

Greinargerð til Vegagerðarinnar vegna styrks til verkefnisins:

Afkoma og hreyfing Breiðamerkurjökuls og afrennsli leysingavatns til Jökulsárlóns á Breiðamerskursandi 2023



Jarðvísindastofnunar Háskólans
Jöklahópur
apríl 2024
RH-04-24
Finnur Pálsson og Eyjólfur Magnússon

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 2023.

Tilgangur þessarar rannsóknar er margþættur, hér eru nefnd 4 atriði:

1. Leggja mat á afrennsli frá Breiðamerkurjökli til Jökulsárlóns.
2. Meta afkomu Breiðamerkurjökuls ár frá ári og yfir lengri tímabil frá lokum litlu ísaldar. Afkomumælingar sem hafa verið studdar af þessu verkefni eru nýttar ásamt afkomumælingum á um 60 öðrum stöðum víðsvegar á Vatnajökli (í samvinnu JH, Landsvirkjunar og Jöklaánnsóknafélags Íslands til að gera kort af dreifingu vetrar-, sumar- og ársafkomu Vatnajökuls í heild. Þessi gögn nýtast einnig til gerðar samtengdra reiknilíkana um veður, afkomu og hreyfingu jökla. Slík samtengd líkön má nota til að skoða jöklunarsögu Breiðamerkurjökuls og einnig til að spá fyrir um þróun hans í næstu framtíð. Allt þetta nýtist líka þeim sem stunda mælingar á viðbrögðum skorpu við breytingum í jökulfargi og þróun reiknilíkana um landlyftingu.
3. Meta, eins nákvæmlega og kostur er, magn íss sem kelfir í lónið og breytileika þess. Gagnaöflun vegna rannsókna á eðli kelfingar íss og þróunar reiknilíkana sem lýsa henni.
4. Fylgjast með þeim öru breytingum sem nú eru á jökli, landi, farvegum og nýjum lónum á svæðinu milli Breiðamerkurlóns og Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi.

Hér að aftan er gerð grein fyrir afkomumælingum, afrennsli leysingavatns af jökli til Jökulsárlóns og veðurathugunum sem unnið var að á árinu 2023. 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. Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirrar stofnunar sem höfundar starfar hjá.



1. mynd. Afkomumælistaðir (+), veðurstöðvar (o), GPS stöðvar (Δ) á Breiðamerkurjökli. Ísaskil Breiðamerkurjökuls eru sýnd með blárrí línu og vatnaskil Jökulsárlóns með rauðri. Í bakgrunni er Sentinel 2 gervihnattamynd frá 23. september 2022).

Verkefnið sem hér er lýst er framhald verkefna sem jöklahópur Jarðvísindastofnunar hefur staðið að á síðustu áratugum. Auk gerðar korta af yfirborði og botni og mati á afkomu, hafa þessar rannsóknir snúist um að meta innflæði sjávar í Jökulsárlón, kanna orkuskipti lónsins, magn íss sem bráðnar þar, ísflæði til lónsins og breytingar í stærð þess.

Frá jökulárinu 1991-92 hefur Jöklahópur Jarðvísindastofnunar mælt afkomu víða á Vatnajökli, og síðan um 1996 einnig á Breiðamerkurjökli, lengst af með stuðningi Vegagerðar. Jöklahópur hefur einnig í nær allan þann tíma rekið veðurstöð á sporði Breiðamerkurjökuls og árin 2012 til 2018 aðra í 600 m hæð á austurstraumi jökulsins, en rekstri hennar var hætt því nær ómögulegt var að komast að henni til viðhalds vegna sprungna. Frá 2016 hefur einnig árlega verið að sumarlagi veðurstöð í ríflega 1200 m hæð, en hún var flutt til, hafði áður verið í sumarrekstri í svipaðri hæð á Hoffellsjökli í um áratug. Gögn frá veðurstöðvunum eru notuð til að reikna orkubúskap við jökulyfirborð (og þar með leysingu). Eftir afkomumælingum eru unnin kort af vetrar, sumar og ársafkomu jökulsins hvert ár og einnig metið heildar afrennsli leysingavatns frá jökli til Jökulsárlóns.

Jöklahópurinn hefur einnig gert stafræn kort af botni Breiðamerkurjökuls auk korta af

yfirborði á mismunandi tímum á 20. öld og það sem af er þeirri 21. Árið 2000 var gerð rannsókn á þróun Jökulsárlóns frá því það myndaðist fyrst á miðjun 4. áratug tuttugustu aldar. Því verki var fylgt eftir með líkangerð af þróun lónsins til framtíðar, en auk vinnu jöklahópsins, var það einnig gert af samverkafólki í Hollandi og Austurríki. MS-nemi (Snævarr Guðmundsson) Helga Björnssonar, vísindamanns við JH, vann rannsókn á þróun Breiðamerkurjökuls og Breiðamerkursands frá lokum litlu ísaldar, en hann lauk námi vorið 2014. Snævarr og fleiri (m.a. annar skýrsluhöfundur (FP) og Helgi Björnsson, nú vísindamaður emerítus við JH) skrifaðu 2020 grein í tímaritið Jökul um þróun lóna við SA-Vatnajökul. Nú er í vinnslu grein Svævarrs, HB og FP um jökluskerin í Breiðamerkurjökli og verður birt í næsta árgangi tímaritsins Jökuls.

Annar skýrsluhöfnada (EM), stóð að samfelldum mælingar á skriðhraða íss til Jökulsárlóns 2012-14 og aftur 2022-23 með GNSS landmælingatækjum sem voru um 1,5 km frá sporði jökulsins þar sem hann kelfir í lónið (sjá. <http://husbondi.rhi.hi.is/brda/>). EM hefur einnig unnið hraðasvið Breiðamerkurjökuls eftir gervitunglagögnum 2008-13 og nýtt ásamt hraðamælingum frá GNSS tækjunum. Nú hefur verið tryggður aðgangur jöklahóps JH að hraðasviðum Breiðamerkurjökuls, með allt að 6 daga upplausn í tíma, sem Austuríska fyrirtækið Enveo býr til úr eftir háupplausnar ratsjármyndum (<https://www.enveo.at/>), en sú mæliröð nær aftur til 2014, og muna halda áfram inn í framtíðina. Myndræn gervitunglagögn eru notuð til að kortleggja stöðu sporðsins árlega eða oftar. EM stóð einnig að uppsetningu og rekstri myndavélar sem tók myndir af jökulsporðinum sem kelfir í lónið á 5. mínútna fresti frá 2012-2014. Þær myndir munu nýtast með öðrum gögnum til að meta rúmmál þess íss sem kelfir.

Í tengslum við verkefnið hefur töluverður hluti botns Jökulsárlóns verið kortlagður í hárru upplausn með fjölgeislamæli og ef allt gengur eftir mun verða lokið við kortlagningu botnsins á næstu árum.

Á árum 2017-2020 vann PhD. nemandi hjá Jöklahópi JH, Louise Steffensen Schmidt, að gerð reiknilíkans af afkomu Vatnajökuls frá 1980 til 2015 og tengdi afkomulíkanið við íshreyfilíkan til þess skoða þróun Vatnajökuls á ýmsum tímabilum: liðnum, núverandi og í framtíðinni. Grein hennar og fleiri um framtíð Vatnajökuls birtist á árinu 2020. Brice Noël við háskólan í Utrecht í Hollandi, vann ásamt öðrum, m.a. skýrsluhöfunum að rannsókn á framtíð jökla á Íslandi, þar sem gögn úr afkomumælingum og af veðurstöðvum á Breiðamerkurjökli reyndust einnig mikilvæg. Þekking sem aflað hefur verið á undanförunum áratugum nýttist einnig í grein sem Hrafnhildur Hannesdóttir leiddi um breytingar á stærð jökla á Íslandi frá um 1890 og birtist í tímaritinu Jökli árið 2020.

Andri Gunnarsson og umsækjandi (FP) vinna nú að grein þar sem dregnar verða saman helstu niðurstöður um aldafjórðungs samfelldar veðurmælingar með sjálfvirkum veðurstöðvum á Vatnajökli (um 10-12 stöðvar árlega) og gagnagrunni þar sem öll gögnin verða aðgengileg. Þarna eru mælingar í veðurstöðvum á Breiðamerkurjökli einkar mikilvægar vegna legu sinnar nærri algengustu lægðabrautum, og að neðri veðurstöðin er í ca. 100 m hæð, sem er um 600 m lægra en nokkur hinna ~10 á Vatnajökli..

Leiðangrar vegna mælinga:

2.-8. maí. Vetrarafkomumælingar á safnsvæði Breiðamerkurjökuls. Veðurstöð sett upp í ~1250 m hæð. 20.-21. júní 2023: Reynt var að fara í vorverk á leysingasvæði í maí byrjun en hætt við vegna þess hve aðgengi var erfitt og hættulegt. Gerður var sérstakur 5 manna leiðangur í júní og þá lesið af afkomumælivírum og vetrarsnjór mældur. Nýjir afkomumælivírar boraðir niður með gufubor. Veðurstöð í Br1 heimsótt og borað fyrir nýjum $\frac{3}{4}$ “ rörum fyrir snjóhæðarmælinn með gufubor. Einnig voru GNSS stöðvarnar í Br3 og Brda teknar niður.

17-19. október. Sumarafkoma á safnsvæði mæld. Veðurstöð í 1250 m hæð tekin niður.

22. október. Uppsetning snjóhæðarmælis í neðri lagfærð og lesið af afkomuvírum á leysingasvæði.

23.-27. október. Efri veðurstöð tekin niður og lesið af afkomumælistikum á safnsvæði.

Kostnaður á árinu 2023:

Styrkur til þessa verkefnis af tilraunafé Vegagerðar árið 2023 var 2.500 þkr.

Vinna við frumúrvinnslu og túlkun mælinga (1.6 mannmánuðir): 1.620.000 kr.

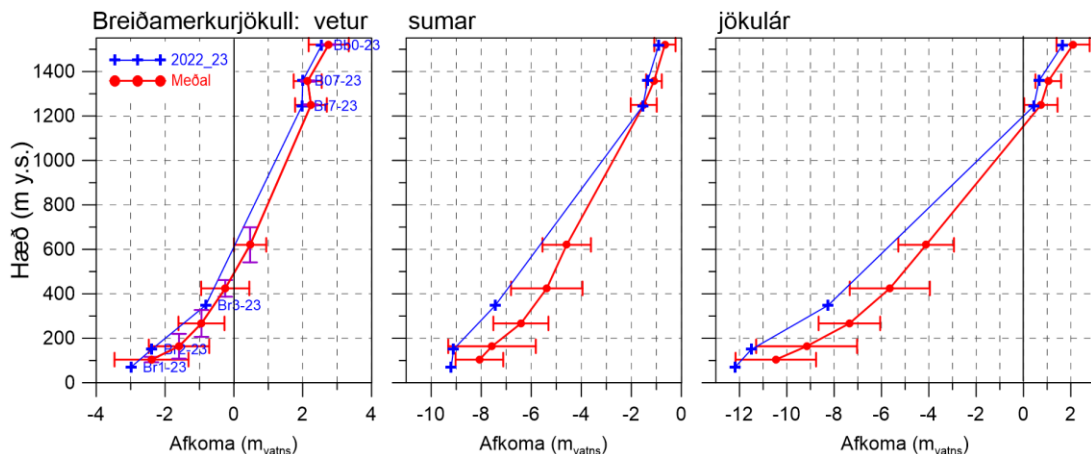
Viðhald veðurstöðva og efni til afkomumælinga: 170.000 kr.

Kostnaður við mæliferðir: 900.000 kr.

Stjórnunarkostnaður (aðstöðugjald 2.5%): 62.500 kr.

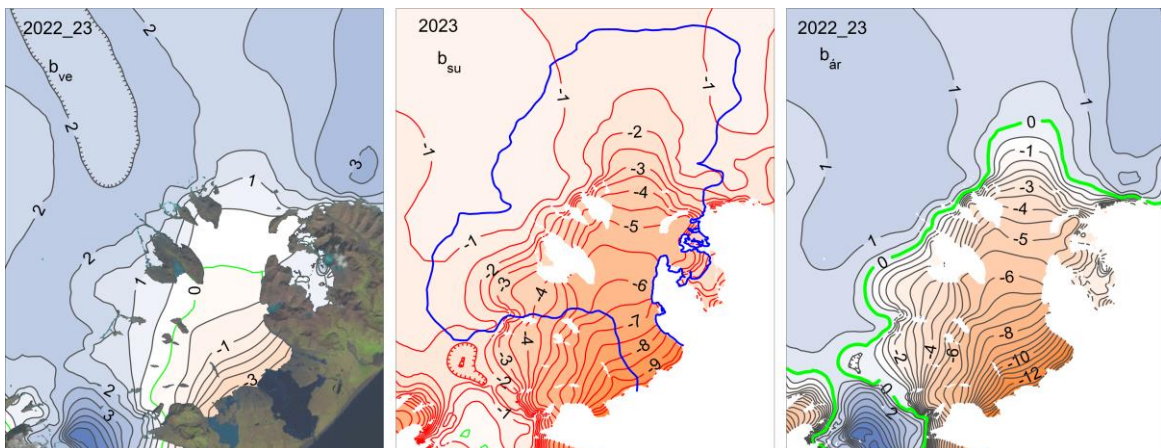
Samtals kostnaður : 2.752.000 kr.

Niðurstöður afkomumælinga 2022-23.

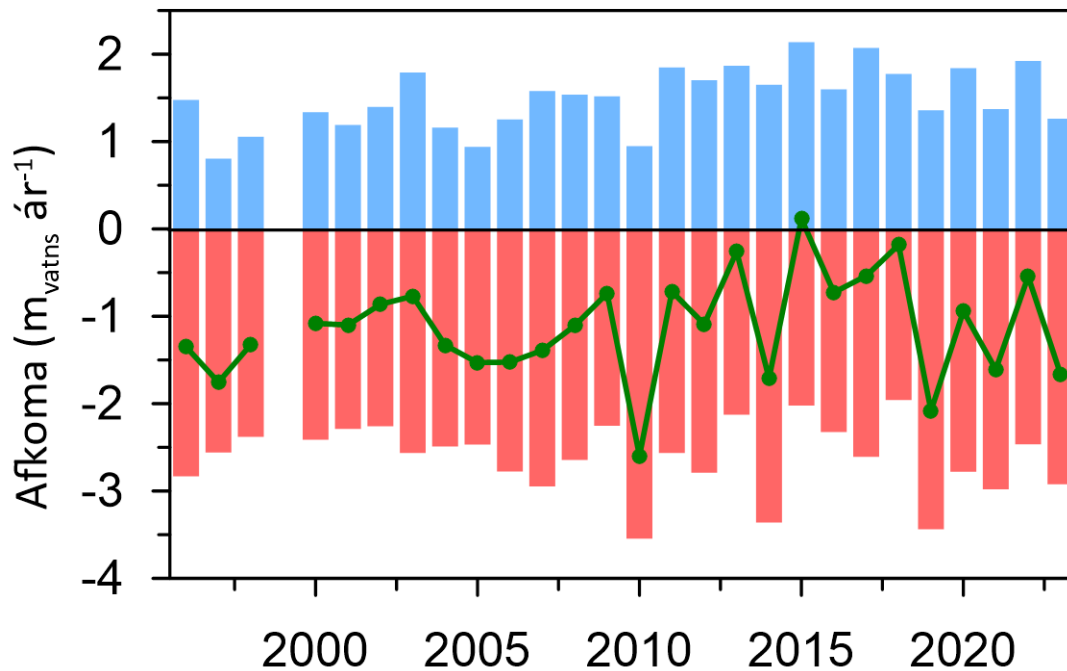


2. mynd. Breytileiki afkomu með hæð á Breiðamerkurjökli jökulárið 2022-23 og meðaltal allra ára sem afkoma hefur verið mæld (flest ár frá 1995-96, afkoma í m vatns og hæð mælistaða í m yfir sjó). Þverstrikin sýna staðalfrávik mæliraðar í mælistöðvunum.

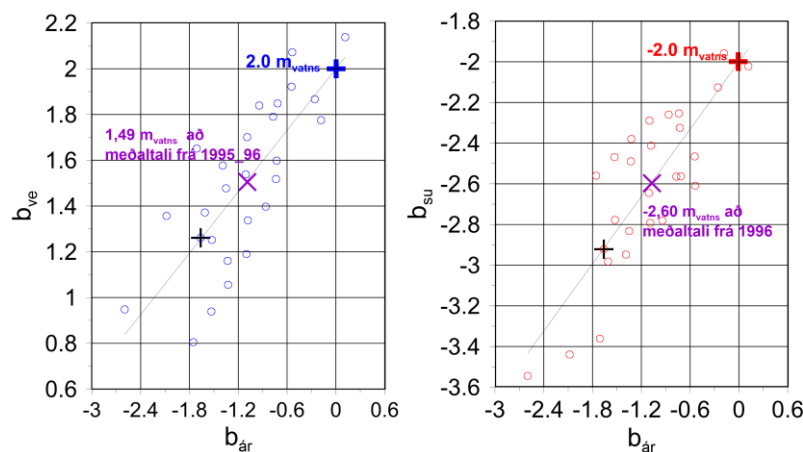
Farnar voru þrjár ferðir til afkomumælinga og viðhalds veðurstöðva jökulárið 2022-23, flestar voru tengdar öðrum verkum til að lágmarka kostnað. Vetrarmælingar á efri hluta Breiðamerkurjökuls (safnsvæði) voru gerðar í byrjun maí og veðurstöð við Br7 var sett upp 2. maí. Aðalmæliferðin var ekki farin fyrr en 21. -22. júní 2023 á neðri hluta jökulsins (leysingasvæði). Reynt var að koma þarna við á leið úr afkomuferðinni í maí, en snúið frá vegna erfiðleika við að komast á jökulinn yfir leðju og vatnsaga. Lesið var af eldri afkomuvírum og boraðar holur (~10-15 m djúpar) með snigilbor og komið fyrir nýjum afkomumælivírum í Br2 og Br3 en ¾ rörum fyrir snjóhæðarmæli veðurstöðvar við Br1. 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. Þetta var gert 22. október, og í framhaldinu gerðar mælingar á safnsvæðinu. Á 2. mynd sést að vetrarsnjósófnun var talsvert undir meðallagi á safnsvæðinu, en neðantil á leysingasvæði var vetrarýrmun undir meðallagi. Meiri hluti sumars var hlýr og bjartur og leysing verulega umfram meðallag á leysingasvæðinu, en þó nærri meðallagi ofantil. Það sama á við um ársafkomuna.



3. mynd. Dreifing vetrar- (vinstri) sumar- (miðja) og ársafkomu (hægri) á Breiðamerkurjökli 2022-23 (afkoma í m vatns). Ísasvið Breiðamerkurjökuls er sýnt með grænni línu (vinstri rammi) og vatnasvið Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi með blárrí línu (miðju rammi).



4. mynd. Yfirborðsafkoma Breiðamerkurjökuls metin eftir afkomumælingum *vetur*, *sumar* og *jökulár*. Hér ekki er tekið tillit til kelfingar, en síðustu ár er kelfing metin svára til $\sim 0,6$ m viðbótar rýrnunar.

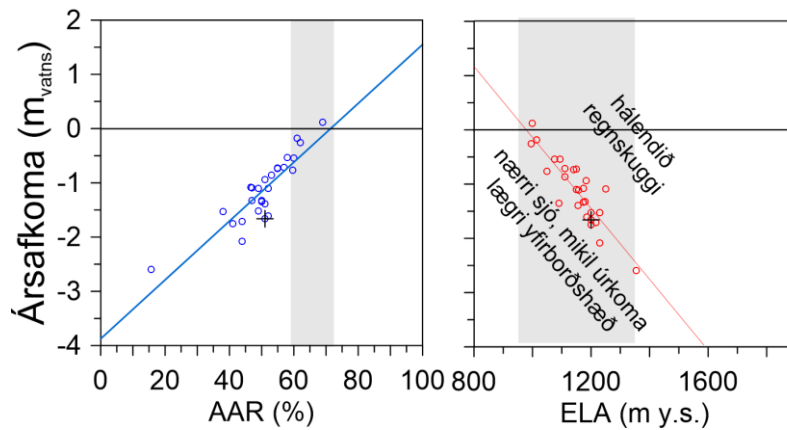


5. mynd. Ársafkoma ($b_{\text{ár}}$) Breiðamerkurjökuls teiknuð á móti vetrarafkomu (b_{ve} , vinstri) og sumarafkomu (b_{su} , hægri). Mæligildi jökulársins 2022_23 eru merkt með svörtum +.

Flatartegur afkomukortanna yfir ísavið jökulsins skilarheildarafkomutölum (3. og 4. mynd).

Ársafkoma 2022-23 var nærri meðallagi efst á safnsvæðinu og heildarýrnun verulega meiru en í meðalári. Vetrarafkoma reyndist $1,26 \text{ m}_{\text{vatns}}$ eða um 84 % af meðaltalr mælitímans. Rýrnun sumarsins var $-2,92 \text{ m}_{\text{vatns}}$ eða um 12 % umfram meðalrýrnun mælitímans. Jökulárið 2022_23 var ársafkoman $-1,66 \text{ m}_{\text{vatns}}$, eða rýrnun um 50 % umfram þess sem verið hefur í meðalári frá því mælingar hófust um miðjan tíunda áratug síðustu aldar. Ef frá er talið jökulárið 2014_15 hefur ársafkoman verið neikvæð allt mælitímabilið ($-1,11 \text{ m}_{\text{vatns}}$ á ári að meðaltali).

Auk massataps vegna afkomu við yfirborð tapast ís vegna kelfingar í Jökulsárlón, ríflega $\sim 0,5 \text{ km}^3$ 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 línuritirn sýna sterkt samband og gefa vísbendingu um að til þess að afkoma Breiðamerkurjökuls sé í jafnvægi miðað við núverandi lögun ætti umsetning að vera um $2 \text{ m}_{\text{vatns}}$ ($b_{\text{ve}} = 2 \text{ m}_{\text{vatns}}$ og $b_{\text{su}} = -2 \text{ m}_{\text{vatns}}$). Mæliröðin sýnir hins vegar að meðalvetrarafkoma er aðeins $1,49 \text{ m}_{\text{vatns}}$ eða $\sim 74\%$ af $2 \text{ m}_{\text{vatns}}$ og meðalsumarleysing um 30% umfram ($-2,60 \text{ m}_{\text{vatns}}$). 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



6. mynd. Ársafkoma Breiðamerkurjökuls teiknuð á móti mældri hæð jafnvægislínu (ELA) á mælisniði og hlutfalli safnsvæðis af heildarflatarmáli (AAR). Svartur + er gildi jökulársins 2022_23. Gráa svæðið sýnir spannið sem mælingar sýna að $b_n(ELA)$ og $b_n(AAR)$ annarra skriðjökla Vatnajökuls skeri $b_n=0$ línuna.

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 stigull b_n með AAR og b_n með ELA er svipaður fyrir Breiðamerkurjökul og hina skriðjökla; um 0,6 m_{we} fyrir 10% breytingu AAR og 0,65 m_{we} fyrir 100 m breytingu ELA.

Samandregnar upplýsingar um afkomu Breiðamerkurjökuls jökulárið 2022_23 eru sem hér segir:
Flatarmál = 874 km² (samkvæmt jaðri 2023)

$B_{ve} = 1,10 \text{ km}^3$; $b_{ve} = 1,26 \text{ m}_{vatns}$ (meðatal 1995_96-2021_22 er: $\underline{b}_{ve} = 1,50 \text{ m}_{vatns}$)

$B_{su} = -2,55 \text{ km}^3$; $b_{su} = -2,92 \text{ m}_{vatns}$ (meðatal 1996-2022 er: $\underline{b}_{su} = -2,61 \text{ m}_{vatns}$)

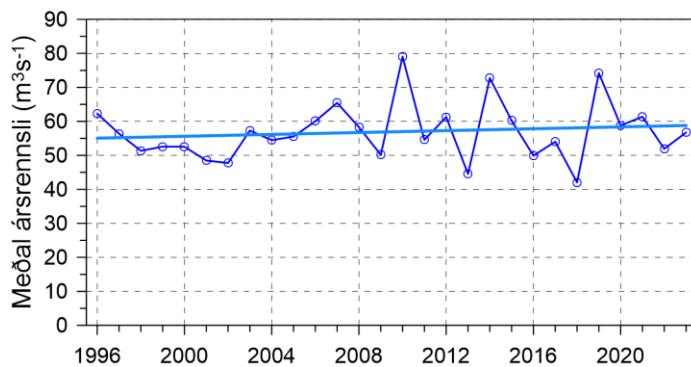
$B_{ár} = -1,45 \text{ km}^3$; $b_{ár} = -1,66 \text{ m}_{vatns}$ (meðatal 1995_96-2021_22 er: $\underline{b}_{ár} = -1,11 \text{ m}_{vatns}$)

ELA (hæð jafnvægislínu) = ~1149 m y.s. (á mælisniði);

AAR (hlutfall safnsvæðis af heildarflatarmáli) = 51 %

(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).

Afrennsli til Jökulsárlóns



7. mynd. Meðalársafrennsli yfirborðsleysingarvatns (metið útfrá sumaraflkomu) til Jökulsárlóns sumurin 1996 til 2023 (á jökulári þ.e. október til september).

Meðalársafrennsli til Jökulsárlóns vegna yfirborðsleysingar að sumarlagi er sýnt á 7. mynd (eins og hún er metin eftir sumaraflkomu en þar er ekki tekið tillit til úrkomu hvort heldur sem er rigning eða snjócoma sem fellur og bráðnar jafnharðan, sem líklega er af stærðargráðu 10% til viðbótar). Sumaraflrennsli til lónsins jafnað yfir jökulárið 2022_23 var rétt tæplega $57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sem er mjög nærri meðalafrennsli til lónsins frá 1996 til 2022 sem er $57 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Afrennsli vegna vetrarleysingar eru miklu minna, af stærðargráðu nokkrir rúmmetrar, en erfitt að meta eftir afkomumælingunum einum, því að vetur eru úrkomusamir og snjóa 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 ofsaleysingu sé topprennsli 2-3 sinnum meira eða $400\text{--}600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Þetta má vinna miklu betur með reiknilíkönunum 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 í kjölfarið, 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 leytir að lónið var meira og minna þakið ísjökum langtímum saman.

Niðurstöður nýrrar könnunar okkar á kelfingu útfrá skriðhraðamælingum eftir gervitunglagögnum (sjá sérstakan kafla hér aftast) benda til að kelfing um þessar mundir (jökul árið 2020-21) sé nærri $0,4 \text{ km}^3$, en hafi árið 2014-2015 verið $0,48 \text{ km}^3$ með um 10% óvissu.

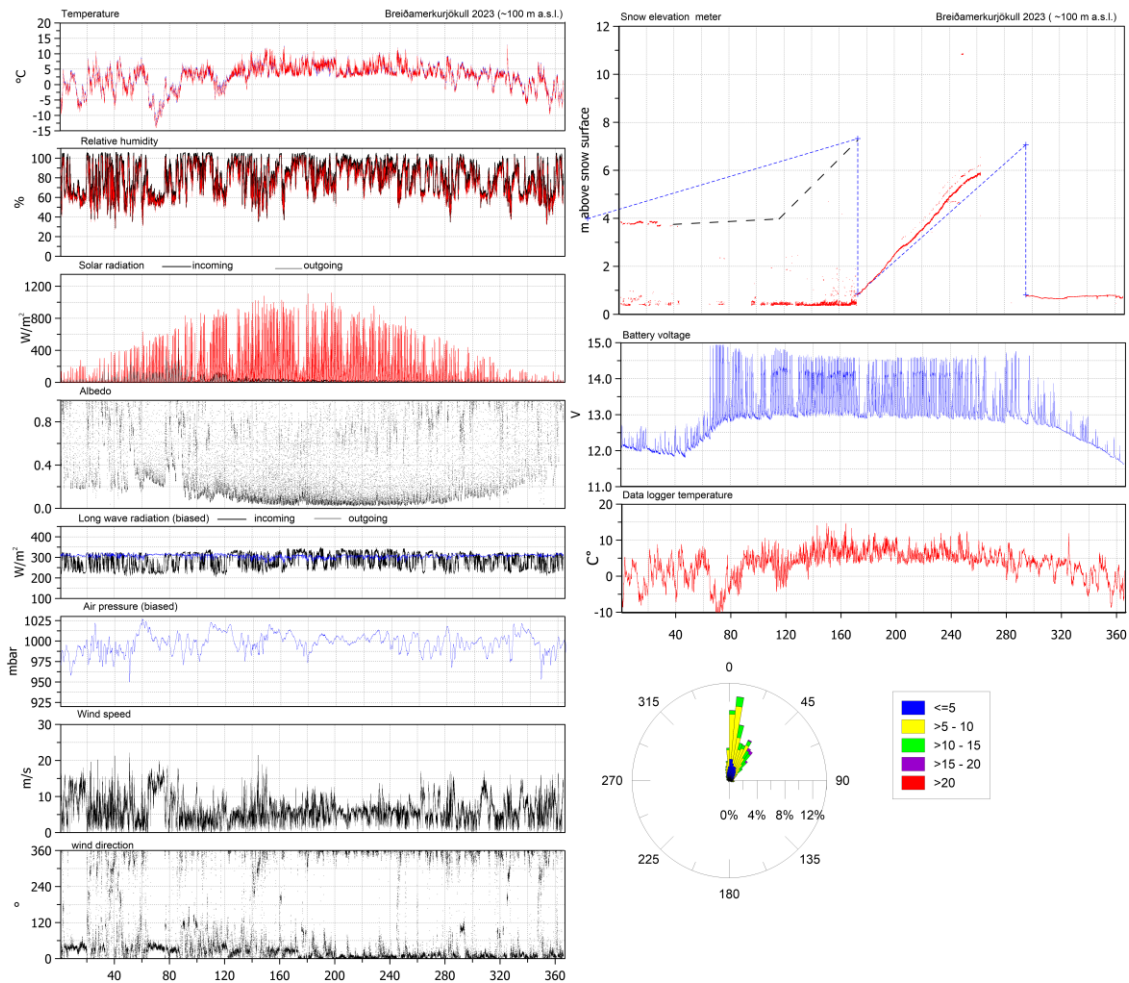
Ef gert er ráð fyrir að bráðnun íss í lóninu sé nálægt $0,5 \text{ km}^3$ af ís á ári eru það nærri $16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ að meðaltali, en mest bráðnar yfir sumarmánuðina (mun minna í nóvember til febrúar/mars), þannig gæti tillegg þessa verið nálægt $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ yfir sumartímann (nær $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ef miðað er við $0,4 \text{ km}^3$).

Breiðmerkurjökull og Jökulsárlón eru á einu 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 $242,7 \text{ mm}$. Í febrúar 1968 mældist $228,4 \text{ mm}$ í sólarhringsúrkoma á Kvískerjum og sama dag $233,9 \text{ mm}$ 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 rynnir burt). Atburður af þessu tagi eru mjög ólíklegir að sumarlagi, en atburðir sem svara til helming þessa ætti ekki að útiloka.

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 Skálabjarga í Esjufjöllum og lón sem fór að myndast rétt fyrir aldamót í Fossadal milli Skálabjarga 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. $100\text{--}1000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) er hann skammær og vatnsmagnið það lítið að ekki myndi hækka í Jökulsárlóni nema um nokkra tug cm (hlaup úr lóni sem er 1 km^2 og 25 m djúpt samsvarar 1 m yfirborðshækkun í Jökulsárlóni).

Ef saman færu í röð sólarhringur með ofsarigningu og sólarhringur með ofsaleysingu er ekki ólíklegt að innrennsli til Jökulsárlóns gæti verið $1000\text{--}1500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ í einn til tvo sólarhringa.

Veðurathuganir



8. mynd. Mældir veðurþættir árið 2023 á veðurstöð í um 100 m hæð á sporði Breiðamerkjökuls.

Til að auka skilning á samhengi veðurs og jöklabreytinga hefur verið aflað veðurgagna á jökli með sjálfvirkum veðurstöðvum. Á Breiðamerkjökli var árið 2023 ein veðurstöð í rekstri allt árið (í um 100 m hæð (Br1)). Um sumarið var einnig rekin veðurstöð í um ~1250 m (Br7) hæð á Breiðamerkjökli, en þar er ekki fjarskiptasamband.

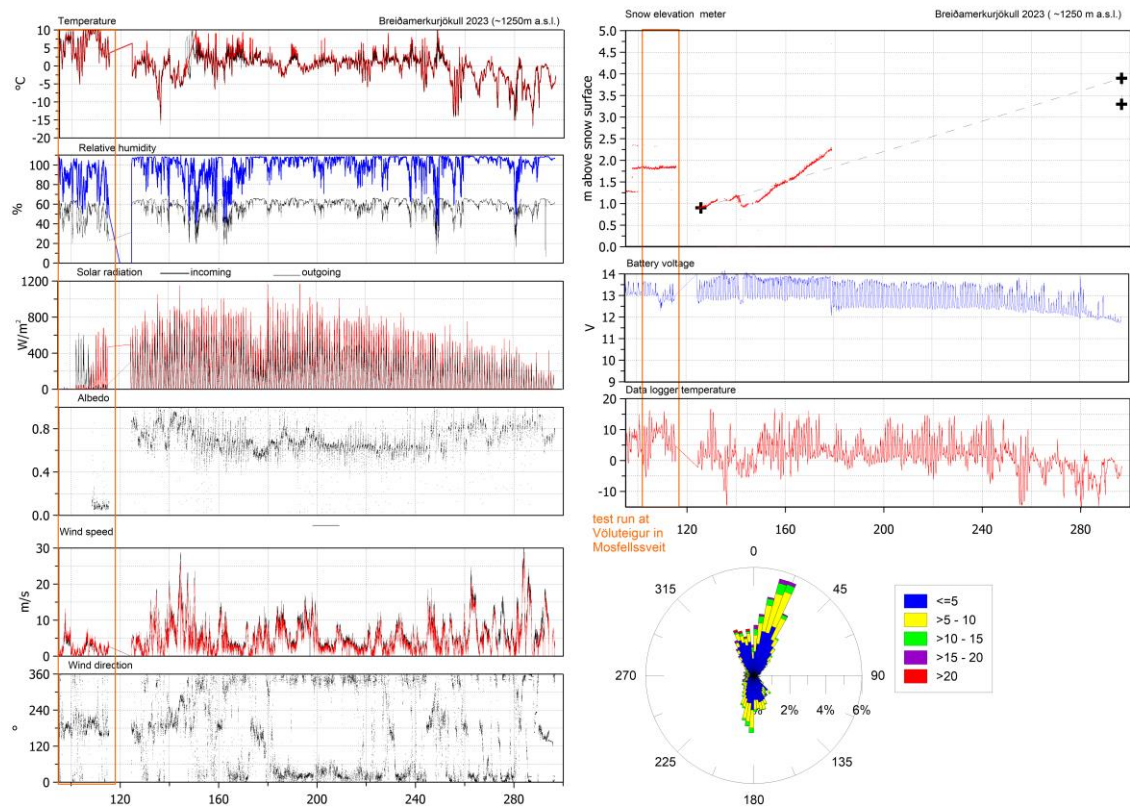
Yfirlit mældra veðurþátta veðurstöðvar í Br1 er sýnt á 8. mynd og á þeirri 9. yfirlit mældra veðurþátta á Br7.

Gögnin sem aflað hefur verið 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 af afkomulíkön sem byggja á reikningum útfrá lofthjúpslíkönum (lofthjúpslíkön sem byggja á mældum veðurþáttum). Þannig fæst möguleiki til að reikna tímaraðir afrennslis bæði aftur og einnig fram í tímann eftir loftlagsspám.

Einnig má nýta þessar mælingar til að dreifa afrennslis frá jöklinum á tíma og fá þannig betra mat á dreifingu afrennslis og hámark þess. Nú er unnið að gerð gagnagrunns allra veðurgagna sem aflað hefur verið að jökli, en jöklahópur JH hefur í samvinnu við Landsvirkjun rekið um 10 aðrar veðurstöðvar á jökli, í upphafi (1994) eina á Brúarjökli en fjölgar með árunum, orðnar 6 1996 og 12 á árinu 2023.

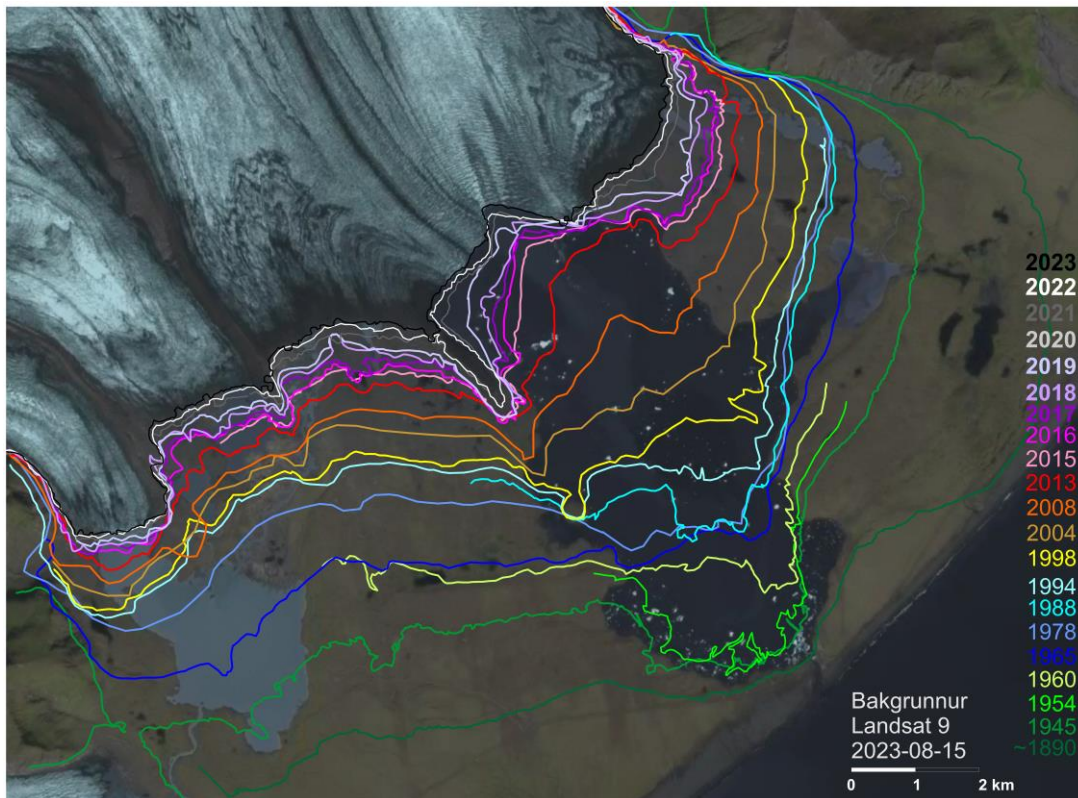
Nú er unnið að grein um helstu einkenni veðurþátta á jökli, breytileika og stigla með hæð og tíma.

Í framhaldinu verður reiknaður orkubúskapur sumars á öllum veðurstöðvum öll árin og það síðan nýtt til að sannreyna og skala reiknilíkön orkubúskaps útfrá almennum veðurlíkönunum. Sú vinna mun skila jöklaleysingu sem falli af tíma og rúmi sem heilda má yfir tiltekin svæði, t.d. vatnasvið Jökulsárlóns og fá þannig tímabreytileika afrennslis leysingavatns þangað.



9. mynd. Mældir veðurþættir árið 2023 á veðurstöð í um 1250 m hæð á austurstraumi Breiðamerkurjökuls.

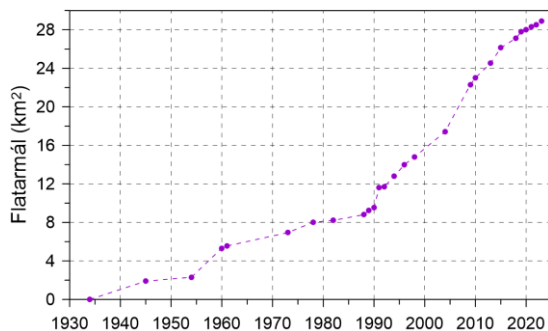
Breiðamerkurjökull rýrnar og hörfar



10. 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, Sentinel 2), annað eftir flugmyndum Landmælinga Íslands. Í bakgrunni er mynd frá Landsat 09 (sýnilega sviðið, 10 m upplausn, NASA) tekin 15. ágúst 2023 en jaðarinn 2023 er rakinn eftir henni.

Fylgst hefur verið með legu jaðars Breiðamerkurjökuls eftir ýmsum tiltækum gögnum m.a. gervihnattamyndum. Á 10. mynd er sýnd lega jaðars Breiðamerkurjökuls á ýmsum tímum frá lokum Litlu ísaldar um 1890. Nýjasti jaðarinn er unnin eftir Sentinel gervihnattamynd frá 15. ágúst 2023. 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. Skyndileg breyting flatarmál 1991-92 er vegna þess að þá sameinaðist Stemmulón (nú austur frá miðbiki Jökulsárlóns) Jökulsárlóni. Á 10. mynd eru stærstu jaðarlón við Breiðamerkurjökul dregin fram sérstaklega með grábláum lit. Breiðarlón er vestast þeirra en 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 orðið 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 ríflega 1,0 km² en botnkortið gefur kynna að það geti stækkað til NNV og orðið allt að 6 km langt, dýpst um 100 m og nærri 10 km² 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.



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

bæði Breiðárlóns og Jökulsárlóns, þróun lónanna lýst og helstu kennistærðir þeirra settar fram. Efni greinarinnar verður ekki endurtekið hér, en á 11. mynd má lesa þróun flatarmáls Jökulsárlóns frá um 1935, þegar fyrstu ummerki um lón sást.

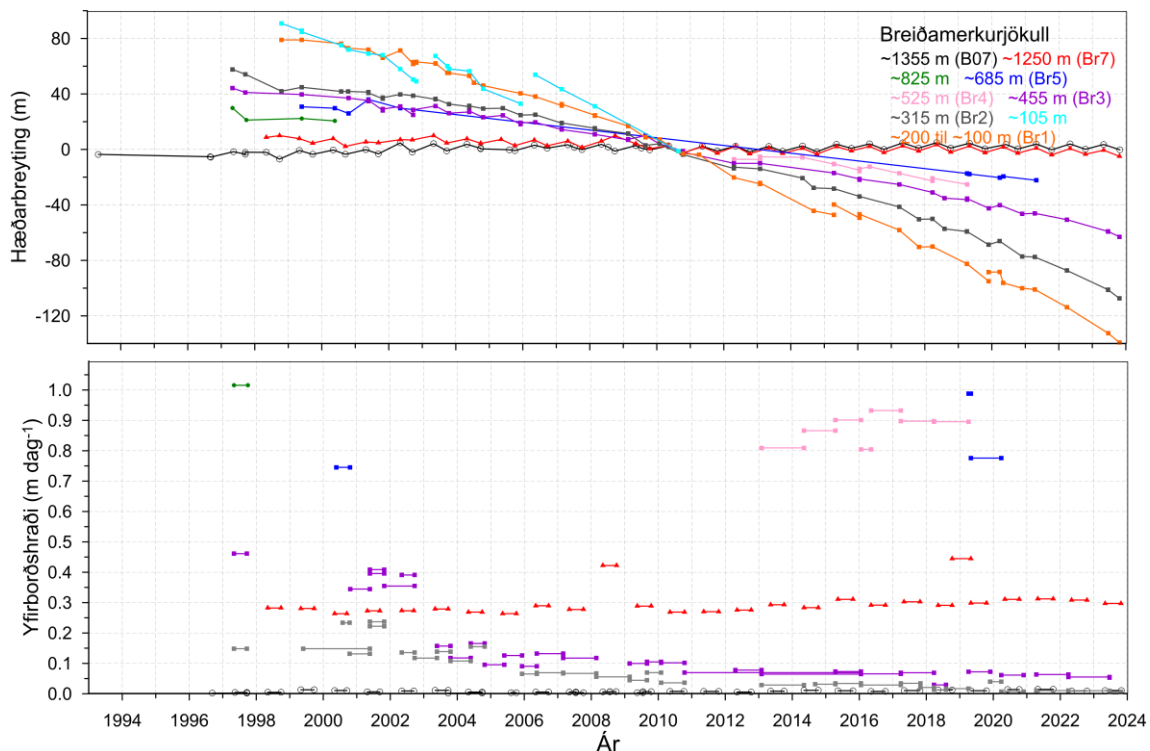
Í grein jöklahóps árið 2001 (Helgi Björnsson og fleiri) var gerð grein fyrir hvernig Jökulsárlón dregur í sig orku sem er í hlutfalli við stærð lónsins, einkum sólgeislun og þó í enn meiri mæli frá orkuríki (7-11°C heitum) sjó sem streymir inn og út úr lóninu á sjávarföllum (mælingar gerðar að frumkvæði 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 mun meiri en þarf til að bræða það magn íss sem brotnar af jöklinum (kelfir) út í lónið.

Ekki tókst að afla hæðarlíkans af Breiðamerkurjökli haustið 2023, og því ekki hægt að bæti í þá röð sem korta af hæðarbreytingum sem kynntar voru í skýrslun síðustu nokkurra ára.

Á 12. mynd (efri rammi) sést hvernig yfirborðshæð jökulsins hefur breyst með tíma á afkomumælistöðvum. Hæðarbreytingar eru mjög litlar á efstu mælistöðvunum, þrátt fyrir stöðuga rýrnun jökulsins í heild allt mælitímabilið, en þynning sporðsins orðin yfir 200 m fremst í sporðinn.

Skriðhraðamælingar

Allir afkomumælistaðir eru mældir inn með landmælinga GNSS-tækjum þegar vitjað er um þá. Þannig fæst skriðhraðamæling í stökum mælipunktum. Niðurstöður þeirra mælinga og breytileiki með tíma eru sýndar á 12. mynd. Í tengslum við CISIM verkefnið sem rætt verður hér aftur, var sett upp síritandi GNSS stöð á mælistað Br3 vorið 2021 og var í rekstri út árið 2022, og gerð var grein fyrir í greinargerð síðasta árs. Þá var frá 2022 einnig rekstri GNSS mælistöð (BRDA) nærri jaðri á kelfandi hluta jökulsins við Jökulsárlón, en sú stöð tekin niður í júní 2023 (sjá: <http://husbondi.rhi.hi.is/brda/>).



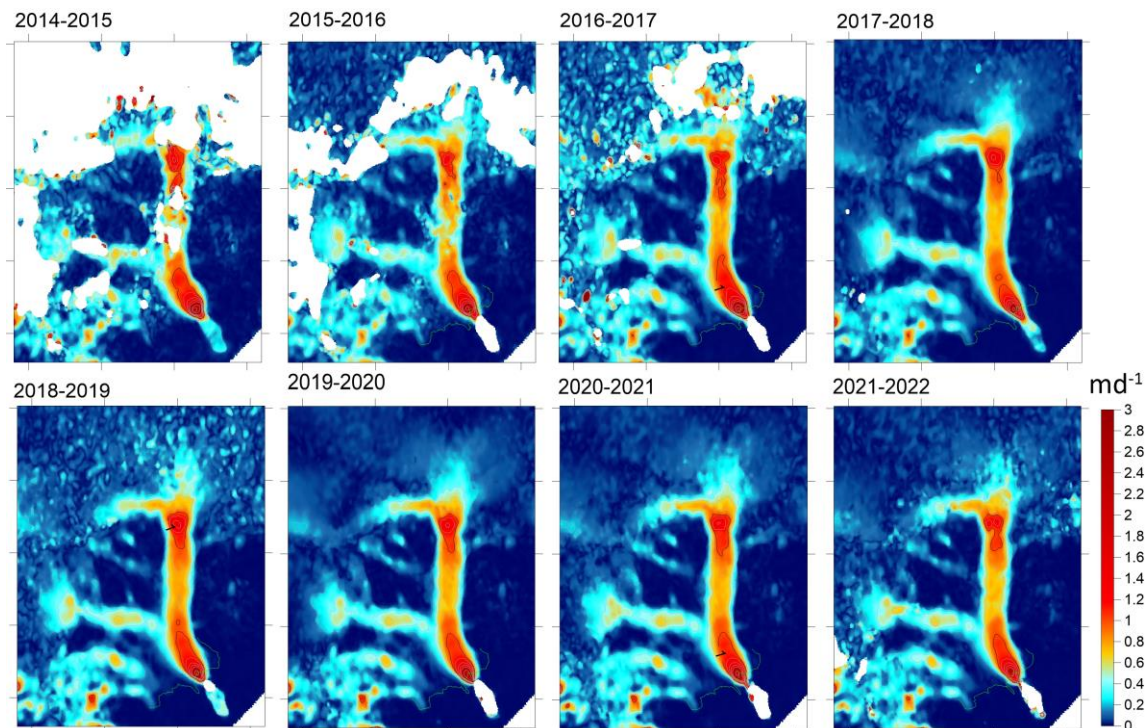
12. mynd. Á efri myndinni eru sýndar hæðarbreytingar á afkomumælistöðvum, unnar sem mismunur hæðarmælinga með landmælinga GPS tækjum og Lidarhæðarkorts frá 2010. Á neðri myndinni er sýndur yfirborðsskriðhraði í mælistöðvum metin útfrá staðsetningu mælistika og víra sem mæld er með landmælinga GNSS tækjum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

Á 12. mynd (neðri) er sýnd tímaröð skriðhraða á afkomumælistöðvum á Breiðamerkurjökli. Þar sést meðal annars að blásporðurinn milli Jökulsárlóns og Breiðárlóns (í miðstraumi jökulsins) er nærri kyrrstæður (Br1) og láréttur hraði jökulsins þar fyrir ofan nokkrir tugir metra á ári (5-10 cm á dag) (Br2 og Br3), en á austur straumnum er skriðhraðinn Br4, Br5 og Br7 ~0,3 til 1 m á dag og hraðinn á GNSS BRDA mælistöðinni að jafnaði um 1,25 m á dag, en breytilegur með tíma, mestur um 3 m á dag. Sveiflurnar í hraðanum tengjast væntanleg mest skyndilegum breytingum á vatnsþrýstingi við botninn, sem ræðst af framboði leysingavatns frá yfirborði og rigningu. Ekki er tækifæri til að greina það nánar hér, en það er hluti verkefnis PhD nema.

Skriðhraði í Br3 hefur lækkað með tíma, líklega vegna þessa að vegna þess að ísstraumur til austurs hefur þokast norðar.

Á árinu 2020 hófst rannsóknaverkefnið CISIM sem stutt er af RANNÍS, en í forsvari eru Tómas Jóhannesson á Veðurstofu Íslands og EM (annar skýrsluhöfundar). 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. Auk VÍ og JH kemur að CISIM verkefninu fyrirtækið ENVEO í Austurríki sem vinnur eftir radarmælingum gervitungla hraðasvið yfirborðs jarðar. Enveo vinnur fyrir allt Ísland með sjálfvirkum hætti hraðasvið á 6 daga eftir radarmælingum Sentinel gervitungla ESA (sjá Jan Wuite ofl. 2022). Á 13. mynd er sýndur meðal láréttur skriðhraði Breiðamerkurjökuls jökulárin 2014-2015 til 2021-2022 (höfundar hafa ekki enn niðurstöður fyrir jökulárið 2022-2023). Þó hraðasviðin séu misjöfn að gæðum eru megindrættir ljósir á þeim öllum. Öflugur ísstraumur er úr norðri niður austurstrauminn, meðalárshraði er víða á bilinu 1-2 m á dag um miðbik straumsins, en mestur nærri jaðri kelfandi hluta jökulsins til Jökulsárlóns, þar sem ársmeðalhraðinn er á 3 m á dag. Einnig er sterkur ísstraumur úr vestri norðan Mávabyggða og flytur ís að austurstraumnum, einnig sunnan Mávabyggða frá Hermannskarði og norðurdrögum Örfajökuls og af Örfajökli til Breiðárlóns.

Þessar upplýsingar um hraðasvið má nýta ásamt botn og yfirborðskortum til að reikna íslæði til einstakra svæða, t.d. að jaðarlónunum, og gerð er grein fyrir í næsta kafla.



13. mynd. Meðal láréttur skriðhraði yfirborðs Breiðamerkurjökuls jökulárin (október til loka september næsta ár) 2014-15 til 2021-2022. Hraðinn er sýndur með lit í m á dag, sjá litaskala til hægri. Úvinnsla hraðsviða á 6 daga fresti er unnin af fyrirtækinu Enveo í Austurríki en samantekt meðaltals jökulárna af Kristu Hannesdóttur PhD nema við JH.

Mat á kelfingu í Jökulsárlón.

Eins og rætt er hér að ofan í kaflanum um Afrennsli til jökulsárlóns, hefur magn kelfingar verið metið með ýmsum aðferðum. Ein sú einfaldasta er:

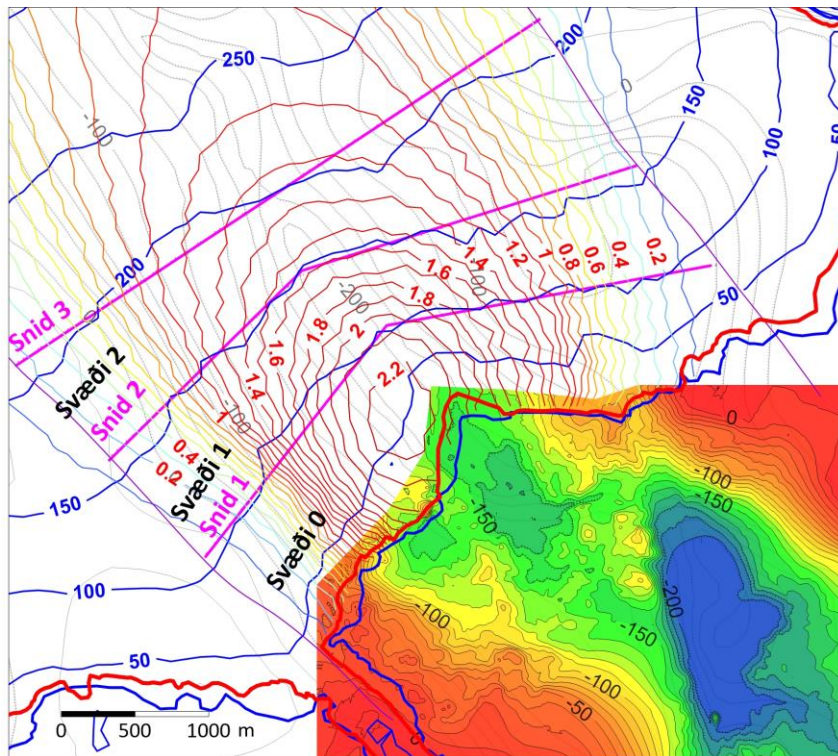
Skriðhraði á blásporðinum hefur mælt um 500 m á ári; kelfandi tungan er um 3 km breið og miðað við núverandi þekkingu á botnlögun er flatarmál þversniðs kelfandi hlutans um $\sim 0,5 \text{ km}$, Rúmtak ískelfingar er þá gróflega $0,5 \text{ km} \times 0,6 \text{ km}^2 = 0,3 \text{ km}^3$. En auk þess hefur kelfandi hluti sporðsins líka tapað um 4 km^2 og meðalþykkt þess $\sim 400 \text{ m}$ frá 2013. Þetta er tapaða ísrúmmál er um $\sim 1,6 \text{ km}^3$ eða $0,18 \text{ km}^3$ á ári. Samtals verður þá árlegt rúmtak kelfingar $\sim 0,5 \text{ km}^3$ íss eða $0,45 \text{ km}^3$ að vatnsgildi.

Nú þegar fyrir liggja mælingar á skriðhraðsviðinu auk botnkorts og nokkur hæðarlíkon yfirborðs er hægt að velja þversnið hornrétt á skriðstefnu nærri sporði og reikna ísflæði gegnum það. Ísinn sem flæðir gegnum sniðið getur bráðnað á yfirborði, en að mestum hluta (ef flöturinn milli lóns og sniðs er lítill) skriðið út í lónið. Þannig má reikna heildar magn kelfingar sem:

$K = Q_f + B + T - Q_s$ þar sem K er rúmtak kelfingar, Q_f flæði íss í gegnum þversniðið, B rúmtak íss sem bráðnar á yfirborði milli sniðsins og lónsins, T rúmtak íspýnningar eða þykkunar vegna aflögunnar (tognunar eða samþjöppunar) á svæðinu milli lóns og þversniðs og loks Q_s sem er rúmtak íss sem horfið hefur vegna styttingar vegalengdar frá jaðri við lón að þversniðinu (hop jaðars í lóninu). Út frá hæð sporðsins yfir vatnsborði lónsins er vitað að mjög lítill hluti tungunnar getur verið fljótandi, og því látið duga að líta svo að allur ísinn sitji á botni eða því sem næst.

Þessir reikningar hafa verið gerðir fyrir árið 2020-2021 og 2014-15, en fyrir 2015 og 2021 eru til hæðarlíkon af yfirborði jökulsins.

Sem dæmi um reikingana er hér gerð grein fyrir mati á kelfingu jökulárið 2020-2021. Á 14. mynd eru sýnd þau gögn sem notuð eru: Botnkort sem gráar hæðarlínur (innan lónsins eru nýlegar mælingar með fjölgeislasónar, sýndar með lituðum hæðarbílum auk hæðarlína) yfirborðshæð hæðarlíkans frá hausti 2021 (bláar línur), meðalhraðasvið jökulársins 2020-2021 sem litaðar hæðarlínur. Einnig eru þarna jökuljaðrar 2020 (þykk blá lína) og 2021 (þykk rauð lína). Lega þversniðanna þriggja sem flæði er reiknað í gegnum er sýnd með lillabláum línunum, og svæðið þar sem rýrnun vegna leysingar og hæðarbreyting er vegna aflögunar eru milli jökuljaðars og fyrsta þversniðsins, en hin tvö svæðin liggja milli þversniðanna. Lega þversniðanna er valin að liggja í u.þ.b. 200, 150 og 100 hæð, og sniðin fylgja



14. mynd. Gögn til ísflæðireiknigna. Gráar hæðarlínur í jökclubotni, litakort af lónbotni, hæðarlínur yfirborðs haustið 2021 bláar, hæðir í m y.s.. Hraðasvið jökulársins 2020-2021 er sýnt með lituðum línunum og rauðum tölum í m á dag. Lega valinna þversniða er sýnd með lillabláum línunum. Svæði 0,1,2 vísa til flata þar sem rúmmál vegna hæðarbreytinga og rýrnun vegna afkomu er reiknuð.

Því sem næst hæðarlínu því allmennt er flæðistefna hornrétt á þær (þó flæðistefna sé einnig aðgengileg í úrvinnslu Enveo er álitid að ekki svaraði kostnaði að flækja reikingana, skekkja vegna nálgunarinnar sé hverfandi lítill).

Tekið er snið eftir hverri sniðlínu af skriðhraða, botn- og yfirborðshæð. Eftir þessum upplýsingum er reiknað flæði gegnum hvert snið (skriðhraði í enda línanna beggja megin er nærri núlli).

Oft er notuð sú nálgun að meðalhraði í snið frá botni til sé um 80% yfirborðshraða. Á þessu svæði er vitað að langstærsti hluti hreyfingarinnar er botnskrið, þ.e. láréttur breytileiki hraða er mjög lítill, nema helst á hægustu svæðunum þar sem aðhald er frá hliðum dalsins sem ísstraumurinn liggur í, en þar er hraðinn hvort eð er svo lítill að litlu skiptir. Þannig er líklegt að það að gera ráð fyrir að flutningshraðinn sé sá sami og yfirborðshraðinn skapi mjög litla villu í mati ísflæðisins. En til að gæta varúðar er reiknaður ísflutningur fyrir 1,0, 0,9 og 0,8 sinnum yfirborðshraðann, það breytir ísflutningu um 10 og 20%. Langlíklegast er að stuðull milli 0,95 og 1,0 sé nærri lagi en við höfum ekki gögn til að skera úr um þetta.

Heildarleysing á hverju svæði (sjá 14. mynd) er reiknað með því að margfalda flatarmál svæðisins með afkomu í miðjuhæð svæðisins skv. afkomumælingu jökulársins.

Mat á heildarýrnum hvers svæðis fékkst með mismunakorti yfirborðshæðar milli árunna 2019 og 2021, og líta svo á að um helmingur þeirra breytingar hefði orðið jökulárið 2020-2021.

Sporðurinn í lóninu gekk allur til baka um allt að 200 m víðast þó miklu minna. Rúmtak íssins sem hvarf, er reiknað með tegri yfir ísþykktina á svæðinu (með 1 m möskvastærð). Í töflunni hér að neðan eru niðurstöður reikninganna listaðar. Það reynist svo að mat eftir notkun allra sniðanna er svipað, þó lægsta gildið fáið fyrir efsta sniðið, en þar er líka von til stærstar óvissu vegna þess hve flöturinn milli þess og lónsins er orðinn stór, en hin tvö gefa nær sömu tölulegu niðurstöðu.

Í ljós kemur að leysing á hverju svæði er um 10 hluti ísflæðis og hæðarbreyting vegna aflögunar ~ þrítugasti hluti þess.

Rúmtak þess sem horfið hefur vegna styttingar og bætist við flæðið til lónsins er 0,03 km³, sem er innan við 10 partur ísflæðisins. Mjög hefur hægt á hopun jaðarsins eftir 2015, líklega vegna þrenginga og stefnubreytingar í botnlögun á svæðinu sem sporðurinn hörfar nú yfir (sjá. 11. mynd).

Ef við gerum ráð fyrir að flutnings og yfirborðsskriðhraði sé sá sami fæst að kelfing ársins 2020-2021 er 0,4 km³ íss eða 0,36 km³ að vatnsgildi.

Með sömu aðferðum fæst að 2014-2015 var kelfing 2014-2015 nær 0,48 km³ af ís eða 0,43 km³ að vatnsgildi. Þetta ár var hluti vegna hörfunar nærri 0,06 eða nær tvöfalt meiri en 2020-2021.

Vænta má að skekkja í mati kelfingarinnar sé ekki fjarri 10%.

Til eru gögn til að vinna samskonar mat fyrir jökulárið 2009-2010 en ekki vannst tími til að gera það nú.

2020-2021			snid3	snid2	snid1
Flötur þversniðs	km2		1.18	1.077	0.852
Lengd sniðs	m		4310	4209	4241
meðal ísþykkt sniðs	m		273	255	188
meðal yfirborðshæð sniðs	m		204.70	152.00	96.00
flux-1.0	km ³ /ári		0.45	0.45	0.42
flux-0.9	km ³ /ári		0.40	0.41	0.37
flux-0.80	km ³ /ári		0.36	0.36	0.33
			svæði 2	svæði 1	svæði 0
bn	m-vatns/ári		-9.60	-10.40	-11.20
A	km2		3.20	2.85	3.24
Bn	km ³ /ári		-0.034	-0.033	-0.040
þynning	km ³ /ári		-0.024	-0.026	-0.043
leysing umfram þynningu D	km ³ /ári		0.010	0.007	-0.003
% hlutfall þynning/leysing	km ³ /ári		70	79	107
Vegna styttingar sporðs km3:	km ³ /ári	0.03			
			flux-1.0	flux-0.9	flux-0.80
flux3+BnN210-D210+stytting	km ³ /ári	snid3:	0.38	0.34	0.29
flux2+Bn10+D10+stytting	km ³ /ári	snid2:	0.41	0.37	0.32
flux1+Bn0+D0+stytting	km ³ /ári	snid1:	0.40	0.36	0.32
kelfing íss	km ³ /ári	meðal	0.40	0.35	0.31
kelfing íss, vatnsgildi		meðal	0.36	0.32	0.28

Tafla I. Niðurstöður reikninga á kelfingu til Jökulsárlóns 2020-2021.

Tilvísanir:

Jan Wuite, Ludivine Libert, Thomas Nagler and Tómas Jóhannesson. 2022. Continuous monitoring of ice dynamics in Iceland with Sentinel-1 satellite radar images. *Jökull* No 72, 2022. .

<https://jokull.jorfi.is/articles/jokull2022.72/jokull2022.72.001.pdf>

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 Gascoin, 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 íssjármælinga 1991. Raunvísindastofnun Háskólans RH-92-12. 19 s. og 7 kort.