

Greinargerð til Vegagerðarinnar vegna styrks til verkefnisins:

Afkoma og hreyfing Breiðamerkurjökuls og afrennsli leysingavatns til Jökulsárlóns á Breiðamerkursandi 2022



Jarðvísindastofnunar Háskólans

Jöklahópur

febrúar 2023

RH-01-23

(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 2022.

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. Auk þess að hafa vísindalegt gildi, skipta allir þessir þættir máli í ákvörðunum um staðsetningu og hönnunarforsendur vegamannvirkja á Breiðamerkursandi.

Hér að aftan er gerð grein fyrir afkomumælingum, afrennslis leysingavatns af jökli til Jökulsárlóns og veðurathugunum sem unnið var að á árinu 2022. 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 Stemma og hugsanlegum flutningi brúar yfir Jökulsá, voru gerðar íssjarmælingar 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) og spá um enn frekari hörfun, varð til þess að hætt var við nýja brú yfir Stemma. 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 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



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

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 ísskrið, 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 7 mælistöðvum, en fleiri mælistaðir á Vatnajökli nýtast til að skorða afkomu hans (1. mynd). Unnið er að mælingum á þrem efstu mælistöðvunum í sérstökum leiðöngurum til afkomumælinga á öllum Vatnajökli í maí og október, en stuðningur Vegagerðar nýttur til mælinga á stöðvum Br1, Br2, Br3.

Sjálfvirk veðurstöð hefur nær öll 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.

Staðsetning mælistika eða mælivíra á afkomumælistöðum er mæld með landmælinga GNSS 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 yfirborðshæðarlíkana 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).

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 o.fl. 2020).

Afkomu og veðurgögnin frá Breiðamerkurjökli hafa með öðrum slíkum frá Vatnajökli nýst til líkangerðar af orkubúskap við yfirborð, gerð afkomulíkana og spáreikninga um þróun Vatnajökuls næstu áratugi og aldir. Slíkt verk var unnið af doktorsnema Jöklahópsins, sjá 3 ritrýndar greinar um þetta Louise Steffensen Schmidt o.fl. 2017, 2018 og 2020. Á árinu 2022 birtist grein um framtíð íslensku jöklanna og áhrif kólnunar hafsins suðvestur af Grænland á hana (Brice Noel ofl. 2022).

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. Innan þessa verkefnis er kærkomið tækifæri til að vinna betur að túlkun mælinga sem aflað hefur verið um Breiðamerkurjökul og nágrenni hans með stuðningu Vegagerðarinnar á löngum tíma.

Leiðangrar vegna mælinga:

30-31. mars 2022: 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. Skipt um GNSS tæki í tækjamastru til mælinga á hreyfingu á mælistað Br3.

3. maí vetrarafkoma á safnsvæði mæld.

8. ágúst. Viðhald veðurstöðvar í Br1, snjóhæðarmælir fallinn, hann endurreistur.

17-19. október. Sumarafkoma á safnsvæði mæld.

Í mars 2022 verður lesið af afkomumælivírum á leysingasvæði, nýjum komið fyrir, hugað að veðurstöð í Br1 og GNSS stöð í Br3.

Kostnaður á árinu 2022:

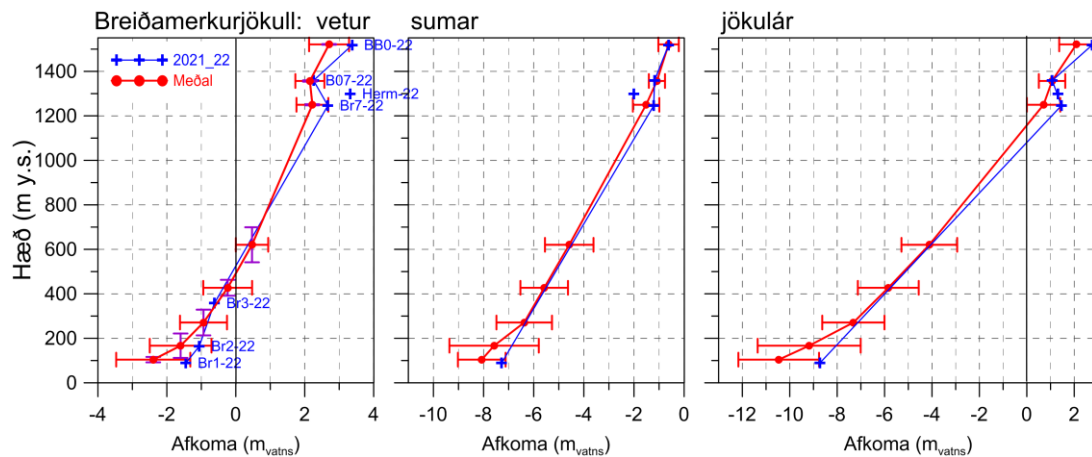
Styrkur til þessa verkefnis af tilraunafé Vegagerðar árið 2022 var 2.500 þkr.

Rekstrarkostnaður mælistöðva (viðgerð veðurstöðva, verkstæðisvinna, varahlutir, rafgeymar o.fl.) var 160 þkr., kostnaður vegna mælileiðangra (4 ferðir, greiðslur fyrir notkun bíla og vélsleða auk launa starfsmanna) reyndist 950 þkr., laun starfsmanns við úrvinnslu og túlkun gagna (1,6 mannmán) 1.520 þkr. og umsjónargjald til yfirstjórnar Raunvísindastofnunar 2,5% eða 62,5 þkr. Samtals eru þetta 2.695 þkr.

27. febrúar 2023. f.h. Jöklahóps Jarðvísindastofnunar Háskólans;

Finnur Pálsson verkefnastjóri í Jöklafrannsóknnum

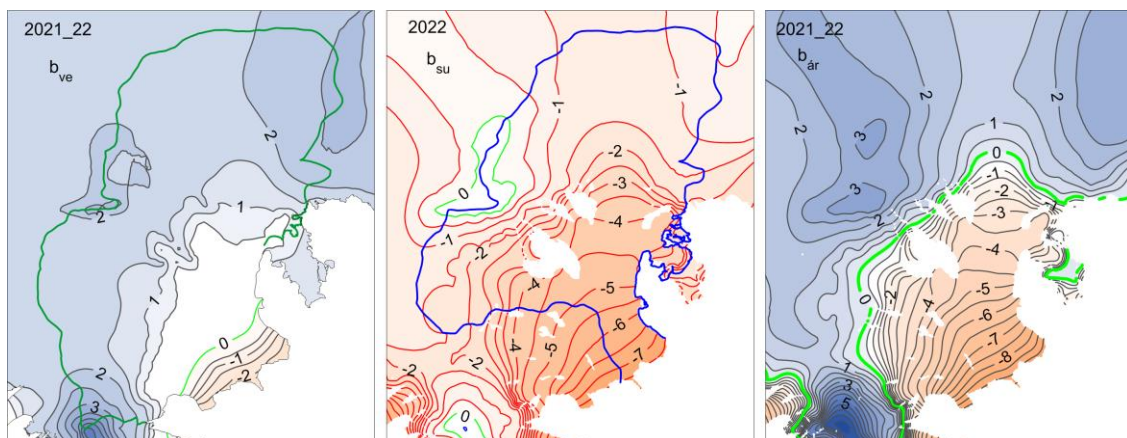
Niðurstöður afkomumælinga 2021-22.



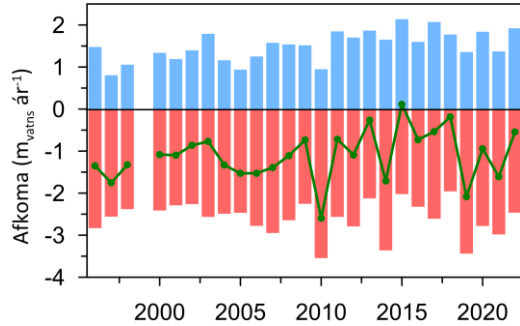
2. mynd. Breytileiki afkomu með hæð á Breiðamerkurjökli jökulárið 2021-22 og meðaltal allra ára sem afkoma hefur verið mæld (flestar ár frá 1995-96, afkoma í m³vatns og hæð mælistaða í m yfir sjó). Þverstrikin sýna staðalfrávik mæliraðar í mælistöðvunum.

Farnar voru fjórar ferðir til afkomumælinga og viðhalds veðurstöðva jökulárið 2021-22, flestar voru tengdar öðrum verkum til að lágmarka kostnað. Aðalmæliferðin var farin 30-31. mars 2022 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“ rörum fyrir snjóhæðarmæli veðurstöðvar við Br1. Vetrarmælingar á efri hlutanum (safnsvæði) voru gerðar í byrjun maí og veðurstöð við Br7 var sett upp 1. maí. Farið var til viðhalds veðurstöðvarinnar í Br1 8. ágúst og þá lagaður snjóhæðarmælir í sem var fallin fyrir skömmu, en hægt að meta heildarleysingu frá uppsetningu mælisins út frá lengd ¾“ röranna. Haustmæling 1. október í Br1 fékkst með aflestri af snjóhæðarmæli þar, en haustmæling á safnsvæði var gerð í fyrstu viku október. 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. Enn hefur ekki tekist að fara þess ferð (sem verður líka aðalferð 2023). Sumarafkoma þessara mælistöðva 2022 metin út frá mælingum í Br1, sumarleysing er svo sterkt fall af hæð að ekki skeikar miklu. Ef einhverju munar verður það leiðrétt að loknum leiðangri.

Á 2. mynd sést að vetrarsnjósöfnun var talsvert yfir meðallagi á safnsvæðinu, en neðantil á leysingasvæði var vetrarýrnun undir meðallagi, og á hæðarbilinu 300-400 m var snjór nærri meðallagi. Sumarið var risjótt, en leysing þó nærri meðallagi ofantil en verulega minni en að jafnaði á sporðinum. Flatartegur yfir ísavið jökulsins skilar heildarafkomutölum (3. og 4. mynd).



3. mynd. Dreifing vetrar- (vinstri) sumar- (miðja) og ársafkomu (hægri) á Breiðamerkurjökli 2021-22 (afkoma í m³vatns). Ísavið 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, en síðustu ár er kelfing metin svára til ~ 0,6 m viðbótar rýrnunar.

Ársafkoma 2021-22 var nærri meðallagi efst á safnsvæðinu en heildarýrnun verulega minni en í meðalári.

Vetrarafkoma reyndist 1,92 m_{vatns} eða um 29% umfram meðaltal mælitímans, og er sú þriðja mesta á mælitímanum. Rýrnun sumarsins reyndist -2,47 m_{vatns} eða um 95% af meðalrýrnun mælitímans. Jökulárið 2021_22 var ársafkoman -0,55 m_{vatns} , eða rýrnun um 50% 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 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 línuritín sýna sterkt samband og gefa vísbandingu um að til þess að afkoma Breiðamerkurjökuls sé í jafnvægi miðað við núverandi lögun ætti umsetningu 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 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 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 stigull b_n - AAR og b_n - 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 2021_22 eru sem hér segir: Flatarmál = 878 km^2 (samkvæmt yfirborði og jaðri 2021)

$B_{ve} = 1,69 km^3$; $b_{ve} = 1,92 m$ (meðatal 1995_96-2019_20 er: $b_{ve} = 1,49 m$)

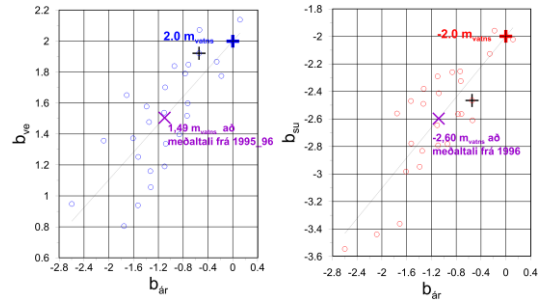
$B_{su} = -2,17 km^3$; $b_{su} = -2,46 m$ (meðatal 1996-2021 er: $b_{su} = -2,60 m$)

$B_{ár} = -0,48 km^3$; $b_{ár} = -0,54 m$ (meðatal 1995_96-2019_20 er: $b_{ár} = -1,11 m$)

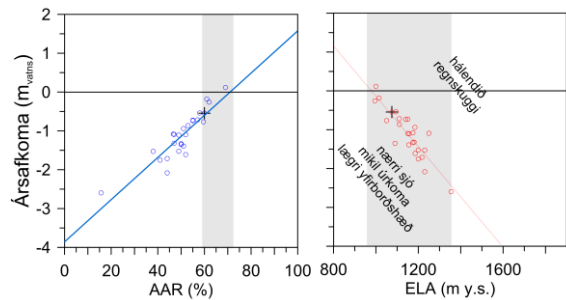
ELA (hæð jafnvægislínu) = ~1075 m (á mælisniði);

AAR (hlutfall safnsvæðis af heildarflatarmáli) = 60%

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

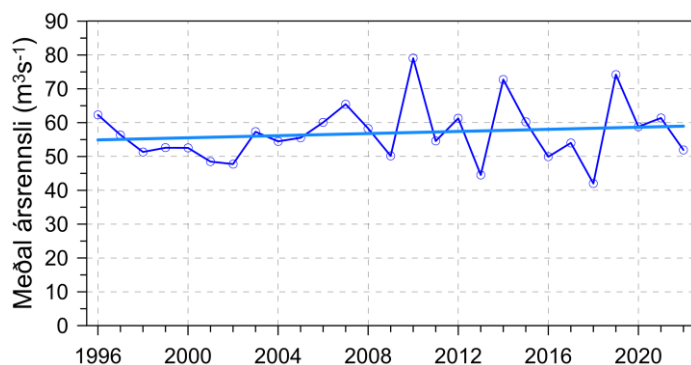


5. mynd. Ársafkoma ($b_{ár}$) Breiðamerkurjökuls teiknuð á móti vetrarafkomu (b_{ve} , vinstri) og sumarafkomu (b_{su} , hægri). Mæligildi jökulársins 2021_22 eru merkt með svörtum +.



6. mynd. Ársafkoma Breiðamerkurjökuls teiknuð á móti mældri hæð jafnvægislínu (ELA) á mælisniði og hlutfalli safnsvæðis af heildarflatarmáli (AAR). Svartur + er gildi jökulársins 2021_22. Gráa svæðið sýnir spannið sem mælingar sýna að $b_n(ELA)$ og $b_n(AAR)$ annarra skriðjökla Vatnajökuls skeri $b_n=0$

Afrennsli til Jökulsárlóns



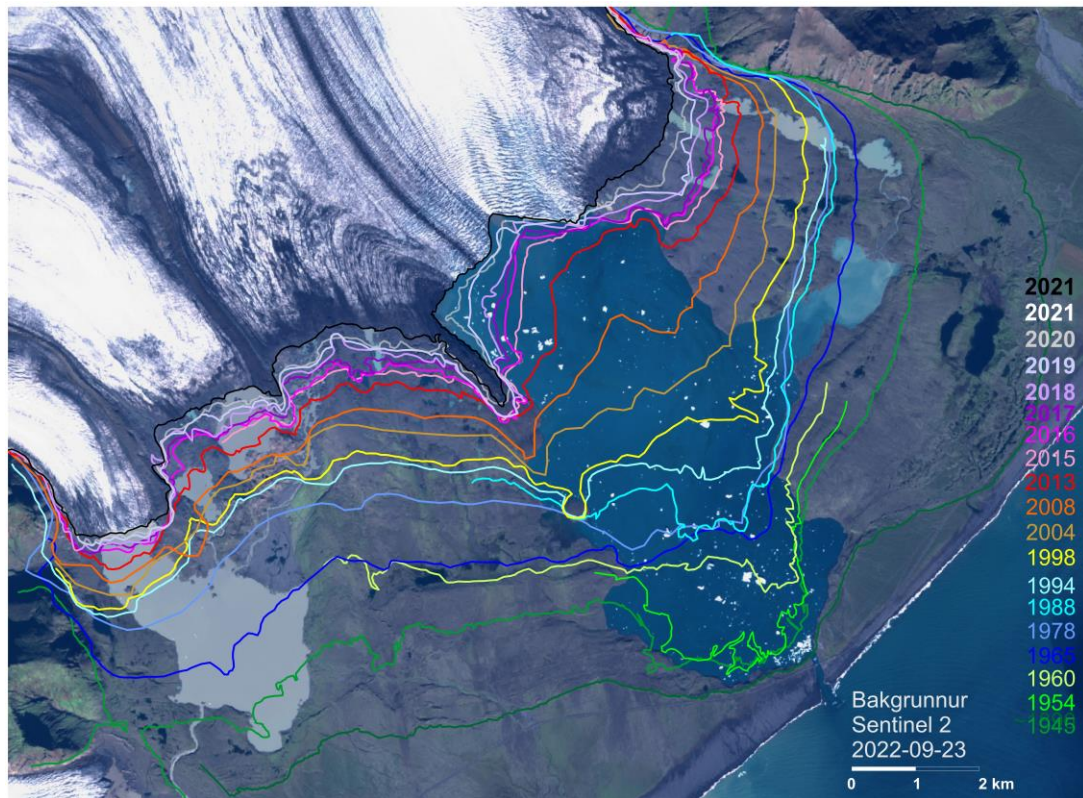
7. mynd. Meðalársafrennsli yfirborðsleysingarvatns (metið útfrá sumaraflkomu) til Jökulsárlóns sumurin 1996 til 2022 (á jökulári þ.e. október til september).

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 2021_22 er rétt undir meðaltali mælitímans, metin rétt tæplega $52 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en meðalafrennsli til lónsins 1996 til 2021 er ríflega $60 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. 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 nálga dreifingu leysingar með tíma grófllega 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 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 $0,5 \text{ km}^3$ 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 sumartímam. 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 meðalrensli $(0,2 \text{ m} \cdot 740.000.000 \text{ m}^2 / (3600 \cdot 24 \text{ s})) = 1720 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (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 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 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 ofsaleysingu 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 reiknilíkönum sem nýta gagnasafnið sem til er.

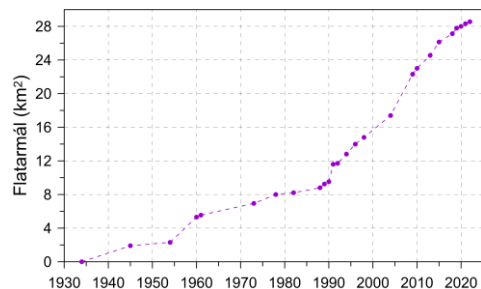
Breiðamerkurjökull rýrnar og hörfar



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 23. september 2022 en jaðarinn 2022 er rakinn eftir henni.

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 23. september 2022. 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. Á 8. 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 nú ~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. 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.

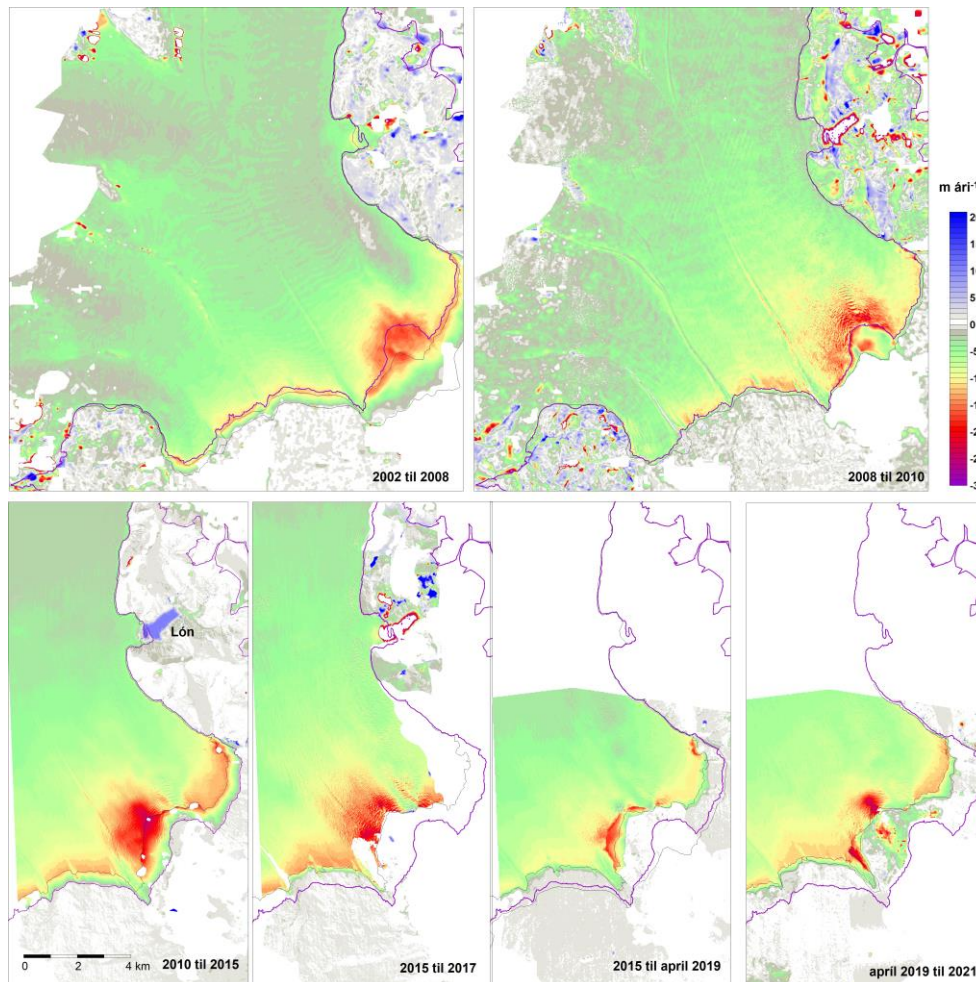
Í grein jöklahóps árið 2001 (Helgi Björnsson og fleiri)



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

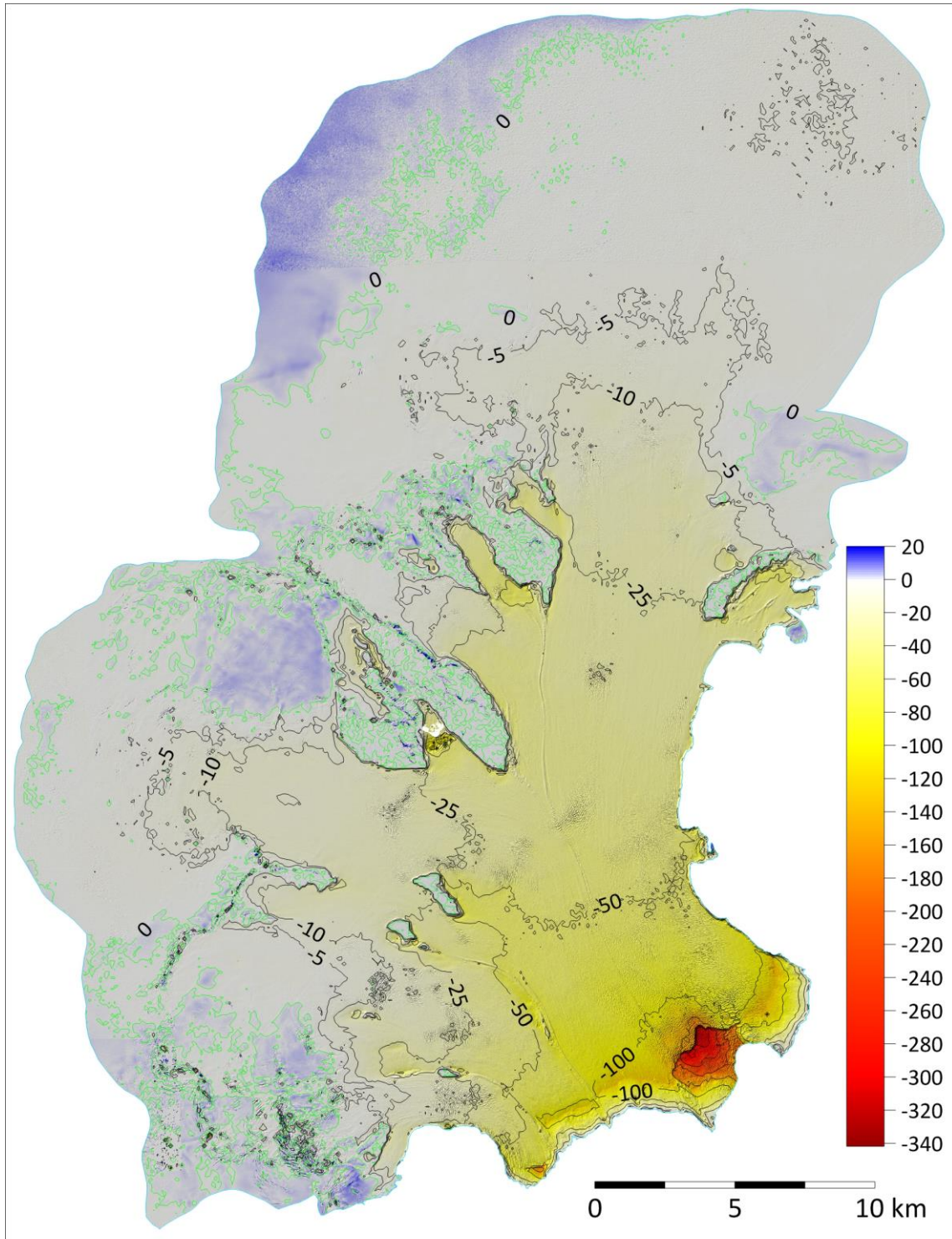
var gerð grein fyrir hvernig Jökulsárlón dregur í sig orku sem er í hlutfalli við stærð lónsins, einkum sólgeislun og þó í enn meiri mæli frá orkuríkmum (7-11°C heitum) sjó sem streymir inn og út úr lóninu á sjávarföllum (mælingar gerðar að frumkvæði Jóns Ólafssonar haffræðings, með stuðningi Vegagerðar, 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 meiri en þarf til að bræða það magn íss sem brotnar af jöklinum (kelfir) út í lónið. Skriðhraði á blásporðinum hefur mælst um ~600 m á ári; kelfandi tungan er um 3 km breið og miðað við núverandi þekkingu á botnlögum er flatarmál þversniðs kelfandi hlutans um ~0,5 km², rúmtak ískelfingar er þá grófllega 0,5*0,6 = 0,3 km³. En auk þess hefur kelfandi hluti sporðsins líka tapað um 4 km² og meðalþykkt þess ~400 m frá 2013. Þetta er tapaða ísrúmmál er um ~1,6 km³ eða 0,18 km³ á ári. Samtals verður þá árlegt rúmtak kelfingar ~0,5 km³. Þetta er stærðargráðu-reikningur en skilar svipaðri niðurstöðu og áður hefur verið metið.

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 hæðarlíkans af Breiðamerkurjökli fyrir árið 2022. 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 Guðmundsson og Helga Björnssonar í 65. árgangi tímaritsins Jökuls (2016).



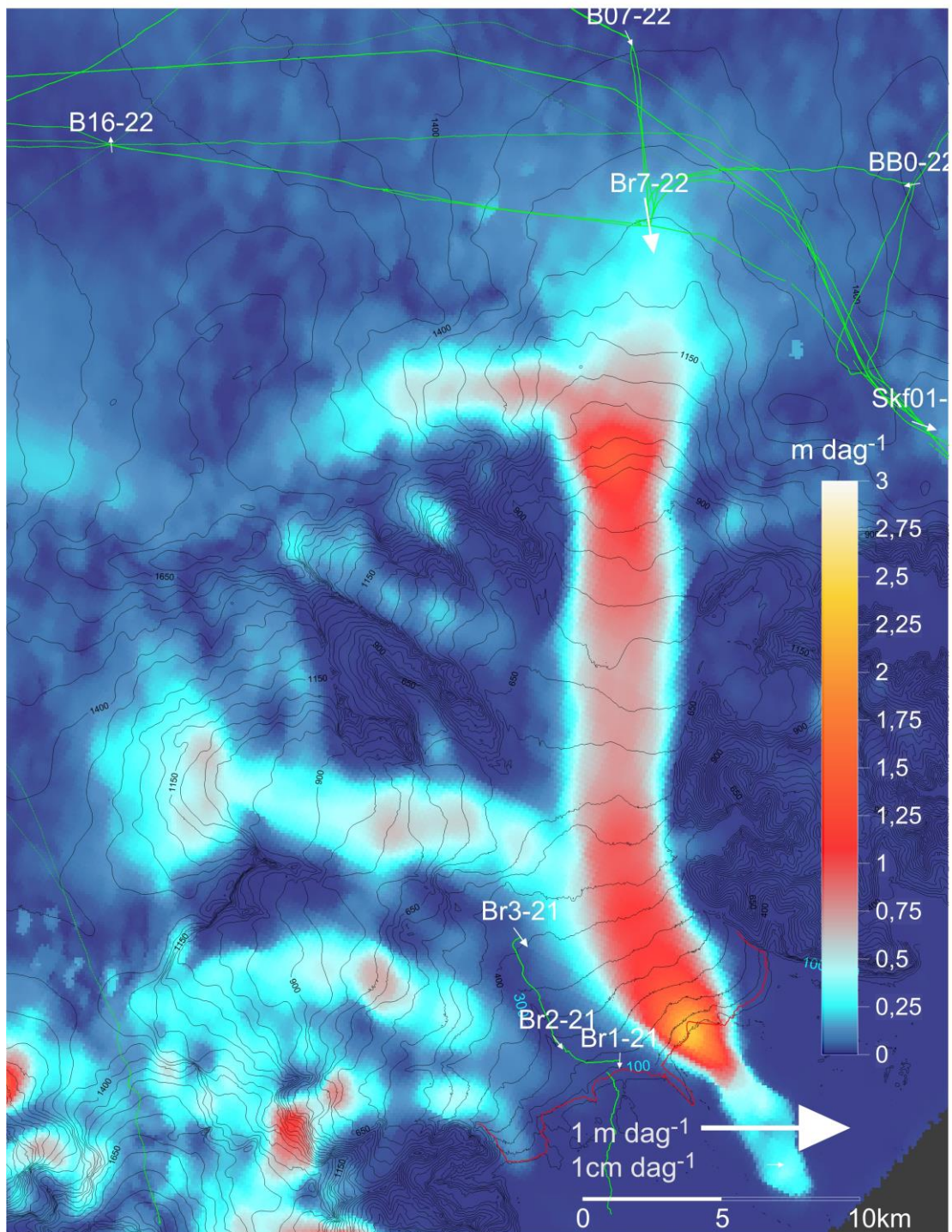
10. mynd. Rýrnunarhraði Breiðamerkurjökuls (árleg þynning í m á ári) á sex tímabilum. Mismunakortin eru unnin eftir stafrænum hæðarlíkunum 2002, 2008 og 2021 (gerð eftir SPOT gervitunglamyndum frá SPOT Image og Legos í Toulouse Frakklandi, 2010 (gert eftir Lidar mælingu úr flugvél, sjá Tómas Jóhannesson o.fl. 2013), 2015, 2017 og 2019 eru unnin úr bandaríska Arctic DEM safninu .

Á 11. mynd er sýnd heildarhæðarbreyting Breiðamerkurjökuls frá ágúst 2010 til hausts 2021. Rúmtak jökulsins hefur minnkað um $13,35 \text{ km}^3$ sem jafgildir að meðalafkoma tímabilsins sé um $-1,64 \text{ m}$ að vatnsgildi (miðað við að eðlismassi þess sem tapaðist hafi að jafnaði verið 850 kg m^{-3}). Mæld yfirborðsafkoma er á tímabilinu $-0,88 \text{ m}$ sem bendir til að um $0,76 \text{ m}$ hafi tapast árlega af öðrum ástæðum, langstærri hluti þess vegna kelfingar í Jökulsárlón, og í er samræmi við matið hé að ofan.



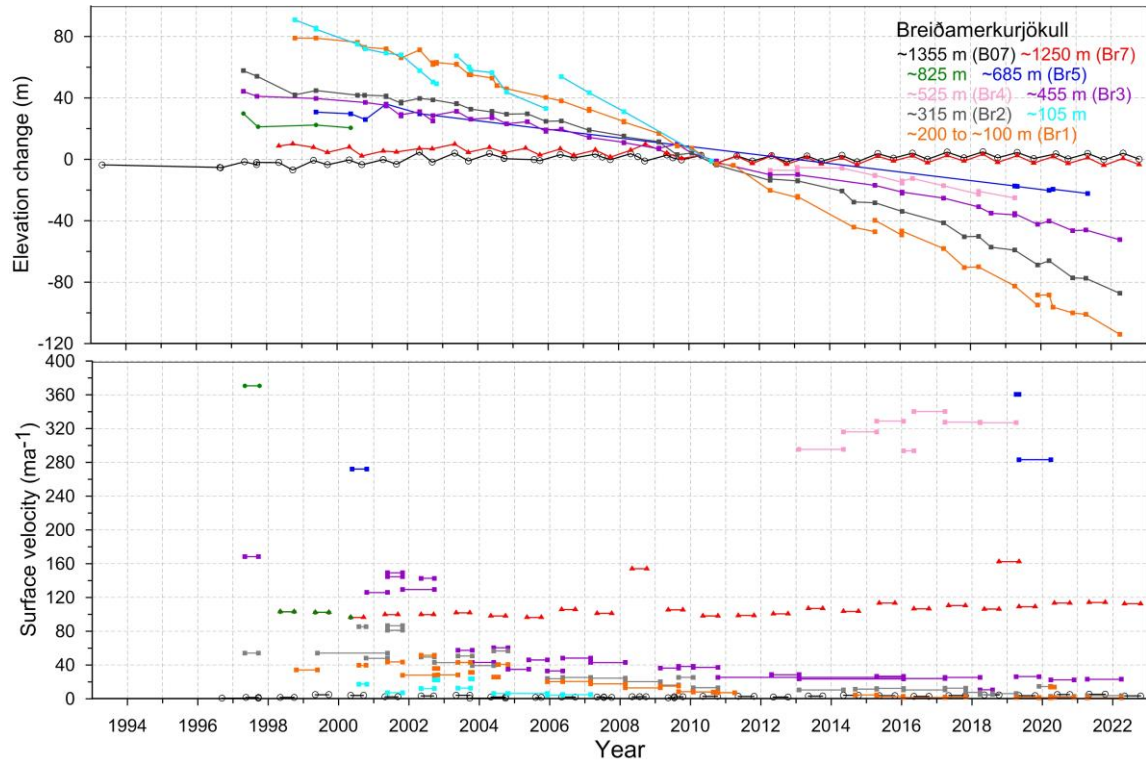
11. mynd. Rýrnun Breiðamerkurjökuls 2010 til 2021. Hæðarlíkan 2010 gert eftir Lidar mælingu úr flugvél, sjá Tómas Jóhannesson o.fl. 2013) en 2021 eftir SPOT6 gervitunglamyndum frá SPOT Image og Legos í Toulouse Frakklandi.

Skriðhraðamælingar



12. mynd. Yfirborðsskriðhraði Breiðamerkurjökuls. Í bakgrunni er meðaltal hraðasviða árin 2016-2020 sem unnin eru af starfsmönnum ENVEO í Austurríki eftir radarmælingum Sentinel gervitungla. Mældur meðalhraði yfirborðs á afkomumælistöðum er sýndur með hvítum pílum. Grænar punktalínur sýna legu hæðarsniða sem mæld voru með landmælinga GPS tækjum á farartækjum (safn lína frá mars, maí, júní og október 2022).

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 12. mynd. Bakgrunnur 12. myndar er meðalyfirborðshraðasvið árána 2016-2020 sem unnið var af starfsmönnum ENVEO í Austurríki eftir radarmælingum Sentinel gervitungla. Hraðasviðið er unnið í tengslum við



13. 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 GPS tækjum vor og haust.

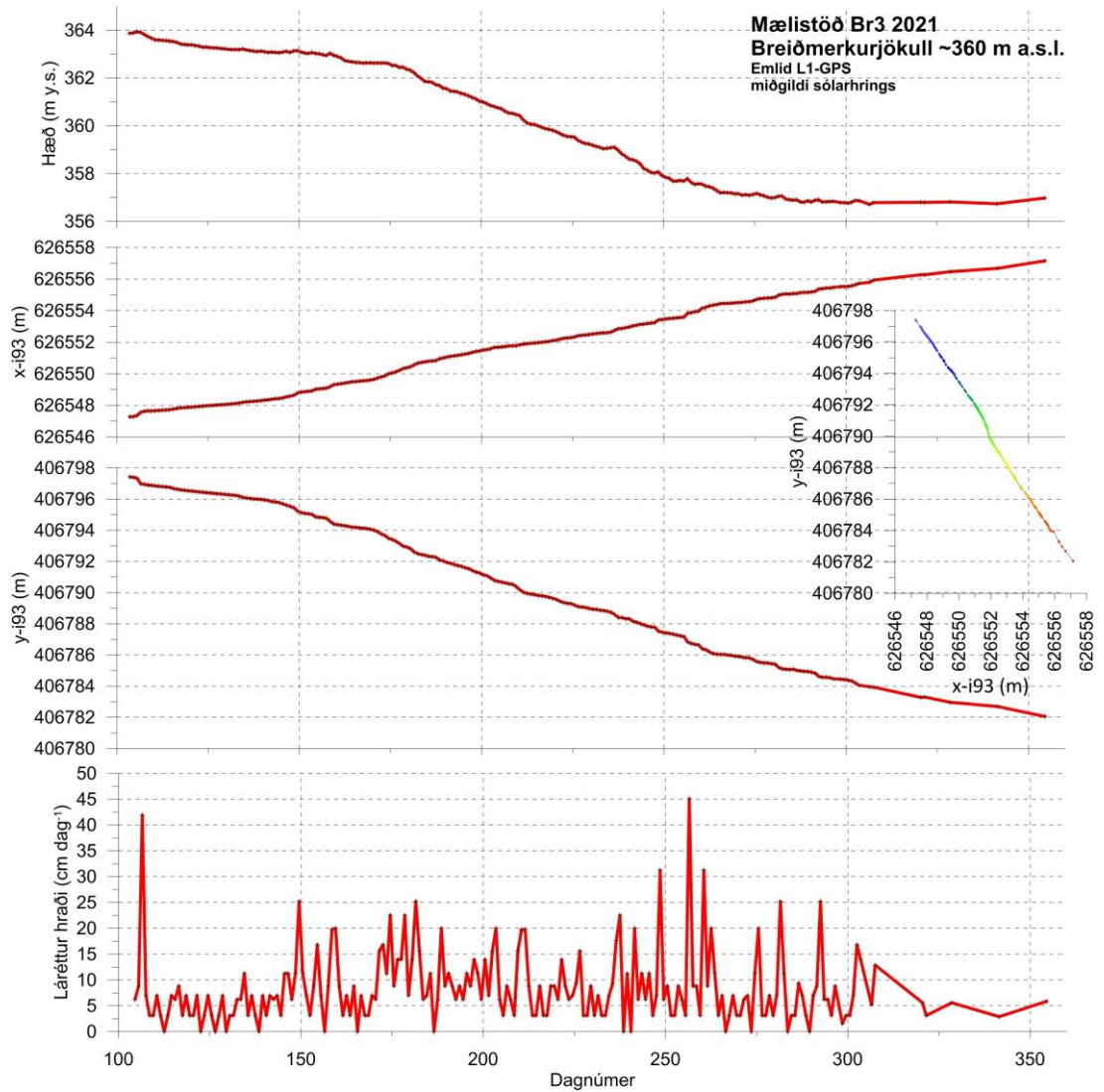
verkefnið CISIM sem stutt er af RANNÍS, en í forsvari eru Tómas Jóhannesson á Veðurstofu Íslands og Eyjólfur Magnússon á við Jarðvísindastofnun. Eitt verkefna innan CISIM (rannsókn Doktorsnema við Jarðvísindadeild) er að kanna með ísflæðilíkani samspil vatns við botn (vatnsþrýstings) og hreyfingar jökulíss,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

Á 13. mynd er sýnd tímaröð skriðhraða og hæðarbreytinga á afkomumælistöðvum á Breiðamerkurjökli. Þar sést meðal annars að sporðurinn milli Jökulsárlóns og Breiðárlóns er nærri kyrrstæður (Br1) 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 á 12. mynd sýnir að hreyfing tungunnar ofan jökulsárlóns er nærri 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 12. 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.

Í tengslum við CISIM verkefnið sem nefnt var hér að ofan var sett upp síritandi GNSS stöð á mælistað Br3 vorið 2021, til að mæla breytileika í skriðhraða jökulsins. Skipt var um tæki í mars 2022, og gögn ársins 2021 lesin af tækinu og þau síðan leiðrétt Kinematskt með viðmiðunargögnum frá GNSS stöð sem rekin er á Grímsfjalli. Þetta gefur punktmælingar staðsetningu miðju loftnetsins á hverri sekúndu með um dm nákvæmni. Á 14. mynd eru sýndar niðurstöður þessara mælinga þar sem miðgildi þrívíðrar staðsetningar sólarhrings. Á hæðargrafinu sést skýrt að veruleg leysing hefst þarna á degi ~180 (í lok júní, júní 2021 var kaldur), en lýkur að mestu á degi ~265 (í síðustu viku september).

Megin hreyfistefna þarna er til SSA og það sést vel hvernig skriðhraði vex í kjölfar fyrstu leysinga uppúr degi 150 (síðasta vika maí) helst að jafnaði hár yfir leysingartímann en lækkar í lok hans. Verulegur breytileiki er þó milli sólahringa, minnsti hraði nærri núlli en sá mesti ~45 cm á sólahring, en meðalárshraði þarna er nærri 6 cm 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.

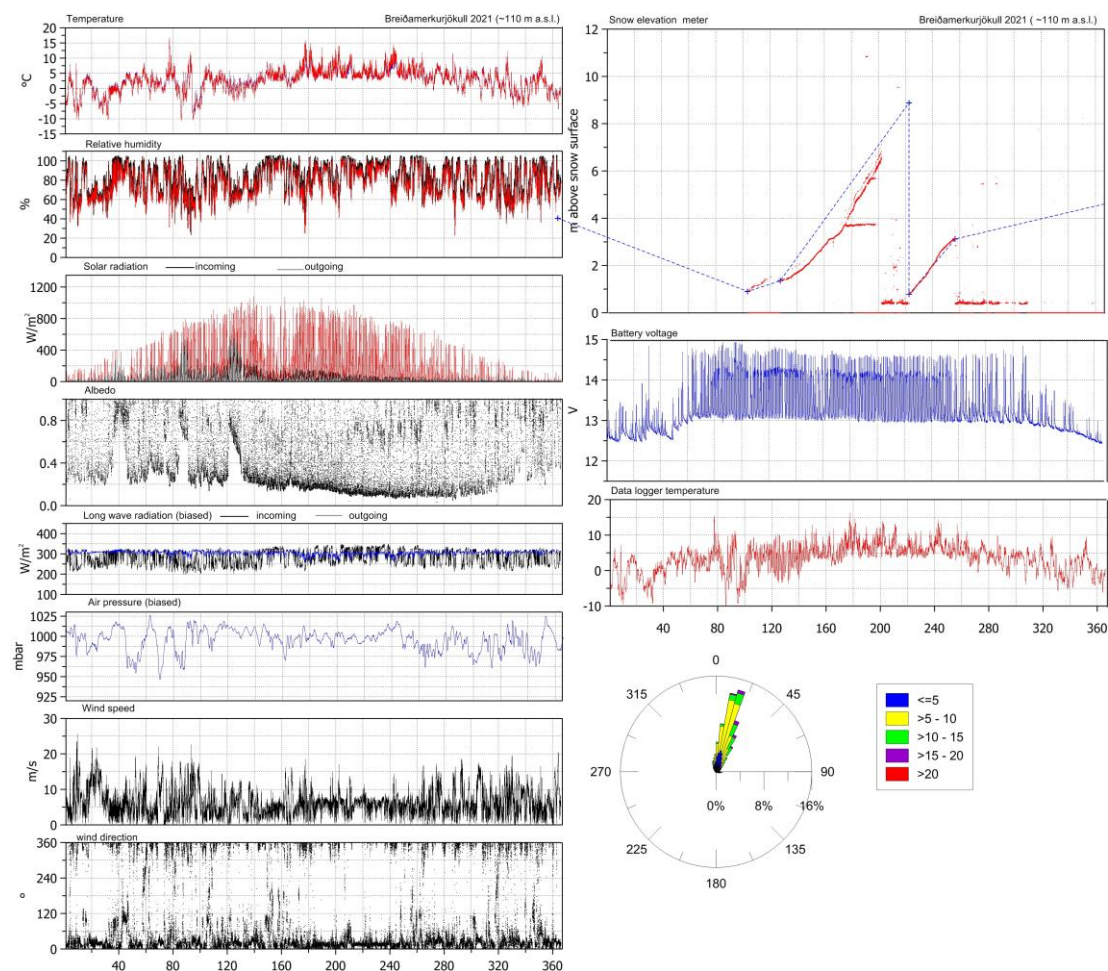


14. mynd. Hreyfing mæld með GNSS tæli á mælistöð Br3. Efst er hæðarferill, þá hreyfing V-A, þá hreyfing S-N, og láréttur ferill (tími er sýndur með lit) felld ofaná. Neðst er meðalhraði hvers sólarhrings reiknaður út frá láréttri færslu.

Veðurathuganir

Til að auka skilning á samhengi veðurs og jöklabreytinga hefur verið aflað veðurgagna á jökli með sjálfvirkum veðurstöðvum. Á Breiðamerkurjökli var árið 2022 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 bilun í skráningatæki þar, en búnaðurinn hafði unnið snuðrulaust í um mánuð, í prófun, áður en farið var með hann á jökul. Yfirlit mældra veðurbátta veðurstöðvar í Br1 er sýnt á 14. mynd.

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 lofthjúpslíkönnum (lofthjúpslíkön sem byggja á mældum veðurbátum). 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.



14. mynd. Mældir veðurbátir á veðurstöð í um 100 m hæð á sporði Breiðamerkurjökuls.

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.