

Greinargerð til Vegagerðarinnar vegna styrks til verkefnisins:

## **Afkoma og hreyfing Breiðamerkurjökuls og afrennsli leysingavatns til Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi 2021**



Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans

apríl 2022

RH-04-22

(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 2021.

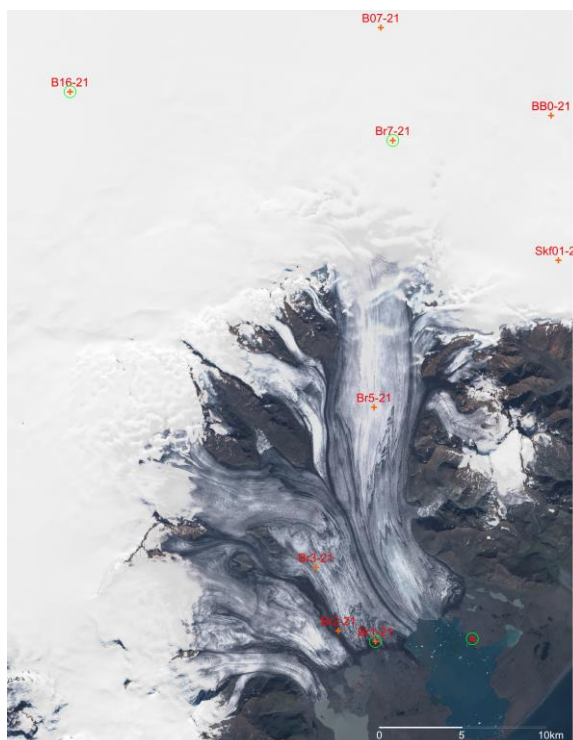
Megin tilgangur þessa verkefnis er þríþættur:

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 vegamannvirka.

Hér að aftan er gerð grein fyrir afkomumælingum, afrennslis leysingavatns af jökli til Jökulsárlóns og veðurathugunum sem unnið var að á árinu 2021. Sumt af texta greinargerðarinnar er samhljóða greinargerð síðasta árs, til að halda samfellu, en hér er fyrst og fremst gerð grein fyrir gagnaöflun síðasta árs. Höfundur skýrslunnar ber ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirrar stofnunar sem höfundur starfar hjá.

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 (sjá skýrslu Helgi Björnsson o.fl. 1992). 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 fyrir en ~20 km norðar.

Kerfisbundnar mælingar á afkomu Vatnajökuls (snjósöfnun að vetri og bráðnun að sumri) hófust 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 fjölbjóðlegt verkefni (TEMBA) sem styrkt var af Evrópusambandinu, en lengst af síðan hefur



1. mynd. Afkomumælistaðir (+), veðurstöðvar (O), GPS stöðvar (Δ) og myndavél (Δ) á og við Breiðamerkurjökul. Ísaskil Breiðamerkurjökuls sýnd með blárrí línu. (í bakgrunni er Sentinel 2 gervi-hnattamynd frá 16. ágúst 2020).

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 leið-öngrum 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 sex sumur, en sú stöð hafði í rúman áratug verið í rekstri á safnsvæði Hoffellsjökuls. 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 afkomumælistöðum 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. Nú er á sporðinum rétt ofan Jökulsárlóns GNSS tæki og annað tæki á mælistað Br3 sem sett voru út í apríl 2021 í tengslum við Rannís styrkta verkefnið CISIM.

Þá hefur síðustu ár verið aflað margskonar gervihnattagagna sem nýtast til að meta legu jaðars og yfirborðshreyfingu stórra svæða yfir tiltekin tímabil (frá nokkrum dögum til nokkurra mánaða) og til gerðar hæðarlíkana jökulsins.

### **Stíklur um tengdar rannsóknir og birtingar nokkur síðustu ár:**

MS nemandi jöklahóps, 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, og 2020 grein um þróun lóna við jaðar SA-Vatnajökuls (Snævarr o.fl. 2020).

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.

Einnig grein um framtíð íslensku jöklanna og áhrif kólnunar hafsins Sv við Grænland á hana (Brice Noel ofl. 2022).

Niðurstöður þessarar rannsóknar eru einnig mikilvægur þáttur í grein þar sem tekin er saman þekking um afkomu íslenskra jökla frá lokum litlu ísaldar (~1890) til 2019 (Guðfinna Aðalgeirsdóttir ofl. 2020).

Á árinu 2020 hófst rannsóknaverkefnið CISIM sem stutt er af RANNÍS, en í forsvari eru Tómas Jóhannesson á Veðurstofu Íslands og Eyjólfur Magnússon á við Jarðvísindastofnun. Eitt verkefna innan CISIM (rannsókn Doktorsnema við Jarðvísindadeild) er að kanna með ísflæðilíkani samspil vatns við botn (vatnsþrýstings) og hreyfingar jökulíss, en þar verður Breiðamerkurjökull eitt helsta viðfangsefnið og mæliraðir okkar um afkomu, skriðhraða, yfirborðsbreytingar og veðurþætti mikilvæg grunn gögn.

### **Leiðangrar vegna mælinga:**

13-14. apríl. 2021 Lesið af afkomumælivírum og vetrarsnjór mældur. Nýjir afkomumælivírar boraðir niður með gufubor. Veðurstöð í Br1 færð ofar og borað fyrir nýjum ¾“ rörum fyrir snjóhæðarmælinn með gufubor. Sett upp GNSS stöð til mælingar á hreyfingu á mælistað Br3.

1. maí vetrarafkoma á safnsvæði mæld.

10. ágúst. Viðhald veðurstöðvar í Br1, skipt um snjóhæðarmæli.

15. október. Sumarafkoma á safnsvæði mæld.

30. mars 2022. Lesið af afkomumælivírum á leysingasvæði, nýjum komið fyrir og hugað á veðurstöð í Br1.

### **Kostnaður á árinu 2021:**

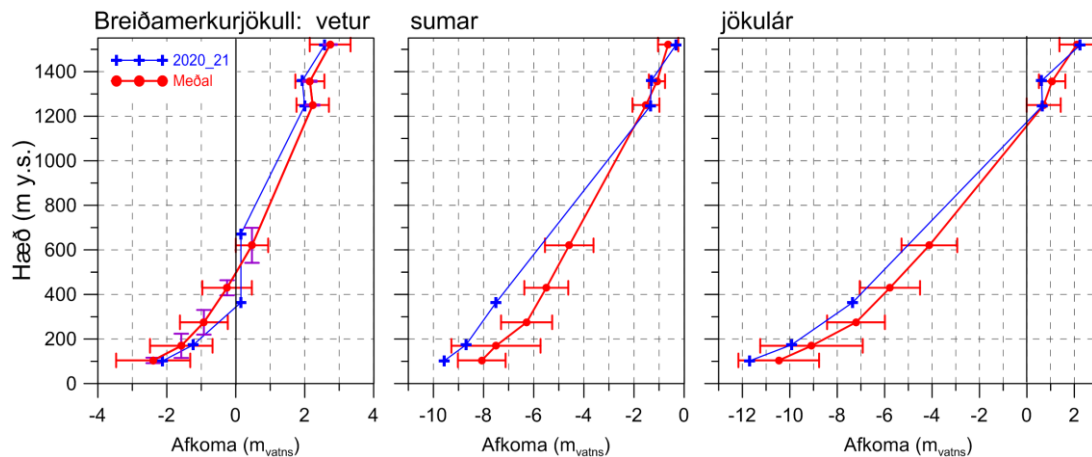
Styrkur til þessa verkefnis af tilraunafé Vegagerðar árið 2021 var 2000 þkr.

Rekstrarkostnaður mælistöðva (viðgerð veðurstöðva, verkstæðisvinna, varahlutir, rafgeymar o.fl.) var 160 þkr., kostnaður vegna mælleiðangra (5 ferðir, greiðslur fyrir notkun bíla og vélsleða auk launa starfsmanna) reyndist 975 þkr., laun starfsmanns við úrvinnslu og túlkun gagna (1,5 mannmán) 1300 þkr. og umsjónargjald til yfirstjórnar Raunvísindastofnunar 2,5% eða 50 þkr. Samtals eru þetta 2485 þkr.

13. apríl 2022. f.h. Jöklahóps Jarðvísindastofnunar Háskólans;

Finnur Pálsson verkefnastjóri í Jöklafræðingum

## Niðurstöður afkomumælinga 2020-21.

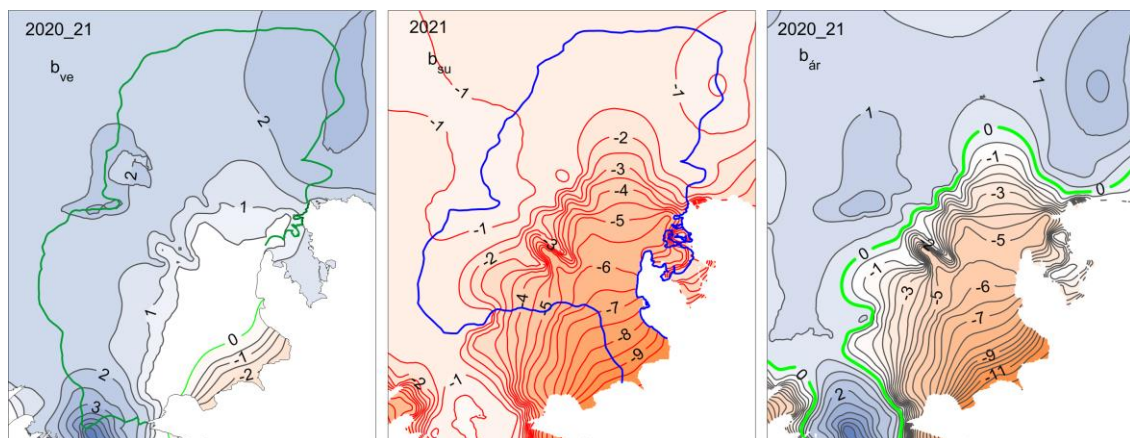


2. mynd. Breytileiki afkomu með hæð á Breiðamerkurjökli jökulárið 2020-21 og meðaltal allra ára sem afkoma hefur verið mæld (flestar ár frá 1995-96, afkoma í m vatns og hæð mælistaða í m yfir sjó). Þverstrikin sýna staðalfrávik mæliraðar í mælistöðvunum.

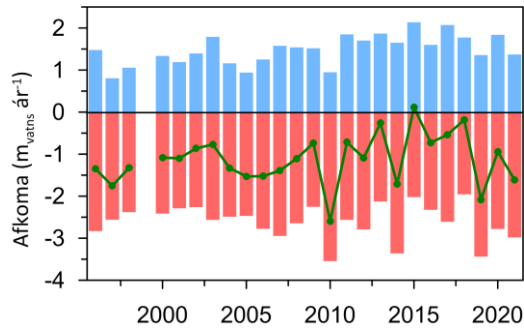
Farnar voru fimm ferðir til afkomumælinga og viðhalds veðurstöðva jökulárið 2020-21, flestar voru tengdar öðrum verkum til að lágmarka kostnað. Aðalmæliferðin var farin 13-14. apríl 2021 á neðri hluta jökulsins (leysingasvæði). Lesið var af eldri afkomuvírum og boraðar holur (~10-15 m djúpar) með gufubor og komið fyrir nýjum afkomumælivírum í Br2 og Br3 en ¾ rorum fyrir snjóhæðarmæli við Br1. Vetrarmælingar á efri hlutanum (safnsvæði) voru gerðar í byrjun maí. Veðurstöð við Br7 var sett upp 1. maí. Farið var til viðhalds veðurstöðvarinnar í Br1 10. ágúst og þá lagaður snjóhæðarmælir í Br1 sem var fallin fyrir skömmu, en hægt að meta heildarleysingu útfra lengd ¾ rorranna. Haustmæling 1. október fékkst með aflestri af snjóhæðarmæli þar. Haustmæling á safnsvæði var gerð í annarri viku október, 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. Til að komast til að lesa seinni aflestur af leysingavírum í Br1, Br2 og Br3 þarf hafa verið frost í nokkra daga (til að koma farartækjum yfir svaðið við jökuljaðar, æskilegt að eitthvað hafi snjóað, skaplegt veður og daginn farið að lengja. Þessi ferð (sem er líka fyrri ferð 2022), var farin 30-31. mars 2022 og sumarafkoma þessara mælistöðva 2021 metin út frá mælingum sem þá voru gerðar.

Á 2. mynd sést að vetrarsnjósöfnun var lítillega undir meðallagi á safnsvæðinu, en neðantil á leysingasvæði var vetrarýrnun nærri undir meðallagi, og á hæðarbilu 300-400 m var óvenju mikill snjór, mest frá seinni hluta vetrar. Sumarið var fremur hlýtt og þurr. Á mælistöðvum á safnsvæði var sumarrýrnun nærri meðallagi en verulega umfram á sporðinum.

Flatartegur yfir safnsvæði jökulsins skilar heildarafkomutölum (3. og 4. mynd).



3. mynd. Dreifing vetrar- (vinstri) sumar- (miðja) og ársafkomu (hægri) á Breiðamerkurjökli 2020-21 (afkoma í m vatns). Ísarvið Breiðamerkurjökuls er sýnt með grænni línu (vinstri ramma) og vatnasvið Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi með blárrí línu (miðju ramma).



4. mynd. Yfirborðsafkoma Breiðamerkurjökuls metin eftir afkomumælingum *vetur, sumar* og *jökulár*. Hér ekki er tekið tillit til kelfingar, sem síðustu ár svarar kelfing til ~ 0.7 m viðbótar-rýrnunar.

Ársafkoma 2020-21 var nærri meðallagi efst en heildarýrnun verulega meira en í meðalári á leysinga-svæðinu.

Vetrarafkoma reyndist 1,37  $m_{vatns}$  eða um 92% af meðaltali mælitímans. Rýrnun sumarsins reyndist -2,98  $m_{vatns}$  eða um 15% umfram meðalrýrnun mælitímans. Jökulárið 2020\_21 var ársafkoman -1,61  $m_{vatns}$ , eða rýrnun um 45% umfram meðalár frá því mælingar hófust um miðjan tíunda áratug síðustu aldar. Ef frá er talið jökulárið 2014\_15 hefur ársafkoman verið neikvæð allt mælitímabilið (-1,12  $m_{vatns}$  á ári að meðaltali).

Auk massataps vegna afkomu við yfirborð tapast ís vegna kelfingar í Jökulsárlón, nærri 0,6  $km^3$  af ís á ári (sjá umfjöllun hér aftar). Á 5. mynd er sýnt samhengi ársafkomu Breiðamerkurjökuls við vetrar- og sumarafkomu með því að teikna ársafkomu á móti vetrarafkomu annars vegar en sumarafkomu hins vegar. Bæði línuritun sýna sterkt samhengi og gefa vísbendingu um að til þess að afkoma Breiðamerkurjökuls sé í jafnvægi miðað við núverandi lögun ætti umsetning að vera um 2  $m_{vatns}$  ( $b_{ve} = 2 = -b_{su}$ ). Mæliröðin sýnir hins vegar að meðalvetrafkoma er aðeins 1,49  $m_{vatns}$  eða ~74% af 2  $m_{vatns}$  og meðalsumarleysing um 30% umfram (-2,60  $m_{vatns}$ ). 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 stærra 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 hlutfalli safnsvæðis af heildarflatarmáli (AAR). Þetta samhengi 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 stíull  $b_n$  - AAR og  $b_n$  - ELA er svipaður fyrir Breiðamerkurjökul og alla hina jöklana; um 0,6  $m_{ve}$  fyrir 10% breytingu AAR og 0,65  $m_{ve}$  fyrir 100 m breytingu ELA.

En stíull  $b_n$  - AAR og  $b_n$  - ELA er svipaður fyrir Breiðamerkurjökul og alla hina jöklana; um 0,6  $m_{ve}$  fyrir 10% breytingu AAR og 0,65  $m_{ve}$  fyrir 100 m breytingu ELA.

Samandregnar upplýsingar um afkomu Breiða-merkurjökuls jökulárið 2020\_21 eru sem hér segir: Flatarmál = 922  $km^2$  (samkvæmt jaðri 2019)

$B_{ve} = 1,26 km^3$ ;  $b_{ve} = 1,37 m$  (meðatal 1995\_96-2019\_20 er:  $b_{ve} = 1,49 m$ )

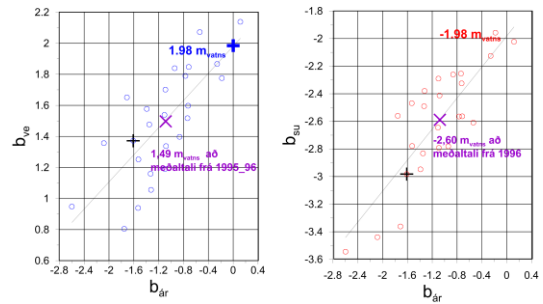
$B_{su} = -2,75 km^3$ ;  $b_{su} = -2,98 m$  (meðatal 1996-2021 er:  $b_{su} = -2,60 m$ )

$B_{ár} = -1,49 km^3$ ;  $b_{ár} = -1,61 m$  (meðatal 1995\_96-2019\_20 er:  $b_{ár} = -1,11 m$ )

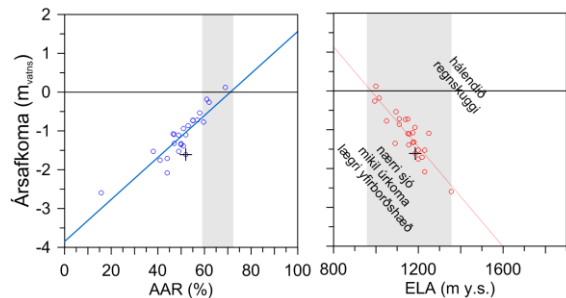
ELA (hæð jafnvægislínu) = ~1185 m (á mælisniði);

AAR (hlutfall safnsvæðis af heildarflatarmáli) = 52%

(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).

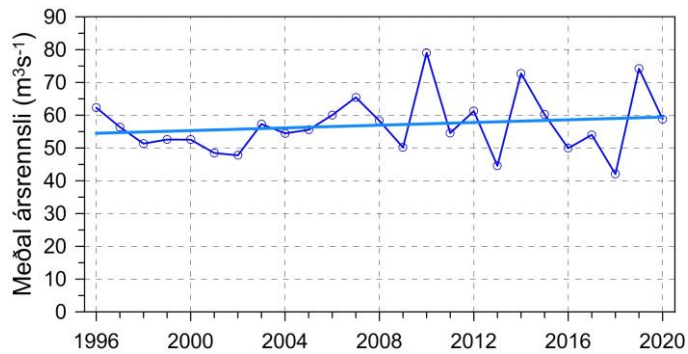


5. mynd. Ársafkoma ( $b_{ár}$ ) Breiðamerkurjökuls teiknuð á móti vetrarafkomu ( $b_{ve}$ , vinstri) og sumarafkomu ( $b_{su}$ , hægri). Mæligildi jökulársins 2020\_21 eru merkt með svörtum +.



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 skriðjökla Vatnajökuls skera  $b_n = 0$  línuna skv. mælingum.

## Afrennsli til Jökulsárlóns



7. mynd. Meðalársafrennsli (á jökulári þ.e. október til september) yfirborðsleysingarvatns (metið útfra sumarafkomu) til Jökulsárlóns sumurin 1996 til 2021.

Meðalársafrennsli til Jökulsárlóns vegna yfirborðsleysingar að sumarlagi er sýnt á 7. mynd (eins og hún er metin eftir sumarafkomu en þar er ekki tekið tillit til úrkomu hvort heldur sem er rigning eða snjökoma sem fellur og bráðnar jafnharðan sem líklega er af stærðagráðu 10% til viðbótar). Sumarafrennsli til lónsins jafnað yfir jökulárið 2020\_21 er rétt undir meðaltali mælitímans, metin rétt tæplega  $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  en meðlafrennsli til lónsins 1996 til 2020 er ríflega  $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Afrennsli vegna vetrarleysingar eru miklu minna, af stærðagráðu nokkrir rúmmetrar, en erfitt að meta eftir afkomumælingunum einum, því að vetur eru úrkomusamir og snjóá neðan 500 m leysir að mestu jafnharðan.

Leysing á miðju sumri ræðst að stærstum hluta af sólgeislun, þannig má nálgá 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  $400\text{-}600 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Þetta má vinna miklu betur með reiknilíkönum sem byggja þeirri röð veðurgagna sem til eru.

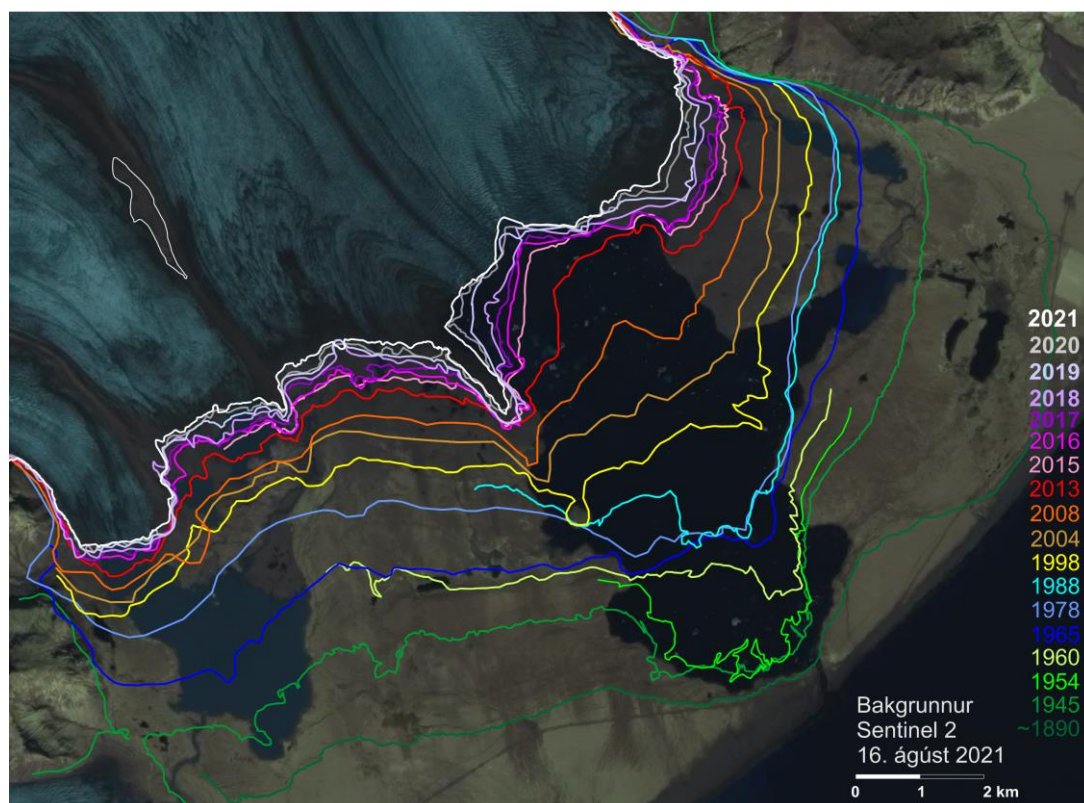
Jöklahópur hefur í fyrri greinargerðum metið að kelfing hafi verið fjórðungur úr  $\text{km}^3$  um miðjan fyrsta áratug aldarinnar (sem samsvarar 10 hluta meðal sumarleysingar). Sterkar vísbendingar eru um að kelfing hafi aukist á síðasta áratug, það voru niðurstöður vinnu fransks nemenda sem var hjá 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 langtínum saman. Ef gert er ráð fyrir að bráðnun íss í lóninu sé nálægt  $0,5 \text{ km}^3$  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 sumartímamann.

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  $\sim 6 \text{ m}$  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  $2 \text{ km}^2$ ), lítið lón við enda Skálbjarga í Esjufjöllum og lón sem fór að myndast rétt fyrir aldamót í Fossadal milli Skálbjarga og Vesturbjarga stækkar enn (nú um  $1 \text{ km}^2$ ); 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.  $100\text{-}1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) er hann skammær og vatnsmagnið það lítið að ekki myndi hækka í Jökulsárlóni nema um nokkra tugi cm (hlaup úr lóni sem er  $1 \text{ km}^2$  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  $1000\text{-}1500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  í einn til tvo sólarhringa. Áfram verður unnið að betra mati á þessum stærðum; gera þarf reiknilíkön sem nýta gagnasafnið sem til er. Vinna PhD nemandi gæti skilað niðurstöðum um þetta á næsta ári.

## Breiðamerkurjökull rýrnar og 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, Sentinel2), annað eftir flugmyndum Landmælinga Íslands. Í bakgrunni er mynd frá Sentinel2 (sýnilega sviðið, 10 m upplausn, ESA) tekin 16. ágúst en jaðarinn 2021 er rakinn eftir henni. Grá lína umlykur sker sem nýlega kom undan jökli og stækkar nú ört.

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 1. október 2020.

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 (~21 m) gæti lónið lengst um nærri 6 km, og dýpi þess ríflega 100 m rétt inn við núverandi sporð.

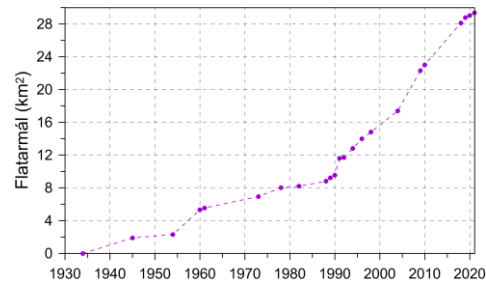
Rétt austan Breiðarlóns eru tvö lón sem myndast hafa við hörfun jökulsins síðasta áratuginn við jaðarinn milli Breiðarlóns og Mávabyggðarandar. Vestara lónið sem nú er ~0,35 km<sup>2</sup>, en mun líkast til ekki stækka meira, skv. botnkorti hækkar landið þarna fyrir innan. Eystra lónið er nú ~0,7 km<sup>2</sup> en botnkortið gefur kynna að það geti stækkað til NNV og orðið allt að 6 km langt, dýpst um 100 m og allt að 10 km<sup>2</sup> að flatarmáli. Varla líða mörg ár áður en þarna fer að kelfa, því botninn lækkar til norðurs.

2020 kom út ritrýnd 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 saúst. 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 orkuríkmum (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

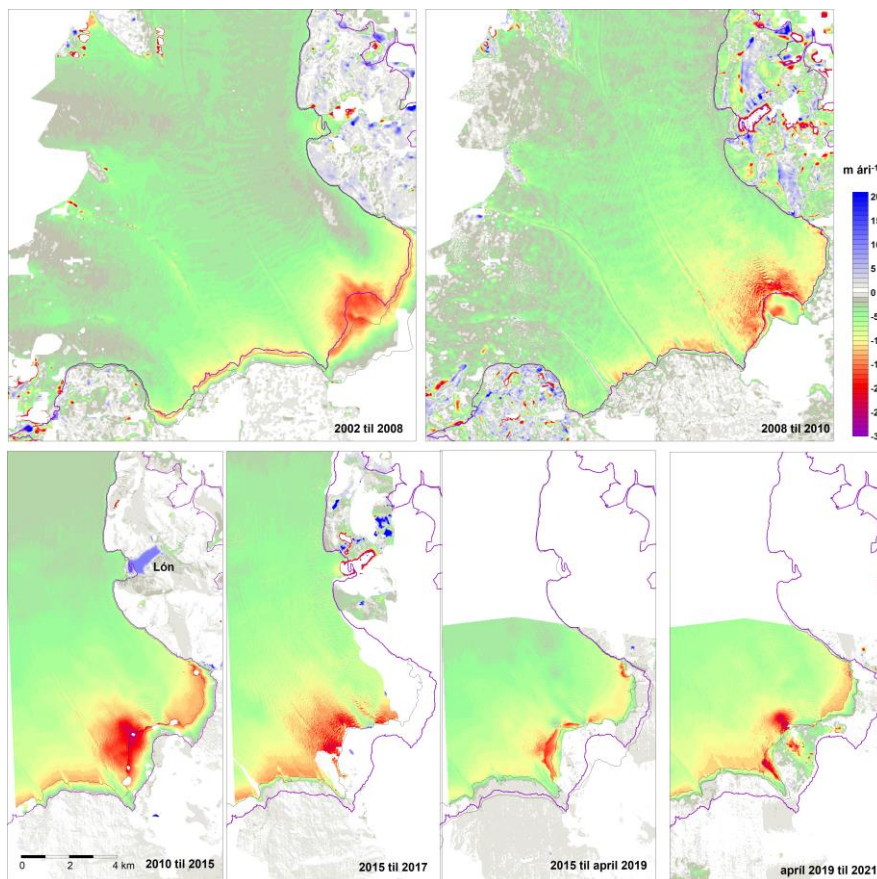


mælt um 500 m á ári; kelfandi tungan er um 3 km löng og miðað við að sporðurinn er 25-30 yfir vatnsborðinu er hann um ~300 m þykkur í endann. Rúmtak ískelfingar er þá gróflega  $3 \cdot 0,3 \cdot 0,5 = 0,45 \text{ km}^3$ . En auk þess hefur kelfandi hluti sporðsins líka höfðað um nærri 1500 m frá 2013. Þetta er tapað ísrúmmál um  $\sim 1,3 \text{ km}^3$  eða  $0,17 \text{ km}^3$  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, 2008 og 2021 eftir SPOT gervitunglamyndum (frá SPOT Image og Legos) 2010 (gert eftir Lidar mælingu úr flugvél, sjá Tómas Jóhannesson o.fl. 2013) en 2015, 2017 og 2019 úr bandaríska ArcticDEM safninu. Ekki tókst að afla nýrra hæðarlíkana af Breiðamerkurjökli að þessu sinni. Á mismunakortunum í 10. mynd 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 flæddi 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 Guðmundssonar og Helga Björnssonar í 65. árgangi tímaritsins Jökuls (2016).



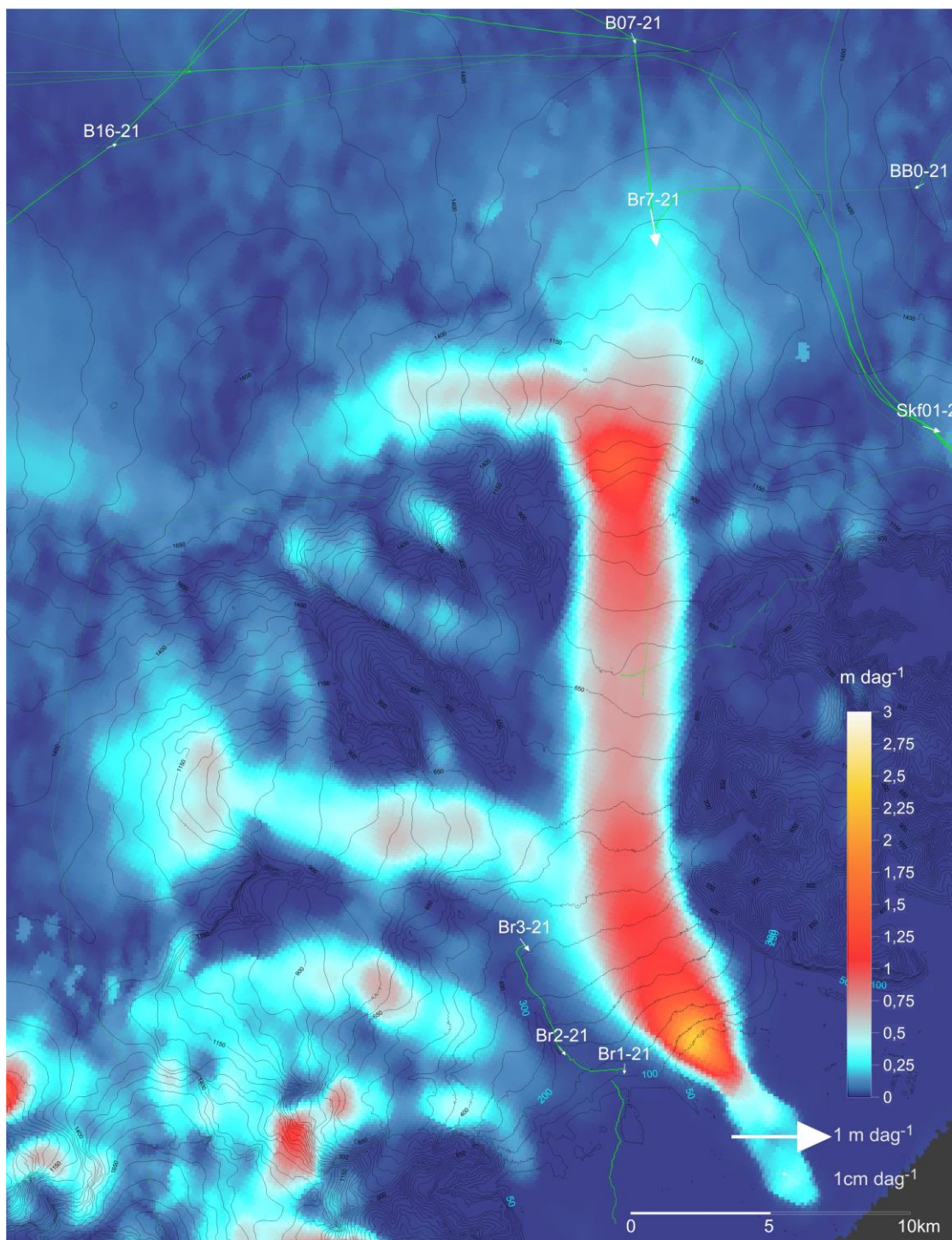
9. mynd. Flatarmál jökulsárlóns unnið eftir flugmyndum úr safni Landmælinga Íslands en eftir 2003 eftir gervihnattamyndum (SPOT-5, Landsat 8 og Sentinel-2).



10. mynd. Rýrnunarhraði Breiðamerkurjökuls (árleg þynning í m á ári) á sex 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), 2015, 2017 og 2019 eru unnin úr bandaríska Arctic DEM safninu og 2021 eftir SPOT6.

## 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. Bakgrunnur 11. myndar er meðalýfirborðshraðasvið árinna 2016-2020 sem unnið var af starfsmönnum

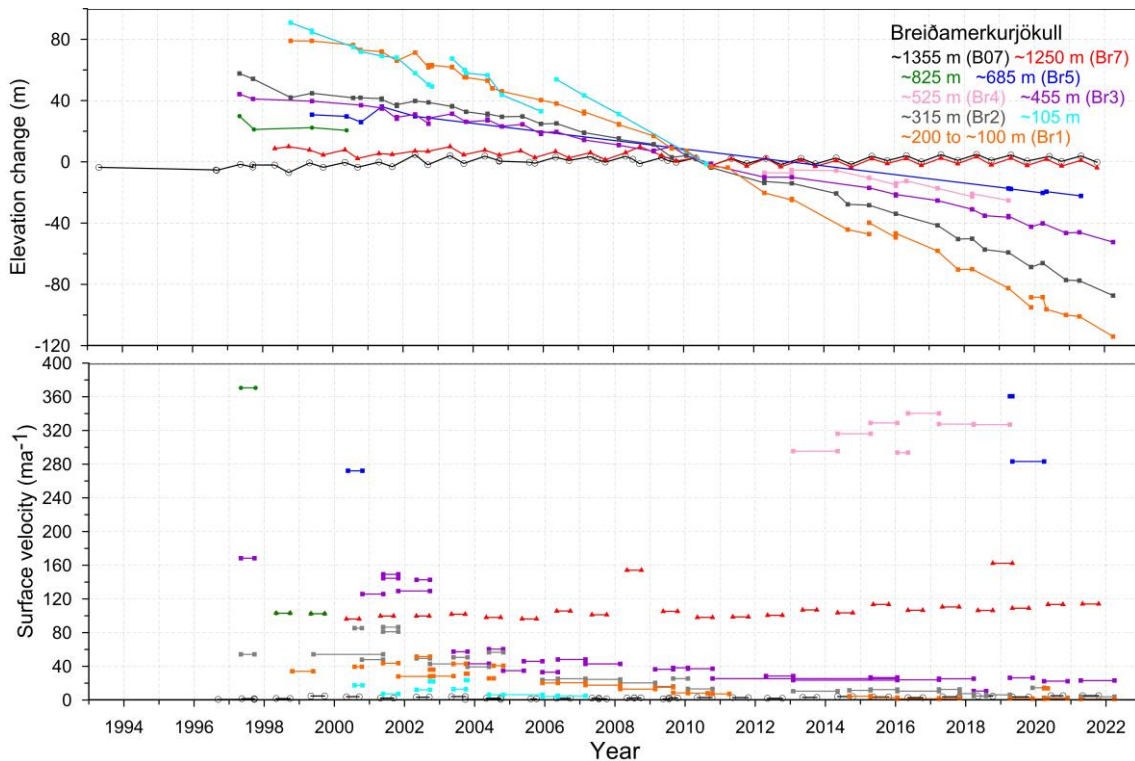


11. mynd. Yfirborðsskriðhraði Breiðamerkurjökuls. Í bakgrunni er meðaltal hraðasviða árin 2016-2020 sem unnið eru af starfsmönnum ENVEO í Austurríki eftir radarmælingum Sentinel gervitungla. Mældur meðalhraði yfirborðs á afkomumælistöðum er sýndur með hvítum pílum. Mælitímabil hraðamælinga og hraðar eru gefnir í töflunni hér að aftan. Grænar punktalínur eru hæðarsnið mæld með landmælinga GPS tækjum á vélslæða (safn lína í aríl, maí, júní og október 2021, og mars 2022).

ENVEO í Austurríki eftir radarmælingum Sentinel 2 gerfitungla. Hraðasviðið er unnið í tengslum við ný hafið verkefni CISIM sem stutt er af RANNÍS, en í forsvari eru Tómas Jóhannesson á Veðurstofu Íslands og Eyjólfur Magnússon á við Jarðvísindastofnun. Eitt verkefna innan CISIM (rannsókn Doktorsnema við Jarðvísindadeild) er að kanna með íslæðilíkani samspil vatns við botn (vatnsþrýstings) og hreyfingar jökulíss, en þar verður Breiðamerkurjökull eitt helsta viðfangsefnið og mæliraðir okkar um afkomu, skriðhraða, yfirborðsbreytingar og veðurþætti mikilvæg grunnögn.

Á 12. mynd er sýnd tímaröð skriðhraða og hæðarbreytinga á afkomumælistöðvum á Breiðamerkurjökli. Þar sést m.a. annars að sporðurinn milli Jökulsárlóns og Breiðaárlóns er nærri (Br1) kyrrstæður, og láréttur hraði jökulsins þar fyrir ofan nokkrir tugir metra á ári (Br2 og Br3), en á austur straumnum er skriðhraðinn Br4, Br5 og Br7 ~0,3 til 1 m á dag og hraðasviðið sýnir að hreyfing tungunnar ofan jökulsárlóns nær allt að 2 m á dag. Skriðhraði í Br3 hefur lækkað með tíma, líklega vegna þessa að vegna þess að ísstraumur til austurs hefur þokast norðar (sjá 11. mynd)

Hæðarbreytingar eru mjög litlar á efstu mælistöðvunum, þrátt fyrir stöðuga rýrnun jökulsins í heild allt mælitímabilið, en þynning sporðsins orðin nærri 200 m fremst í sporðinn.



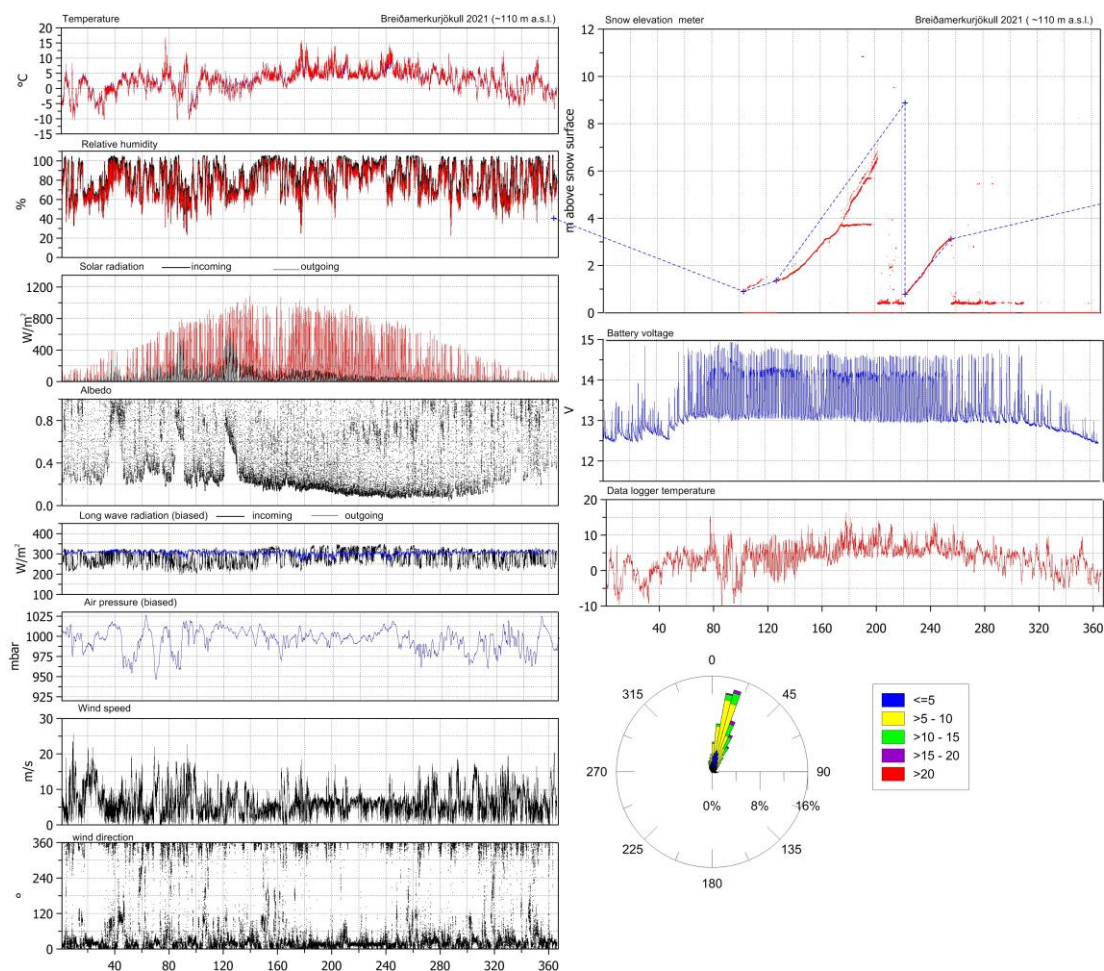
12. mynd. Á efri myndinni eru sýndar hæðarbreytingar á afkomumælistöðvum, unnar sem mismunur hæðarmælinga með landmælinga GPS tækjum og Lidarhæðarkorts frá 2010. Á neðri myndinni er sýndur yfirborðsskriðhraði í mælistöðvum metin út frá staðsetningu mælistika og víra sem mæld er með landmælinga GPS tækjum vor og haust.

## Veðurathuganir

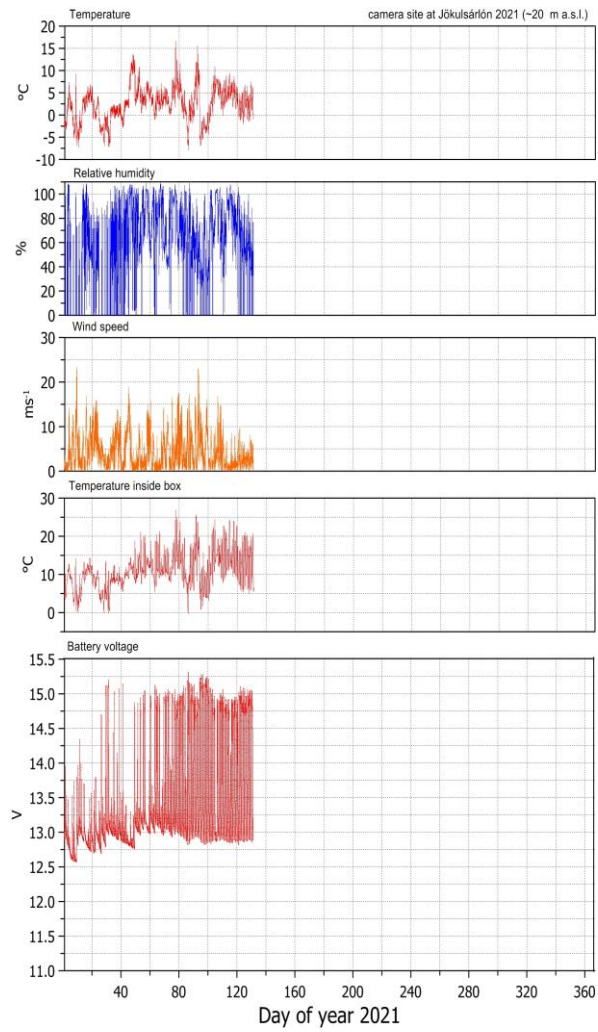
Til að auka skilning á samhengi veðurs og jöklabreytinga hefur verið aflað veðurgagna á jökli með sjálfvirkum veðurstöðvum. Á Breiðamerkurjökli var árið 2021 ein veðurstöð í rekstri allt árið (í um 100 m hæð (Br1)). Þá var einnig rekin um sumarið veðurstöð í um ~1250 m (Br7) hæð á Breiðamerkurjökli, en þar er ekki fjarskiptasamband. Um haustið kom í ljós kom að hún hafði bilað og þaðan því engin gögn þetta sumar, líklegast er talið að stöðurafmagn í óveðri í október (raunar eftir að stöðin var tekin niður en áður en reynt var að lesa af henni) á Grímsfjalli, þar sem tækin voru geymd í litlum gámi í nokkra daga, hafi ruglað innihald minna í safntæki.

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), en þessi stöð sem sem er þarna án viðhalds missti samband í apríl, þarna gætu verið gögn út árið en stöðin verður ekki heimsótt fyrr þar verður sett myndavél að nýju sem gæti orðið haustið 2022. Yfirlit mældra veðurþátta veðurstöðvanna er sýnt á 13. og 14. myndum.

Gögnin sem aflað er á veðurstöðvunum hafa verið og verða notuð sem inntak í reiknilíkön orkubúskaps við jökulyfirborð (sjá t.d. Louise Schmidt ofl. 2017, 2018 og 2020, Brice Noel ofl. 2022) til að meta leysingu og stilla afkomulíkön sem byggja á reikningum útfra 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.



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



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

Tilvísanir:

Brice Noël, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Finnur Pálsson, Wouters, B., Lhermitte, S., Haacker, J. M., & van den Broeke, M.R. (2022). North Atlantic cooling is slowing down mass loss of Icelandic glaciers. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL095697. <https://doi.org/10.1029/2021GL095697>

Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Ragnar H. Þrastarson, Snævarr Guðmundsson, Joaquín M.C. Belart, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Skúli Víkingsson, Ingibjörg Kaldal and Tómas Jóhannesson. A national glacier inventory and variations in glacier extent in Iceland from the Little Ice Age maximum to 2019. *Jökull* 2020: 1-34.

Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Thorsteinn Thorsteinsson, Joaquín M. C. Belart., Tómas Jóhannesson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Andri Gunnarsson, Bergur Einarsson, Berthier Etienne, Schmidt Louise Steffensen, Hannes H. Haraldsson, Helgi Björnsson, 2020. *Glacier Changes in Iceland From ~1890 to 2019*. *Frontiers in Earth Science*, Vol 8., 2020. <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2020.523646>, DOI=10.3389/feart.2020.523646, ISSN=2296-6463

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, 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>

Louise Steffensen Schmidt; 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 Institut

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>

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

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

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.

Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Guðmundsson, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Thorsteinn Thorsteinsson 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.

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

Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson. 1992. *Breiðamerkurjökull, niðurstöður íssjarmælinga 1991*. *Raunvísindastofnun Háskólans RH-92-12*. 19 s. og 7 kort.