017 var afkoman neikvæð á ný. Þessar niðurstöður hafa ekki verið leiðréttar fyrir hliðrun í stikugögnum sem fjallað er um í kafla 10.

Mynd 29 sýnir sveiflur í hæð jafnvægislínu á Sátujökli, Þjórsárjökli og Blágnípujökli. Flest árin liggur jafnvægislínan á móta hátt á Sátujökli og Blágnípujökli og er hún að jafnaði 100 m ofar en á Þjórsárjökli. Skýrist munurinn aðallega af meiri vetrarákomu á neðanverðum Þjórsárjökli og Blágnípujökli. Breytileiki er verulegur og neðst fer jafnvægislínan í 1010 m á Þjórsárjökli (1992) en hæst í um 1550 m (2010). Meðaltalshæð jafnvægislínu á ísasviðunum þrem er gefin í töflu 3 ásamt hæð jafnvægislínunnar síðustu þrjú árin.

Mynd 30 sýnir samhengi mældrar ársafkomu og hæðar jafnvægislínu á jöklunum þremur. Línurnar sem dregnar eru í gegnum mælingarnar sýna meðalsamband ársafkomu, B_a í $\text{m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$, og



Mynd 28. Ársafkoma Sátu-, Þjórsár- og Blágnípujökuls frá upphafi mælinga 1988 og 1989 til 2017. Afkoman er hér ekki leiðrétt fyrir einhliðaskekkju sem um er fjallað í kafla 10. Leiðrétt afkoma er sýnd á mynd 43.



Mynd 29. Hæð jafnvægislínu á Sátujökli, Þjórsárjökli og Blágnípujökli frá upphafi mælinga 1988 til 2017. Við útreikning á hæð jafnvægislínu er afkoman ekki leiðrétt fyrir einhliðaskekkju sem um er fjallað í kafla 10.

Tafla 3. Hæð jafnvægislínu á Sátujökli, Þjórsárjökli og Blágnípujökli 2015–2017 og að meðaltali 1989–2017. Við útreikning á hæð jafnvægislínu er afkoman ekki leiðrétt fyrir einhliðaskekkju sem um er fjallað í kafla 10.

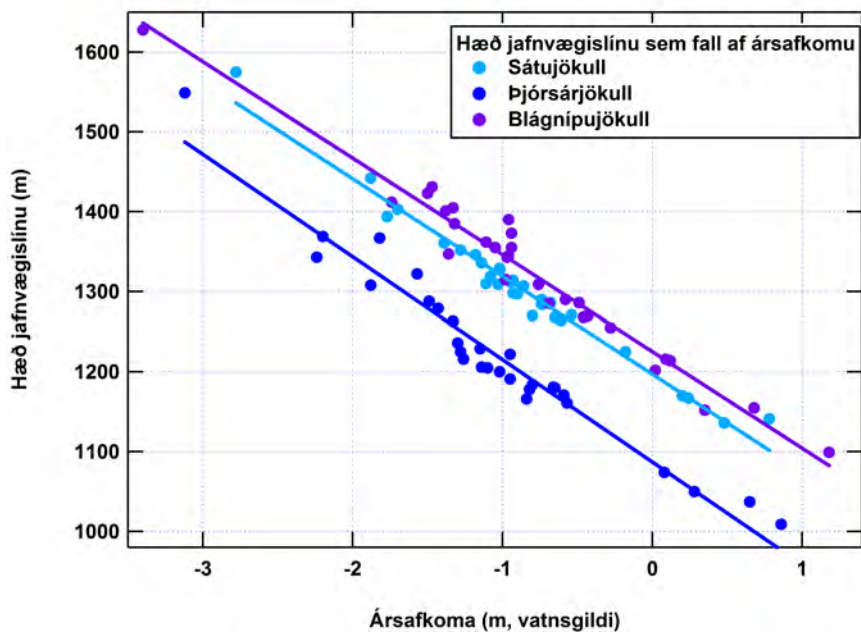
Jafnvægislína	Sátujökull	Þjórsárjökull	Blágnípujökull
2015	1135	1010	1100
2016	1320	1280	1390
2017	1290	1220	1270
Meðaltal 1989–2017	1305	1220	1320

hæðar jafnvægislínu, z_{ELA} , á jöklunum eru

$$\text{Sátujökull: } z_{ELA} = 1197 - 122B_a$$

$$\text{Þjórsárjökull: } z_{ELA} = 1087 - 128B_a$$

$$\text{Blágnípujökull: } z_{ELA} = 1225 - 121B_a .$$



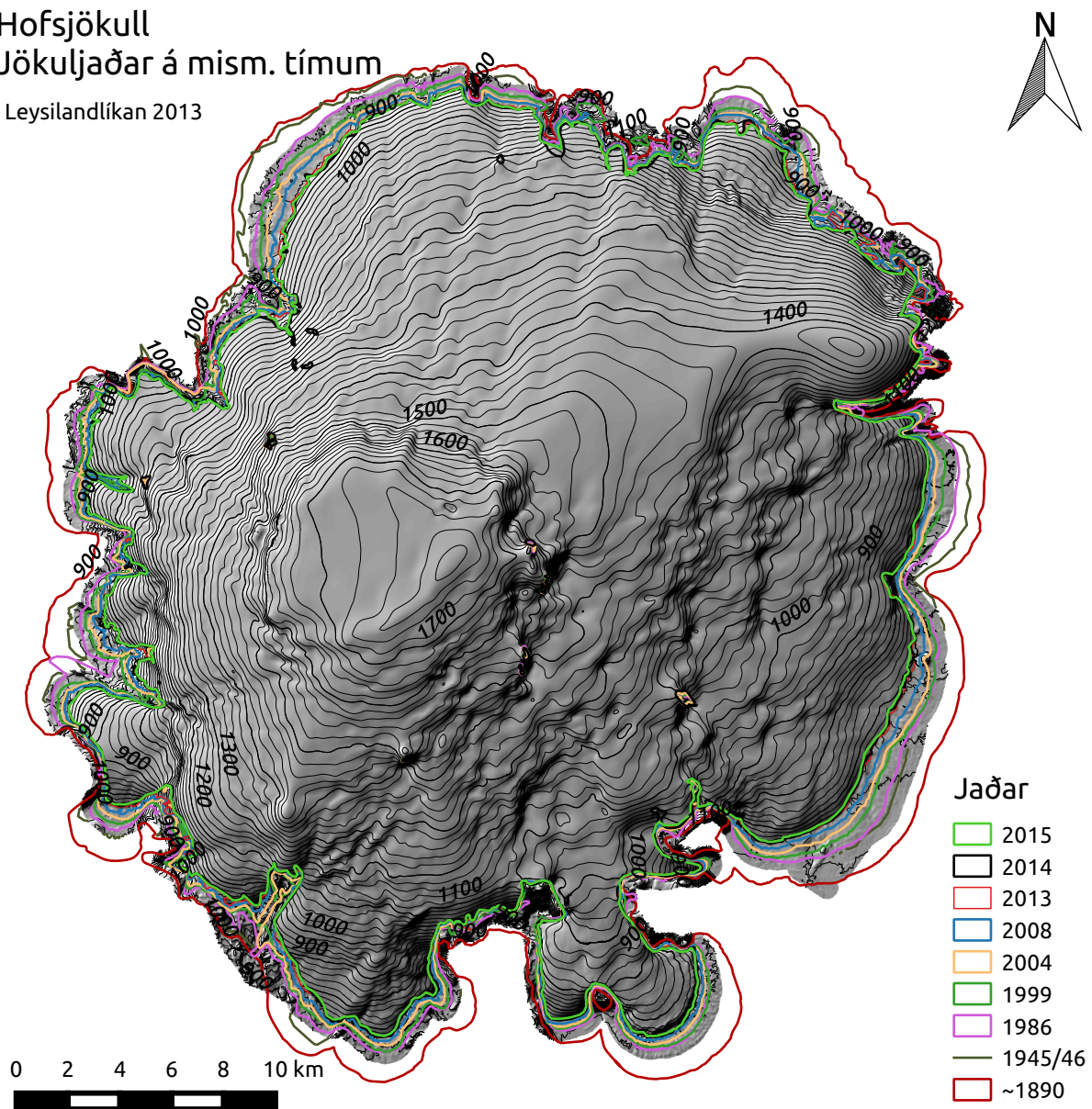
Mynd 30. Hæð jafnvægislínu á Sátujökli, Þjórsárjökli og Blágnípujökli frá upphafi mælinga 1988 og 1989 til 2017 sem fall af ársafkoma. Við útreikning á hæð jafnvægislínu er afkoman ekki leiðrétt fyrir einhliðaskekku sem um er fjallað í kafla 10.

8 Flatarmáls- og rúmmálsbreytingar

Jaðar Hofsjökuls á ýmsum tímum frá mestu útbreiðslu hans undir lok 19. aldar hefur verið ákvarðaður á grundvelli ýmissa gagna, sjá mynd 31 og töflu 4. Mesta útbreiðsla jökulsins afmarkast af jökulgörðum og öðrum ummerkum sem rakin hafa verið á loftmyndum (Oddur Sigurðsson o.fl., 2013). Loftmyndir úr flugvélum, gervihnattamyndir og leysikortlagning hafa verið notaðar til þess að rekja legu jaðarsins á ýmsum tímum síðan þá og hefur flatarmál jökulsins minnkað úr 1038 km² undir lok 19. aldar niður í um 824 km² árið 2015, eða um rúma 200 km². Skölun rúmmáls og flatarmáls (Bahr o.fl., 1997) gefur jafnframt til kynna að rúmmál jökulsins hafi minnkað um u.þ.b. 60 km³ á sama tímabili en það mældist um 200 km³ árið 1983 (Helgi Björnsson, 1988; Helgi Björnsson & Finnur Pálsson, 2008).

Hofsjökull Jökuljaðar á mism. tímum

Leysilandlíkan 2013



Mynd 31. Jaðar Hofsjökuls á mismunandi tímum skv. ýmsum heimildum, sjá nánar töflu 4.

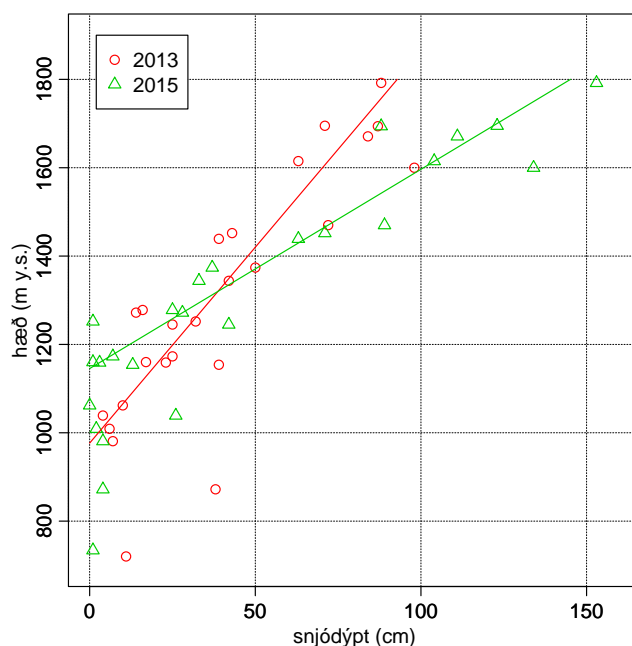
Tafla 4. Flatarmál Hofsjökuls á mismunandi tímum skv. ýmsum heimildum. Afmörkun jökuljaðarsins undir lok 19. aldar er byggð á jarðfræðilegum ummerkjum skv. greiningu Odds Sigurðssonar o.fl. (2013). Flatarmálið 1945/46 er byggð á stöðu jaðarsins þá á nokkrum stöðum skv. loftmyndum miðað við jaðrana ~1890, 1986 og 1999. Misjafnt er hversu langt menn hafa gengið við hnitun jökulskerja og lítilla jökulflekkja utan meginjaðarsins í hverju tilviki. Hér er flatarmálið til samræmis reiknað á grundvelli meginjaðarsins og nær til jökulskerja innan hans. Litlir flekkir utan meginjaðarsins eru ekki teknir með. Þó eru Arnarfell og Hjartafell, sem eru innan meginjaðarsins frá því um 1890 ekki talin með jöklinum. Heildarflatarmál skerjanna, að frátöldu Arnarfelli og Hjartafelli undir lok 19. aldar, er um og undir 1 km² í öllum tilvikum.

Ár	Flatarmál (km ²)	Gögn	Athugasemd
~1890	1038 ^a	Jarðfr. ummerki o.fl.	Skv. Oddi Sigurðssyni o.fl. (2013)
1945/46	~960 ^b	AMS-kort	Síðsumarsloftmyndir
1986	919	DMA-kort	Síðsumarsloftmyndir
1999	890	Myndir frá Loftmyndum ehf.	Síðsumarsloftmyndir
2004	872	SPOT5	Hnitun Eyjólf Magnússonar
2006	868	SPOT	Hnitun Odds Sigurðssonar
2008	852	Lidar	Mælingar TopScan, 3./4.09.2008 ^c
2013	831	Lidar	Mælingar TopScan, 13./14.10.2013
2014	825	Myndir frá Loftmyndum ehf.	Skv. Daða Björnssyni (2015)
2015	824	ArcticDEM	Myndir frá 10.10.2015 og 09.11.2015

^a Án Arnarfells og Hjartafells sem samtals eru 2.6 km²

^b Mat á grundvelli slitróttis jaðars

^c Fyllt upp í með gögnum frá 18./19.7.2010 á norðaustanverðum jöklinum.



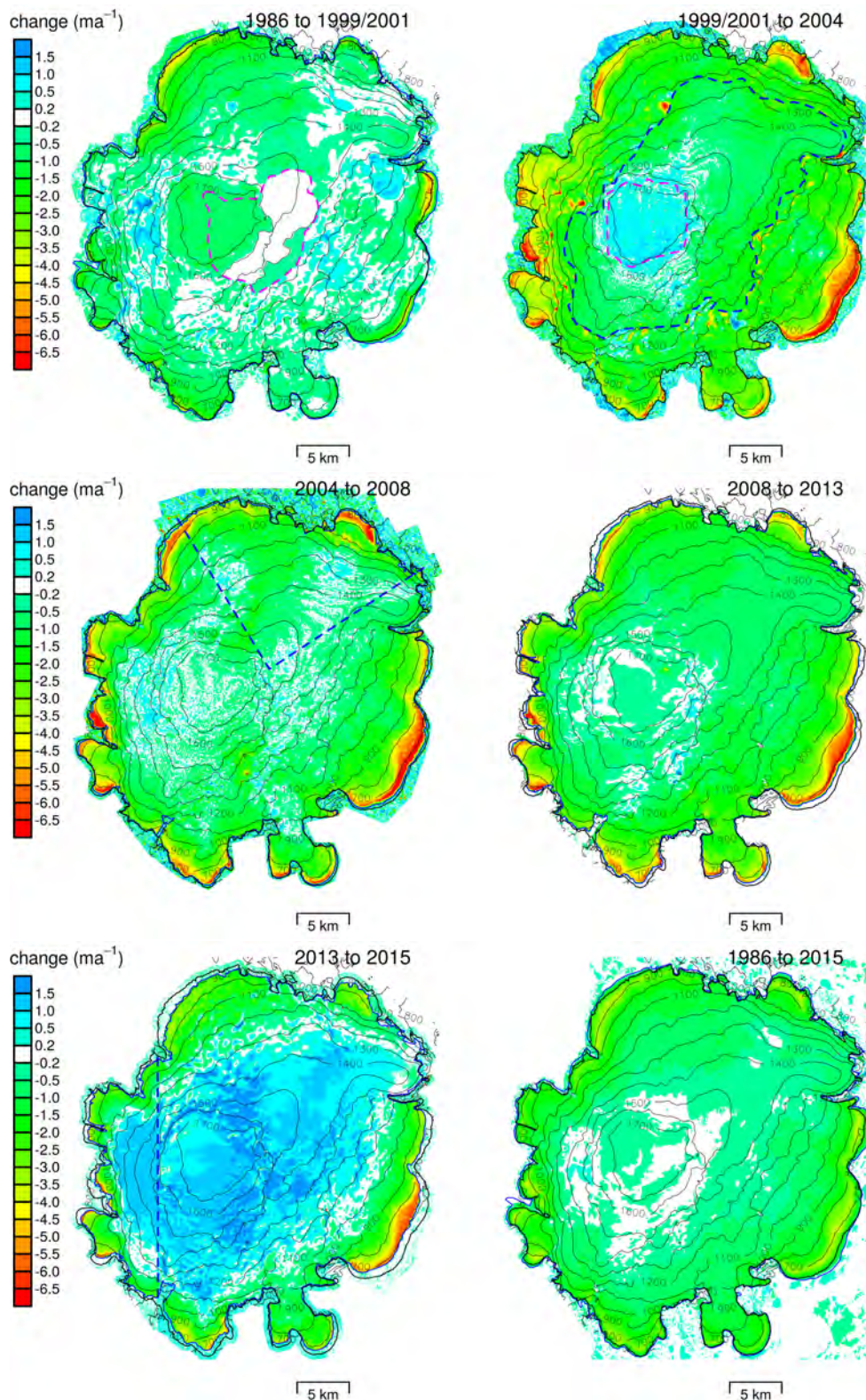
Mynd 32. Snjódypt á stikum á Hofsjökli í haustferðum 2013 og 2015 sem fall af hæð yfir sjó.

Landlíkön sem lýst er í kafla 4 má nota til þess að reikna breytingu í rúmmáli jökulsins á tímabilunum sem þau spanna. Rúmmálsbreytingarnar má síðan nota til þess að reikna afkomu jökulsins á viðkomandi tímabili að gefnu mati á meðaleðlisþyngd rúmmálsbreytingarinnar sem hér er miðað við að sé 850 kg m^{-3} (Huss, 2013). Þá er gert ráð fyrir að þykkt og eðlisþyngd snjó- og hjarnlaga síðsumars sé svipuð þó að rúmmál jökulsins breytist þannig að meðaleðlisþyngd rúmmálsbreytingarinnar sé nærri eðlisþyngd íss sem er um 900 kg m^{-3} .

Ekki er í reikningum á landlíkanafkomu hér leiðrétt fyrir mismun í tímasetningu mælinganna innan ársins nema hvað þykkt nýsnævis sem fall af hæð yfir sjó samkvæmt mælingum í haustferðum VÍ þann 8. og 9. október 2013 og 7. og 8. október 2015 er dregin frá landlíkönunum frá október 2013 og október 2015, sjá mynd 32 (þykktin var tæplega 1 m ofarlega á ákomusvæðinu haustið 2013 og tæplega 1.5 m haustið 2015 en óveruleg neðan jafnvægislínu í báðum tilvikum).

Flatarmál, breyting á rúmmáli íss, meðalhæðarbreyting í metrum íss og meðalafkoma í metrum vatnsgildis á ári fyrir ísasvið Hofsjökuls fyrir tímabilin 1986–1999, 1999–2004, 2004–2008, 2008–2013 og 2013–2015 eru sýnd í töflu 5 í viðauka I. Meðalafkoma hvers ísasviðs fyrir þessi tímabil er jafnframt sýnd á myndum 47–51 í viðaukanum ásamt auðkennisnúmeri ísasviðanna. Meðalafkoma ísasviðanna fyrir tímabilið 1999–2008 er sýnd á mynd 52. Óvissa í mati á meðalafkomu tímabilanna er í flestum tilvikum $0.15\text{--}0.3 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$ en um $0.15 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$ fyrir 2008–2013 og fyrir lengra tímabilið 1999–2008. Mynd 33 sýnir að hæðarbreytingin er mest nærri jaðri jökulsins og minni ofar.

Fram kemur í töflunni að flatarmál jökulsins (flatarmál jökulskerja er ekki dregið frá) minnkaði úr 919 í 824 km^2 frá 1986 til 2015 og minnkaði rúmmál jökulsins um 22.5 km^3 á sama tímabili.



Mynd 33. Meðalbreyting í hæð yfirborðs Hofsjökuls, reiknuð í metrum íss á ári fyrir tímabilin 1986–1999/2001, 1999/2001–2004, 2004–2008, 2008–2013 og 2013–2015 og að meðaltali fyrir allt tímabilið 1986–2015. Myndartexti heldur áfram efst á næstu blaðsíðu.

Mynd 33, framhald skýringar: Hæðarlínur yfirborðsins eru byggðar á leysikorti frá 2008. Jaðar jökulsins árið 1999 er sýnd með svartri línu. Jaðar jökulsins á fyrra ári viðkomandi tímabils er sýnd með blárri línu (nema fyrir tímabilið 1999/2001–2004). Slitinn ferill á myndinni fyrir 1986–1999/2001 sýnir svæði þar sem DMA kortið frá 1986 er ekki ábyggilegt. Slitnu ferlarnir á myndinni fyrir 1999/2001–2004 sýna hvar landlíkanið frá 1999/2001 er byggt á GPS-mælingum árið 2001 (efst á jöklinum), flugmyndum Loftmynda ehf. (leysingarsvæðið neðan neðri slitnu línunnar) og mati á grundvelli annarra mælinga. Slitinn ferill á myndinni fyrir 2004–2008 sýnir mörk leysimælinganna 2008 og 2013. Slitinn ferill á myndinni fyrir 2013–2015 sýnir vesturmörk ArcticDEM landlíkananna sem tiltæk voru frá haustinu 2015. Vestan þeirra var landlíkanið 2015 metið á grundvelli leysimælingarinnar 2013 og hæðarbreytingarinnar frá 2013 til 2015 annars staðar á jöklinum.

Hlutfallsleg minnkun flatarmáls er sambærileg á mismunandi ísasviðum. Rýrnun jökulsins var um þrefalt hraðari eftir 1999 ($-1.06 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$) en fyrir þann tíma ($-0.39 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$).

Rýrnun jökulsins á mismunandi ísasviðum er í aðalatriðum sambærileg þegar tekið er tillit til óvissu í yfirborðsmælingunum. Óvissan er minnst fyrir tímabilið 2008–2013, þegar leysimæling er notuð í báðum tilvikum, og fyrir tímabilið 1999–2008 (ekki sýnt á korti) vegna þess að landlíkönin frá 1999 og 2008 eru nákvæmari en frá 1986 og 2004 og tímabilið er tiltölulega langt. Dálkur fyrir afkomu aftarlega í töflu 5 og mynd 50 sýna að fyrir tímabilið 2008–2013 er meðalafkoma ísasviðanna í flestum tilvikum á bilinu -1.0 til $-1.5 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$ og sama gildir fyrir tímabilið 1999–2008. Rýrnun skriðjökla til norðurs virðist heldur hægari en skriðjökla til austurs, suðurs og vesturs. Þessi mismunur er reyndar ekki miklu meiri en sem nemur óvissu í mælingunum en mismunurinn kemur fram fyrir bæði tímabilin og með nokkuð reglulegum hætti eftir staðsetningu ísasviðanna þannig að hann er líklega raunverulegur. Á svæðum 5–8 á vesturhlið jökulsins (Blágnípujökull til Álftabrekkujökuls) kemur fram mismunur á rýrnun jökulsins milli tímabilanna 1999–2008 og 2008–2013 þannig að árleg rýrnun þessara jökla er nokkru hraðari á fyrra tímabilinu þrátt fyrir að rýrnun Hofsjökuls alls sé annars mjög sambærileg á þessum tímabilum. Ekki er ljóst hvort þessi munur kemur til af óvissu í mælingunum eða hvort raunverulega hefur verið slíkur munur í afkomu jökulsins milli svæða á þessum tímabilum. Afkoma hinna mismunandi ísasviða jökulsins á tímabilinu 2013–2015 er nærri núlli þegar tekið er tillit til óvissu enda var afkoma jökulársins 2014/15 jákvæð en neikvæð árið áður. Rétt er að hafa í huga að framhlaup í Þjósárjökli og Múlajökli og ef til vill í Blautukvíslarjökli geta haft áhrif á hversu hratt skriðjöklnir bregðast við breytingum í afkomu og kunna framhlaup að skýra hluta munarins í landlíkanafkomu milli svæða sem hér hefur verið nefndur.

Þegar rýnt er í afkomutölur svæðanna á hinum tímabilunum kemur í nokkrum tilvikum fram nokkuð mikil breyting á einu tímabili sem kallast á við minni breytingu á tímabilinu á undan eða eftir og kann þetta að skýrast af skekkju í landlíkönunum í einhverjum tilvikanna. Tiltölulega mikil rýrnun Þjósárjökuls kann að stafa af framgangi í jöklinum árin 1992 og 1994. Rýrnun jökulsins virðist hafa verið heldur meiri á tímabilinu 1999–2004 en 2004–2008. Þessi munur er sambærilegur við óvissu mælinganna og stafar að miklu leyti af mismun í mati á breytingu yfirborðshæðar á efri hluta leysingarsvæðisins og neðri hluta ákomusvæðisins (sjá mynd 33). Ekki þarf mikla einhliðaskekkju á þessu stóra svæði til þess að skýra mikinn hluta þessa mismunar og verður því að gera ráð fyrir þessi mismunur gæti að hluta eða öllu leyti verið til kominn vegna mæliskekkju. Að öðru leyti gefur gott samræmi í tölunum í töflu 5, að teknu tilliti til óvissu

mælinganna, til kynna að nákvæmni landlíkananna sé nokkuð góð og ísasviðin virðast bregðast sambærilega við hlýnun undanfarinna tveggja til þriggja áratuga. Þetta bendir til þess að matið á rýrnun Hofsjökuls á hinum mismunandi tímabilum og ísasviðum sé ábyggilegt.

9 Snjósjármælingar

Eins og nánar er rætt í næsta kafla virðast niðurstöður hefðbundinna afkomumælinga vanmeta rýrnun Hofsjökuls í samanburði við niðurstöður gervitungla- og leysimælinga (landlíkanafkoma). Möguleg skýring á þessu misræmi er að vetrarafkoma sé ofmetin með borunum og stikumælingum, annar er sá að leysing sé vanmetin. Einnig gæti verið um að ræða framlög beggja þessara þátta. Sold o.fl. (2016) leggja áherslu á að ná ítarlegum mælingum á dreifingu vetrarafkomu með snjósjá (e: ground-penetrating radar) til samanburðar við niðurstöður snjóborana og stikumælinga.

Til þess að skilja betur orsök hliðrunarvandans á Hofsjökli var ráðist í samfelldar mælingar á þykkt vetrarsnævar með snjósjá á völdum sniðlínnum á Hofsjökli. Þar var annars vegar um að ræða mælingar á sniðum sem liggja um hina hefðbundnu mælipunkta og gefa því kost á nákvæmum samanburði. Einnig var mælt á vatnasviði Blöndu og Austari-Jökulsár, auk sniða á Blautukvíslarjökli og Múlajökli og á suðvestanverðum Þjórsárjökli. Lengd snjósjárnsniða, sem mæld voru í vorferð 2015 var samtals 184 km og í vorferð 2016 voru mældir alls 275 km. Niðurstöður hafa verið kynntar í tveim áfangaskýrslum til Orkurannsóknasjóðs Landsvirkjunar (Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2016a,b) og eru aðalatriði þeirra rakin hér.

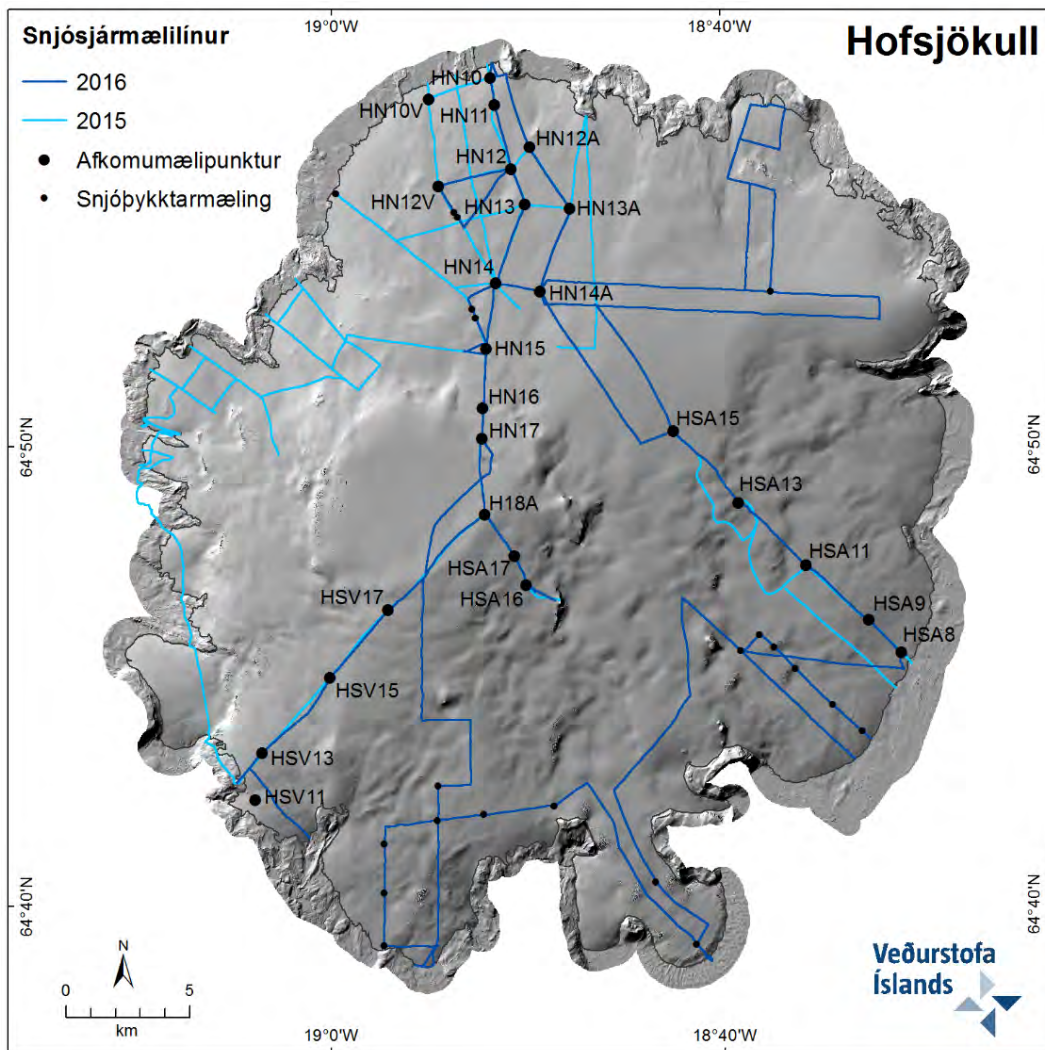
9.1 Snjósjáin og mælinúr

Snjósjáin er af gerðinni IceMap og er sérstaklega þróuð til að mæla þykkt lagnaðaríss en hefur einnig reynst vel við mælingar á snjóþykkt við ýmsar aðstæður (sjá www.senssoft.ca/Products/IceMap/Overview.aspx). Um er að ræða hefðbundna bergmálmælingu með rafsegulbylgjum og er notast við tíðnina 500 MHz. Í tækinu er allt sambyggt: Senditæki, loftnet og GPS-tæki sem skráir staðsetningu jafnóðum og mælt er. Tækinu er komið fyrir á sérstakri þotu sem dregin er af vélsleða og er snjósjáinni stýrt með tölvu sem er í þráðlausu sambandi við mælitækið. Að jafnaði er tekin ein mæling á um 0.4 m fresti.

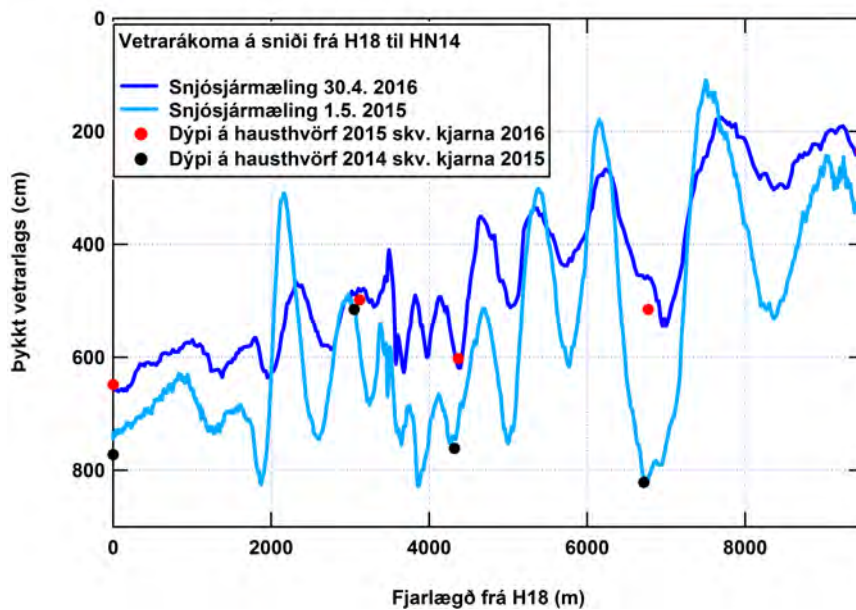
Hraði rafsegulbylgna í snjó er háður eðlisþyngd snævarins og þarf því að kvarða bylgjuhraðann sérstaklega í hverri mæliferð vegna breytileika í eðlisþyngd á milli ára (sbr. kafla 7). Snjóþykkt er þekkt á borstöðum og reiknast hraðinn út frá henni og mældum ferðatíma bylgjunnar. Við kvörðun í vorferð 2015 fékkst bylgjuhraðinn 214 m/s en 208 m/s vorið 2016. Vísað er í ofangreindar áfangaskýrslur um nánari lýsingu á snjósjármælingunum og úrvinnslu gagnanna með þar til gerðum forritum. Kort af mælinúnum, sem eknar voru með snjósjáinni, er sýnt á mynd 34.

9.2 Niðurstöður

Mynd 35 sýnir mælda snjóþykkt á sniðinu milli punktanna H18 og HN14, þ.e. syðri hluta mælinunnar á Sátujökli. Sýndar eru niðurstöður mælinga í vorferðum 2015 og 2016. Framkoma mjög miklar sveiflur í snjóþykktinni, með öldulengd nálægt 1 km og er lega þeirra á sniðinu svipuð bæði árin. Athyglisvert er að útslag sveiflunnar er mun meira eftir hinn snjóþunga vetur 2014/15 og virðist sem tilflutningur með skafrenningi hafi haft mun meiri áhrif á snjódreifinguna þann vetur en hinn síðari. Mjög áberandi er hvernig tveir stikumælipunktar, HN16 í um 4300 m fjarlægð frá H18 og HN15 í um 6700 m fjarlægð frá H18, eru í staðbundnum snjóþykktarhámörkum. Til viðbótar kemur sá vandi á Sátujökli að þessi hluti N–S mælinunnar, milli HN14 og H18, liggur í raun utan við sjálft ísasvið Sátujökuls, sjá mynd 36 en lega ísaskila á jöklinum á þessu svæði var ekki vel þekkt í upphafi mælinganna. Jökullinn er sprunginn ofar-



Mynd 34. Snjósjármælilínur á Hofsjökli 2015 og 2016.



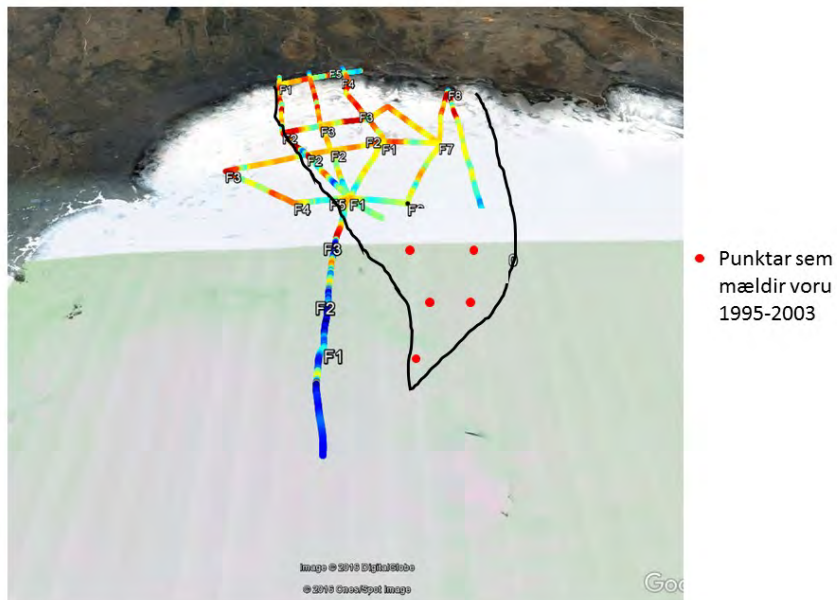
Mynd 35. Snjósjárnsnið frá H18 (lengst t.v.) til HN14 (lengst t.h.) á Sátujökli.

lega á ísasviðinu og eru mælipunktur staðsettir á nokkuð öruggri leið sem liggur beint upp í H18. Til eru þó nokkrar mælingar frá árabílinu 1995–2003, þegar fært var með varúð í punkta á efri hluta ísasviðs Sátujökuls. Þegar þær eru bornar saman við mælingar á meginlínunni kemur í ljós að niðurstöður frá henni ofmeta vetrarafkomu á efri hluta ísasviðsins, sjá mynd 37. Þegar þessu ofmati á vetrarafkomunni er jafnað yfir allt ísasviðið er niðurstaðan sú að *vetrarafkoma á ísasviði Sátujökuls hafi verið ofmetin um $0.2 m_{vatns} a^{-1}$.*

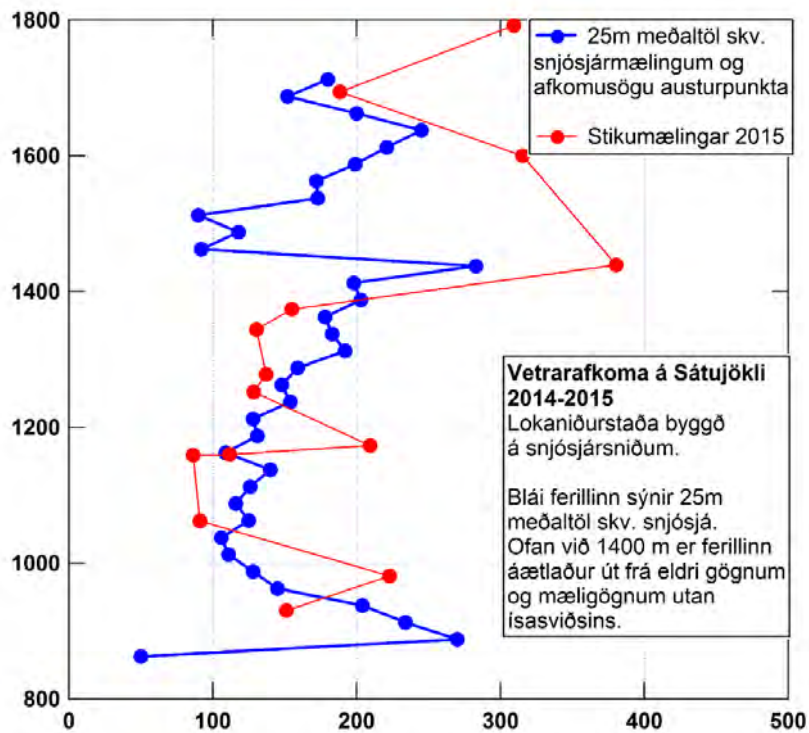
Næst er litið á Blágnjúpjökul og er samfelldur snjóþykktarferill 2015 eftir mælingunni sýndur á mynd 38 (til vinstri) ásamt mæligildum úr snjóborunum í hinum föstu punktum. Á þessu sniði er enn meira áberandi hvernig a.m.k. 3 hinna 5 föstu borpunkta liggja í staðbundnum snjóþykktarhámörkum. Mynd 38 (til hægri) sýnir hvernig besta lína gegnum vetrarafkomugildi úr snjókjörnum er talsvert hliðruð miðað við afkomuferilinn sem reiknast út frá snjósjarmælingunni. Mjög svipuð niðurstaða fékkst 2016 og fyrir Blágnjúpjökul reiknast *ofmat á vetrarafkomu af þessum sökum um $0.3 m_{vatns} a^{-1}$.*

Mynd 39 sýnir legu þriggja samsíða snjósjárnsniða á Þjórarárjökli og liggur nyrsta sniðið (Thjór-07) um hina föstu mælipunkta. Snjóþykktir á sniðunum þrem eru sýndar á mynd 40. Álykta má að nyrsta sniðið sýni meiri snjóþykkt en hin tvö allt að 7000 m vegalengd upp frá jaðrinum og gefi því ekki fyllilega rétta mynd af snjódreifingunni um allt ísasvið. Gögnin benda til að mælingar í stikustöðum *ofmeti vetrarafkomu á Þjórarárjökli um $0.1 m_{vatns} a^{-1}$.*

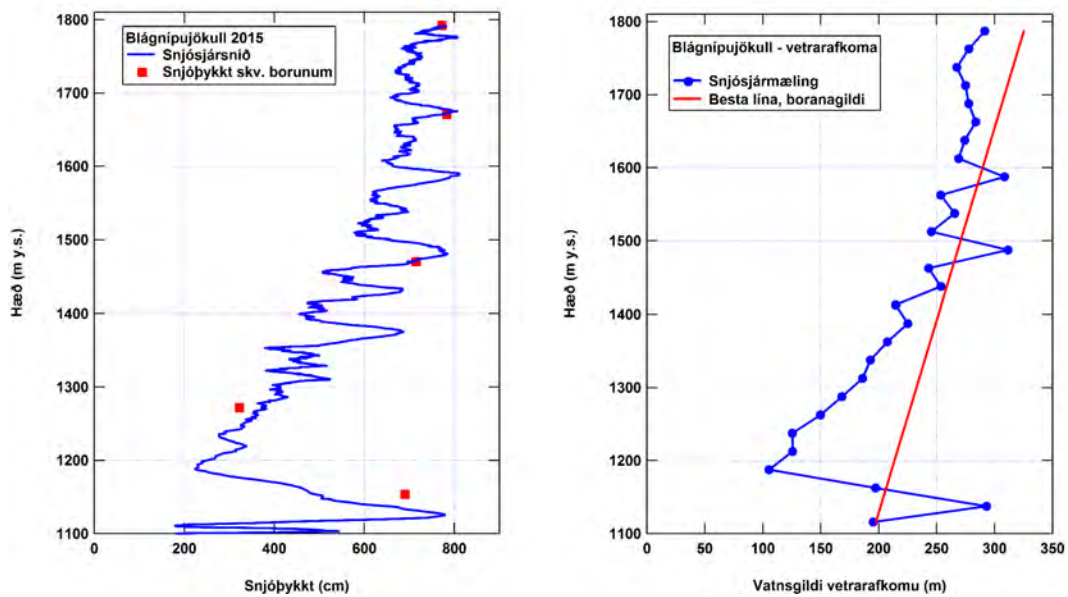
Rétt er að hafa í huga að snjósjárnlínurnar sýna takmarkaðan hluta af hverju ísasviði og gefur auga leið að dreifing vetrarafkomu þvert á snjósjárnlínurnar getur breytt tölunum sem tilgreindar eru hér að ofan fyrir ofmat á vetrarafkomu á Sátu-, Þjórarár- og Blágnjúpjökli. Þær gefa þó skýra vísbendingu um stærðarþrep þessa skekkjubáttar og mismun á ofmatinu milli mælisvæða á jöklinum.



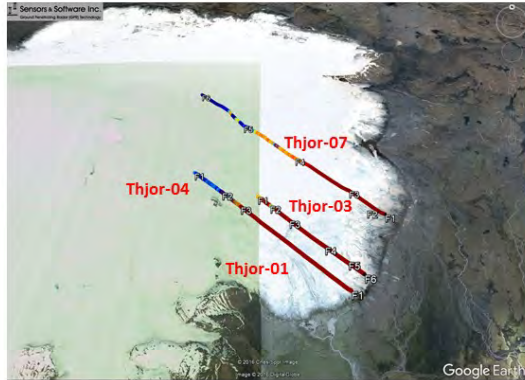
Mynd 36. N–S snjósmælilínan á Sástujökli, útlínur ísasviðs Sástujökuls (gróflega dregnar) og lega punkta, þar sem afkoma var mæld 1995–2003.



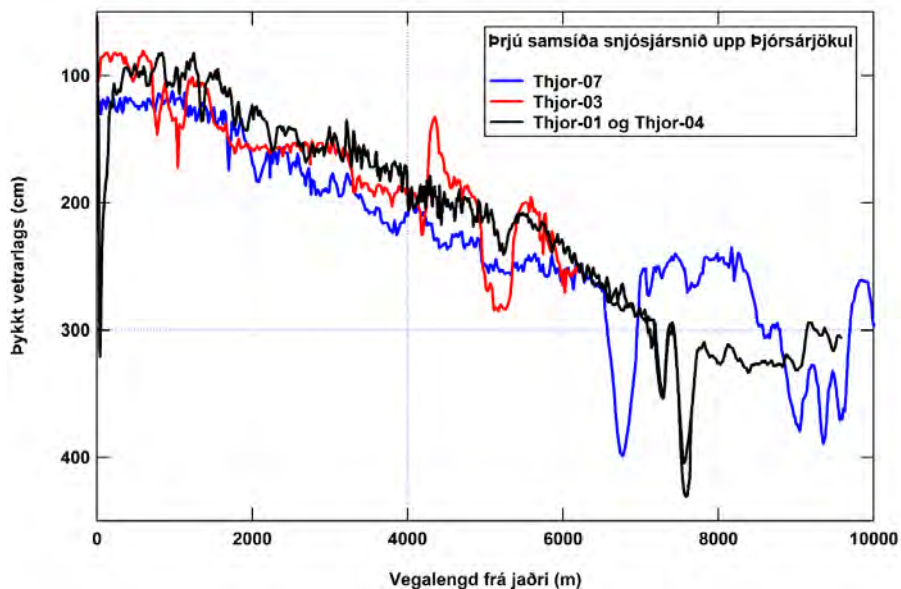
Mynd 37. Rauða línan sýnir vetrarafkomu á N–S línunni á Sátuþjökli skv. stikumælingum. Þegar söguleg gögn um afkomu frá 1995–2003 á efri hluta ísasviðsins (rauðlitaðir punktar á mynd 36) eru höfð til hliðsjónar fæst réttara mat á vetrarafkomu fyrir þetta hæðarbil ísasviðsins (bláa línan, 25 m meðaltöl).



Mynd 38. Snjósjársnið og punktmælingar á Blágnípuþjökli.



Mynd 39. Lega þriggja samsíða sniða upp eftir Þjósárjökli sem mæld voru í vorferð 2016. Syðsta sniðið er samsett úr tveimur sniðum: Thjor-01 (mælt 29.4.) og Thjor-03 (mælt 1.5.). Hin tvö voru bæði mæld 1.5.



Mynd 40. Snjóþykkt á sniðunum þremur á Þjósárjökli sem sýnd eru á mynd 39. Sniðin Thjor-01 og Thjor-04 (svört) eru á sömu línu og skarast á bilinu $x = 6200\text{--}7200$ m.

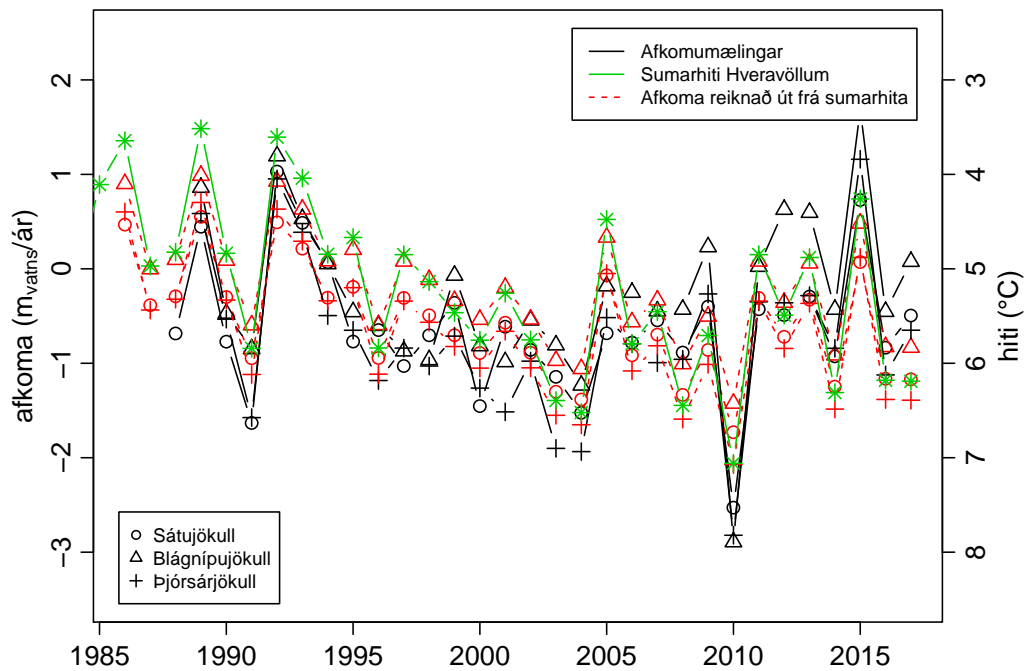
10 Samanburður hefðbundinna afkomumælinga og rúmmálsbreytinga jökulsins

Þegar Hofsjökull var kortlagður með leysimælingum haustið 2008 og þær mælingar bornar saman við fyrri landlíkön frá 1986, 1999 og 2004 kom í ljós að afkomumælingar gáfu til kynna minni breytingar á rúmmáli jökulsins en landlíkönin sýndu (Tómas Jóhannesson o.fl., 2013). Í greiningu á breytingum íslenskra jökla frá lokum litlu ísaldar til ársins 2010 (Helgi Björnsson o.fl., 2013) var á grundvelli leysimælingarinnar miðað við að leiðrétta þyrfti afkomumælingarnar um $-0.4 m_{\text{vatns}} a^{-1}$, og var gert ráð fyrir því að leiðréttingin væri hin sama á hinum mismunandi ísasviðum sem afkomumælingarnar ná til. Snjósjarmælingar 2015 og 2016 sýna einnig að stikur afkomumælingans hafa tilhneigingu til þess að vera þar sem snjór safnast í skafrenningi (Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2016a,b) eins og nánar er lýst í kafla 9 hér að framan.

Greining á afkomu jökla með landlíkönunum hefur á síðari árum leitt í ljós að veruleg einhliðaskekkja er algeng í hefðbundnum afkomumælingum (Andreassen o.fl., 2016) og hafa verið lagðar fram tillögur að verklagsreglum um leiðréttingu hefðbundinna afkomumælinga á grundvelli landlíkana og mælt með því að slíkar leiðréttingar verði almennt þáttur í afkomumælingum á jöklum (Zemp o.fl., 2013). Í grein Andreassen o.fl. kemur fram að í 21 tilfelli þar sem hefðbundnar afkomumælingar hafa verið bornar saman við landlíkanafkomu, fyrir 10 jökla þar sem reglulegar afkomumælingar hafa farið fram um árabíl, reynist einhliðaskekkja á bilinu -0.58 til $+0.52 m_{\text{vatns}} a^{-1}$. Þar af voru 9 tilvik, eða tæpur helmingur, með skekkju sem að tölugildi var $>0.25 m_{\text{vatns}} a^{-1}$. Skekkjan hefur jafnframt tilhneigingu til þess að vera svipuð fyrir mismunandi tímabil á sama jöklinum. Þannig er líklegt að stikunetið leiði í hverju tilviki til ákveðinnar einhliðaskekkju sem ræðst af því hvort stikur hafi lent á stöðum þar sem snjósöfnun eða leysingaraðstæður víkja frá meðaltali fyrir stærra svæði sem gert er ráð fyrir að stíkan sé dæmigerð fyrir í úrvinnslu.

Hér verður afkoma samkvæmt landlíkönunum af Hofsjökli frá 1986, 1999, 2004, 2008, 2013 og 2015 borin saman við niðurstöður hefðbundinna afkomumælinga frá upphafi og lagt mat á einhliðaskekkju fyrir hvert hinna þriggja mælisvæða sem afkomumælingarnar ná til. Þar sem fyrsta landlíkanið, frá árinu 1986, er frá því ári áður en afkomumælingar hófust á Sátujökli og tveimur árum áður en afkomumælingarnar hófust á Blágnípu- og Þjórsárjökli þarf að meta afkomu jökuláranna 1986/87, fyrir alla jöklana, og 1987/88, fyrir Blágnípu- og Þjórsárjökul, til þess að bera hefðbundnar afkomumælingar saman við landlíkanafkomu á tímabilinu 1986–1999. Unnt er að spá nokkuð vel fyrir um afkomu á Hofsjökli með sumarhita á Hveravöllum eins og sjá má á mynd 41 sem sýnir niðurstöður einfalds línulegs tölfræðilegs líkans af afkomu mældu jöklanna þriggja. Líkanið skýrir 55–70% af kvaðratfráviki ársafkomunnar fyrir jöklana þrjá og er hér notað til þess að meta afkomu jökuláranna sem upp á vantar í samanburði við landlíkanafkomu fyrir tímabilið 1986–1999.

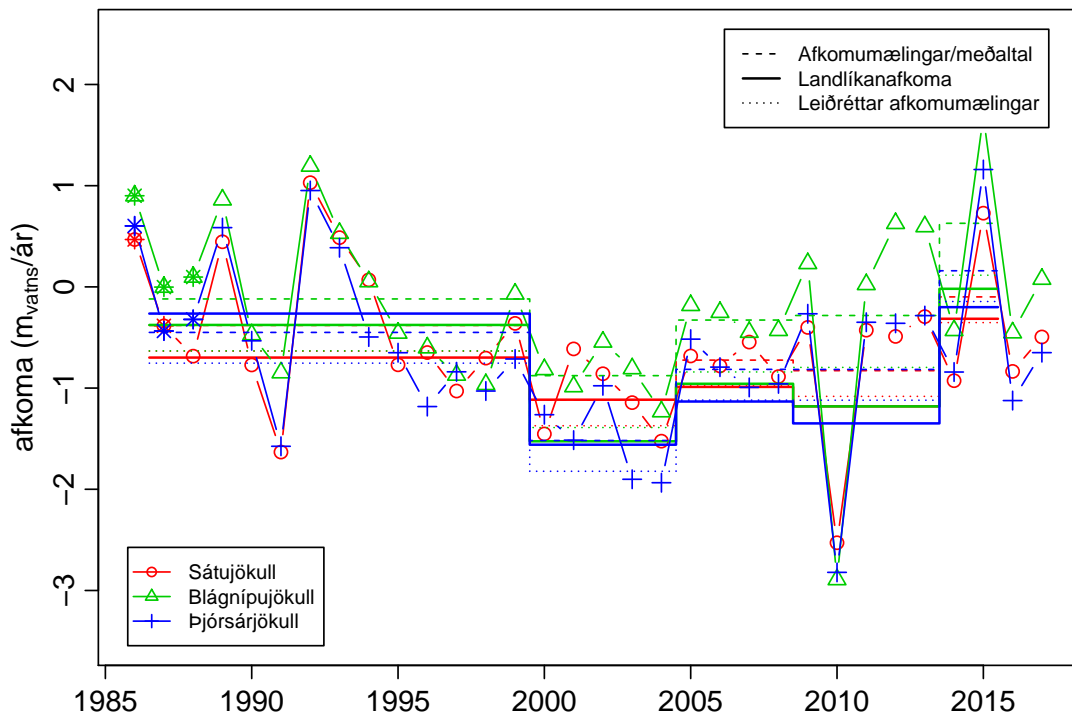
Landlíkanafkoma fyrir tímabilin fimm var borin saman við meðaltal hefðbundinna afkomumælinga, sjá mynd 42, og kom í ljós að hefðbundnu afkomumælingarnar (slitnar línur) ofmeta afkomu jökulsins í öllum tilvikum, nema fyrir Þjórsárjökul á tímabilinu 1986–1999, og liggur munurinn oftast á bilinu -0.25 til $-0.50 m_{\text{vatns}} a^{-1}$. Prófuð voru ýmis tölfræðileg líkön til þess að leiðrétta hefðbundnu afkomugildin, föst hliðrun fyrir hvern jökul, hlutfallsleg leiðrétting á vetrarafkomu með og án skurðpunktar (e. intercept), og hlutfallslega leiðrétting á bæði vetrar- og sumarafkomu. Í ljós koma að föst hliðrun fyrir hvern jökul og hlutfallsleg leiðrétting á vetr-



Mynd 41. Mæld afkoma á Sátujökli, Blágnjúpújökli og Þjórsárjökli, sumarhiti á Hveravöllum og afkoma reiknuð út frá sumarhita.

arafkomu (án skurðpunktar) gáfu bestu niðurstöðu og kom föst hliðrun sjónarmun betur út. Fasta hliðrunin reiknaðist $\Delta B_a = -0.25, -0.30$ og $-0.51 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$ en hlutfallsleg leiðrétting á vetrarafkomu reyndist $0.82, 0.80$ og $0.69 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$ fyrir Sátu-, Þjórsár- og Blágnjúpújökul í þessari röð, þ.e. margfalda þarf vetrarafkomu með þessum stuðlum til að stikumælingar gefi ársafkomu sem er sambærileg við ársafkomu úr landlíkönum (athugið að hér er ekki tekið tillit til leysingar af völdum jarðhitaflæðis og orkutaps í flæði íss og vatns þannig að þessa stuðla er ekki ráðlegt að nota nema með frekari greiningu, sbr. kafla 11). Þjórsárjökull hljóp fram 1991 (suðurhluti) og 1994 (norðurhluti). Ekki er tekið tillit til breytinga á flatarmáli og hæðardreifingu jökulsins af völdum framhlaupanna í þessum útreikningum og því var landlíkanafkomu fyrir tímabilið 1986–1999 sleppt við mat á leiðréttingunni fyrir Þjórsárjökul.

Afkomuleiðréttingin er sérstaklega mikil fyrir Blágnjúpújökul og meiri en ætla mætti út frá fyrri niðurstöðum úrvinnslu á afkomumælingum þar. Fyrri úrvinnsla afkomumælinganna á Blágnjúpújökli byggðist á ófullkominni hæðardreifingu sem ekki var uppfærð á margra ára tímabili þegar jökullinn hörfaði mikið. Endurskoðun úrvinnslunnar með árlegum hæðardreifingum hækkaði því afkomu Blágnjúpújökuls nokkuð. Sú niðurstaða er ekki ólíkleg í ljósi snjósjarmælinga sem lýst er í kaflanum hér að framan. Þær sýna að stikur á Blágnjúpújökli hafa tilhneigingu til þess að standa þar sem vetrarafkoma er mikil í samanburði við nærliggjandi svæði, sjá mynd 38. Getur ofmat meðalvetrarafkomu af þessum sökum hæglega numið tugum cm vatnsgildis. Því felst endurskoðun mælinganna á Blágnjúpújökli nú í tveimur þáttum sem vegast á, annars vegar eykst afkoman vegna þess að notaðar eru árlegar hæðardreifingar þar sem hörfun jökulsins kemur fram og hins vegar er leiðrétting á grundvelli landlíkanafkomu sem lækkar afkomuna til þess



Mynd 42. Mæld afkoma á Sátujökli, Blágnjúpjökli og Þjórsárjökli (tákn), afkoma skv. landlíkönunum á tímabilunum 1986–1999, 1999–2004, 2004–2008, 2008–2013 og 2013–2015 (breiðar línur), mæld meðalafkoma á sömu tímabilum (slitnar línur) og leiðrétt mæld meðalafkoma á sömu tímabilum, fundin með því að hliðra ársafkomu með föstu gildi sem er ákvarðað fyrir hvern jökul (punktalínur).

að vega upp á móti ofmati á vetrarafkomu. Hin endanlega niðurstaða er svipuð og áður var en meðalafkoman lækkar þó lítillega.

Eins og nánar er rætt í kafla 11 er líklegast að einhliðaskekkja hefðbundnu afkomumælinganna stafi af ofmati á vetrarafkomu vegna tilhneigingar til þess að stikur séu þar sem snjór safnast í skafrenningi. Breytileiki í vetrarafkomumælingunum og e.t.v. óvissa í landlíkanafkomunni gera það hins vegar að verkum að það virðist ekki koma betur út að leiðrétt melda vetrarafkomu með föstu hlutfalli fyrir hvern jökul. Því er hér miðað við að best og einfaldast sé að leiðrétt hefðbundnu afkomumælingarnar með því að leggja fasta leiðréttingu við melda ársafkomu hvers jökuls. Hins vegar er rétt að hafa í huga að líklegra er að þessi leiðrétting eigi við vetrarafkomuna en sumarafkomuna, t.d. ef afkomumælingarnar eru túlkaðar til þess að meta heildarúrkomu á jöklinum.

11 Landlíkanleiðrétt afkoma, túlkun og umræður

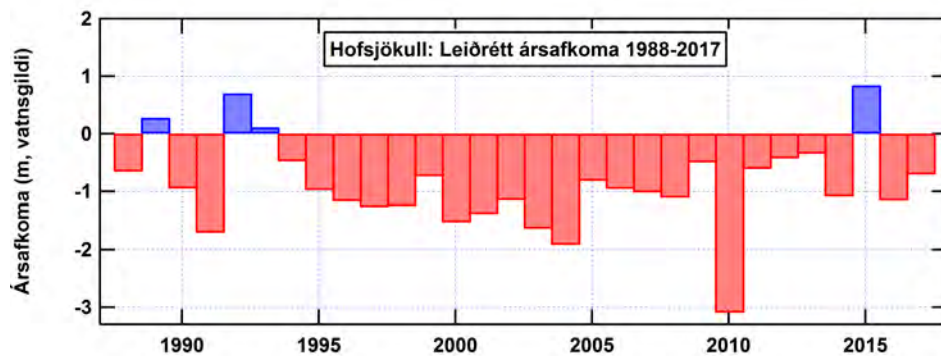
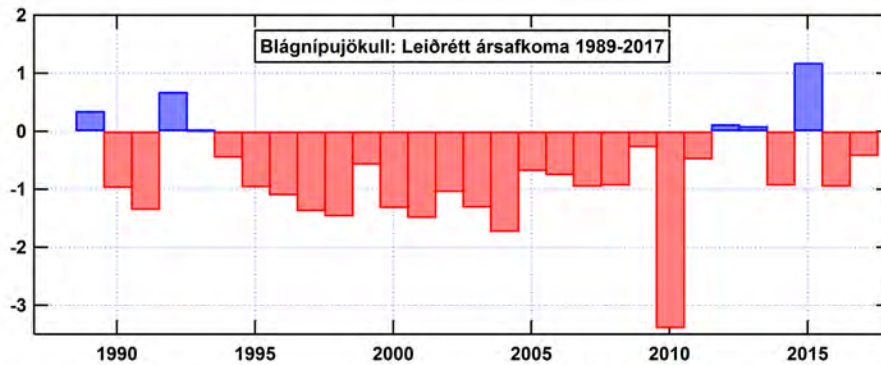
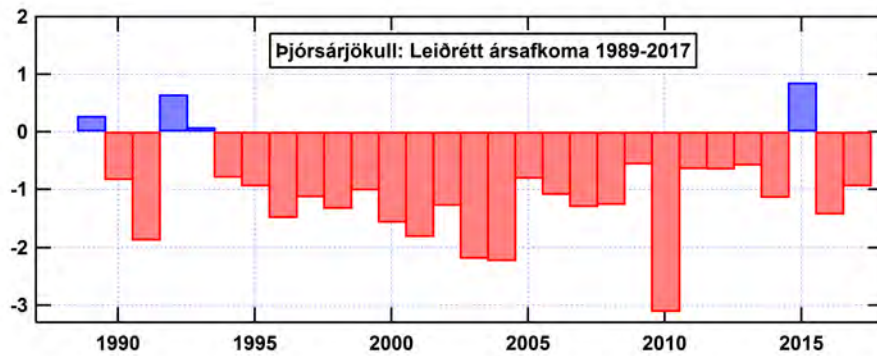
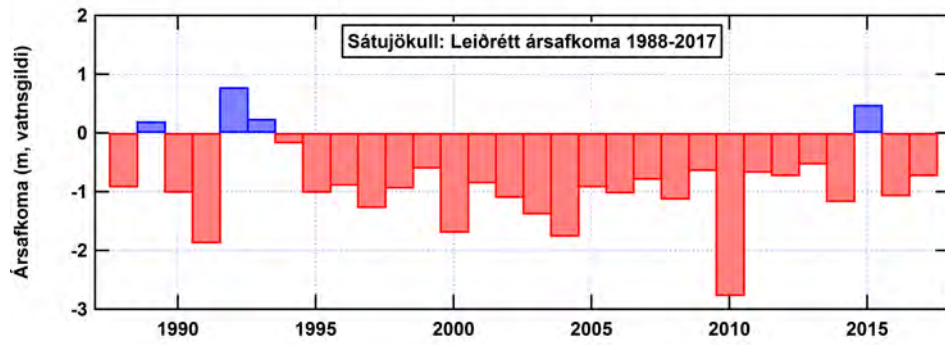
Á grundvelli hliðrunarinnar sem landlíkanafkoma gefur til kynna voru reiknaðar leiðréttar afkomuraðir fyrir Sátu-, Þjorsár- og Blágnípujökul með leiðréttunni $\Delta B_a = -0.25, -0.30$ og $-0.51 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ (í þessari röð), sem reiknuð var í kafla 10. Niðurstaðan er sýnd á á stöplariti fyrir hvern jökul á mynd 43. Sömu niðurstöður eru sýndar saman fyrir jöklana þrjá á mynd 44 og uppsöfnuð afkoma á mynd 45. Sjá má að leiðrétt afkoma þessara jökla fylgist mjög vel að ár fyrir ár eins og vænta mátti út frá góðu samhengi landlíkanafkomunnar milli ísasviða sem rætt var í kafla 8. Uppsöfnuð afkoma þessara jökla frá 1989 liggur á bilinu -30 til $-20 m_{\text{vatns}}$. Þjorsárjökuls rýrnar mest en rýrnun Sátujökuls og Blágnípujökull er svipuð.

Ef tekið er meðaltal mælinganna á jöklunum þremur og það borið saman við landlíkanafkomu alls jökulsins þá kemur í ljós að þar á milli er nánast engin hliðrun, eða einungis $-0.01 m_{\text{vatns}} a^{-1}$. Meðaltal landlíkanleiðréttar afkoma Sátu-, Þjorsár- og Blágnípujökuls gefur því gott mat á heildarafkomu Hofsjökuls alls. Samkvæmt því hefur Hofsjökull tapað um 23 km^3 vatns síðan afkomumælingarnar hófust 1988, þar af um 20 km^3 vatns á 20 ára tímabilinu 1995–2014 þegar rýrnunin var hröðust. Meðalafkoma jökulsins alls á tímabilinu 1988–2017 var $-0.90 m_{\text{vatns}} a^{-1}$, $-1.06 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ á árunum 1995–2017 en $-1.16 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ á árunum 1995–2014.

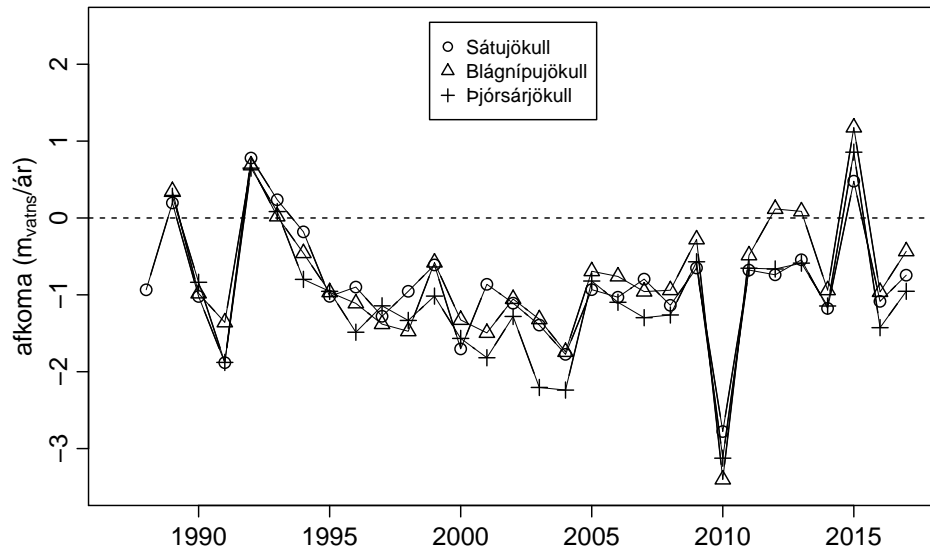
Hæð jafnvægislínu, sem sýnd er í töflu 3 og á myndum 29 og 30 í kafla 7, breytist einnig þegar afkoman er leiðrétt og nemur breytingin 30–60 m fyrir afkomuleiðréttunum sem hér eru notaðar fyrir jöklana þrjá. Þar sem hæð jafnvægislínu er breytileg með stað á jöklunum og gildin sem reiknuð eru í kafla 7 sýna hæð jafnvægislínu nærri réttu lagi á hinum eiginlegu mælingunum þá er hæð jafnvægislínunnar ekki endurreiknuð hér. Við látum duga að nefna að meðalhæð jafnvægislínunnar á jöklunum þremur er nokkru hærri en fram kemur í töflu 3, sem byggir á óleiðréttri afkomu, og er munurinn mestur á Blágnípujökli.

Til þess að kanna áhrif breytilegrar hæðardreifingar á afkomuna var reiknað út úr afkomumælingunum með fastri afkomudreifingu ársins 2000 fyrir öll árin og er niðurstaðan sýnd á mynd 46. Í ljós kemur að ekki munar miklu á niðurstöðunum fyrir Sátujökul. Þar virðast áhrif lækkunar yfirborðsins, sem eykur leysingu og dregur úr úrkomu, vega á móti hörfun jökuljaðarsins sem minnkar leysingarsvæðið og dregur þannig úr leysingu. Á Þjorsár- og Blágnípujökulum hefur breytilega hæðardreifingin þau áhrif að afkoman vex jafnt og þétt með tíma miðað við það að nota fasta hæðardreifingu. Munurinn er umtalsverður þannig að afkoma Þjorsárjökuls er $0.23 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ hærri árið 2017 miðað við 1988 og afkoma Blágnípujökuls $0.39 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ hærri en ella væri. Skýringin á þessu er að Þjorsár- og Blágnípujökull hafa hörfað mun meira á tímabilinu en Sátujökull og tapað meira af leysingarsvæðum sínum eins og rætt var í kafla 6. Lækkun yfirborðsins og þar með afkomunnar nær ekki að vega upp á móti minnkandi leysingarsvæðum þessara jökla. Þetta sýnir að mikilvægt er að taka tillit til breytinga á hæðardreifingu í úrvinnslu afkomumælinga til þess að niðurstöðurnar endurspegli rétt þróun jökulafkomunnar með tíma. Einnig sýnir reynslan af þessari endurskoðun á úrvinnslu afkomugagnanna að mikilvægt er að uppfæra hæð stikanna sem notuð er í úrvinnslunni reglulega. Hæð jökulyfirborðsins þar sem stikurnar standa hefur lækkað um allt að og jafnvel rúmlega 100 m þar sem mest er á leysingarsvæðunum. Nokkurra ára gamlar tölur um hæð stika geta því verið rangar sem nemur tugum metra og það getur haft umtalsverð áhrif á mat á afkomu, sér í lagi á leysingarsvæðum þar sem hallatala sumarafkomu með hæð á leysingarsvæðinu ákvarðast af fáum mælipunktum.

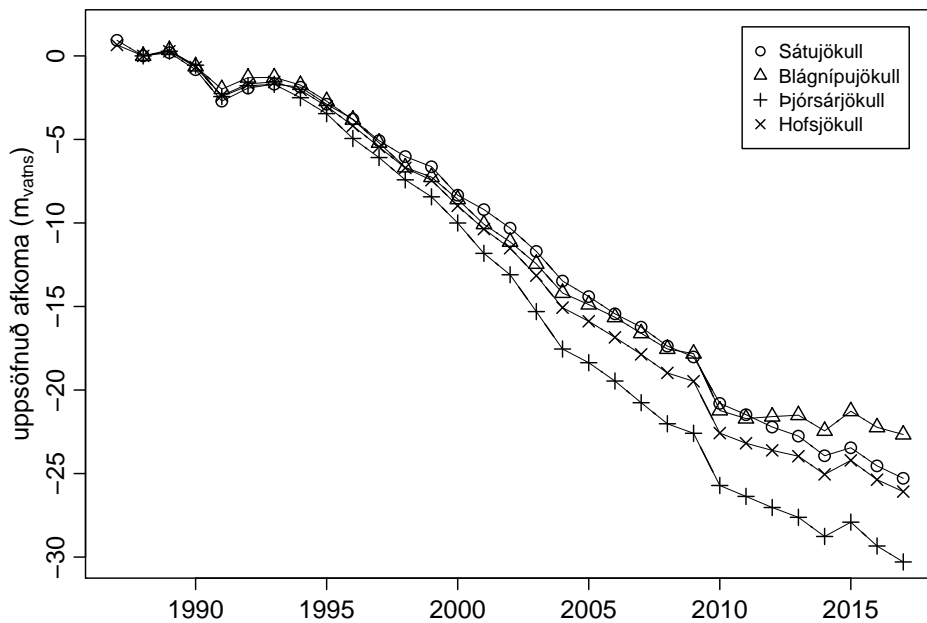
Breytingar í hæðardreifingu og minnkun flatarmáls jökulsins eru þáttur í aðlögun jökuls að



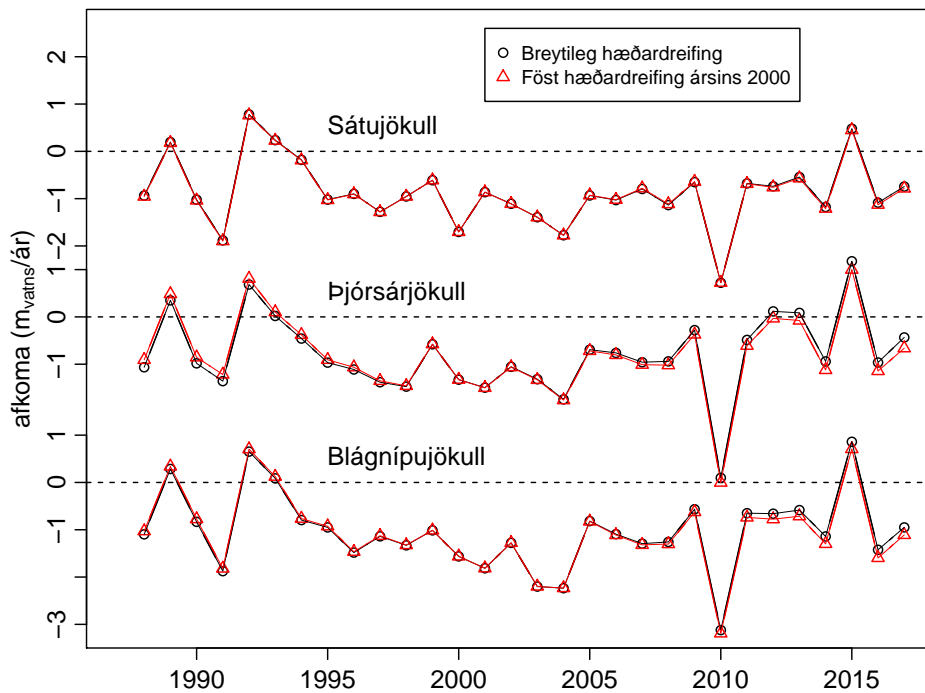
Mynd 43. Ársafkoma Sátu-, Þjórsár- og Blágnípuþjökuls og Hofsjökuls alls frá upphafi mælinga 1988 og 1989 til 2017 leiðrétt á grundvelli landlíkanafkomu 1986–1999, 1999–2004, 2004–2008, 2008–2013 og 2013–2015.



Mynd 44. Árlæg afkoma Sátu-, Þjórsár- og Blágnjúpjökuls leiðrétt með hliðsjón af landlíkanafkomu.



Mynd 45. Uppsöfnuð ársafkoma Sátu-, Þjórsár- og Blágnjúpjökuls frá 1988 leiðrétt með hliðsjón af landlíkanafkomu.



Mynd 46. Afkoma Sátu-, Þjórsár- og Blágnípujökuls, leiðrétt með hliðsjón af landlíkanaafkomu, reiknuð með breytilegri hæðardreifingu fyrir hvert ár og með fastri hæðardreifingu ársins 2000.

breyttri afkomu. Ef loftslag og þar með afkoma helst óbreytt í langan tíma leiðir aðlögun jökulsins til þess að hann nálgast nýtt jafnvægi á tímakvarða sem nefnist viðbragstími og ætla má að sé um 40 ár fyrir Hofsjökul. Á þeim tíma má búast við að frávik frá jafnvægi í afkomu og lögun jökulsins minnki í hlutfallinu $e^{-1} = 0.37$. Mælingarnar á Hofsjökli hafa staðið það lengi að sjá má merki þessa í afkomunni á mynd 43 þannig að hún batnar og nálgast núllið hægt og bítandi eftir ca. árið 2000 þó hiti á sama tíma breyttist ekki mikið, sjá mynd 41. Á tímabilinu frá 2000 má ætla að frávik frá jafnvægi minnki í hlutfallinu 0.65 og er það í mjög grófum dráttum í samræmi við þróunina sem mynd 43 sýnir.

Í kafla 9 hér að framan var komist að þeirri niðurstöður að ofmat á vetrarafkomu skýri stóran hluta af hliðrun hefðbundinna afkomumælinga sem kemur fram í samanburði við landlíkanaafkomu og leiðir þetta ofmat til þess að leiðréttu þarf mælda vetrarafkomu um -0.2 , -0.1 og $-0.3 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$ fyrir Sátu-, Þjórsár- og Blágnípujökul í þessari röð. Leiðréttingin sem reiknuð er út frá landlíkanaafkomunni til þess m.a. að vega þarna á móti er hins vegar nokkru meiri að tölugildi eða $\Delta B_a = -0.25$, -0.30 og $-0.51 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$. Hluti skýringarinnar á þessum mismun er bráðnun við jökulbotn og í jöklinum vegna varma sem streymir úr jarðskorpunni og stöðuorku sem losnar við flæði íss og vatns undan halla en þessi afkomuþáttur kemur fram í landlíkanaafkomu en ekki hefðbundnum afkomumælingum á yfirborði með borunum og stikum. Þessa þætti má meta gróflega á eftirfarandi hátt. Varmastreymi jarðskorpunnar undir Hofsjökli er um 200 mW m^{-2} (Árni Hjartarson, 2015) sem samsvarar bráðnun upp á um $0.02 \text{ m}_{\text{vatns}} \text{ a}^{-1}$. Ef miðað er við að úrkoma á Hofsjökli sé um eða rúmlega 2500 mm (Crochet o.fl., 2007) og að

stöðuorkutap samsvari að meðaltali falli upp á 750 m þá fæst að bráðnun vegna varmans sem losnar sé um $0.06 m_{\text{vatns}} a^{-1}$. Einnig má gera ráð fyrir einhverri jarðhitavirkni í eldstöðinni undir Hofsjökli umfram almennt varmaflæði jarðskorpunnar sem t.d. má álykta af jökulhlaupi í ágúst 2013 sem kom úr katli í norðurbrún öskjunnar (Tómas Jóhannesson o.fl., 2014) sem vafalaust er myndaður af jarðhita. Þessir tveir þættir samanlagt nema því rúmlega $0.08 m_{\text{vatns}} a^{-1}$. Þegar því er bætt við ofmat vetrarafkomunnar hér að ofan fæst leiðréttingin $\Delta B_a = -0.28, -0.18$ og $-0.38 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ fyrir Sátu-, Þjórsár- og Blágnípujökul í þessari röð. Þetta er mjög nærri leiðréttingunni sem reiknast út frá landlíkanafkomunni fyrir Sátujökul en heldur minni leiðrétting en reiknaðist fyrir Þjórsár- og Blágnípujökul. Munurinn, 0.12 og $0.13 m_{\text{vatns}} a^{-1}$, er þó minni en ætla má að sé óvissa í útreikningunum. Þannig er niðurstaða þessarar greiningar að skýringin á hliðrun hefðbundinna afkomumælinga á Hofsjökli sé ofmat á vetrarafkomu, mismunandi á milli svæða á jöklinum, og að minna leyti bráðnun við botn og í jöklinum af völdum varma úr jarðskorpunni og vegna stöðuorkutaps í flæði vatns og íss.

Það hefur verið haft fyrir satt að afkomumælingar á jöklum gefi áreiðanlegustu vísendingar um úrkomu á hálendinu sem völ er á og þær hafa komið að góðum notum við líkanreikninga af úrkomu á landinu (Crochet o.fl., 2007). Leiðréttingarnar sem hér hefur verið lagt mat á gefa til kynna að betra mat á úrkomunni megi fá með því að nota leiðréttingarstuðla fyrir hvert mælisvæði á jöklunum byggt á landlíkanafkomu. Snjósjármælingarnar, sem hér hefur verið lýst, má einnig nota til þess að meta hvað stikur kunni að ofmeta eða vanmeta ákomu og þar með úrkomu og leiðréttu mæligildi á hverjum stað fyrir sig til þess að þau endurspegli betur stærri svæði á jöklinum. Þegar jökulafkoma er t.d. notuð við kvörðun á veður- eða afkomulíkönunum er sóst eftir mæligildum á úrkomu fyrir allstór svæði, nokkra ferkílómetra í flestum tilvikum, til samanburðar við líkanniðurstöður.

12 Niðurstaða

Afkomumælingar á Hofsjökli hafa verið stundaðar í 30 ár og hafa aðferðir við úrvinnslu í aðalatriðum verið sambærilegar frá upphafi. Við ritun þessarar skýrslu hafa þó komið fram atriði, sem þarfnast samræmingar, auk þess sem minni háttar villur hafa verið leiðréttar. Takmörkuð gögn voru tiltæk um breytingar á yfirborðshæð jökulsins, ísasviðum, flatarmáli og ýmsum öðrum þáttum sem áhrif hafa á úrvinnsluna. Mælingarnar hafa verið endurunnar með samræmdum hætti og bornar saman við mat á afkomu jökulsins út frá yfirborðskortum. Reiknaðar hafa verið nýjar afkomutímaraðir sem gefa betri mynd af þróun afkomu jökulsins en fyrri niðurstöður. Endurskoðuðu gögnin fylgja þessari skýrslu á stafrænu formi.

Niðurstaða endurskoðunarinnar er að einhliðaskekkja eða hliðrun er í fyrri niðurstöðum afkomumælinganna og hefur þessi hliðrun verið leiðrétt fyrir Sátu-, Þjórsár- og Blágnípujökul hvern fyrir sig á grundvelli mældra breytinga á yfirborðshæð. Einhliðaskekkjan skýrist af ofmati á vetrarafkomu sem mælingar með snjósjá leiða í ljós og að minna leyti af bráðnun við botn og í jöklinum af völdum varma úr jarðskorpunni og vegna stöðuorkutaps í flæði vatns og íss. Ekki hafa komið fram niðurstöður sem benda til að lóðrétt færsla á leysingarstikum um sumarið geti skýrt hluta einhliðaskekkjunnar en það atriði þarfnast þó frekari athugunar. Endurskoðuðu afkomumælingarnar fyrir Sátu-, Þjórsár- og Blágnípujökul er unnt að nota til þess að meta meðalafkomu fyrir Hofsjökul allan með hliðsjón af landlíkanafkomunni.

Á þeim 30 árum sem afkomumælingar á Hofsjökli hafa staðið hefur afkoman verið neikvæð í 26 ár en jákvæð í 4 ár. Meðalafkoma tímabilsins 1988–2017 fyrir jökulinn allan var $-0.90 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ en $-1.16 m_{\text{vatns}} a^{-1}$ á árunum 1995–2014 þegar afkoma jökulsins var neikvæð 20 ár í röð í samfelldum hlýindum. Á mælitímabilinu má sjá að aðlögun jökulsins að hlýrra loftslagi hefur haft umtalsverð áhrif á afkomuna sem væri mun neikvæðari nú ef jökulinn hefði ekki hörfað og dregið þannig saman flatarmál leysingarsvæðisins.

13 Þakkir

Afkomumælingar á Hofsjökli hafa verið kostaðar af Vatnsorkudeild og síðar Auðlindadeild Orkustofnunar, með fjárveitingu frá iðnaðarráðuneytinu og að hluta til af Veðurstofunni eftir sameiningu Vatnamælinga Orkustofnunar og Veðurstofunnar. Ýmis rannsóknaverkefni styrkt af RANNÍS, Landsvirkjun, Vegagerðinni, Bandaríska landafræðifélaginu (National Geographic Society, NGS) og fleiri aðilum hafa jafnframt lagt til gögn sem varpa ljósi á afkomu jökulsins. Orkurannsóknasjóður Landsvirkjunar styrkti mælingar með snjósjá 2015 og 2016. Leysimælingar á íslenskum jöklum 2008–2012 voru styrktar af Rannsóknarsjóði (Rannís), Orkurannsóknasjóði Landsvirkjunar, Rannsóknarsjóði Vegagerðarinnar, Orku- og umhverfisrannsóknasjóði Orkuveitu Reykjavíkur, Landmælingum Íslands, Umhverfisrannsóknasjóði undir Norrænu ráðherranefndinni (KoL), Vinum Vatnajökuls og Vatnajökulsþjóðgarði. Einnig hefur Veðurstofa Íslands lagt fram fjármagn til mælinganna. Leysimæling á Hofsjökli 2013 var kostuð af austurríska fyrirtækinu alpS í samstarfi við Háskólann í Innsbruck og Veðurstofu Íslands. Leysimælingarnar 2008 og 2013 voru unnar af þýska landmælingafyrirtækinu TopScan. Landlíkanið frá 1986 var unnið af Eyjólf Magnússyni á Jarðvísindastofnun HÍ. Landlíkanið frá 1999 byggist á loftmyndum frá Loftmyndum ehf. sem lét þessar myndir í té til rannsókna endurgjaldslítið. Landlíkanið frá 2004 var unnið af Eyjólf Magnússyni í samvinnu við Etienne Berthier við CNRS og háskólann í Toulouse í Frakklandi. Jaðar Hofsjökuls frá 2014 var hnitaður af Daða Björnssyni á grundvelli loftmynda frá Loftmyndum ehf. og lét hann í té stafrænar niðurstöður sínar sem hér eru birtar. ArcticDEM landlíkön eru unnin á grundvelli gervihnattamynda frá fyrirtækinu DigitalGlobe („DEM(s) were created from DigitalGlobe, Inc., imagery and funded under National Science Foundation awards 1043681, 1559691, and 1542736.“). Á þeim þremur áratugum sem afkomumælingar hafa staðið á Hofsjökli hafa um 40 manns tekið þátt í mælingunum sjálfum og fjölmargir íslenskir og erlendir vísindamann komið að túlkun gagnanna og rannsóknum sem mælingunum tengjast. Þessum samstarfsmönnum er þakkað framlag þeirra til rannsókna á þessum tímamótum. Á engan er hallað þó Vilhjálmur S. Kjartansson sé sérstaklega nefndur hér en hann hefur síðan 2004 tekið þátt í flestum mæliferðanna og hefur reynsla hans af ferðalögum um jökla og meðferð farartækja og annars búnaðar verið ómetanleg fyrir verkefnið.

14 Heimildir

- Ahlmann, H. W:son, & Sigurður Þórarinnsson (1937–1943). Vatnajökull. Scientific results of the Swedish-Icelandic investigations 1936–37–38. *Geografiska Annaler*, **19**(3–4), 146–231, **20**(3–4), 171–233, **21**(1), 39–66, **21**(3–4), 171–242, **22**(3–4), 188–205, **25**(1–2), 1–54.
- Ahlmann, Hans W:son (1940). The relative influence of precipitation and temperature on glacier regime. *Geografiska Annaler*, **22**, 188–205.
- Andreassen, L. M., H. Elvehøy, B. Kjølmoen & R. V. Engeset (2016). Reanalysis of long-term series of glaciological and geodetic mass balance for 10 Norwegian glaciers. *Cryosph.*, **10**, 535–552, doi:10.5194/tc-10-535-2016.
- Árni Hjartarson (2015). Heat Flow in Iceland. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia, 19–25 April 2015.
- Bahr, D. B., M. F. Meier and S. D. Peckham (1997). The physical basis of glacier volume–area scaling. *J. Geophys. Res.*, **102**(B9), 20,355–20,362.
- Bergström, S., Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, A. Ahlstrøm, L. M. Andreassen, J. Andréasson, S. Beldring, Helgi Björnsson, B. Carlsson, P. Crochet, M. de Woul, Bergur Einarsson, H. Elvehøy, G. E. Flowers, P. Graham, Gunnar O. Gröndal, Sverrir Guðmundsson, S-S. Hellström, R. Hock, P. Holmlund, Jóna F. Jónsdóttir, Finnur Pálsson, V. Radic, N. Reeh, L. A. Roald, J. Rosberg, S. Rogozova, Oddur Sigurðsson, M. Suomalainen, Þorsteinn Þorsteinsson, B. Vehviläinen & N. Veijalainen (2007). *Impacts of climate change on river runoff, glaciers and hydropower in the Nordic area. Joint final report from the CE Hydrological Models and Snow and Ice Groups*. Reykjavík, The CE Project, CE Rep. No. 6.
- Bergur Einarsson & Sveinbjörn Jónsson (2010). *The effect of climate change on runoff from two watersheds in Iceland*. Veðurstofa Íslands, skýrsla 2010/016.
- Cuffey, K., & W. S. B. Paterson (2010). *The Physics of Glaciers. 4th Edition*. Academic Press, 704 bls.
- Cogley, J.G., R. Hock, L. A. Rasmussen, A. A. Arendt, A. Bauder, R. J. Braithwaite, P. Jansson, G. Kaser, M. Möller, L. Nicholson & M. Zemp (2011). *Glossary of Glacier Mass Balance and Related Terms*. Paris, UNESCO-IHP, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 86, IACS. Contribution No. 2.
- Crochet, P., Tómas Jóhannesson, Trausti Jónsson, Oddur Sigurðsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson and I. Barstad (2007). Estimating the spatial distribution of precipitation in Iceland using a linear model of orographic precipitation. *J. Hydrometeorol.*, **8**(6), 1285–1306.
- Daði Björnsson (2015). *Heildarstærð jökla á Íslandi 2014*. Loftmyndir ehf., minnisblað dags. í mars. 2015.
- Dyurgerov, M. B., & M. F. Meier (1997). Mass balance of mountain and subpolar glaciers: a new global assessment for 1961–1990. *Arctic and Alpine Research*, **29**(4), 379–391.
- Fenger, J., ed. (2007) *Impacts of Climate Change on Renewable Energy Sources. Their role in the Nordic energy System. A comprehensive report resulting from a Nordic Energy Research project*. Nord 2007:003, Nordic Council of Ministers, Copenhagen, 190 bls.
- Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson & Oddur Sigurðsson (2006). The response of Hofsjökull and southern Vatnajökull, Iceland, to climate change. *J. Geophys. Res.*, **111**(F3), F03001, doi: 10.1029/2005JF000388.
- Hálf dán Ágústsson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Þorsteinn Þorsteinsson, Finnur Pálsson & Björn Oddsson (2013). Mass balance of Mýrdalsjökull ice cap accumulation area and comparison of observed winter balance with simulated precipitation. *Jökull*, **63**, 91–104.

- Helgi Björnsson (1971). Bægisárjökull, North-Iceland. Result of glaciological investigations 1967–1968. Part I. Mass balance and general meteorology. *Jökull*, **21**, 1–23.
- Helgi Björnsson (1972). Bægisárjökull, North-Iceland. Results of glaciological investigations 1967–1968. Part II. The energy balance. *Jökull*, **22**, 44–61.
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Magnús Tumi Guðmundsson & Hannes H. Haraldsson (1998). Mass balance of western and northern Vatnajökull, Iceland, 1991–1995. *Jökull*, **45**, 35–58.
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson & Hannes H. Haraldsson (2002). Mass balance of Vatnajökull (1991–2001) and Langjökull (1996–2001), Iceland. *Jökull*, **51**, 75–78.
- Helgi Björnsson (1988). *Hydrology of ice caps in volcanic regions*. Vísindafélag Íslendinga, **45**, 139 bls.
- Helgi Björnsson & Finnur Pálsson (2008). Icelandic glaciers. *Jökull*, **58**, 365–386.
- Helgi Björnsson (2009). *Jöklar á Íslandi*. Reykjavík, Opna, 479 bls. ISBN: 978-9935-10-004-7
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Sverrir Guðmundsson, Eyjólfur Magnússon, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Etienne Berthier, Oddur Sigurðsson & Þorsteinn Þorsteinsson (2013). Contribution of Icelandic ice caps to sea level rise: Trends and variability since the Little Ice Age. *Geophys. Res. Lett.*, **40**(8), 1546–1550, doi: 10.1002/grl.50278.
- Huss, M. (2013). Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *Cryosph.*, **7**, 877–887.
- Ives, J., & C. A. M. King (1955). Glaciological observations on Morsárjökull, SW Vatnajökull. *J. Glaciol.*, **2**(17), 477–482.
- Knútur Árnason (1995). *TEM-viðnámsmælingar á Hofsjökli*. Orkustofnun, skýrsla OS-95014/JHD-09 B. 16 bls.
- Noh, M. J., and I. M. Howat (2015). Automated stereo-photogrammetric DEM generation at high latitudes: Surface Extraction from TIN-Based Search Minimization (SETSM) validation and demonstration over glaciated regions. *GIScience and Remote Sensing*, doi:10.1080/15481603.2015.1008621.
- Oddur Sigurðsson (1989). *Afkoma Hofsjökuls 1987–1988*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-89005/VOD-02 B.
- Oddur Sigurðsson (1991). *Afkoma Hofsjökuls 1988–1989*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-91052/VOD-08 B.
- Oddur Sigurðsson (1993). *Afkoma nokkurra jökla á Íslandi 1989–1992*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-93032/VOD-02.
- Oddur Sigurðsson & Ólafur Jens Sigurðsson (1998). *Afkoma nokkurra jökla á Íslandi 1992–1997*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-98082.
- Oddur Sigurðsson, Tómas Jóhannesson, Þorsteinn Þorsteinsson & Guðrún Larsen (2002). Ice core drilling on the Hofsjökull Ice Cap for measuring glacier mass balance. Í: Killingtveit, Á. (ritstj). *Nordic Hydrological Conference 2002 (NHK-2002)*, Oslo, Nordic Hydrological Programme, NHP-repport No. 47, 17–22.
- Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson, Stefán Már Ágústsson & Bergur Einarsson (2004). *Afkoma Hofsjökuls 1997–2004*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-2004/029.
- Oddur Sigurðsson, Richard S. Williams Jr. & Skúli Víkingsson (2013). *Jöklakort af Íslandi*. Veðurstofa Íslands.
- PGC (2016). *ArcticDEM Documentation and User Guidance. Version 1.1 – September 29, 2016*. The Polar Geospatial Center – University of Minnesota & The Ohio State University. ([www.pgc.umn.edu/system/files/ArcticDEM Documentation and User Guidance - Latest.pdf](http://www.pgc.umn.edu/system/files/ArcticDEM%20Documentation%20and%20User%20Guidance%20-%20Latest.pdf)).

- Philippe Crochet & Tómas Jóhannesson (2011). A data set of gridded daily temperature in Iceland, 1949–2010. *Jökull*, **61**, 1–17.
- Rögnvaldsson, Ó., P. Crochet and H. Ólafsson (2004) Mapping of precipitation in Iceland using numerical simulations and statistical modeling. *Meteorol. Zeitschrift*, **13**(3), 209–219, doi: 10.1127/0941-2948/2004/0013-0209.
- Rögnvaldsson, Ó., J. F. Jónsdóttir and H. Ólafsson (2007) Numerical simulations of precipitation in the complex terrain of Iceland—Comparison with glaciological and hydrological data. *Meteorol. Z.*, **16**(1), 71–85.
- Sigurður Þórarinnsson (1953). The Grímsvötn Expedition June–July 1953. *Jökull*, **3**, 6–23.
- Sigurjón Rist (1952). Snjósmæling á Vatnajökli 27. mars – 24. apríl 1951. *Jökull*, **2**, 6–7.
- Sigurjón Rist (1956). Snjósmæling á jökulum 1954 og 1955. *Jökull*, **7**, 33–36.
- Sverrir Guðmundsson, Helgi Björnsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Tómas Jóhannesson, Finnur Pálsson & Oddur Sigurðsson (2009). Similarities and differences in the response of two ice caps in Iceland to climate warming. *Hydrology Research*, **40**(5), 495–502.
- Sælthun, N. R., P. Aittoniemi, S. Bergström, Kristinn Einarsson, Tómas Jóhannesson, G. Lindström, P.-E. Ohlsson, T. Thomsen, B. Vehviläinen, K. O. Aamodt (1998). *Climate change impact on runoff and hydropower in the Nordic countries—Final report from the project “Climate change and energy production”*. Copenhagen, Nordic Council of Ministers, Tema-Nord 1998:552.
- Tómas Jóhannesson (1991). Modelling the effect of CO₂ induced warming on the Hofsjökull ice cap, central Iceland. *Nordic Hydrology*, **22**, 81–94.
- Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson, T. Laumann & M. Kennett (1995). Degree-day glacier mass balance modelling with applications to glaciers in Iceland, Norway and Greenland. *J. Glaciol.*, **41**(138), 345–358.
- Tómas Jóhannesson (1997). The response of two Icelandic glaciers to climate warming computed with a degree-day glacier mass-balance model coupled to a dynamic model. *J. Glaciol.*, **43**(144), 321–327.
- Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson & Oddur Sigurðsson (2004a). Response of glaciers and glacier runoff in Iceland to climate change. Í: Järvet, A. (ritstj.). *Nordic Hydrological Conference 2004 (NHC-2004)*, Tartu, Nordic Hydrological Programme, NHP-rapport No. 48, 651–660.
- Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Helgi Björnsson, C. E. Bøggild, H. Elvehøy, Sverrir Guðmundsson, R. Hock, P. Holmlund, P. Jansson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson & Þorsteinn Þorsteinsson (2004b). *The impact of climate change on glaciers in the Nordic countries*. Reykjavík, The CWE Project, CWE Rep. No. 3.
- Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson, Bergur Einarsson & Þorsteinn Þorsteinsson (2006). *Mass balance modelling of the Hofsjökull ice cap based on data from 1988–2004*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-2006/004.
- Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Helgi Björnsson, P. Crochet, Elías B. Elíasson, Sverrir Guðmundsson, Jóna F. Jónsdóttir, Haraldur Ólafsson, Finnur Pálsson, Ólafur Rögnvaldsson, Oddur Sigurðsson, Árni Snorrason, Óli G. B. Sveinsson & Þorsteinn Þorsteinsson (2007). *Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-2007/011.
- Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson & Þorsteinn Þorsteinsson (2011). LiDAR mapping of the Snæfellsjökull ice cap, western Iceland. *Jökull*, **61**, 19–32.

- Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, A. Ahlstrøm, L. M. Andreassen, S. Beldring, Helgi Björnsson, P. Crochet, Bergur Einarsson, H. Elvehøy, Sverrir Guðmundsson, R. Hock, H. Machguth, K. Melvold, Finnur Pálsson, V. Radic, Oddur Sigurðsson & Þorsteinn Þorsteinsson (2011). Hydropower, snow and ice. Í: Þorsteinn Þorsteinsson & Halldór Björnsson (ritstj.). *Climate Change and Energy Systems. Impacts, Risks and Adaptation in the Nordic and Baltic Countries*. Nordic Council of Ministers, TemaNord 2011:502, 87–107.
- Tómas Jóhannesson (2012). *Rýrnun Hofsjökuls á einstökum ísasviðum á árabílunum 1986 til 1999, 1999 til 2004, 2004 til 2008 og 1999 til 2008*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 28.11.2012.
- Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson & Etienne Berthier (2013). Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Ann. Glaciol.*, **63**, 63–74.
- Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson, Hilmar Björn Hróðmarsson & Bergur Einarsson (2014). *Jökulhlaup úr Hofsjökli í ágúst 2013*. Veðurstofa Íslands, tækniskýrsla dags. 28.11.2014, málnúmer 2014-287.
- Tómas Jóhannesson (2015). *Rýrnun Hofsjökuls á einstökum ísasviðum á árabílunum 1986 til 1999, 1999 til 2004, 2004 til 2008, 2008 til 2013 og 1999 til 2008*. Veðurstofa Íslands, tækniskýrsla dags. 12.1.2015, málnúmer 2015-12.
- Zemp, M., E. Thibert, M. Huss, D. Stumm, C. Rolstad Denby, C. Nuth, S. U. Nussbaumer, G. Moholdt, A. Mercer, C. Mayer, P. C. Joerg, P. Jansson, B. Hynek, A. Fischer, H. Escher-Vetter, H. Elvehøy & L. M. Andreassen (2013). Reanalysing glacier mass balance measurement series. *Cryosph.*, **7**, 1227–1245, doi:10.5194/tc-7-1227-2013.
- Þorsteinn Þorsteinsson, Oddur Sigurðsson, Tómas Jóhannesson, Guðrún Larsen, C. Drücker & F. Wilhelms (2002). Ice core drilling on the Hofsjökull ice cap. *Jökull*, **51**, 25–41.
- Þorsteinn Þorsteinsson, Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson, Einar Örn Hreinsson, Stefán Már Ágústsson & Egill Tómasson (2003). *Afkomumælingar á hábungu Hofsjökuls í maí 2003*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-2003/053.
- Þorsteinn Þorsteinsson & Oddur Sigurðsson (2005). *Afkoma Hofsjökuls 2004–2005*. Orkustofnun, Vatnamælingar, greinargerð 2005-12-23.
- Þorsteinn Þorsteinsson & Oddur Sigurðsson (2006). *Afkoma Hofsjökuls 2005–2006*. Orkustofnun, Vatnamælingar, greinargerð Thor-OSig-2006/001.
- Þorsteinn Þorsteinsson, Bergur Einarsson, Tómas Jóhannesson & R. Hock (2006) *Comparison of degree-day models of the mass balance of the Hofsjökull ice cap*. Orkustofnun, Vatnamælingar, skýrsla OS-2006/014.
- Þorsteinn Þorsteinsson (2008). *Afkoma Hofsjökuls 2006–2007*. Orkustofnun, Vatnamælingar, greinargerð Thor-2008/001.
- Þorsteinn Þorsteinsson (2009). *Afkoma Hofsjökuls 2007–2008*. Veðurstofa Íslands, skýrsla 2009/015.
- Þorsteinn Þorsteinsson (2010). *Afkoma Hofsjökuls 2008–2009*. Veðurstofa Íslands, greinargerð ThTh/2010-01.
- Þorsteinn Þorsteinsson & Halldór Björnsson (ritstj.) (2011). *Climate Change and Energy Systems. Impacts, Risks and Adaptation in the Nordic and Baltic Countries*. Nordic Council of Ministers, TemaNord 2011:502.
- Þorsteinn Þorsteinsson, Bergur Einarsson & Vilhjálmur S. Kjartansson (2014). *Afkoma Hofsjökuls 2009–2013*. Veðurstofa Íslands, skýrsla 2014-002.

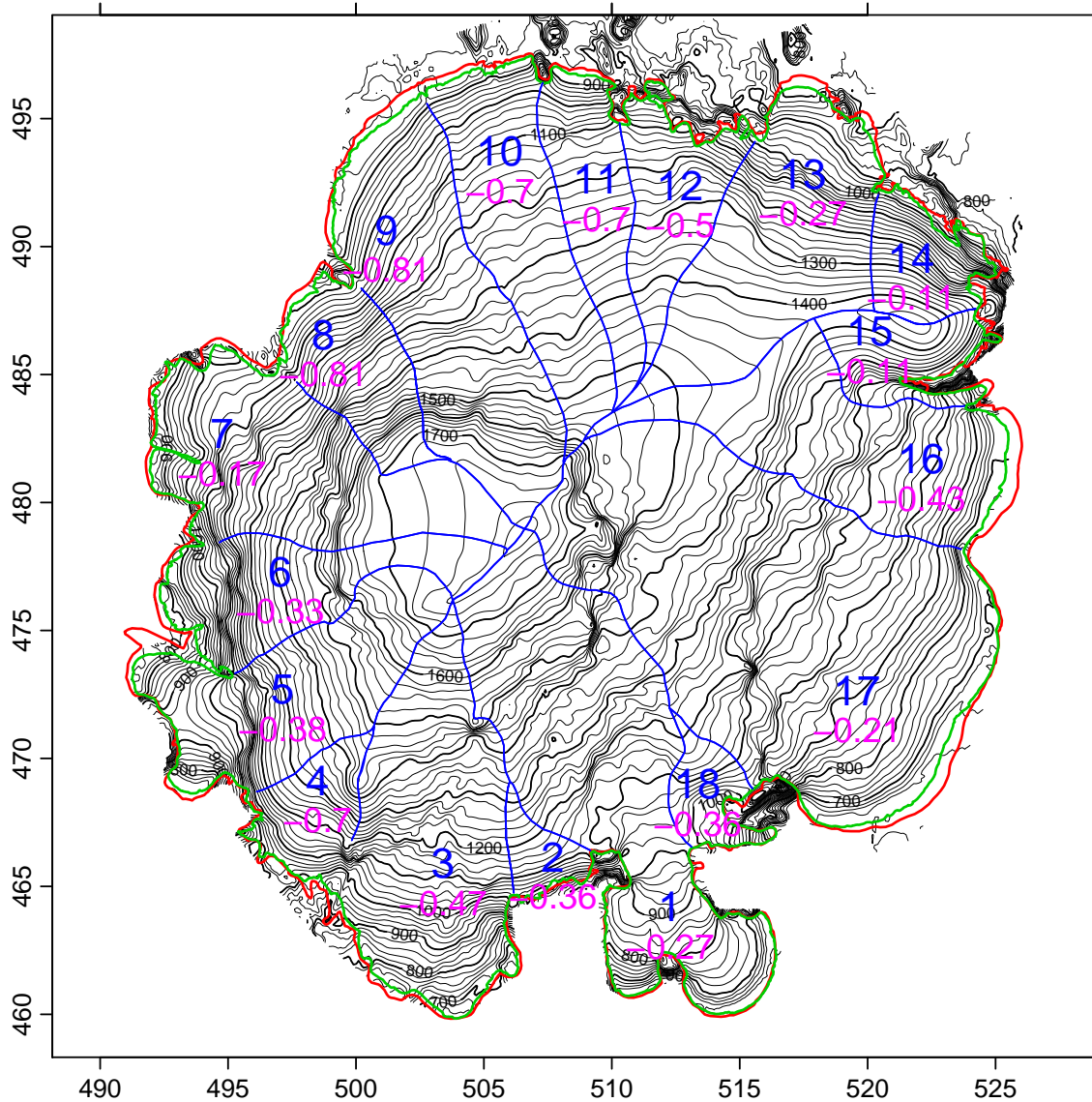
- Þorsteinn Þorsteinsson, Tómas Jóhannesson, Bergur Einarsson & Vilhjálmur S. Kjartansson (2016a) *Dreifing vetrarafrömu á Hofsjökli mæld með snjósjá – I*. Veðurstofa Íslands, greinargerð ThTh/ofl/2016-01.
- Þorsteinn Þorsteinsson, Tómas Jóhannesson, Bergur Einarsson & Vilhjálmur S. Kjartansson (2016b). *Dreifing vetrarafrömu á Hofsjökli mæld með snjósjá – II*. Veðurstofa Íslands, greinargerð ThTh/ofl/2016-02.
- Østrem, G., & Alan Stanley (1969). *Glacier mass-balance measurements; a manual for field and office work*. Oslo, Norwegian Water Resources and Energy Administration.
- Østrem, G., & Brugman (1991). *Glacier mass-balance measurements. A manual for field and office work*. Oslo, Norwegian Water Resources and Energy Administration, and Saskatoon, Canada, National Hydrology Research Institute, NHRI Science Report No. 4. 234 bls.
- Østrem, G., & N. Haakensen (1999). Map Comparison of Traditional Mass-balance Measurements: Which Method is Better? *Geografiska Annaler. A.*, **81**(4), 703–711.

Viðaukar

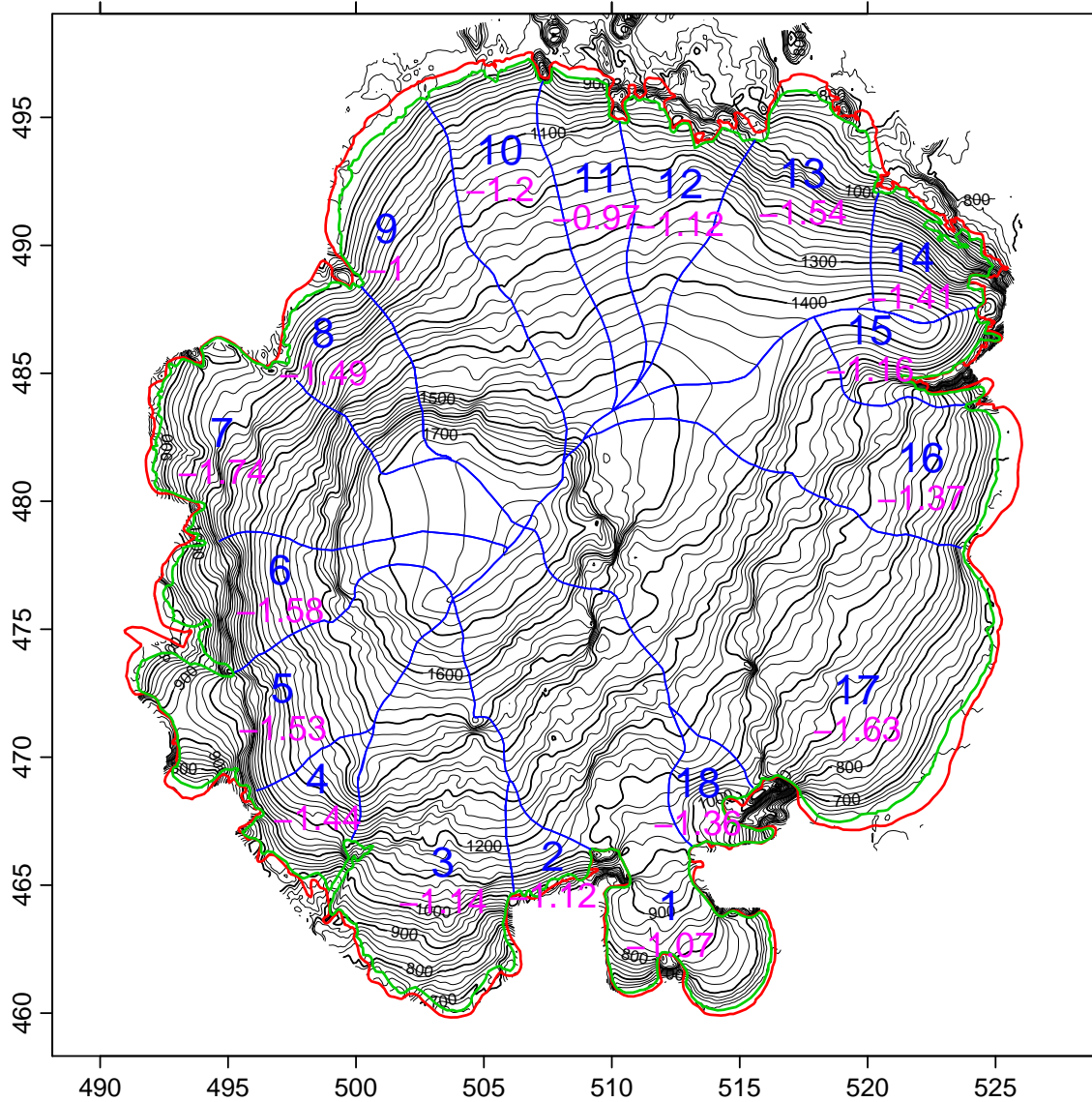
I Töflur og myndir

Tafla 5. Breyting á rúmmáli íss, meðalheðarbreyting og meðalafkoma ísásviða á Hofsjökli fyrir árabílin 1986 til 1999, 1999 til 2004, 2004 til 2008, 2008 til 2013 og 2013 til 2015.

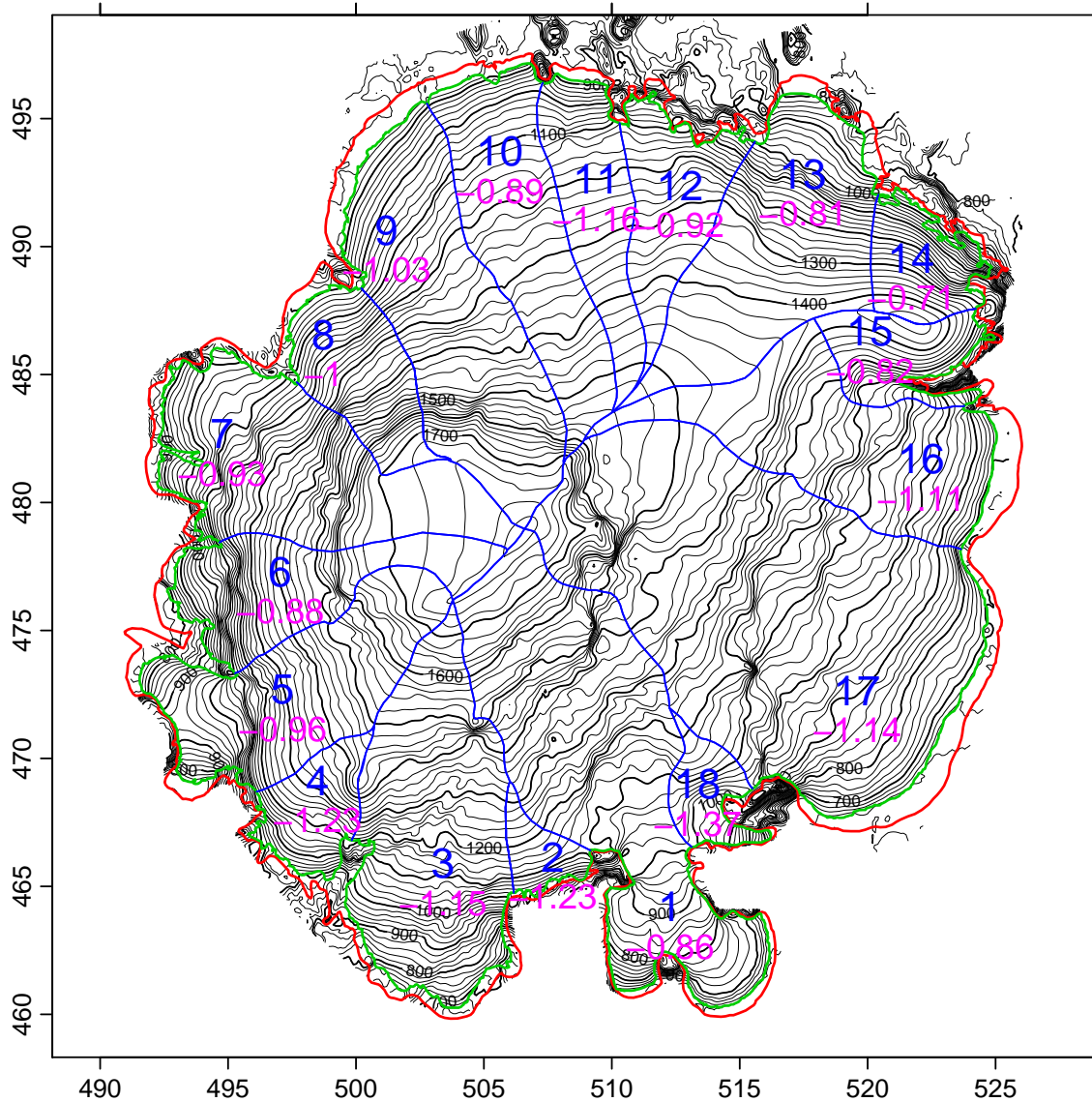
Nr. Ísásvið	ΔV																					
	A86	A99	A04	A08	A13	A15	86-99	99-04	04-08	08-13	13-15	86-99	99-04	04-08	08-13	13-15	b86-99	b99-04	b04-08	b08-13	b13-15	
	km ²	km ²	km ²	km ²	km ²	km ²	km ³	km ³	km ³	km ³	km ³	miss	miss	miss	miss	miss	m _v a ⁻¹	m _v a ⁻¹	m _v a ⁻¹	m _v a ⁻¹	m _v a ⁻¹	m _v a ⁻¹
1 Múla- og Nauthagaj.	100.1	99.3	97.8	96.3	94.9	94.6	-0.41	-0.62	-0.39	-0.65	0.05	-4.08	-6.27	-4.07	-6.80	0.50	-0.27	-1.07	-0.86	-1.16	0.12	
2 Miklukvíslarjökull	7.9	7.8	7.4	7.3	7.2	7.1	-0.04	-0.05	-0.04	-0.06	-0.00	-5.56	-6.58	-5.81	-8.13	-0.31	-0.36	-1.12	-1.23	-1.38	-0.16	
3 Blautukvíslarjökull	74.5	72.5	70.9	68.3	66.6	66.1	-0.53	-0.48	-0.38	-0.51	0.00	-7.16	-6.69	-5.42	-7.63	0.07	-0.47	-1.14	-1.15	-1.30	-0.06	
4 Þverf- og Brattölduj.	18.6	17.6	17.1	15.5	15.0	14.6	-0.19	-0.15	-0.09	-0.13	-0.01	-10.74	-8.48	-5.80	-8.19	-0.38	-0.70	-1.44	-1.23	-1.39	-0.21	
5 Blágnipujökull	55.6	52.7	51.6	50.5	49.4	48.8	-0.31	-0.47	-0.23	-0.35	0.01	-5.75	-8.98	-4.51	-6.95	0.17	-0.38	-1.53	-0.96	-1.18	-0.02	
6 Böndujökull	38.1	36.4	35.3	34.3	32.6	32.3	-0.19	-0.33	-0.14	-0.19	0.02	-5.11	-9.28	-4.12	-5.65	0.62	-0.33	-1.58	-0.88	-0.96	0.17	
7 Kvíslarjökull	66.2	63.9	64.2	61.1	59.8	59.7	-0.17	-0.66	-0.27	-0.35	0.01	-2.68	-10.25	-4.37	-5.79	0.22	-0.17	-1.74	-0.93	-0.98	0.01	
8 Aftabrekkujökull	27.3	26.2	25.4	24.7	24.1	23.7	-0.33	-0.23	-0.12	-0.16	-0.01	-12.32	-8.74	-4.68	-6.60	-0.38	-0.81	-1.49	-1.00	-1.12	-0.22	
9 Vestari-Sátujökull	74.7	72.5	70.3	68.7	66.2	65.7	-0.91	-0.42	-0.34	-0.43	0.01	-12.40	-5.91	-4.86	-6.34	0.12	-0.81	-1.00	-1.03	-1.08	-0.05	
10 Eystri-Sátujökull	49.8	48.7	47.9	47.5	46.8	46.7	-0.53	-0.34	-0.20	-0.32	-0.02	-10.67	-7.06	-4.19	-6.88	-0.51	-0.70	-1.20	-0.89	-1.17	-0.30	
11 Tvirfellsjökull	28.8	28.2	27.7	27.5	27.1	27.0	-0.31	-0.16	-0.15	-0.19	-0.02	-10.71	-5.70	-5.44	-7.05	-0.70	-0.70	-0.97	-1.16	-1.20	-0.35	
12 Austari-Jökulsárf.	27.7	26.7	25.5	25.8	25.3	25.2	-0.21	-0.17	-0.11	-0.16	-0.00	-7.60	-6.60	-4.32	-6.15	-0.13	-0.50	-1.12	-0.92	-1.05	-0.09	
13 Illvíðrajökull	64.5	62.8	61.4	60.9	59.3	58.9	-0.26	-0.56	-0.23	-0.40	0.02	-4.07	-9.08	-3.79	-6.62	0.33	-0.27	-1.54	-0.81	-1.13	0.06	
14 Löngukvíslarjökull	18.6	17.1	16.6	16.1	15.1	14.2	-0.03	-0.14	-0.05	-0.09	-0.00	-1.69	-8.28	-3.33	-5.74	-0.19	-0.11	-1.41	-0.71	-0.98	-0.10	
15 Miklat- og Klakksj.	18.9	17.9	17.8	17.3	16.8	16.9	-0.03	-0.12	-0.07	-0.09	0.01	-1.73	-6.83	-3.87	-5.30	0.35	-0.11	-1.16	-0.82	-0.90	0.10	
16 Háöldujökull	63.0	59.8	58.5	57.7	56.8	56.6	-0.40	-0.48	-0.30	-0.43	0.00	-6.51	-8.07	-5.23	-7.60	0.02	-0.43	-1.37	-1.11	-1.29	-0.07	
17 Þjórsárfjökull	172.9	169.1	166.1	162.5	157.9	156.5	-0.54	-1.60	-0.88	-1.29	-0.06	-3.14	-9.57	-5.36	-8.06	-0.35	-0.21	-1.63	-1.14	-1.37	-0.25	
18 Rótarjökull	11.2	10.9	10.8	10.4	10.2	10.0	-0.06	-0.09	-0.07	-0.10	-0.01	-5.47	-7.98	-6.43	-10.06	-1.24	-0.36	-1.36	-1.37	-1.71	-0.57	
0 Samtals/meðaltal	918.7	890.2	872.5	852.4	831.2	824.4	-5.45	-7.07	-4.08	-5.90	-0.01	-6.02	-8.02	-4.73	-7.01	-0.01	-0.39	-1.36	-1.01	-1.19	-0.09	



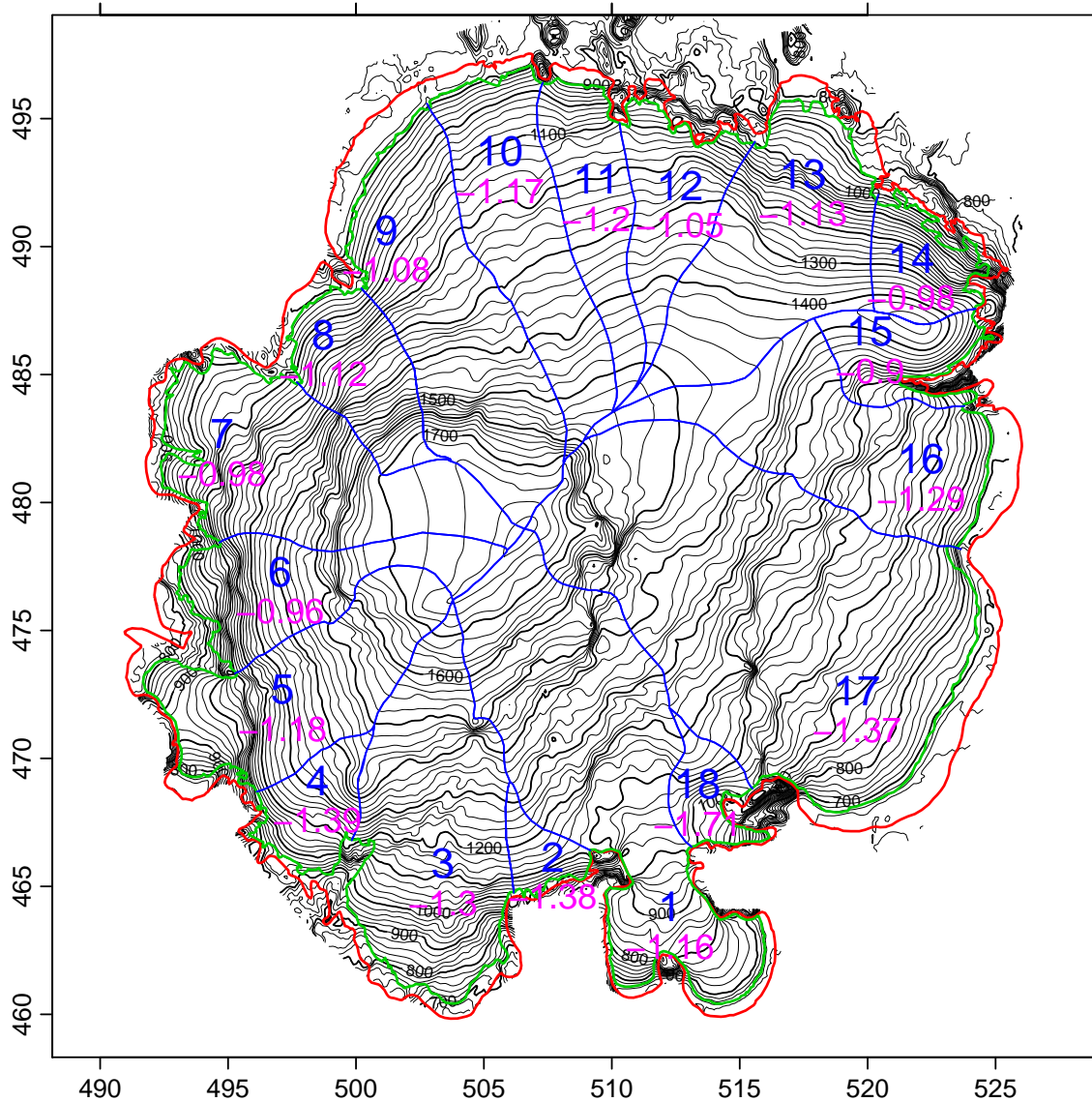
Mynd 47. Ísasvið á Hofsjökli ásamt meðalafkomu hvers um sig á árabílinu 1986–1999 í metrum vatnsgildis á ári (sjá töflu 5). Óvissa í mati á meðalafkomu tímabilsins er um eða undir $0.2 m_{vams} a^{-1}$. Meðalafkoma alls jökulsins á tímabilinu er $-0.39 m_{vams} a^{-1}$. Hæðarlínur og ísaskil eru skv. leysimælingu frá 2008. Innri jökuljaðarinn er skv. myndum Loftmynda ehf. frá 1999. Ytri jökuljaðarinn er skv. korti frá 1986.



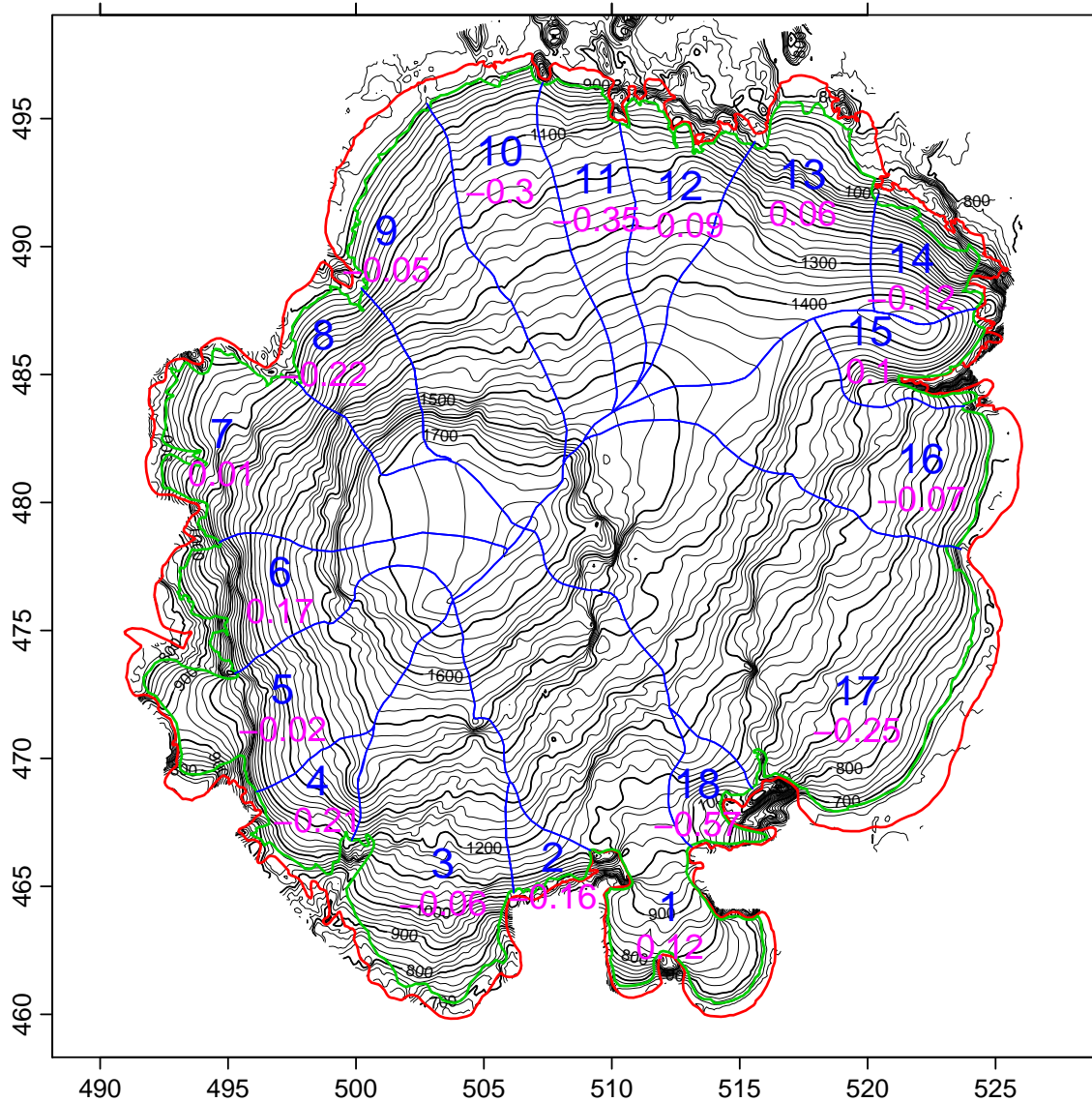
Mynd 48. Ísasvið á Hofsjökli ásamt meðalafkomu hvers um sig á árabílinu 1999–2004 í metrum vatnsgildis á ári (sjá töflu 5). Óvissa í mati á meðalafkomu tímabilsins er um eða undir $0.3 m_{\text{vatns}} a^{-1}$. Meðalafkoma alls jökulsins á tímabilinu er $-1.36 m_{\text{vatns}} a^{-1}$. Hæðarlínur og ísaskil eru skv. leysimælingu frá 2008. Innri jökuljaðarinn er skv. SPOT5 myndum frá 2004 (Gögn frá Eyjólfu Magnússyni á JH og Etienne Bertier við CNRS). Ytri jökuljaðarinn er skv. korti frá 1986.



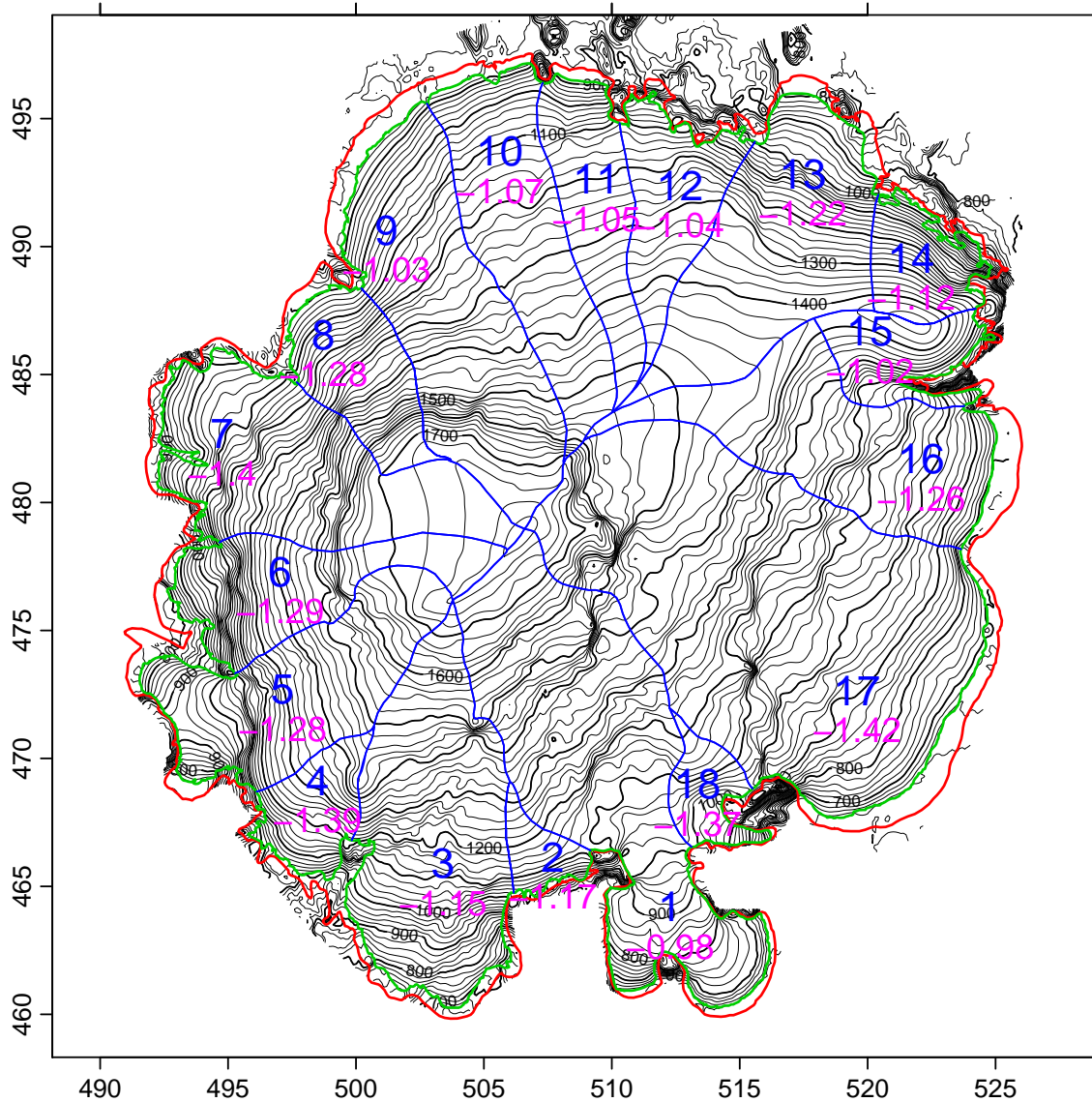
Mynd 49. Ísasvið á Hofsjökli ásamt meðalafkomu hvers um sig á árabílinu 2004–2008 í metrum vatnsgildis á ári (sjá töflu 5). Óvissa í mati á meðalafkomu tímabilsins er um eða undir $0.2 m_{vams} a^{-1}$. Meðalafkoma alls jökulsins á tímabilinu er $-1.01 m_{vams} a^{-1}$. Hæðarlínur, ísavið og innri jökuljaðarinn eru skv. leysimælingu frá 2008. Ytri jökuljaðarinn er skv. korti frá 1986.



Mynd 50. Ísasvið á Hofsjökli ásamt meðalafkomu hvers um sig á árabílinu 2008–2013 í metrum vatnsgildis á ári (sjá töflu 5). Óvissa í mati á meðalafkomu tímabilsins er um eða undir $0.15 m_{\text{vams}} a^{-1}$. Meðalafkoma alls jökulsins á tímabilinu er $-1.19 m_{\text{vams}} a^{-1}$. Hæðarlínur og ísasvið eru skv. leysimælingu frá 2008. Innri jökuljaðarinn er skv. leysimælingu frá 2013. Ytri jökuljaðarinn er skv. korti frá 1986.



Mynd 51. Ísasvið á Hofsjökli ásamt meðalafkomu hvers um sig á árabílinu 2013–2015 í metrum vatnsgildis á ári (sjá töflu 5). Óvissa í mati á meðalafkomu tímabilsins er um eða undir $0.3 m_{vams} a^{-1}$. Meðalafkoma alls jökulsins á tímabilinu er $-0.09 m_{vams} a^{-1}$. Hæðarlínur og ísasvið eru skv. leysimælingu frá 2008. Inri jökuljaðarinn er skv. ArcticDEM frá 2015. Ytri jökuljaðarinn er skv. korti frá 1986.



Mynd 52. Ísavið á Hofsjökli ásamt meðalafkomu hvers um sig á árabílinu 1999–2008 í metrum vatnsgildis á ári (sjá töflu 5). Óvissa í mati á meðalafkomu tímabilsins er um $0.15 m_{vams} a^{-1}$. Meðalafkoma alls jökulsins á tímabilinu er $-1.28 m_{vams} a^{-1}$. Hæðarlínur og ísaskil eru skv. leysimælingu frá 2008. Hæðarlínur, ísavið og innri jökuljaðarinn eru skv. leysimælingu frá 2008. Ytri jökuljaðarinn er skv. korti frá 1986.