

Greinargerð til Vegagerðarinnar vegna styrks til verkefnisins:

**Afkoma og hreyfing Breiðamerkurjökuls og afrennsli
leysingavatns til Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi 2019**



Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans

mars 2020

(Umsjón: Finnur Pálsson, verkefnastjóri í jöklarannsóknum; fp@hi.is)

Inngangur

Jöklahópur Jarðvísindastofnunar hefur í áratugi aflað gagna um Breiðamerkurjökul, Jökulsárlón og Jökulsá á Breiðamerkursandi, lengst af í samstarfi við Vegagerðina. Hér er lýst helstu niðurstöðum rannsókna ársins 2019.

Megin tilgangur þessa verkefnis er þríþættur: Könnun afrennslis til Jökulsárlóns, mat fargbreytinga (vegna landlyftingar), öflun gagna til að meta líklega þróun Breiðamerkurjökuls og jaðarlóna hans næstu ártugi. Allir þessir þættir skipta máli í ákvörðunum um vegstæði og staðsetningu og hönnunarforsendur vegamannvirkja.

Í samvinnu við Vegagerðina, sem þá var að huga að brúargerð yfir ána Stemmu og hugsanlegum flutningi brúar yfir Jökulsá, voru gerðar íssjármælingar á Breiðamerkurjökli vorið 1991. Eftir mælingunum voru gerð kort af yfirborði jökulsins og botni hans. Þessi nýju kort ásamt því að áin Stemma hætti að renna til sjávar (heldur fór með jökuljaðrinum til Jökulsárlóns þegar jökullinn hörfaði 1992), ásamt spá um enn frekari hörfun, varð til þess að hætt var við nýja brú yfir Stemmu. Þá varð líka ljóst að ekki kæmi vegstæði undan jökli til að leysa af hólmi brú yfir Jökulsá heldur myndi lónið stækka til norðurs þegar jökullinn hörfaði; bergbotn fer ekki yfir sjávarmál fyrr en ~20 km norðar.

Kerfisbundnar mælingar á afkomu Vatnajökuls (snjósöfnun að vetri og bráðnun að sumri) hófust árið jökulárið 1991-1992 (í samvinnu við Landsvirkjun), en einskorðuðust þá við vesturjökulinn. Smám saman var mælisvæðið stækkað og jökulárið 1995-96 var mælingum á Breiðamerkurjökli aukið við. 1994 og 1995 hófust tilraunir til mælinga á veðurþáttum til mats á orkustraumum að jökulyfirborði (orka til bræðslu íss og snævar). Rekstur veðurstöða á Breiðamerkurjökli hófst árið 1996 í tengslum við fjölþjóðlegt verkefni (TEMBA) sem styrkt var af Evrópusambandinu, en lengst af síðan hefur rannsóknasjóður Vegagerðarinnar styrkt Jöklahóp Jarðvísindastofnunar til reksturs veðurstöðva og afkomumælinga þar. Auk þessa hefur jöklahópur aflað margvíslegra gagna um hreyfingu, yfirborðslögun og fleira. Öll þessi gögn hafa verið nýtt til að nálgast rannsóknarmarkmiðin sem nefnd eru hér að ofan.

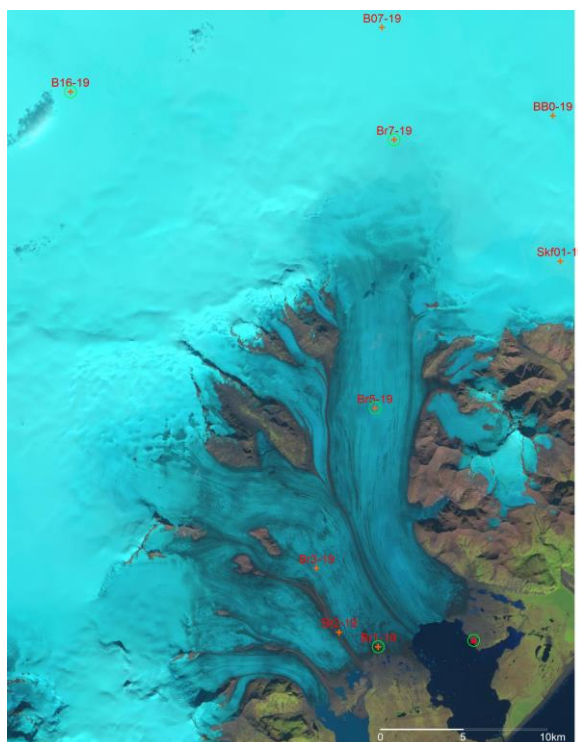
Afkoma Breiðamerkurjökuls er nú mæld á 6 mælistöðvum en, fleiri mælistaðir á Vatnajökli nýtast til að skorða afkomu hans (1. mynd). Unnið er að mælingum á þrem efstu mælistöðvunum í sérstökum leiðongrum til afkomumælinga á öllum Vatnajökli í maí og október, en stuðningur Vegagerðar er

nýttur til mælinga á stöðvum BR1, BR2, BR3 og BR5.

Sjálfvirk veðurstöð hefur flest ár síðan 1996 verið í rekstri allt árið á mælistað Br1, en að sumarlagi einnig á mælistað Br7 síðustu fimm sumur, en sú stöð hafði í rúman áratug verið í rekstri á safnsvæði Hoffellsjökuls. Stöðin sem síðasta vor var sett upp í Br5 hafði áður verið 6 ár á mælistað Br4 (um 5 km sunnar en Br5), en illa gekk að halda henni við; þarna er nú mjög erfitt að fara um vegna sprungna. Á veðurstöðvunum er safnað gögnum sem nýtast til að meta orku sem berst að yfirborði jökuls og bræðir ís og snjó. Auk þess er lofthiti, raki og vindstyrkur mæld stað við NA-Jökulsárlón þar sem myndavél var áður í rekstri (sjá hér á eftir).

Staðsetning mælistika eða mælivíra á afkomumælistöðvum er mæld með landmælinga GPS tækjum og meðalhraði milli mælinga reiknaður út frá færslu þeirra. Á síðasta áratug var í nokkur misseri mældur skriðhraði jökulsins í átt til Jökulsárlóns með samfelldum GPS mælingum. Slíkum mælingum var ekki viðhaldið þar sem rekstur stöðvanna var mjög erfiður (og dýr) í framkvæmd vegna sprungins jökulyfirborðs.

Þá hefur síðustu ár verið aflað margskonar gervihnattagagna sem nýtast til að meta legu



1. mynd. Afkomumælistaðir (+), veðurstöðvar (O), GPS stöðvar (Δ) og myndavél (Δ) á og við Breiðamerkurjökul. Ísaskil Breiðamerkurjökuls sýnd með blárrí línu. (í bakgrunni er Sentinel2 gervihnattamynd frá 9. september 2019).

jaðars og yfirborðshreyfingu stórra svæða yfir tiltekin tímabil (frá nokkrum dögum til nokkurra mánaða) og til gerðar hæðarlíkana jökulsins.

Hér að aftan er gerð grein fyrir afkomumælingum, afrennsli leysingavatns af jökli til Jökulsárlóns og veðurathugunum sem unnið var að á árinu 2019. Sumt af texta greinargerðarinnar er samhljóða greinargerð síðasta árs, til að halda samfellu, en hér er fyrst og fremst gerð grein fyrir gagnaöflun á síðasta árs. Höfundur skýrslunnar ber ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirrar stofnunar sem höfundar starfa hjá.

Stíklur um tengdar rannsóknir og birtingar nokkur síðustu ár:

Eyjólfur Magnússon sem unnið hefur að rannsóknum á hreyfingu jökulsins, flutti erindi um þær á árlegri ráðstefnu American Geoscience Union í San Fransisco í desember 2013 og á ráðstefnu International Glaciological Society í Finnlandi í nóvember 2013.

Um tveggja ára skeið rak Jöklahópur (Eyjólfur Magnússon) myndavél sem tók háupplausnarljósmyndir af kelfandi hluta jökulsins á 5 mínútna fresti. Myndaraðirnar nýtast til að sjá kelfingararburði (myndaraðir má sjá hér: https://notendur.hi.is/~eyjolfm/Breidamerkurj_time_lapse_video.html).

Alexander Jarosch sem vann að gagnaöflun með flygildi og túlkun þeirra gagna, kynnti niðurstöður í erindi um þær á árlegri ráðstefnu American Geoscience Union í San Fransisco í desember 2014 og víðar.

MS nemandi hans Tayo van Boeckel vann meistaraverkefni um vensl botnskriðs og vatnsþrýstings á Breiðamerkurjökli, en í því verkefni nýtti hann gögn frá veðurstöðvunum, GPS tækjunum, afkomumælingarnar, um lögun botnsins og nýleg kort af yfirborði jökulsins sem jöklahópur hefur aflað. Ritgerð hans um þetta efni má nálgast hér:

(<http://skemman.is/item/view/1946/23007?jsessionid=7E330A905BA14EFC419157BE3ADFCF2E>).

Árið 2017 kom úr grein í alþjóðlegu tímariti (Snævarr o.fl. 2017) þar sem rakin er þróun Breiðamerkurjökuls frá um 1900, og í grein (Svævarr o.fl, 2020) er rakin þróun lónanna við Breiðamerkurjökul.

Einnig er rétt að nefna að afkomu og veðurgögnin frá Breiðamerkurjökli hafa með öðrum slíkum frá Vatnajökli nýst til líkangerðar af orkubúskap við yfirborð, gerð afkomulíkan og spáreikninga um þróun Vatnajökuls næstu áratugi og aldir. Þetta var verk var unnið af doktorsnema Jöklahópsins, sjá 3 ritrýndar greinar um þetta Louise Steffensen Schmidt o.fl. 2017, 2018 og 2020.

Leiðangrar vegna mælinga:

3-4. apríl. Lesið af afkomumælivírum og vetrarsnjór mældur. Nýjir afkomumælivírar boraðir niður með gufubor. Veðurstöð í Br1 færð ofar og borað fyrir nýjum $\frac{3}{4}$ “ rorum fyrir snjóhæðarmælinn með gufubor. Veðurstöð í Br4 mokkuð upp og flutt til í Br5. Mælitæki og skráningabúnaður tekin til Reykjavíkur til viðgerðar.

1. maí. Mælitækjum veðurstöðvar í Br5 komið fyrir.

9. september. Viðhald veðurstöðvar í Br1, skipt um snjóhæðarmæli.

18. -19. nóvember. Lesið af afkomumælivírum. Nýr afkomumælivír í Br2 boraður niður með gufubor. Í Br1 var borað fyrir nýjum $\frac{3}{4}$ “ rorum fyrir snjóhæðarmælinn með gufubor. Reynt að vitju um stöð í Br5, en tókst ekki.

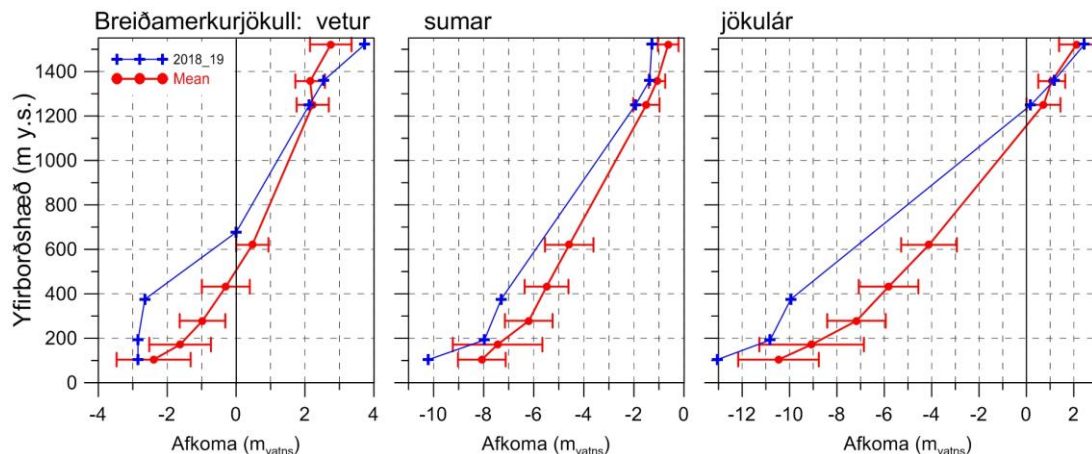
Kostnaður á árinu 2019:

Styrkur til þessa verkefnis af tilraunafé Vegagerðar árið 2019 var 2500 þkr.

Rekstrarkostnaður mælistöðva (viðgerð veðurstöðva, verkstæðisvinna, varahlutir, rafgeymar o.fl.) var 175 þkr., kostnaður vegna mællleiðangra (4 ferðir, greiðslur fyrir notkun bíla og vélsleða auk launa starfsmanna) reyndist 950 þkr., laun starfsmanns við úrvinnslu og túlkun gagna (1.6 mannmán) 1330 þkr. og umsjónargjald til yfirstjórnar Raunvísindastofnunar 2.5% eða 63þkr. Samtals eru þetta 2518 þkr.

24. mars 2020. f.h. Jöklahóps Jarðvísindastofnunar Háskólans;
Finnur Pálsson verkefnastjóri í Jökklarannsóknum

Niðurstöður afkomumælinga 2018-19.

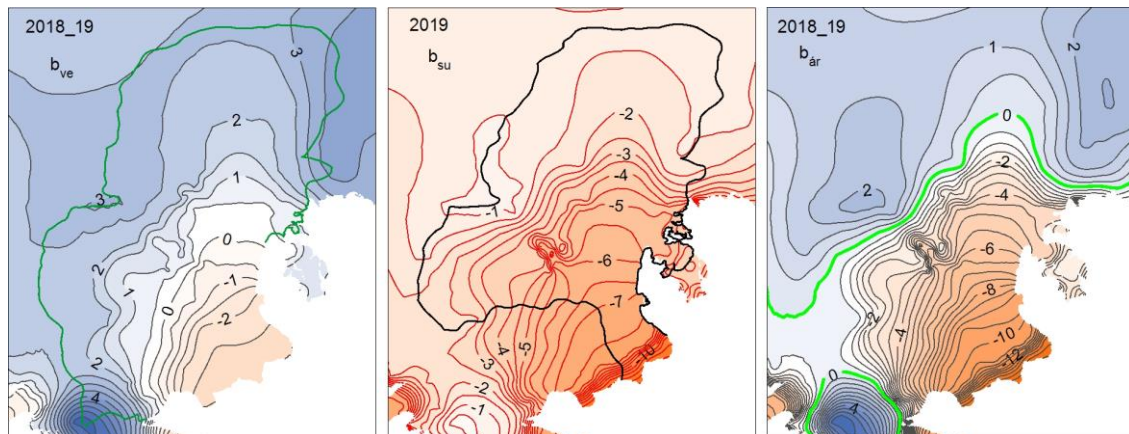


2. mynd. Breytileiki afkomu með hæð á Breiðamerkurjökli jökulárið 2018-19 og meðaltal allra ára sem afkoma hefur verið mæld (flestar ár frá 1995-96, afkoma í m vatns og hæð mældastaða í m yfir sjó). Þverstríkin sýna staðalfrávik mæliraðar í mælistöðvunum.

Farnar voru nokkrar ferðir til afkomumælinga og viðhalds veðurstöðva jökulárið 2018-19, flestar voru tengja öðrum verkum til að lágmarka kostnað þessa verkefnis. Aðalmæliferðin var farin 3.-4. mars 2019 á neðri hluta jökulsins (leysingasvæði). Lesið var af eldri afkomuvírum og boraðar holur (~10-15 m djúpar) með gufubor og komið fyrir nýjum afkomumælivírum í Br2 og Br3 en ¼“ rörum fyrir snjóhæðarmæla við veðurstöðvarnar í Br5 og Br1. Veðurstöð sem var í Br4 var grafinn upp (sjá mynd á forsiðu) og færð ofar á jökulinn á stað Br5. Vetrarmælingar á efri hlutanum (safnsvæði) voru gerðar í byrjun maí. Þá var einnig farið í veðurstöðina í Br5 og mælitækjum komið fyrir. Veðurstöð við Br7 var sett upp 9. maí. Haustmælingar á safnsvæði voru gerðar 18. október og þá tekin niður veðurstöðin í Br7. Á leysingasvæðinu var mælt í Br1, Br2 í ágúst og þá einnig lagaður snjóhæðarmælir í Br1 sem var við það að falla. Haustmæling afkomu var gerð 19. nóvember, en ekki reyndist hægt að fara þá í Br5, enginn snjór komin og of mikið um sprungur til að hættandi væri á að fara þangað.

Veður haustið 2018 var breytilegt, október óvenju hlýr en nóvember kaldur, seinni hluti vetrar einnig hlýr og þó metsnjór væri allra efst á jöklinum var nær enginn snjór neðan um 1000 m hæðar og áköf vetrarleysing á leysingasvæðinu. Vorveður var fremur kalt en þurr. Sólríkt og hlýtt var mest allt sumaríð. Á 2. mynd sést að vetrarsnjósöfnun var verulega yfir meðallagi í safnsvæðinu, og á leysingasvæði var vetrarýrjun nærri tveim staðalfrávikum umfram meðalag. Á safnsvæðinu var sumarrýrjun vel umfram meðalag en á stærstum hluta leysingasvæðis var leysing hins vegar langt umfram meðalag. Ársafkoma 2018-19 var nærri meðallagi efst en rýrjun verulega meiri (2 staðalfrávik umfram) á leysingasvæðinu neðanverðu.

Flatartegur yfir safnsvæði jökulsins skilar heildarafkomutölum (3. og 4. mynd). Vetrarafkoma reyndist 1.36 m_{vatns} eða um 90% af meðaltali mælitímans. Rýrjun sumarsins reyndist -3.44 m_{vatns} eða um 35% umfram meðalrýrjun mælitímans. Á jökulárinu var afkoma efst á safnsvæðinu nærri meðallagi en



3. mynd. Dreifing vetrar- (vinstri) sumar- (miðja) og ársafkomu (hægri) á Breiðamerkurjökli 2018-19 (afkoma í m vatns). Ísasvið Breiðamerkurjökuls er sýnt með grænni línu (vinstri rammi) og vatnasvið Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi með svartri línu (miðju rammi).

Þegar neðar dró varð hún meir og meir neikvæðari en að jafnaði á mælitímanum, neðst var rýrnun nær 1.5 staðaðfráviki meiri en að jafnaði. Jökulárið 2018_10 var ársafkoman $-2.08 m_{\text{vatns}}$, eða rýrnun um tvöfalt meiri en að meðaltali. Ef frá er talið jökulárið 2014-15 hefur ársafkoman verið neikvæð allt mælitímabilið ($-1.07 m_{\text{vatns}}$ á ári að meðaltali).

Auk massataps vegna afkomu við yfirborð tapast ís vegna kelfingar í Jökulsárlón (ís sem brotnar af sporðinum og bráðnar í lóninu); þetta eru nærri 0.6 km^3 af ís á ári (sjá umfjöllun hér aftar). Á 5. mynd er sýnt sambengi ársafkomu Breiðamerkurjökuls við vetrar- og sumarafkomu með því að teikna ársafkomu á móti vetrarafkomu annars vegar en sumarafkomu hins vegar. Bæði línuritin sýna sterkt sambengi og gefa vísbendingu um að til þess að afkoma Breiðamerkurjökuls sé í jafnvægið miðað við núverandi lögun ætti umsetning að vera um $2 m_{\text{vatns}}$ ($b_{\text{ve}} = 2 = -b_{\text{su}}$). Mæliröðin sýnir hins vegar að meðalvetrarafkoma er aðeins $1.48 m_{\text{vatns}}$ eða $\sim 74\%$ af $2 m_{\text{vatns}}$ og meðalsumarleysing um 30% umfram ($-2.55 m_{\text{vatns}}$). Þannig hníga rök til þess að hin afgerandi neikvæða afkoma Breiðamerkurjökuls á mælitímanum sé bæði vegna skorts á snjósöfnun að vetri og mikillar leysingar að sumarlagi. Fyrir aðra skriðjökla Vatnajökuls þar sem afkoma er mæld er sumarrýrnun langtum stærri orsakabáttur og vetrarafkoma vel yfir 90% af því sem til þarf. Á 6. mynd er ársafkoma Breiðamerkurjökuls teiknuð á móti mældri hæð jafnvægislínu (ELA) á mælisniði og einnig hlutfalli safnsvæðis af heildarflatarmáli (AAR). Þetta sambengi bendir til að AAR Breiðamerkurjökuls þurfi að jafnaði að vera nærri 72% og ELA nærri 960 m til að ársafkoma hans sé núll. Bæði eru þessi gildi útmörk þess sem mælist fyrir skriðjökla Vatnajökuls (sjá gráu svæðin á 6. mynd), AAR hæst en ELA lægst.

En stígul b_n - AAR og b_n - ELA er svipaður fyrir Breiðamerkurjökul og alla hina jöklana; um $0.5 m_{\text{ve}}$ fyrir 10% breytingu AAR og $0.7 m_{\text{ve}}$ fyrir 100 m breytingu ELA.

Samandregnar upplýsingar um afkomu Breiðamerkurjökuls jökulárið 2018-19 eru sem hér segir:

Flatarmál = 925 km^2 (samkvæmt jaðri 2017)

$B_{\text{ve}} = 1.25 \text{ km}^3$; $b_{\text{ve}} = 1.36 \text{ m}$ (meðatal 1995_96-2017_18 er: $\underline{b}_{\text{ve}} = 1.48 \text{ m}$)

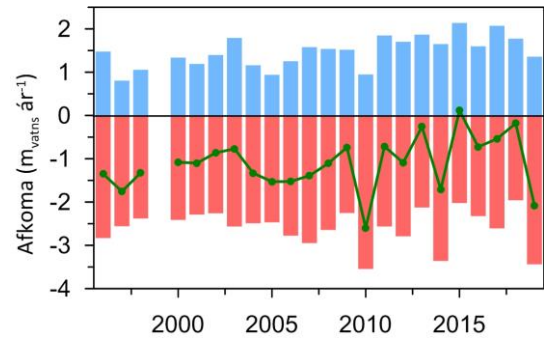
$B_{\text{su}} = -3.18 \text{ km}^3$; $b_{\text{su}} = -3.44 \text{ m}$ (meðatal 1996-2018 er: $\underline{b}_{\text{su}} = -2.55 \text{ m}$)

$B_{\text{ár}} = -1.93 \text{ km}^3$; $b_{\text{ár}} = -2.08 \text{ m}$ (meðatal 1995_96-2017_18 er: $\underline{b}_{\text{ár}} = -1.07 \text{ m}$)

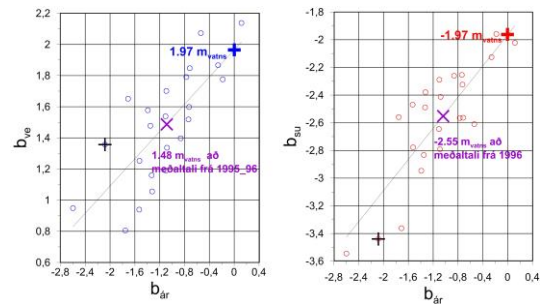
ELA (hæð jafnvægislínu) = $\sim 1230 \text{ m}$ (á mælisniði);

AAR (hlutfall safnsvæðis af heildarflatarmáli) = 44%

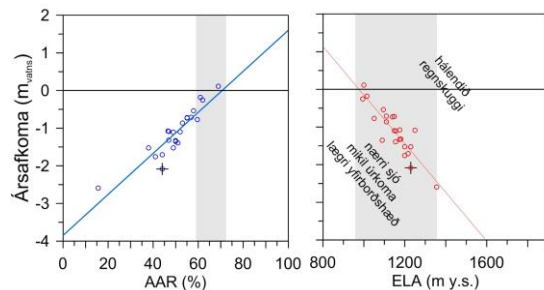
(Afkomustærðir eru gefnar sem vatnsjafngildi. B er rúmmál afkomu, b er þykkt afkomu jafndreift á flötinn, bæði gefin sem vatnsjafngildi, ve, su, ár standa fyrir vetur, sumar og jökulár).



4. mynd. Yfirborðsafkoma Breiðamerkurjökuls metin eftir afkomumælingum *vetur*, *sumar* og *jökulár* (ekki er tekið tillit til kelfingar).



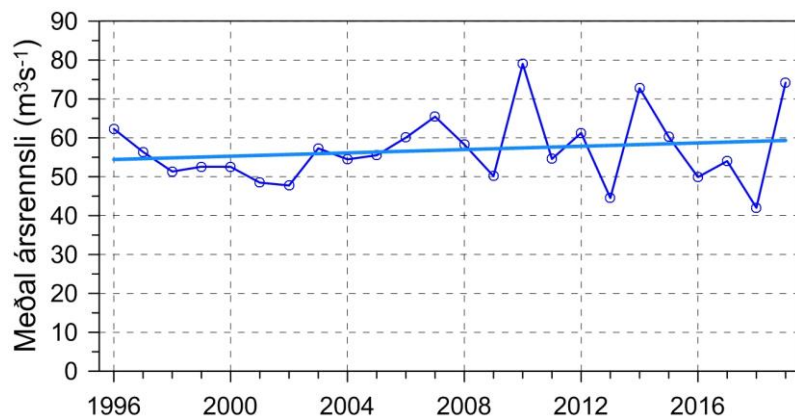
5. mynd. Ársafkoma ($b_{\text{ár}}$) Breiðamerkurjökuls teiknuð á móti vetrarafkomu (b_{ve} , vinstri) og sumarafkomu (b_{su} , hægri). Mæligildi jökulársins 2018_19 eru merkt með svörtum +.



6. mynd. Ársafkoma Breiðamerkurjökuls teiknuð á móti mældri hæð jafnvægislínu (ELA) á mælisniði og hlutfalli safnsvæðis af heildarflatarmáli (AAR). Svartur + er gildi ársins. Gráa svæðið sýnir svæði þar sem aðrir annarra skriðjökla Vatnajökuls sker $b_n=0$ línuna skv. mælingum.

Afrennsli til Jökulsárlóns

Meðalársafrennsli til Jökulsárlóns vegna yfirborðsleysingar að sumarlagi (eins og hún er metin eftir sumarafkomu en þar er ekki tekið tillit til úrkomu, hvort heldur sem er rigningar eða snjókomu sem fellur og bráðnar) er sýnt á 7. mynd. Sumarafrennsli til lónsins jafnað yfir jökulárið 2018-19 er sú minnsta á mælitímanum, metin rétt rúmlega $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en meðalafrennsli til lónsins 1996 til 2018 er nærri $55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.



7. mynd. Meðalársafrennsli (á jökulári þ.e. október til september) yfirborðsleysingarvatns (metið útfrá sumarafkomu) til Jökulsárlóns sumurin 1996 til 2019.

Leysing á miðju sumri ræðst að stærstum hluta af sólgeislun, þannig má nálga dreifingu leysingar með tíma gróflega með sólarhæð; þ.e. gera ráð fyrir að lítil sem engin leysing sé á tímabilinu nóvember til febrúar, en nota sínuslögun það sem eftir er árs með hámarki á miðju sumri. Ef þetta er gert fæst hámarksafrennsli í meðalári nálægt $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ um miðjan júlí. Raunverulegur toppur er líklega mun hærri, ekki er óvarlegt að gera ráð fyrir að í ofsaleytingu sé topprennsli 2-3 sinnum meira eða 400-600 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$. Þetta má vinna miklu betur með reiknilíkönum sem byggja þeirri röð veðurgagna sem til eru.

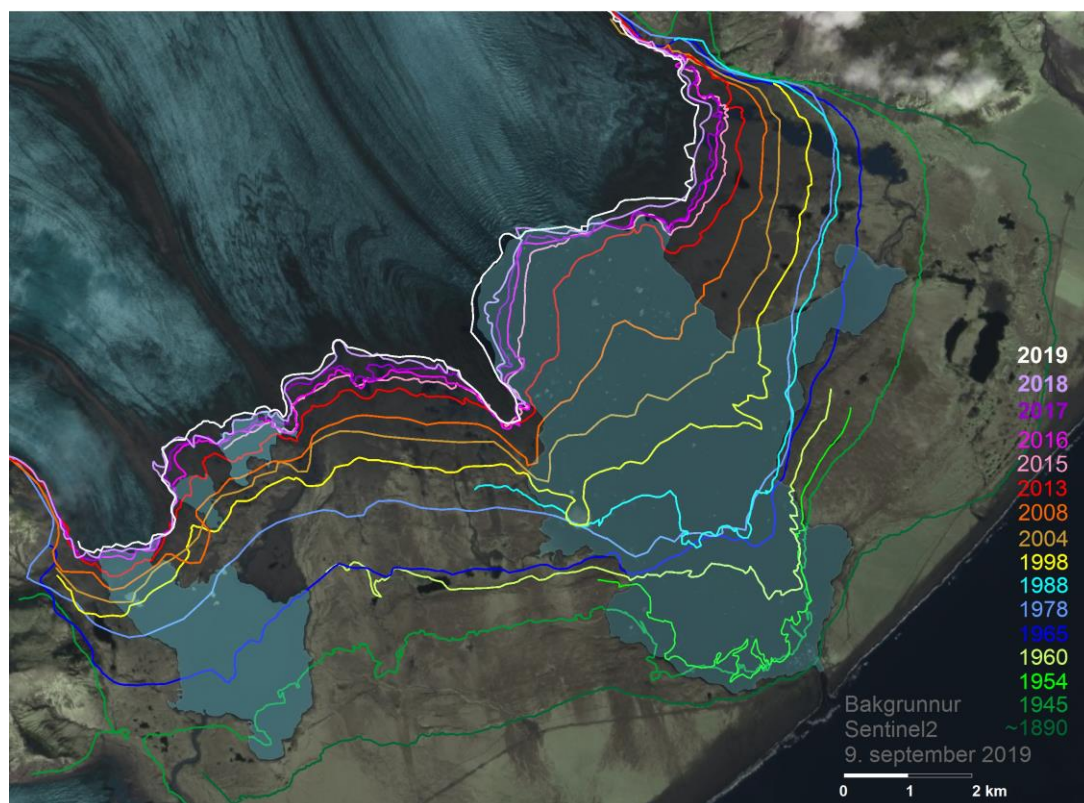
Jöklahópur hefur í fyrri greinargerðum metið að kelfing hafi verið fjórðungur úr km^3 um miðjan fyrsta áratug aldarinnar (sem samsvarar 10 hluta meðal sumarleysingar). Sterkar vísbendingar eru um að kelfing hafi aukist á síðasta áratug, það voru niðurstöður vinnu fransks nemenda sem var hjá jöklahópi sumarið 2009 og vann að mati kelfingar út frá ýmsum gervitunglagögnum. Samkvæmt þeirri vinnu var kelfing árið 2007 $\sim 0.25 \text{ km}^3$ en $\sim 0.7 \text{ km}^3$ árið 2009. Það ár var þó einstakt að því leyti að lónið var meira og minna þakið ísjökum langtímum saman. Ef gert er ráð fyrir að bráðnun íss í lóninu sé nálægt 0.5 km^3 af ís á ári eru það nærri $16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ að meðaltali, en mest bráðnar yfir sumarmánuðina (mjög lítið í nóvember til febrúar/mars), þannig gæti tillegg þessa verið nálægt $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ yfir sumartímann.

Breiðmerkurjökull og Jökulsárlón eru á úrkomusamasta svæði Íslands. Regnvatn sem fellur á vatnasvið Jökulsárlóns á jökli að sumarlagi skilar sér allt sem afrennsli til lónsins með breytilegri seinkun, nær engri seinkun fyrir það sem fellur á sporðinn en u.þ.b. sólarhringur fyrir það sem fellur efst á safnsvæðið. Metúrkoma var á þessu svæði í október 1979 þegar sólarhringsúrkoma á Kvískerjum mældist 242.7 mm. Í febrúar 1968 mældist 228.4 mm í sólarhringsúrkoma á Kvískerjum og sama dag 233.9 mm á Vagnstöðum í Suðursveit. Ef slík úrkoma félli á vatnasvið Jökulsárlóns ($\sim 740 \text{ km}^2$) og skilaði sér á einum sólarhring í lónið væri meðalrennsli $(0.2 \text{ m} \cdot 740.000.000 \text{ m}^2 / (3600 \cdot 24 \text{ s})) = 1720 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (vatnsmagnið myndi hækka yfirborð lónsins um 6 m ef ekkert rynni burt). Atburður af þessu tagi er ekki líklegur að sumarlagi en ekki ósennilegt að helmingur þessa sé ekki útilokað.

Að minnsta kosti þrjú jökulstífluð lón geta hlaupið til Jökulsárlóns undir Breiðamerkurjökul: Vel þekkt lón í Veðurárdal (um 2 km^2), lítið lón við enda Skálaljarga í Esjufjöllum og lón sem fór að myndast rétt fyrir aldamót í Fossadal milli Skálaljarga og Vesturbjarga stækkar enn (nú um 1 km^2); á gervitunglamyndum sést að úr því hleypur. Í samanburði við Jökulsárlón eru öll þessi lón mjög lítil; þó rennslistoppur í hlaupum frá þeim gæti orðið stór (e.t.v. $100-1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) er hann skammær og vatnsmagnið það lítið að ekki myndi hækka í Jökulsárlóni nema um nokkra tugi cm (hlaup úr lóni sem er 1 km^2 og 25 m djúpt samsvarar 1 m yfirborðhækkun í Jökulsárlóni).

Ef saman færu í röð sólarhringur með ofsarigningu og sólarhringur með ofsaleytingu er ekki ólíklegt að innrennsli til Jökulsárlóns gæti verið $1000-1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ í einn til tvo sólarhringa. Áfram verður unnið að betra mati á þessum stærðum; gera þarf reiknilíkön sem nýta gagnasafnið sem til er.

Breiðamerkurjökull hörfar



8. mynd. Lega jaðars Breiðamerkurjökuls á ýmsum árum frá lokum litlu ísaldar um 1890. Jaðarinn 1890 er unnin eftir korti danska herforingjaráðsins og legu ystu jökulgarða. Jaðrar eftir 2004 eru unnir eftir gervihnattamyndum (SPOT-5, Landsat 8, Sentinel), annað eftir flugmyndum Landmælinga Íslands. Í bakgrunni er mynd frá Sentinel (sýnilega sviðið, 10m upplausn, ESA) tekin 9. september 2019. Stærstu lónin eru lituð með gagnsæjum grábláum lit.

Fylgst hefur verið með legu jaðars Breiðamerkurjökuls eftir ýmsum tiltækum gögnum m.a. gervihnattamyndum. Á 8. mynd er sýnd lega jaðars Breiðamerkurjökuls á ýmsum tímum frá lokum Litlu Ísaldar um 1890. Nýjasti jaðarinn er unnin eftir Sentinel gervihnattamynd frá 9. september 2019.

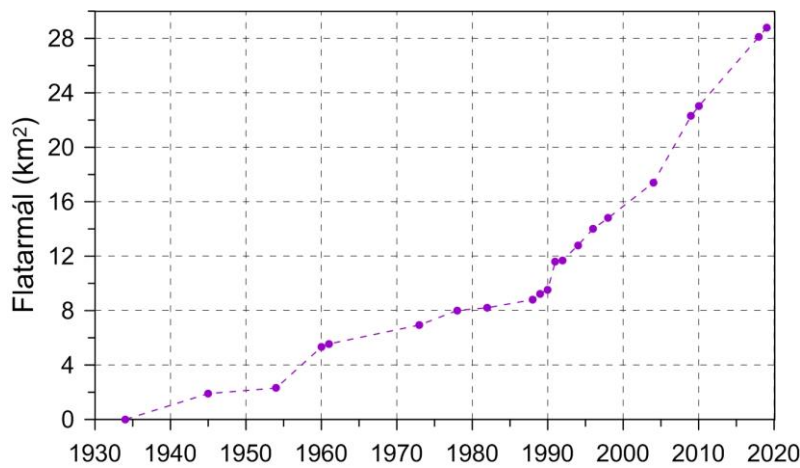
Á 8. mynd eru stærstu jaðarlón við Breiðamerkurjökul dregin fram sérstaklega með grábláum lit. Breiðarlón er vestast þeirra og hefur ekki stækkað hratt allra síðustu árin. Breiðarlón liggur í lægð sem heldur áfram inn undir jökulinn til norðurs og svo vesturs og miðað við núverandi vatnshæð (~21m) gæti lónið lengst um nærri 6 km, og dýpi þess ríflega 100 m rétt inn við núverandi sporð.

Rétt austan Breiðarlóns eru tvö lón sem myndast hafa við hörfun jökulsins síðasta áratuginn við jaðarinn milli Breiðarlóns og Mávabyggðarandar. Vestara lónið sem nú er ~0.35 km², en mun líkast til ekki stækka meira, skv. botnkorti hækkar landið þarna fyrir innan. Eystra lónið er nú ~0.65 km² en botn-kortið gefur kynna að það geti stækkað til NNV og orðið allt að 6 km langt, dýpst um 100 m og allt að 10 km² að flatarmáli. Varla líða mörg ár áður en þarna fer að kelfa, því botninn lækkar til norðurs.

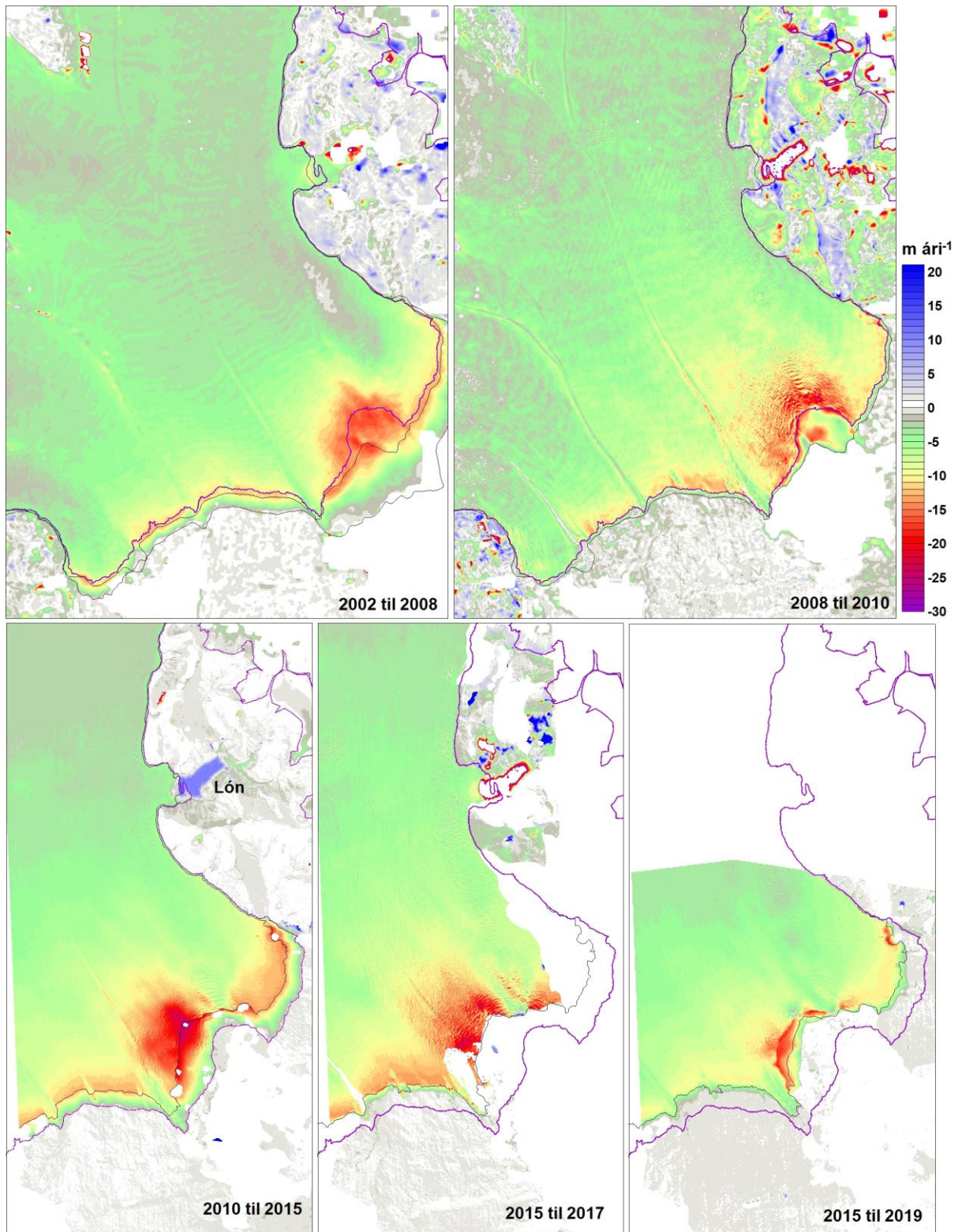
Nú í ársbyrjun kom út ritrynd grein í tímaritinu Jökli (Snævarr Guðmundsson o.fl. 2020), en meðlimir jöklahóps JH eru meðal höfunda. Í greininni eru lýst þróun helstu jaðarlóna við SA skriðjökla Vatnajökuls, m.a. bæði Breiðarlóns og Jökulsárlóns, þróun lónanna lýst og helstu kennistærðir þeirra settar fram. Efni greinarinnar verður ekki endurtekið hér, en á 9. mynd má lesa þróun flatarmáls Jökulsárlóns frá um 1935, þegar fyrstu ummerki um lón sáust. Vel má sjá hraða hörfun jökulsins frá ~1890 til um 1960, nær stöðnun frá 1960 til 1965 og aftur frá um 1978 til 1988 en hratt hop eftir miðjan tíunda áratuginn. Þetta endurspeglar þróun veðurfars þetta tímabil. Í grein jöklahóps árið 2001 (Helgi Björnsson og fleiri) var gerð grein fyrir hvernig Jökulsárlón dregur í sig orku sem er í hlutfalli við stærð lónsins, einkum sólgeislun og þó í enn meiri mæli frá orkurikum (7-11°C heitum) sjó sem streymir inn og út úr lóninu á sjávarföllum (mælingar gerðar að frumkvæði Jóns Ólafssonar haffræðings, með stuðningi Vegagerðar, sem hafa verið kynntar á veggspjöldum og notaðar í nemendaverkefnum, en enn ekki birst í greinum nema Brandon o.fl. 2017). Orkan nýtist til að bræða þann ís sem kelfir og er nú miklu meiri en þarf til að bræða það magn íss sem brotnar af jöklinum

(kelfir) út í lónið. Skriðhraði á blásporðinum hefur mælst um 500 m á ári; kelfandi tungan er um 3 km löng og miðað við að sporðurinn er 25-30 yfir vatnsborðinu er hann um ~300 m þykkur í endann. Rúmtak ískelfingar er þá gróflega $3 \cdot 0.3 \cdot 0.5 = 0.45 \text{ km}^3$. En auk þess hefur kelfandi hluti sporðsins líka hörfað um nærri 1500 m frá 2013. Þetta er tapað ísrúmmál um $\sim 1.3 \text{ km}^3$ eða 0.17 km^3 á ári. Samtals verður þá árlegt rúmtak kelfingar $\sim 0.6 \text{ km}^3$. Þetta er stærðargráðureikningur en skilar svipaðri niðurstöðu og áður hefur verið metið.

Veruleg breyting hefur á síðustu árum orðið á því hvaðan ísinn sem kelfir streymir að. Á 10. mynd er sýndur rýrnunarhraði (árleg þynning) á fjórum tímabilum. Mismunakortin eru unnin eftir stafrænum hæðarlíkunum 2002 og 2008 eftir SPOT5 gervitunglamyndum (frá SPOT Image og Legos, 2010 (gert eftir Lidar mælingu úr flugvél, sjá Tómas Jóhannesson o.fl. 2103) en 2015, 2017 og 2019 úr bandaríska ArcticDEM safninu. Þarna sést vel hvernig rýrnunin á fyrsta tímabilinu er mest beint norður af kelfandi jökultungunni sem að hluta er á floti og myndar þá „sillu“ upp af lóninu. Á tímabilinu 2010-2015 varð sú breyting að æ meiri ís flæddu úr vestri og lækkun vegna ísflæðis farin að teygja sig meir inn á miðstrauminn. Ísflæðið síðustu árin hefur flutt með sér Esjufjallaröndina til austurs, hún hefur slitnað frá suðurendanum og liggur nú á miðjum kelfandi hluta sporðsins, en markaði áður vesturjaðar lónsins og ísflæðis þangað. Þessari tilfærslu randarinnar var lýst í stuttri grein Snævarrs Guðmundsson og Helga Björnssonar í 65. árgangi tímaritsins Jökuls (2016).



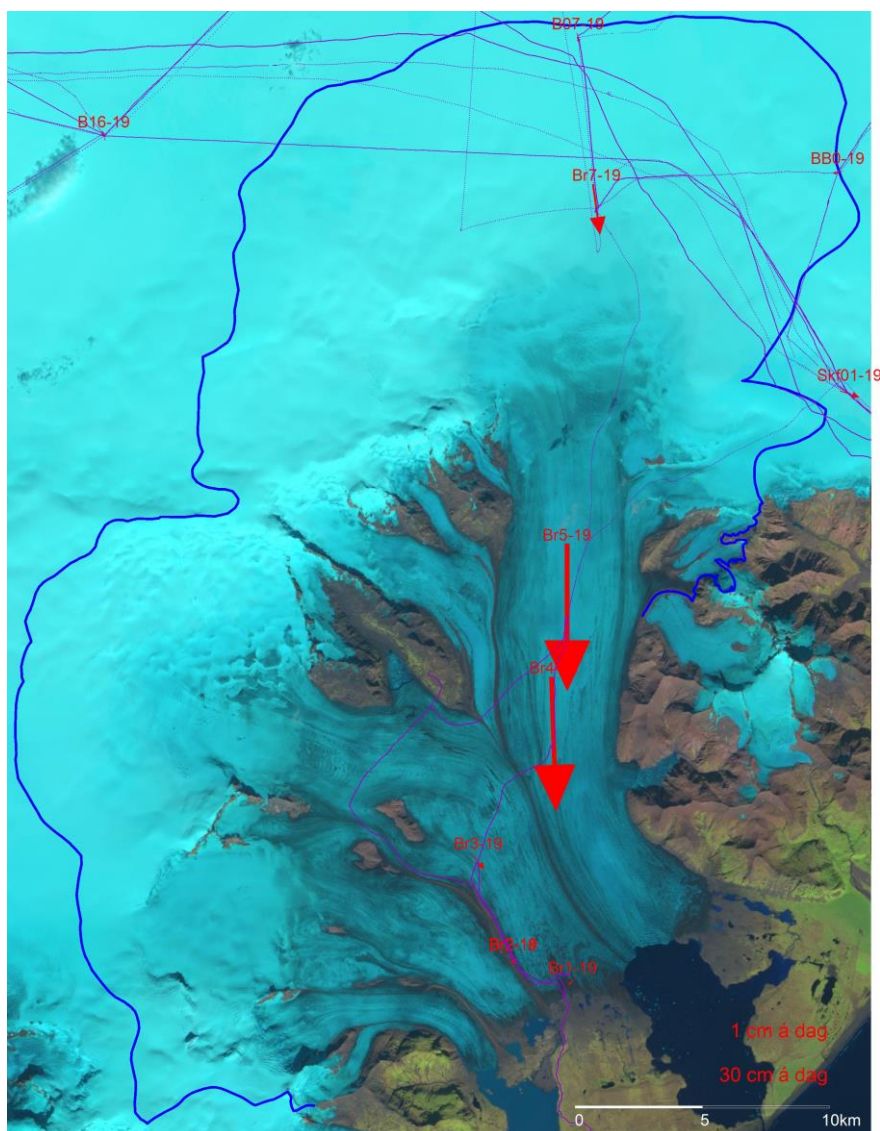
9. mynd. Flatarmál jökulsárlóns unnið eftir flugmyndum úr safni Landmælinga Íslands en eftir 2003 eftir gervihnattamyndum (SPOT-5, Landsat 8 og Sentinel-2).



10. mynd. Rýrnunarhraði Breiðamerkurjökuls (árleg þynning í m á ári) á fjórum tímabilum. Mismunakortin eru unnin eftir stafrænum hæðarlíkunum 2002 og 2008 (gerð eftir SPOT5 gervitunglamyndum frá SPOT Image og Legos í Toulouse Frakklandi, 2010 (gert eftir Lidar mælingu úr flugvél, sjá Tómas Jóhannesson o.fl. 2013) en 2015, 2017 og 2019 eru unnin úr bandaríska Arctic DEM safninu.

Skriðhraðamælingar

Allir afkomumælistaðir eru mældir inn með landmælinga GPS-tækjum þegar vitjað er um þá. Þannig fæst skriðhraðamæling í stökum mælipunktum. Niðurstöður þeirra mælinga eru sýndar á 11. mynd.



11. mynd. Yfirborðsskriðhraði á afkomumælistöðum á Breiðamerkurjökli 2019. Lillabláar línur eru hæðarsnið mæld með landmælinga GPS tækjum á vélsleða (safn lína í apríl, maí, júní og nóvember 2019). Ísaskil Breiðamerkurjökuls sýnd með blárrí línu. (í bakgrunni er Sebtilnet gervihnattamynd frá 9. september 2019). Mælitímabil hraðamælinga og hraðar eru gefnir í töflunni hér að neðan.

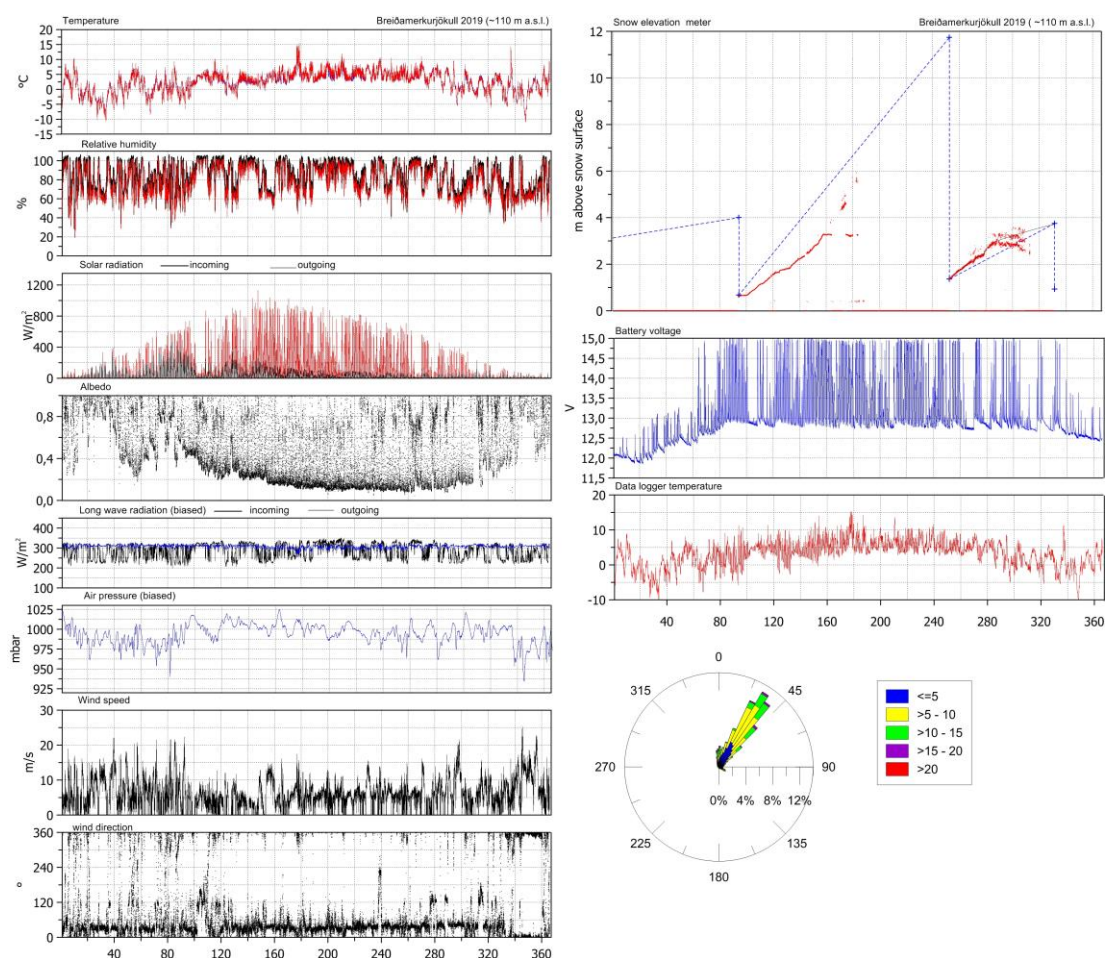
Staður	hæð m y.s.	Tímabil		fjöldi daga	færsla m	stefna °	hraði cm á dag	hraði m á ári
		ár-man-dag	ár-man-dag					
B07-19	1355	19-05-01	19-10-18	170	1,7	168	1,0	3,6
B16-19	1525	19-05-30	19-10-19	142	0,8	343	0,6	2,1
BB0-19	1520	19-05-01	19-10-18	170	1,4	259	0,8	3,1
Br1-19	100	19-04-03	19-11-27	237	1,2	230	0,5	1,8
Br2-18	190	18-08-02	19-04-03	245	4,1	155	1,7	6,1
Br2-19	185	19-04-03	19-11-27	237	3,1	176	1,3	4,7
Br3-19	375	19-04-04	19-11-28	237	17,1	143	7,2	26,3
Br4-18	515	18-03-24	19-04-04	377	336,6	181	89,3	325,9
Br5-19	675	19-04-04	19-05-01	26	25,6	183	98,5	359,5
Br7-19	1245	19-05-01	19-10-18	170	50,6	174	29,8	108,7
Skf01-19	1280	19-04-30	19-10-18	171	13,6	111	7,9	28,9

Veðurathuganir

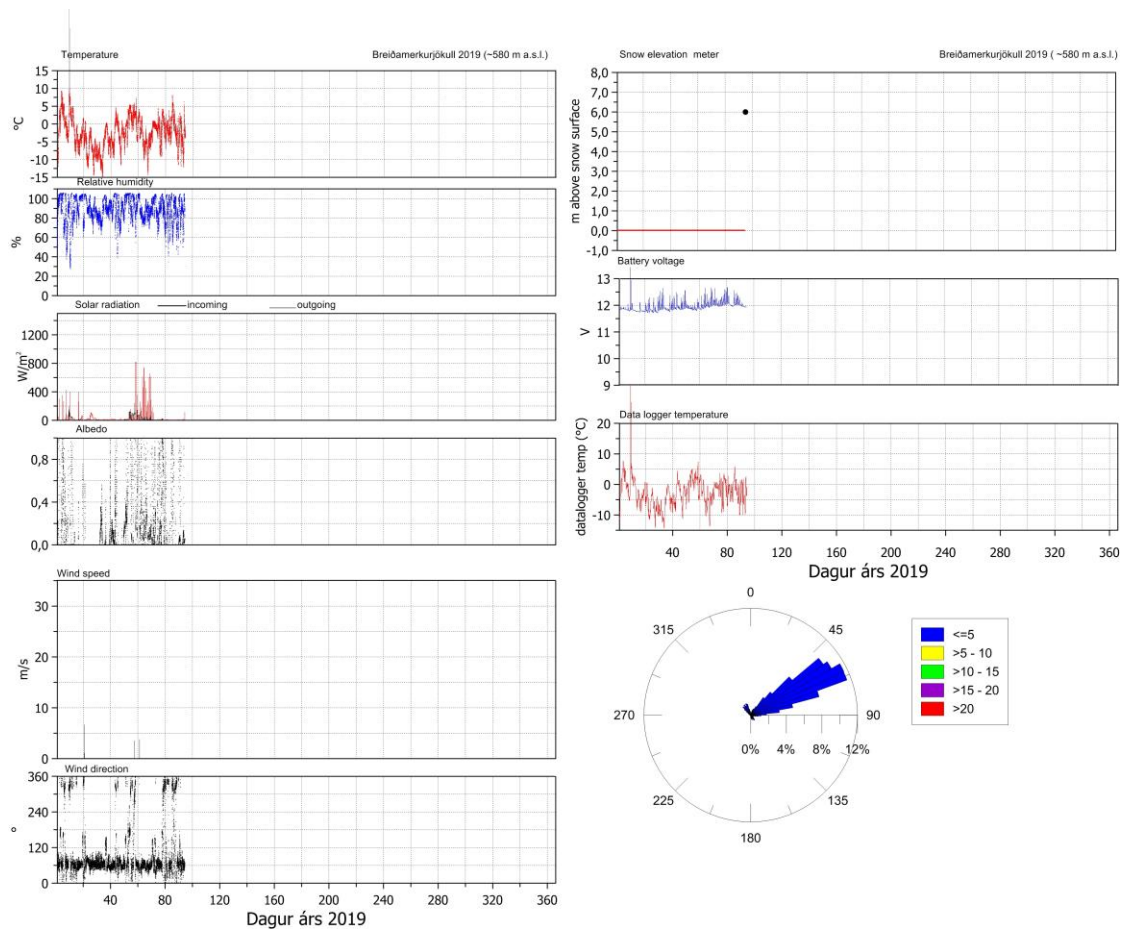
Til að auka skilning á samhengi veðurs og jöklabreytinga hefur verið aflað veðurgagna á jökli með sjálfvirkum veðurstöðvum. Á Breiðamerkurjökli voru árið 2019 tvær veðurstöðvar í rekstri allt árið (í um 100 (Br1) og ~515 m (Br4) framan í apríl en þá flutt í ~675 m (Br5) hæð). Þá var einnig rekin um sumarið veðurstöð í um ~1250 m (Br7) hæð á Breiðamerkurjökli. Stöðin í Br4 var heimsótt í apríl 2019 og hún flutt til um ~6 km til norðurs til að tryggja betra aðgengi, en aðstæður til að vitja um stöðin hafa mjög versnað á síðustu árum, t.d. meira um opnar sprungur, en einnig var talið að betra símasamband fengist. Vissulega er mjög gott símasamband þar (í Br5), en líklega vegna breytinga á þjónustu í 4G símstöðva, er ekki hægt að flytja gögn um hefðbundin GSM-símamótald. Þannig hafa enn ekki náðst nein gögn af stöðinni, en hún safnar þeim þannig að von er til að þau séu til staðar. Reynt var að heimsækja stöðina í nóvember, þegar haustmæling var gerð á leysinga svæðinu og unnið við viðhald veðurstöðvar í Br1, en það tókst ekki. Enn (í 3. viku mars 2020) hefur ekki tekist að fara í stöðina, en tvo daga með skaplegu veðri þarf til að vinna vorverkin á leysingasvæðinu.

Mælingar eru einnig gerðar með stöðluðum mælitækjum á lofthita og vindhraða við austurjaðar Jökulsárlóns þar sem áður var einnig búnaður til sjálfvirkrar myndatöku (sjá 1. mynd). Yfirlit mældra veðurþátta allra veðurstöðvanna (nema Br5) er sýnt á 12-15. mynd. Aftast er einnig mynd af mælingum á veðurþáttum í Br4 árið 2018, en ekki hafði náðst að sækja gögn þaðan þegar síðasta greinagerð var unnin nema fram til apríl (16. mynd).

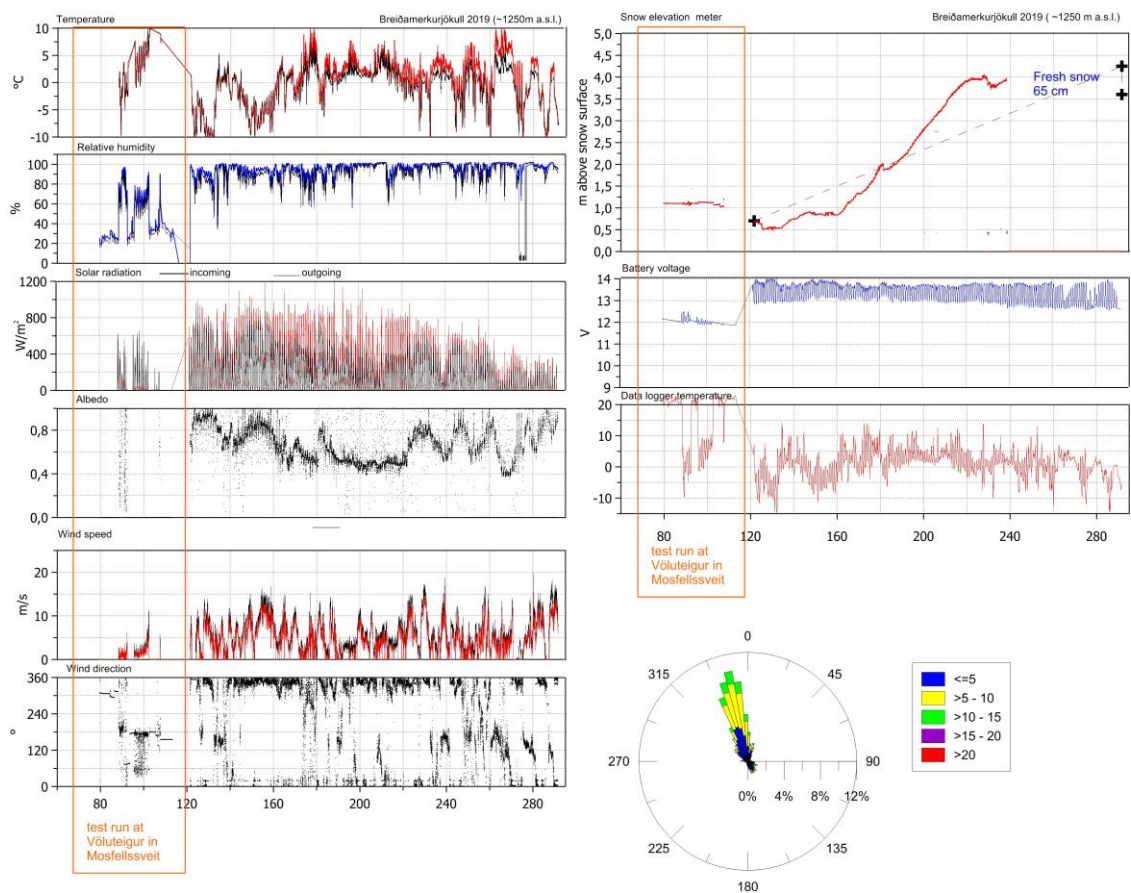
Gögnin sem aflað er á veðurstöðvunum hafa verið og verða notuð sem inntak í reiknilíkön orkubúskaps við jökulyfirborð (Louise Schmidt ofl. 2017, 2018 og 2020) til að meta leysingu og stilla afkomulíkön sem byggja á reikningum útfrá lofthjúpslíkönunum. Þannig fæst möguleiki til að reikna tímaraðir afrennslis bæði aftur í tímann (lofthjúpslíkön sem byggja á mældum veðurþáttum) og fram í tímann eftir loftlagsspám. Einnig má nýta þessar mælingar til að dreifa afrennslis frá jöklinum á tíma og fá þannig betra mat á hámark afrennslis.



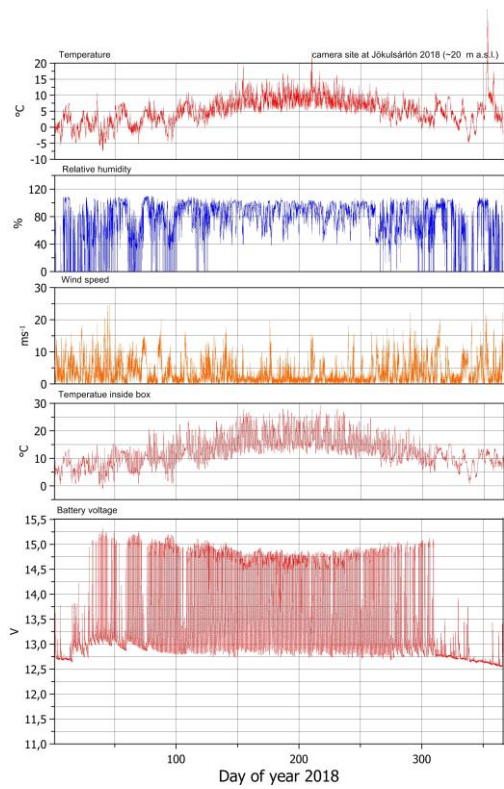
12. mynd. Mældir veðurþættir á veðurstöð í um 100 m hæð á sporði Breiðamerkurjökuls.



13. mynd. Mældir veðurþættir á veðurstöð í um 580 m hæð á austurstraumi Breiðamerkurjökuls. Vindhraðamælir var bilaður allan mælitímann.



14. mynd. Mældir veðurþættir á veðurstöð í um 1250 m hæð á austurstraumi Breiðamerkurjökuls.



15. mynd. Lofihiti, raki og vindstyrkur mælt á veðurstöð í um 20 m hæð við NA jaðar Jökulsárlóns.

Tilvísanir:

Snævarr Guðmundsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, 2017. Changes of Breiðamerkur-jökull glacier, SE-Iceland, from its late nineteenth century maximum to the present. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, (4), 338-352 2017.10.1080/04353676.2017.1355216, <http://dx.doi.org/10.1080/04353676.2017.1355216>

Snævarr Guðmundsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Þorsteinn Sæmundsson and Tómas Jóhannesson. 2020. Terminus lakes on the south side of Vatnajökull ice cap, SE-Iceland. *Jökull* 69, pp.1-28.

Louise Steffensen Schmidt, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Sverrir Guðmundsson, Peter L. Langen, Finnur Pálsson, Ruth Mottram, Simon Gascoïn, and Helgi Björnsson. 2017. The importance of accurate glacier albedo for estimates of surface mass balance on Vatnajökull: evaluating the surface energy budget in a regional climate model with automatic weather station observations *The Cryosphere*, 11, 1665-1684, <https://doi.org/10.5194/tc-11-1665-2017>, 2017

Schmidt, Louise; Langen, Peter; Aðalgeirsdóttir, Guðfinna; Pálsson, Finnur; Guðmundsson, Sverrir; Gunnarsson, Andri;. 2018. Sensitivity of Glacier Runoff to Winter Snow Thickness Investigated for Vatnajökull Ice Cap, Iceland, Using Numerical Models and Observations. *Atmosphere* 2018. 9,450 2018 Multidisciplinary Digital Publishing Institute

Schmidt LS, Aðalgeirsdóttir G, Pálsson F, Langen PL, Guðmundsson S, Björnsson H (2020). Dynamic simulations of Vatnajökull ice cap from 1980 to 2300. *Journal of Glaciology* 66(255), 97–112. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.90>

Snævarr Guðmundsson og Helgi Björnsson, 2016. Changes in the flow of Breiðamerkurjökull reflected by bending of the Esjufjallarönd medial moraine. *Jökull* No. 66, ISSN 0449-0576.

Jóhannesson, Tómas, Helgi Björnsson, Eyjólfur Guðmundsson, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson and Etienne Berthier. 2012. Ice-volume changes, bias-estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by LiDAR-mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Annals of Glaciology* 54, 63A422.

Björnsson, Helgi, Finnur Pálsson and Sverrir Guðmundsson. 2001. Jökulsárlón at Breiðamerkursandur, Vatnajökull, Iceland: 20th century changes and future outlook. *Jökull*, 50, 1-1

Brandon, M., Hodgkins, R., Björnsson, H., & Ólafsson, J. (2017). Multiple melt plumes observed at the Breiðamerkurjökull ice face in the upper waters of Jökulsárlón lagoon, Iceland. *Annals of Glaciology*, 58(74), 131-143. doi:10.1017/aog.2017.101

