

Íslenskir jöklar

Andri Gunnarsson
Hrafnhildur Hannesdóttir
Finnur Pálsson
Tómas Jóhannesson
Eyjólfur Magnússon
Þorsteinn Þorsteinsson
Bergur Einarsson
Guðfinna Aðalgeirsdóttir
Joaquín M.-C. Belart
Oddur Sigurðsson
Snævarr Guðmundsson
Helgi Björnsson

Ketill við Bárðarbungu, 2023
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson

Jöklar Íslands eru mótandi afl í loftslagi, landslagi, vatnafari, eldvirkni og menningu landsins. Þeir breytast hratt í hlýnandi loftslagi og hafa víðtæk áhrif á vatnafar, orkukerfi, vistkerfi og ferðaþjónustu. Í þessari grein er dregin saman þekking á myndun jökla, hreyfingu og afkomu, og lýst samspili þeirra við eldgos, jarðhita og jökulhlaup. Raktar eru helstu rannsóknaraðferðir, frá vettvangsmælingum til fjarkönnunar, og hvernig þær varpa ljósi á þróun jökla frá lokum litlu ísaldar til samtímans. Einnig er fjallað um þau áhrif sem rýrnun jöklanna hefur á landslag, innviði og samfélag, sem og hina menningarlegu þýðingu þeirra en alls eru nafnkunnir jöklar um 400 talsins. Loks er horft til framtíðar og hugað að niðurstöðum líkanreikninga sem undirstrika mikilvægi aðlögunar og ábyrgrar nýtingar vatnsauðlinda í síbreytilegu umhverfi.

JÖKLAR Á ÍSLANDI

Jöklar eru mikilvægir við mótun loftslags á jörðinni og þar er ferskvatnsforði sem milljarðar manna reiða sig á. Vegna loftslagsbreytinga rýrna jöklar hratt um allan heim og er Ísland þar engin undantekning. Sameinuðu þjóðirnar hafa skilgreint árið 2025 sem alþjóðaár jökla¹ til þess að auka vitund um mikilvægi jökla, snjós og íss í vatnafræðilegu og veðurfarslegu samhengi, og ekki síður í efnahagslegu, samfélagslegu og umhverfislegu tilliti. Í greininni er lýst stöðu þekkingar á jöklum landsins og vísað í greinar og bókarkafla fyrir áhugasama lesendur.

Ísland liggur í Norður-Atlantshafi, rétt sunnan heimskautsbaugs, umlukið hafstraumum sem móta loftslagið. Norðan við landið hefur kaldur Austur-Grænlandsstraumurinn áhrif og flytur með sér hafís og svalt loft frá Norður-Íshafi. Þetta hefur áhrif á ríkjandi brautir lægða um Atlantshafið úr suðri og vestri, sem flytja hlýtt og rakt loft til landsins. Milt úthafsloftslag veldur því að vetur eru mildir miðað við legu landsins á hnettinum en sumur tiltölulega svöl. Árstíðasveiflur hita eru fremur litlar. Á Íslandi er úrkoma mikil, sem ásamt lágu hitastigi og hálendi valda því að jöklar geta myndast. Hinir stærstu þeirra eru á suðurhluta landsins, þar sem ríkjandi úrkomuáttir koma að. Til fjalla safnast úrkoman sem snjór að vetri til en á hábungum stærstu jökla landsins fellur úrkoma undir eða nærri frostmarki allt árið.

Jöklar ísaldar hafa mótað landið og hafsbotninn í kringum það með rofi og setmyndun.^{2,3} Þeir rjúfa undirlagið og mynda U-laga dali, skálarlaga hvílfir, hvassa tinda og þrönga firði. Jöklar og jökulvötn móta

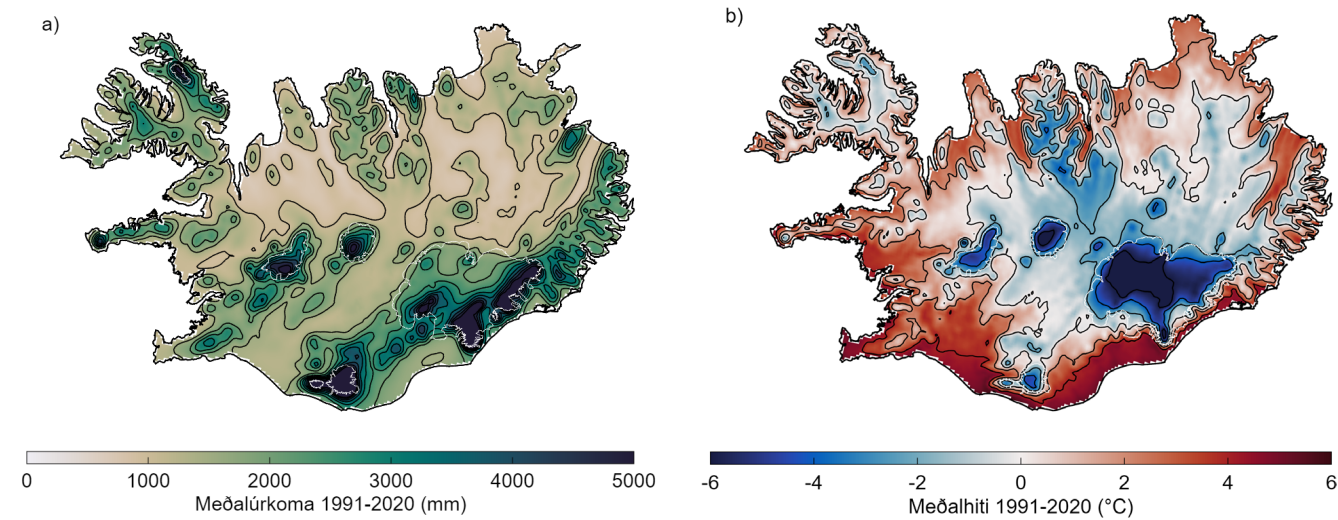
undirlagið með margvíslegum hætti. Sjálfur ísinn er of mjúkur til þess að sverfa harðan berggrunn en til þess nýtir jökullinn set sem hann ber með sér við botninn. Við þetta verður til laust efni sem kallast jökulruðningur. Það berst fram með jöklinum, ýmist undir jökulísnum, í honum eða ofan á, og hleðst að lokum upp í jökulgarða til hliðar eða framan við sporðinn.⁴⁻⁶

Frjósömustu landbúnaðarsvæði landsins eru á Suður- og Vesturlandi. Þau eru grundvölluð á jökulruðningi og jökulárseti frá síðjökultíma og fyrri hluta nútíma. Rof af völdum jökuláa og framburður þeirra er mjög áberandi á Íslandi, þar sem jökulfljót vaxa á sumrin og flytja mikið af seti til láglendis og sjávar. Setið fellur út þegar árnar breiða úr sér og myndar víðáttumikla sanda og óseyrar, sem geta haft veruleg áhrif á strandlínu, lífríki og næringarefni fyrir vistkerfi á landi og í sjó. Við hörfun jökla hafa víða myndast jökullón, sem hafa áhrif á setflutning jökulánna.

Jöklar hylja tæplega tíund lands á Íslandi. Þar eru mörg af virkustu eldfjöllum og jarðhitasvæðum landsins, og þar verða til jökullón. Eitt þekktasta dæmi um þetta eru Grímsvötn í miðjum Vatnajökli, þar sem öflugt jarðhitasvæði bræðir ís og safnar vatni í stórt lón undir jöklinum. Þegar þrýstingurinn í lóninu verður nægur brýst vatnið fram í gríðaröflugum jökulhlaupum, sem eru meðal stærstu flóða í heiminum.

Afrennsli frá jöklum gegnir lykilhlutverki í raforkuframleiðslu og miðlun vatns í uppistöðulónum á Íslandi. Raforkukerfi landsins byggist að miklu leyti á vatnsafl og skilar það um þremur fjórðu árlegrar raforkuframleiðslu.⁷ Langtímaspár gera ráð fyrir

1. mynd. Meðaltal hita og úrkomu á Ísland samkvæmt Copernicus Arctic Regional Reanalysis-endurgreiningu (CARRA) fyrir tímabilið 1991–2020. Útlínur jökla eru sýndar með hvítum lit. – Mean temperature and precipitation for Iceland from the Copernicus Arctic Regional Reanalysis (CARRA) for the period 1991–2020. Glacier outlines are shown in white.



a) Meðalársúrkoma á Íslandi á tímabilinu. Kortið sýnir vel að mesta úrkomu á Íslandi er að finna á jökllum meðfram suðurströnd landsins og á meginjökllum á hálendinu. – Average annual precipitation in Iceland for the period. The map clearly highlights that the greatest precipitation in Iceland is found on the glaciers along the south coast and on the major glaciers in the highlands.

b) Meðalárshiti á Íslandi á tímabilinu. Kortið sýnir með skýrum hætti samband mikillar úrkomu og meðallofthita undir frostmarki þar sem jökla er að finna. – Average annual temperature in Iceland for the period. The map clearly shows the relationship between high precipitation and mean air temperatures below freezing in the areas where glaciers are found.

auknu rennsli til vatnsaflsvirkjana sökum aukinnar bráðnunar jökla í hlýnandi loftslagi. Breytingar á rennslismynstri, svo sem árstíðabundnar breytingar á magni og tímasetningu jökulleysingar, skipta miklu máli við stjórnun vatnsauðlinda og kalla á aðlögun að loftslagsbreytingum.⁸ Þessar breytingar geta einnig haft áhrif á lífríki, framvindu gróðurs og vatnsgæði.

Ný jökullón hafa víða myndast við jökuljaðra, önnur hafa horfið og árfarvegir hafa víða fundið sér nýja leið. Með hækkandi hita, hopi jökulsporða og bráðnandi sífrera verða skriður tíðari og grjóthrun meira í bröttum fjallshlíðum sem áður nutu aðhalds frá skriðjökllum.

Jöklaferðamennska stendur einnig frammi fyrir vaxandi áskorunum vegna hraðrar hörfunar og rýrnunar jökla, og meðfylgjandi breytinga í landslagi.⁹ Ferðapjónustuaðilar þurfa að takast á við aukna óvissu, breyttar öryggiskröfur og stöðuga endurskoðun á leiðarvali og innviðum til þess að tryggja góða og örugga upplifun gestanna.¹⁰

Sambúð Íslendinga og jökla hefur verið bæði gjöful og krefjandi. Jökulár hafa torveldað samgöngur en jafnframt mótað landslag og gefið fólki færi á að upplifa óviðjafnanlega náttúrufergurð. Vatnajökull, stærsti jökull landsins, er nú hluti af stærsta þjóðgarði Evrópu, þar sem sérstaða hans og fegurð eru varðveitt sem sameiginlegur arfur mannkyns.¹¹

Í íslenskum skáldskap birtast jöklar ýmist sem ógn eða yfirþyrmandi fegurð, og endurspeglar þetta vel ímynd þeirra í lífi þjóðarinnar. Þessi nána tenging er ofín inn í þjóðarsálinu, þar sem jöklar eru tákn náttúruafla sem bæði næra og ógna.^{12,13} Heiti íslenskra jökla endurspeglar oft sérstöðu þeirra í landslagi og menningu. Þau hafa verið tekin saman og skráð

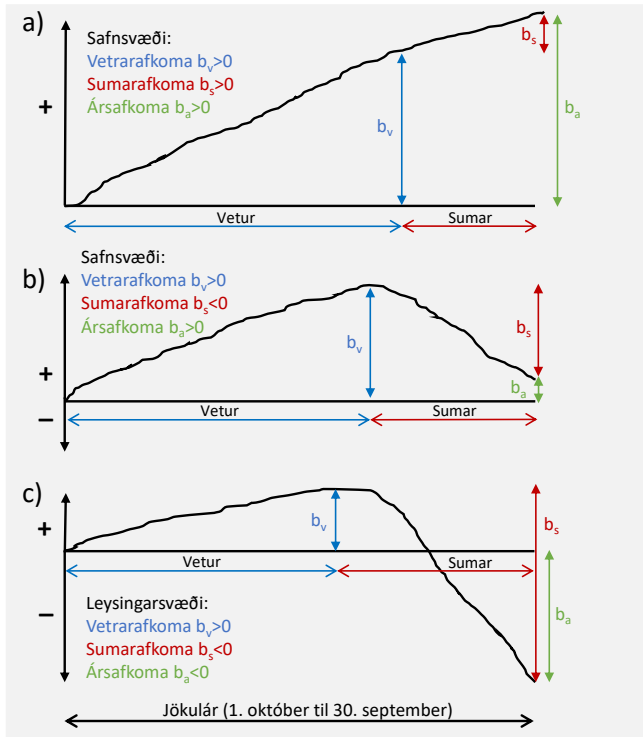
í yfirlit sem varðveitir bæði náttúrufræðilega og menningarlega arfleifð þeirra.^{14,15} Framtíðarbreytingar á jökllum hafa áhrif á alla sem búa nærri þeim, njóta þeirra, ferðast um þá og rannsaka þá.

LOFTSLAG, LANDSLAG OG JÖKLAR

Jökull er massi af snjó, hjarni og ís sem ekki tekur upp áratugum eða öldum saman og hnígur undan eigin þunga. Til þess að jökull myndist þarf að jafnaði meiri snjór að safnast fyrir árlega á tilteknu svæði en nemur því magni sem leysist (bráðnar) og myndar afrennsli. Jöklar á Íslandi eru þíðjöklar (e. temperate glaciers) þar sem allt vetrarfrost er horfið fyrir lok sumars. Bræðsluvatn hripar niður í snjó og hjarn og frýs, sem losar dulvarma og hitar upp jökulinn. Þegar enginn snjór eða hjarn er eftir til að hita, verður til afrennsli. Í svonefndum gaddjökllum (e. cold-based glaciers, polythermal glaciers), þar sem leysing er minni, helst frost í snjónum og ferðast neðar í jökulinn ár hvert. Slíkir jöklar eru á heimskautasvæðum, svo sem á Grænlandi og Suðurskautslandinu. Margir þeirra eru frosnir við undirlagið og renna því ekki eftir því. Miklu skiptir fyrir skrið jökla og rof þeirra hvort þeir eru þíðir eða frosnir við botn. Gaddjöklar finnast almennt ekki á Íslandi.

Úrkoma á föstu formi eykst jafnan með hæð yfir sjó, t.d. sem snjór og él, en orka til leysingar verður meiri eftir því sem neðar dregur. Jöklar myndast því fyrst á hæðum og fjöllum, en skriða síðan fram og niður hlíðar þar sem leysing eykst. Ef veðurfar er stöðugt yfir langan tíma nær jökulinn jafnvægislögun miðað við þær aðstæður sem ráðast af landslagi, loftslagi og eðliseiginleikum íss. Jafnmikill massi í

2. mynd. Massabreyting á heilu jökulári (1. október til 30. september) á þremur svæðum á jökli: a) Ofarlega á safnsvæði bætist stöðugt á jökulinn að vetri. Þar leysir nokkuð að sumri en vegna snjókomu að sumarlagi getur massaaukning einnig átt sér stað. b) Á mestum hluta safnsvæðis bætist massi við að vetri (bv) og tapast vegna leysingar að sumri (bs), en heildarniðurstaðan yfir árið er massaviðbót (ba). c) Á leysingarsvæði er massatap að sumri umfram viðbót að vetri og niðurstaðan er tap. Lengd vetrar- og sumartímabils er höfð breytileg milli myndanna þriggja, enda sýna þær þróun jökulafkomu í mismunandi hæð. – The figure shows mass change over a full glacial year (1 Oct to 30 Sept) in three zones on a glacier: a) In the upper accumulation area, mass is continuously added to the glacier during winter. Some melt occurs in summer, but due to summer snowfall, mass gain can also occur during summer. b) Over most of the accumulation area, mass is added in winter (bw) and lost due to melt in summer (bs), but the annual balance (ba) is positive. c) In the ablation area, summer melt exceeds winter accumulation, resulting in an overall annual mass loss. The relative length of winter and summer periods is variable on the three figures, since they display the development of glacier mass balance at different elevations.



föstu formi safnast fyrir árlega á safnsvæði og leysir neðar á leysingarsvæðinu. Þar sem jöklar vaxa á nokkrum nálægum hæðum og fjallstindum getur farið svo að ísinn skriði niður fjallshlíðar, nái saman og þykkni, þannig að smám saman myndast jökulhvel í stað stakra smærri jökla. Stærstu jöklar landsins, Vatnajökull, Langjökull, Hofsjökull og Mýrdalsjökull, hafa myndast út frá minni jökllum sem hafa skriðið saman.¹⁶

Eldvirkni hefur byggt upp megineldstöðvar og fjalllendi á suðurströnd landsins. Þar er mikil úrkoma sem berst með lægðum úr suðri, og hiti að vetri er nægjanlega lágur til þess að mestur hluti úrkomu fellur sem snjór. Þar raðast upp frá vestri til austurs Eyjafjallajökull, Mýrdalsjökull, Vatnajökull, Hofsjökull eystri og Þrándarjökull. Aðrir helstu jöklar landsins, meðal annars Langjökull, Hofsjökull og Snæfellsjökull, hafa byggst upp á fjalllendi eldstöðva, en Drangajökull á Ströndum stendur á fornu rofnu hálendi og nýtur úrkomu úr norðaustlægum áttum. Mesta árlega úrkoma á Íslandi fellur til á hásléttu Mýrdalsjökuls (~1350 m y.s.) og Öræfajökuls (~1820 m y.s.), að stærstum hluta að vetri þar sem vetrarsnjólagið getur orðið allt að 12–15 m að þykkt (6–7,5 m vatns)^{17–20} (1. mynd).

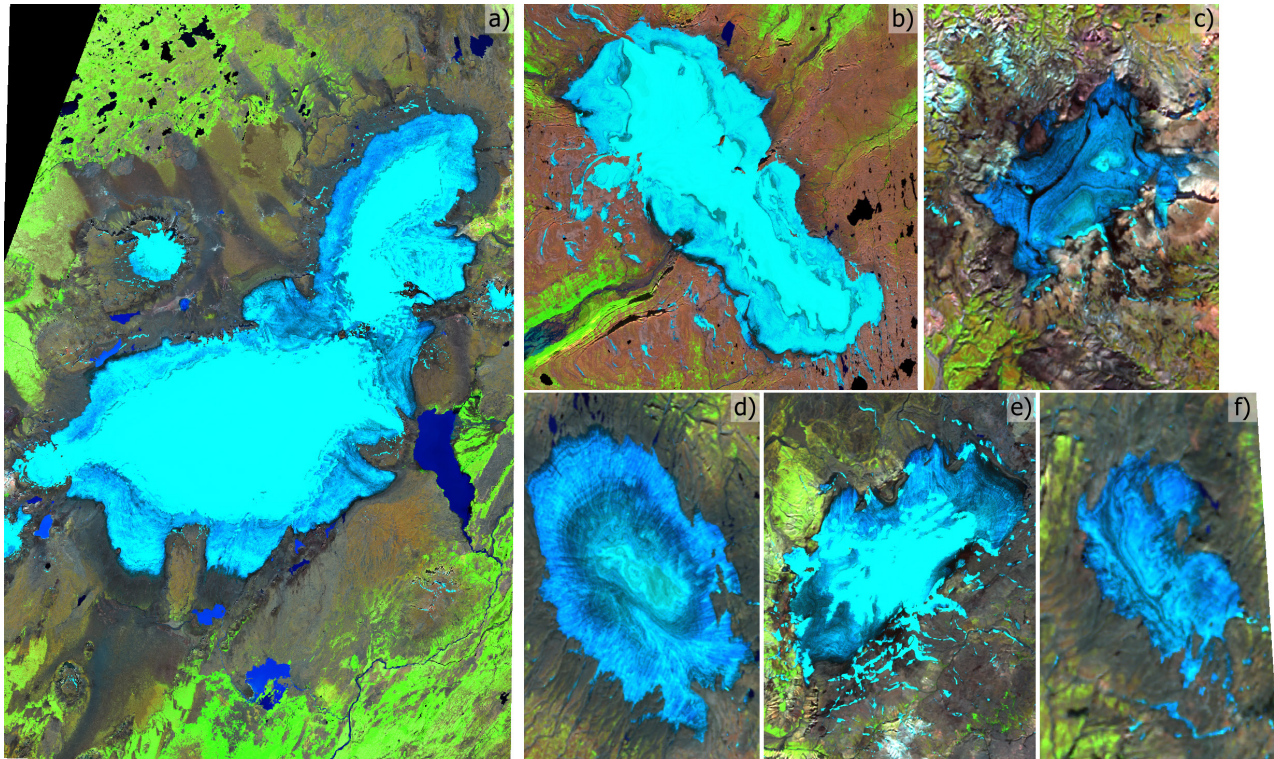
Norðan stóru jöklanna myndast úrkomuskuggi, þar sem loftið úr suðlægum áttum hefur skilað rakanum sem úrkomu á jökla og hálendi og er orðið þurr. Hér á landi er úrkoma úr norðlægum áttum allajafna mun minni en í hinum suðlægum. Minnst er ársúrkoma norðan Vatnajökuls, aðeins 400–700 mm, en meðalársúrkoma á Íslandi er um 1.500

mm.²¹ Mörg svæði norðan Vatnajökuls og austan Herðubreiðar teljast til stærstu „eyðimerkursvæða“ Evrópu, og einkennast af gróðursnauðum víðáttum og berum söndum, sem eru uppsprettur sandfoks og rykstorma.^{22,23} Inn til landsins, á Hofsjökli, Langjökli og norðanverðum Vatnajökli, nær meðalársúrkoma allt að 3,5 m vatns. Á hábungum stærstu jöklanna er meðalhiti allt árið undir frostmarki eða við frostmark, og mest af úrkomunni fellur sem snjór (1. mynd). Ofan við hjarnmörk í 1.100–1.300 m hæð leysir snjó ekki með öllu að sumri og þaðan skriður því ís niður á jökulsporðana.

Leysingartímabil jökla hefst þegar sól hækkar á lofti, daginn lengir og það hlýnar í veðri, þá taka jökulár að bólгна. Mestur hluti leysingar er að sumri en oft er veruleg vetrarleysing á jökulsporðum sem ná niður fyrir um 400 m yfir sjávarmál. Þetta á við um skriðjökla á suðaustanverðum Vatnajökli, um Breiðamerkurjökul, Skeiðarárjökul og sporða Mýrdalsjökuls og Eyjafjallajökuls.

AFKOMA JÖKLA

Árleg afkoma jökuls er skilgreind sem breyting massa hans á einu ári, frá hausti til hausts innan hins svokallaða jökulárs (2. mynd). Breytingu massans má reikna sem mismun massasöfnunar að vetri (vetrarafkoma) og massataps að sumri (sumarafkoma) Árleg afkoma rýrnandi jökuls er að jafnaði neikvæð, meiri massi tapast þá að sumri en við bættist veturinn á undan. Í tilfelli stækkandi jökuls er þessu öfugt farið. Rýrnandi jökull minnkar ár frá ári að rúmmáli



3. mynd. Myndir teknar í ágúst 2025 af völdum jökulum með Copernicus Sentinel-2-gervihnetti. Myndirnar eru settar fram með innrauðum böndum sem ýkja skil íss og snjós og má því vel greina skilin milli safnsvæðis og leysingarsvæðis. Vetrarsnjór hefur ljósa liti en jökulís dekkri bláa liti. Þar hefur allur vetrarsnjórinn bráðnað og jökulísinn undir er kominn í ljós. Neðri mörk snjósins ákvarða snælinu. a) Langjökull 20. ágúst 2025. Heildarflatarmál jökulsins er um 820 km² en við myndatökuna var svæði ofan snælinu um 377 km². Það gefur hlutfallstölu safnsvæðis nærri 46%, sem staðfestir massaójafnvægi jökulsins við núverandi loftslag. b) Drangajökull undir lok ágúst. Safnsvæðið er nærri 56 km² en heildarflatarmál um 136 km², hlutfallstalan 41%. c) Torfajökull. Hefur tapað öllu safnsvæði sínu. d) Prándarjökull. Hefur tapað öllu safnsvæði sínu. e) Tungnafellsjökull. Heldur hluta af safnsvæði sínu ennþá, um 9 km², en heildarflatarmál var nærri 32 km². f) Hofsjökull eystri. Hefur tapað öllu safnsvæði sínu. – Satellite images taken in August 2025 of selected glaciers using the Copernicus Sentinel-2 satellite. The images are presented using short wave infrared bands to enhance the contrast between ice and snow, making the boundary between the accumulation zone and the ablation zone clearly visible. Winter snow appears in light colors, while glacier ice appears in darker blue tones. Where all the winter snow has melted, the underlying glacier ice is exposed. The lower limit of the snowpack defines the snowline. a) Langjökull on 20 August 2025. The total area of the glacier is about 820 km², but when the image was taken, the area above the snowline was about 377 km². This gives an accumulation-area ratio of nearly 46%, confirming the glacier’s mass imbalance under the current climate. b) Drangajökull at the end of August: the accumulation area is roughly 56 km², while the total area is about 136 km², a 41% ratio. c) Torfajökull has lost all of its accumulation area. d) Prándarjökull has lost all of its accumulation area. e) Tungnafellsjökull retains part of its accumulation area, about 9 km², while its total area was close to 32 km². f) Hofsjökull eystri has lost all of its accumulation area.

og flatarmáli, en einkenni vaxandi jökuls er að jafnaði aukið rúmmál og vaxandi flatarmál. Afkoma jökla ræðst fyrst og fremst af veðurfari og haldist það stöðugt lengi nær jökullinn ákveðinni lögun þannig að hann stækkar hvorki né minnkar, og er þá sagður í jafnvægi.

Greint er á milli tveggja meginsvæða á yfirborði jökuls: Safnsvæðis á efri hluta jökulsins og leysingarsvæðis á neðri hlutanum (3. mynd). Á safnsvæðinu bráðnar aðeins hluti vetrarsnjósins yfir sumarið og til verða snjófyrningar sem bætast við massa jökulsins. Á leysingarsvæðinu bráðnar allur vetrarsnjórinn og þar að auki bæði hjarn og jökulís. Á mörkum þessara tveggja svæða er svokölluð jafnvægislína. Þar bráðnar jafnmikið að sumri og á bætist að vetri, og er afkoman því núll. Hæð jafnvægislínunnar er ein af helstu kennistærðum jökla. Hún hækkar í hlýnandi loftslagi en lækkar í kólnandi loftslagi. Til þess að jökull hér á landi haldist nærri jafnvægi – þ.e. afkoman sé nærri núlli og lögun haldist nær óbreytt frá ári til árs yfir lengra tímabil – þarf safnsvæðið að ná yfir um 50–60% af flatarmáli jökulsins. Þetta hlutfall eða stiki er nefnt

hlutfallstala safnsvæðis (e. accumulation area ratio, AAR). Margir litlir jöklar hér á landi hafa nú tapað safnsvæði sínu algerlega og eiga sér ekki viðreisnar von nema loftslag kólni verulega. Þeirra á meðal eru Torfajökull, Prándarjökull og Hofsjökull eystri. Þeir eru ekki afkomumældir að staðaldri en mat á hlutfallstölu safnsvæðis sýnir skýrt hvert stefnir (3. mynd). Hlutfallstala safnsvæðis fyrir stærri jökla landsins er einnig undir viðmiði fyrir jafnvægi.

Safnsvæði jökla er þakið vetrarsnjó og milli snjósins og íssins er hjarnlagið, sem mest getur náð um 40 m þykkt hérlendis. Hjarnið er snjór sem lifað hefur af leysingu fyrsta sumars og er smám saman að þjappast og ummyndast í jökulís. Á leysingarsvæðum er jökulís hulinn vetrarsnjó fram á sumarið en þá leysir hann og leysing jökulíss tekur við.

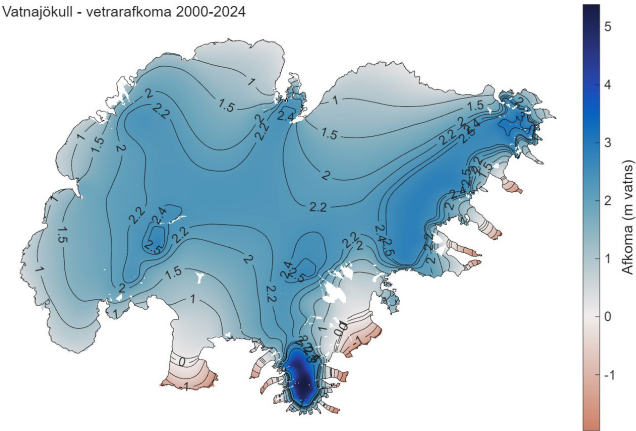
Afkoma þriggja stærstu jökla landsins er nú mæld árlega í afkomuferðum sem farnar eru að vori og hausti. Mælingar hófust á Hofsjökli jökulárið 1987–88, á Vatnajökli 1991–92 og Langjökli 1996–97. Þessir jöklar ná yfir meira en 90% af jökulhuldu landi.^{18,19} Auk þess hefur afkoma verið mæld á Mýrdalsjökli, Drangajökli, Prándarjökli, Eyjafjallajökli og smærri

Horft til Torfajökuls, 2023.
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson

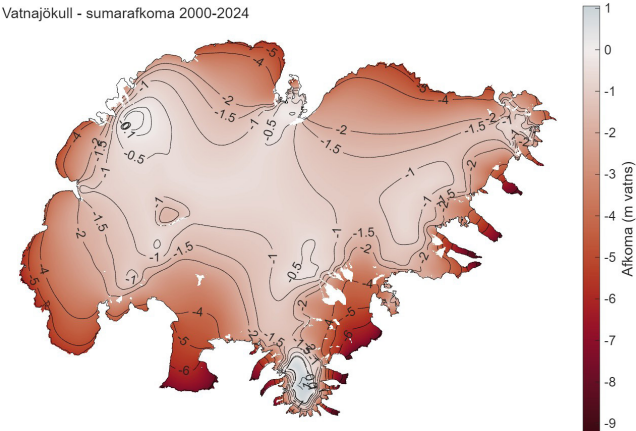


Þursinn í Þursaborg á Langjökli nær og Eiríksjökull fjær, 2024.
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson

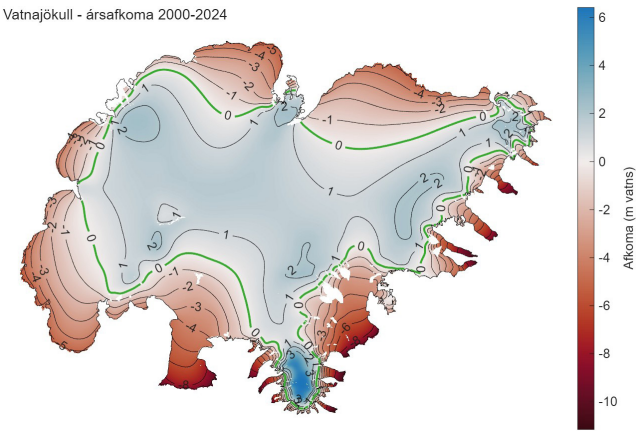
4. mynd. Meðalafkoma Vatnajökuls á tímabilinu 2000–2020. Byggt á afkomu-mælingum. – Average mass balance of Vatnajökull for the period 2000–2020, based on mass-balance measurements.



a) Vetrarafkoma fyrir allan jökulinn er 1,65 m vatns á tímabilinu. Vetrarafkoma eykst almennt með hæð og minnkar með hækkingu breiddargráðu. Á sporðum við suðurströndina má sjá neikvæða afkomu yfir veturinn. – Winter mass balance for the glacier is 1.65 m water equivalent for the period. In general, winter mass balance increases with elevation and decreases with increasing latitude. Negative winter balance can be seen at the glacier termini along the south coast.



b) Sumarafkoma Vatnajökuls á tímabilinu er -2,38 m vatns. Meiri leysing á sér yfirleitt stað við suðurströndina og greina má jákvæða afkomu á Örfæfajökli. – The summer mass balance of Vatnajökull for the period is -2.38 m water equivalent. More melt occurs along the south coast overall, and a positive summer balance can be identified on Örfæfajökull.



c) Ársafkoma á tímabilinu er -0,73 m vatns. Græn lína sýnir meðaljafnvægislínu jökulsins, þar sem vetrarafkoma er jöfn sumarafkomu. – The annual mass balance for the period is -0.73 m water equivalent. The green line shows the average equilibrium line of the glacier, where winter balance equals summer balance.

jöklum á Tröllaskaga og víðar, þó ekki með samfelldum hætti. Lengsta mæliröð afkomu er frá Grímsvötnum í Vatnajökli. Þar hefur vetrarafkoma verið mæld árlega frá 1951 í vorferðum Jökларannsóknafélags Íslands.²⁴

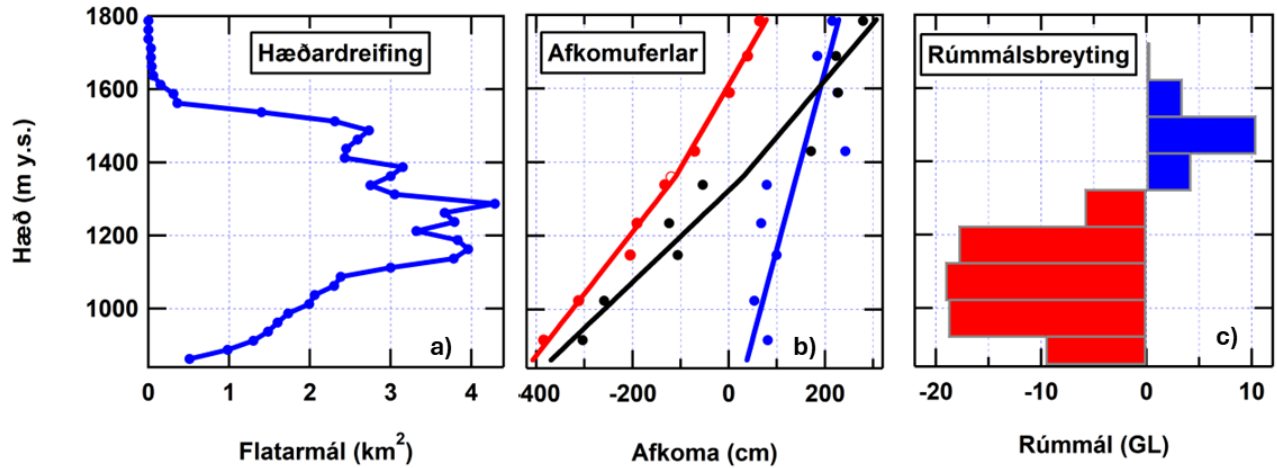
Þessar beinu mælingar yfirborðsafkomu eru kallaðar stikumælingar. Þar er þykkt vetrarsnjós mæld að vori og sumarleysing að hausti, á völdum stöðum. Mismunur þessarar mælinga er ársafkoma fyrir hvern stað. Afkomuferðir eru oftast stórir leiðangrar þar sem bæði þarf sérhæfðan mannskap og tæki til að ferðast um jökulinn með öruggum hætti. Vegna umfangs verður að takmarka fjölda mælipunkta við nokkra tugi, og velja þeim örugga staði fjarri sprungusvæðum og með nokkuð jafnri dreifingu eftir hæð til að þeir endurspegli afkomu jökulsins alls.

Mælingarnar sýna að þykkt vetrarsnjós á hinum stóru jöklum miðhálendisins er 3–4 m, 4–8 m efst á safnsvæðum en oft 0–1 m neðst á jökulsporðum. Vatnsgildi vetrarafkomu er oft um 1–2 m, þegar því er jafndreift yfir allt flatarmál jökuls. Ákefð úrkomu og lega lægðarbrauta hefur mikið að segja um hversu mikill snjór safnast að vetri og hversu mikið af úrkomu fellur sem snjór eða regn. Mest er leysingin á jökulsporðum nærri sjávarmáli. Þar getur sumarleysing náð 10 m og að vetri leysir oft 1–2 m til viðbótar. Þetta á til dæmis við um Sólheimajökul og Breiðamerkurjökul. Á svæðum ofan ~1700 m hæðar getur sumarafkoma hins vegar verið jákvæð, svo sem á hábungu Hofsjökuls, á Örfæfajökli og á Bárðarbungu.

Með stikumælingum er einungis unnt að meta yfirborðsafkomu en jöklar tapa einnig massa vegna innri ferla, svo sem vegna jarðhita við botn, við kelfingu í jökullón, vegna innri núnings og við losun stöðuorku rennandi vatns. Innri leysingu og leysingu af völdum núnings við jökulbotn var lítill gaumur gefinn af jöklafræðingum þar til á síðustu árum.^{25–27} Fyrir bratta jökla á úrkomusömum svæðum getur innri leysing skipt verulegu máli, og jafnvel verið um og yfir 1 m vatnsgildis á ári. Fyrir jökla sem kelfa í lón eða sjó fram getur þáttur kelfingar í afkomu verið mjög stór. Kelfing í Jökulsárlón (jökulís brotnar af, fer út í lónið og bráðnar) er til dæmis stór þáttur í afkomu Breiðamerkurjökuls. Hér á landi er jarðhitinn þó veigamestur þessarar þátta, einkum þar sem jökull þekur jarðhitasvæði. Rýrnun vegna ofangreindra þátta hefur verið metin 5–6 cm vatns árlega á Hofsjökli og Langjökli og nær 20 cm vatns á Vatnajökli, og er líklega enn meiri á Mýrdalsjökli.²⁸ Samanlagt nemur önnur leysing en sú sem mæld er á yfirborði yfir 2 km³ vatns á ári fyrir alla íslensku jöklana, sem jafngildir um það bil meðalrýrnun bæði Hofsjökuls og Langjökuls á ári það sem af er þessari öld. Það er því nauðsynlegt að taka tillit til þessara afkomuþátta þegar gerð er grein fyrir heildarafkomu jökla hér á landi.

Hægt er að nýta hæðarkort, gerð eftir mælingum eða myndum frá gervitunglum, flugvéllum og drónum, til þess að meta afkomu og er slíkt mat kallað landlíkanafkoma. Metin er rúmmálsbreyting jökuls yfir tiltekið tímabil (oft 5–10 ár) út frá hæðarkortum

5. mynd. Afkomumælingar á Sátujökli í Hofsjökli jökulárið 2023–2024. – Mass-balance measurements from Sátujökull at Hofsjökull for the glaciological year 2023–2024.



a) Flatarmál hvers 25 m hæðarbils á Sátujökli. Reikna má rúmmálsbreytingu með því að margfalda afkomutölur með flatarmáli. – The area of each 25 m elevation band on Sátujökull. That allows volumetric change to be calculated by multiplying mass-balance values by area.

b) Mæligildi vetrar-, sumar- og ársafkomu jökulársins 2023–2024 í 9 punktum á ísasviði Sátujökuls, sem nær yfir 72 km² svæði á norðanverðum Hofsjökli. Bestu línur eru lagðar gegnum punktastöfnin. – The figure shows measurements of winter, summer, and annual mass balance for the glaciological year 2023–2024 at nine points on the ice surface of Sátujökull, covering a 72 km² area on the northern side of Hofsjökull. Best-fit lines are drawn through each set of points.

c) Rúmmálsbreytingar ofan og neðan jafnvægislínu, sem var í 1.325 m hæð þetta árið. Greinilegt er að meira tapaðist (rauðu súlurnar) neðan jafnvægislínnunnar en ofan hennar (bláu súlurnar), og reiknaðist afkoma Sátujökuls (og Hofsjökuls alls) verulega neikvæð þetta ár. – The figure shows volume changes above and below the equilibrium line, which was at 1.325 m elevation. More mass was lost (red bars) below the equilibrium line than above it (blue bars), and the mass balance of Sátujökull (and of Hofsjökull overall) was significantly negative.

sem útbúin eru við upphaf tímabilsins og lok þess. Mat á afkomu með landlíkönun hefur þann kost að aðferðin nær yfir allan jökulinn og felur einnig í sér áhrif innri leysingar, leysingar við jökulbotn og kelfingar. Til samanburðar lýsa stikumælingar völdum sniðum og punktum á yfirborði, og einn af kostum þeirra er að gögn fást árlega og jafnvel innan ársins. Afkomumælingar nýtast til að meta breytingar á afkomu jökla, bæði til skemmri og lengri tíma, og til að kvarða og sannreyna jökla- og vatnafarslíkön ásamt fjarkönnunargögnum.

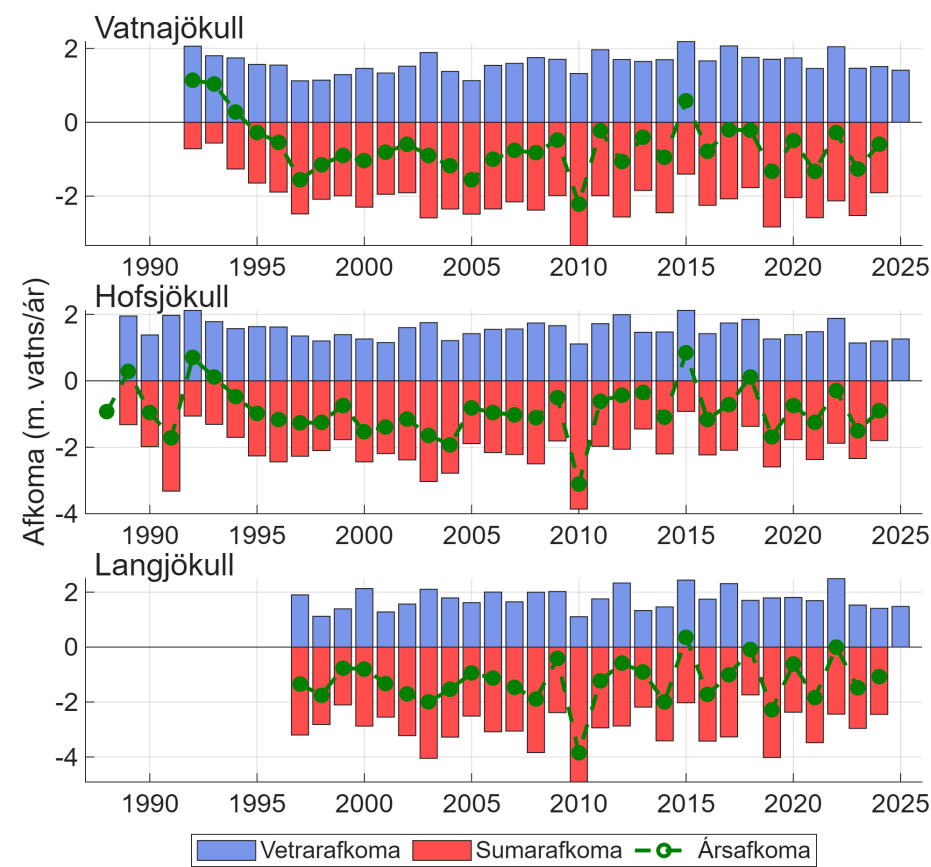
Stikumælingarnar er unnt að setja fram með jafnþykktarlínum líkt og sýnt er á 4. mynd fyrir Vatnajökul. Einnig er hægt að horfa á snið einstakra skriðjökla og sjá hvernig afkomuþættir breytast með hæð, líkt og 5. mynd sýnir á Sátujökli í norðanverðum Hofsjökli. Unnt er að teikna stærri mynd sem sýnir langtímabreytingar í afkomuþáttum (6. mynd) og reyna með aðstoð þeirra að greina orsakir breytinganna. Þær eru margþættar hér á landi. Loftslag, eldgos, framhlaup, jökulhlaup, sand- og öskufok sem sest á yfirborð jökla – allt hefur þetta áhrif á afkomu jöklanna.

Stikumælingar verða ávallt lykilgögn í jöklafræði, þrátt fyrir aukinn fjölda gervihnatta á braut um jörðu og sífellt betri og afkastameiri reiknilíkön til þess að herma hegðun og svörun jökla við breytingum í

loftslagi. Þeir jöklar sem hafa verið mældir samfelld í 30 ár hafa hlotið nafnbótina viðmiðunarjökla (e. reference glaciers) hjá World Glacier Monitoring Service, alþjóðlegri stofnun sem heldur meðal annars utan um þessar afkomumælingar í alþjóðlegum gagnabanka. Hofsjökull og Vatnajökull hafa þegar verið teknir inn í þessa heiðurshöll, og það stýttist í að Langjökull hljóti einnig nafnbótina.

LÖGUN JÖKLA OG SKRIÐ

Fyrsta nánast skýjalausa myndin af Vatnajökli var tekin með MSS-skynjara (e. multispectral scanner) úr Landsat 1-gervihnetti (ERTS-1) hinn 31. janúar 1973 (7. mynd). Á myndinni komu í fyrsta sinn skýrt í ljós öskjur megineldstöðva undir jöklinum og uppbygging sprungusveima sem teygja sig fram undan jökuljaðrinum, sem og farvegir nýafstaðinna jökulhlaupa. Þessir drættir teiknuðust sérlega vel upp undir 7° sólarhorni.²⁹ Í ERTS-1 áætluninni var Íslandsmyndun eitt af tilraunaverkefnum sem NASA studdi, og fólst verkefnið í greiningu MSS-mynda frá ERTS-1 til þess að rannsaka margvísleg jarðfræðileg, vatnafræðileg og haffræðileg fyrirbæri.³⁰ Þessi fyrsta umfangsmikla fjarathugun á Íslandi úr gervihnetti leiddi til frekari greininga og aukinnar þekkingar á mörgum sviðum, þar á meðal ýtarlegrar könnunar á yfirborðslögum



6. mynd. Heildarafkoma stærstu íslensku jöklanna frá upphafi mælinga. Myndin sýnir vel viðvarandi neikvæða afkomu allra jöklanna en einnig sést breytileiki í vetrar- og sumarafkomu, sem ræðst að mestu af veðri hvers jökulárs. – Surface mass balance of the largest Icelandic glaciers since the beginning of measurements. The figure clearly highlights the persistent negative mass balance of all the glaciers, but also shows the variability in winter and summer mass balance, which is largely modulated by the weather of each glaciological year.

jökla, útbreiðslu og stærð eldfjalla undir jökli, ketilsigi af völdum jarðhita undir jökli, afmörkun ísaskila og mati á flatarmáli jökla á Íslandi.²⁹ Síðan hefur fjöldi gervihnatta á sporbaug um jörðu aukist gríðarlega; rúm- og tímaupplausn batnar ár frá ári, og nýir og endurbættir skynjarar gera vísindamönnum kleift að rannsaka fjölbreytt jöklafræðileg fyrirbæri mun betur en áður, sem og að vakta breytingar jafnóðum.

Til þess að skilja hreyfingu jökla er nauðsynlegt að þekkja lögun bæði yfirborðsins og botnsins, ásamt gerð undirlags. Mælingar á yfirborði og þykkt jökla hafa verið gerðar áratugum saman. Fram á miðjan áttunda áratuginn var botnlandslag íslenskra jökla hins vegar nær óþekkt, og einnig yfirborðið ofan um 1.000 m hæðar (8. mynd).³¹ Á undanförunum árum hefur fjarkönnun rutt sér til rúms við kortlagningu á yfirborði jökla, en áður voru slíkar mælingar flóknar og mannaflafrekar í krefjandi umhverfi hálendisins.

Það er líka krefjandi að kortleggja jökulbotninn. Til þess þarf mælitæki sem sjá gegnum snjó og jökulís, sem á Íslandi getur verið allt að 1.000 metra þykkur (9. mynd). Fyrstu rannsóknir á þykkt Vatnajökuls voru gerðar í fransk-íslenska leiðangrinum árið

1951.³² Þá var notast við mælingar á endurkasti hljóðbylgna frá botni jökulsins með sprengingum á yfirborði á nokkrum völdum stöðum. Nú eru þessar mælingar jafnan gerðar með íssjá. Það er sérhæfð ratsjá sem sendir frá sér rafsegulbylgjur og mælir styrk og ferðatíma endurkasts frá jökulbotninum. Auk þess mælist endurkast frá íslinum, öskulögum, vatnsrásum og lónum undir jöklinum. Til þess að greina endurkast frá botni þíðjökla, eins og á Íslandi, þarf að notast við rafsegulbylgjur með bylgjulengd upp á metra eða tugi metra.³³

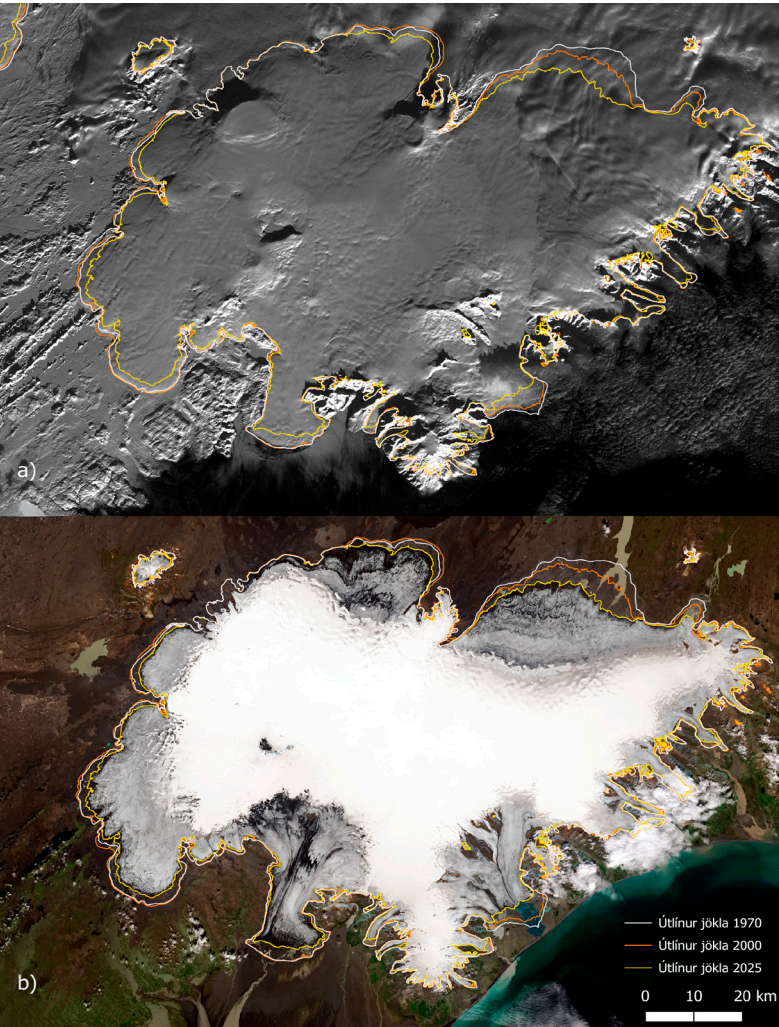
Botnkort jökla afhjúpa jarðfræðilegar myndanir, svo sem eldfjöll og djúpa dali sem jöklar hafa mótað, en einnig eru botnkort nauðsynleg til þess að afmarka vatnasvið jökulvatna við jökulbotn, finna farvegi jökulhlaupa, athuga stöðugleika farvega við jökuljaðar og spá fyrir um myndun og vöxt jökullóna (9. mynd). Hægt er að meta ísþykkt jökla þegar botn og yfirborð er þekkt og fá mat á rúmmáli jökuls, það er hversu mikin ís hann geymir (10. mynd).

Jöklar skriða niður halla undan eigin þunga líkt og deig eða bráðinn málmur. Læknirinn og náttúrufræðingurinn Sveinn Pálsson gerði sér

7. mynd. t.h. Gervihnattamyndir af Vatnajökli. – Satellite images of Vatnajökull.

a) Ein fyrsta gervihnattamynd af Vatnajökli úr Landsat 1-gervihnatti NASA/USGS, 31. janúar 1973. – One of the first satellite images taken of Vatnajökull from the NASA/USGS Landsat-1 satellite, on 31 January 1973.

b) Gervihnattamynd af Vatnajökli og næsta nágrenni tekin 17. ágúst 2025 úr gervitunglinu ESA Copernicus Sentinel-2. Útlínur jökulsins fyrir valin ár eru sýndar. – A satellite image of Vatnajökull and its surroundings taken on 17 August 2025 from the ESA Copernicus Sentinel-2 satellite. Glacier outlines for selected years are shown.

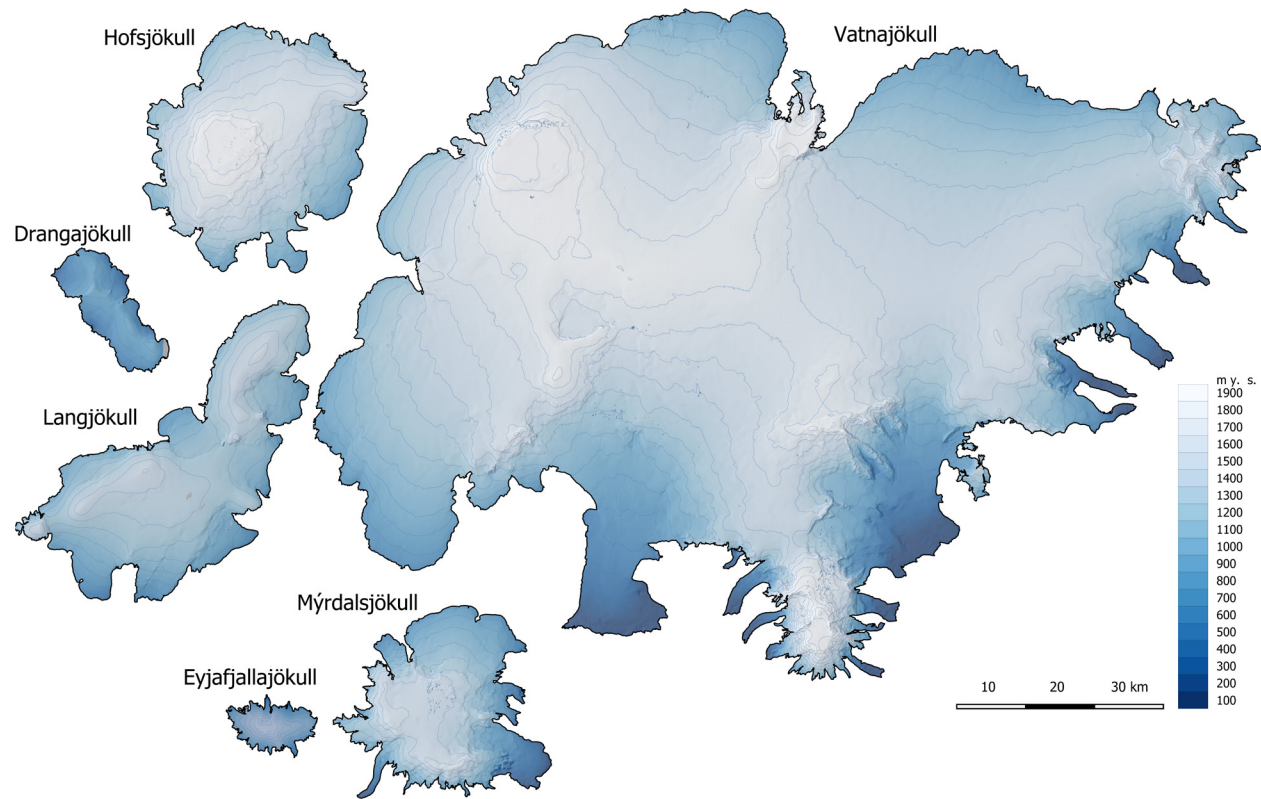


fyrstur manna grein fyrir þessu eins og sést í Jöklariti hans, sem hann lauk við 1784.³⁴ Fyrstu mælingar á skriðhraða jökla hér á landi gerði Otto Turell á Svínafellsjökli um miðja 19. öld.³⁵ Sænsk-íslenski Vatnajökulsleiðangurinn mældi skriðhraða á Hoffellsjökli 1936–1938³⁶ og Jack Ives og félagar á Morsárjökli snemma á sjötta áratug síðustu aldar.^{37,38} Þessar mælingar fóru fram á leysingarsvæðum jöklanna með hefðbundnum landmælingatækjum og voru mjög fyrirhafnarsamar. Þær sýndu að jökullinn skreið frá nokkrum tugum cm upp í nokkra metra á dag. Skriðhraði að sumri reyndist meiri en að vetri, í sumum tilfellum allt að tvöfalt meiri.

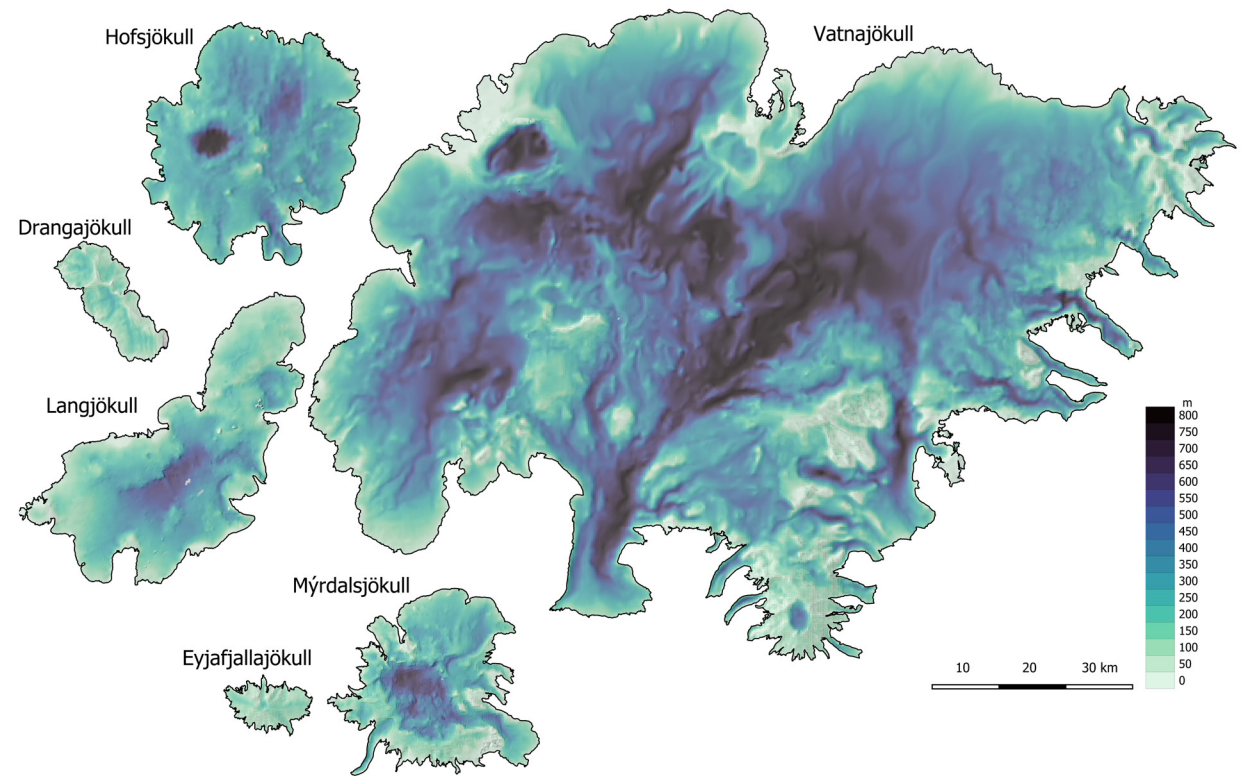
Þegar afkomumælingar á stóru jöklunum hófust um 1990 var nákvæm staðsetning afkomustikna mæld reglulega og eftir að GPS-tæki komu til sögunnar var unnt að nota endurteknar mælingar á sömu stikum til þess að reikna skriðhraða milli mæliferða í nokkrum tugum punkta á hverjum jökli. Á síðustu áratugum hafa siritandi GPS-tæki jafnframt verið sett upp á nokkrum stöðum á jöklunum, og sýna þau hreyfingu íssins á ákveðnum stað með mikilli tímaupplausn. Þessar mælingar juku skilning á hreyfingu jöklanna, en örðugleikar við mælingar af þessum toga og mikill

tilkostnaður gerðu það að verkum að upplýsingar um skrið íslensku jöklanna voru takmarkaðar framan af. Beiting fjarkönnunar við skriðhraðamælingar á jöklum síðastliðin 30 ár hefur umbylt þekkingu okkar, ekki bara um íslenska jökla heldur um alla jökla og ísbreiður heimsins.

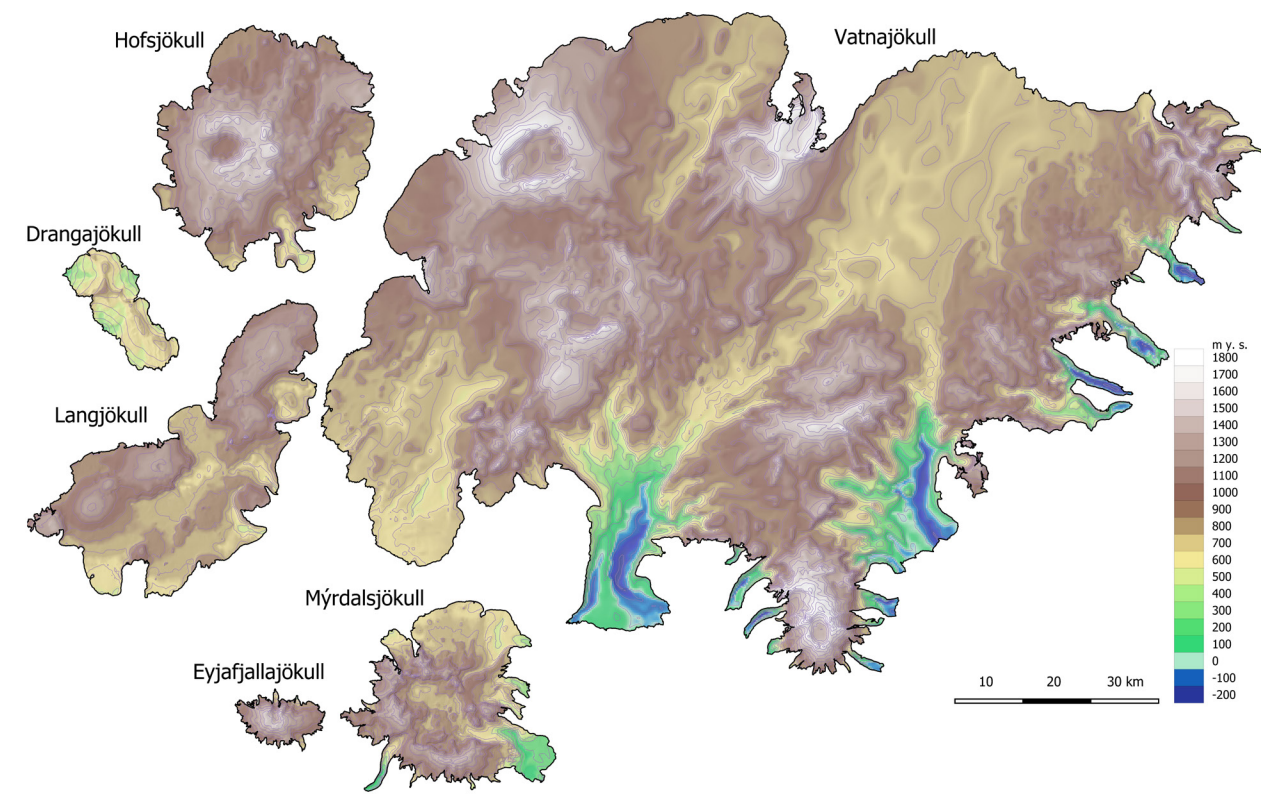
Fjarkönnun á skriðhraða jökla byggist á því að ljósmyndir og ratsjármyndir úr gervihnöttum eða flugvélum sýna breytilegt endurkast frá yfirborði jarðar. Það endurspeglar óreglu í ýmsum eiginleikum yfirborðs og efstu jarðlaga. Þar sem hreyfing er á jarðlögum eða jöklunum er unnt er að meta hraða hreyfingarinnar með því að greina hliðrun í endurkastsmynstri milli ratsjármynda frá mismunandi tímum (e. offset tracking). Einnig er unnt að mæla hraða með svokallaðri bylgjuvíxlgreiningu ratsjármynda (e. interferometric synthetic aperture radar, InSAR). Þessar fjarkönnunaraðferðir gera það að verkum að nú er unnt að mæla yfirborðshraða ísskriðs á reglulegu neti yfir heilu jöklana með allt frá eins dags millibili upp í vikur eða mánuði. Þegar framhlaup eða jökulhlaup valda skyndilegum breytingum í jökulskriði er unnt að taka sérstakar



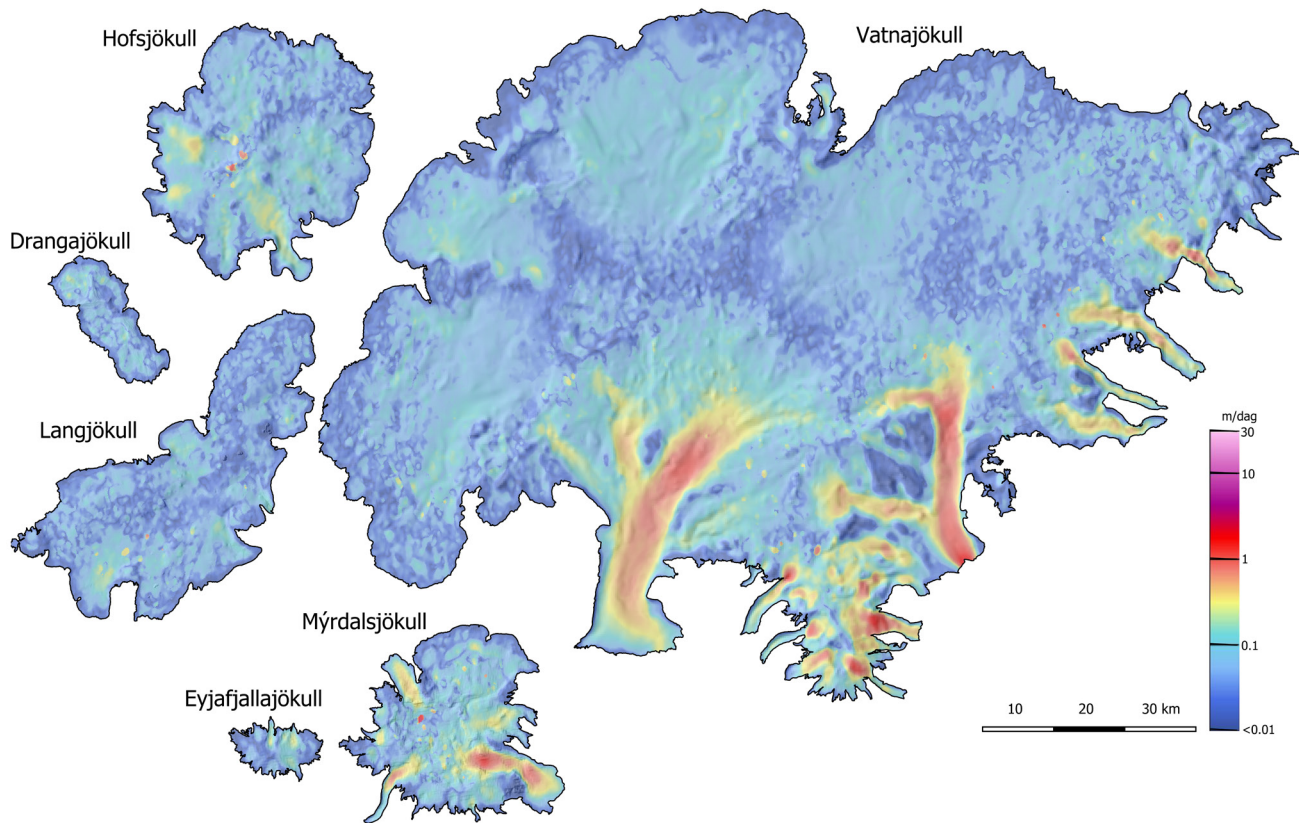
8. mynd. Yfirborðshæð helstu jökla á Íslandi. Byggt á gervitunglagögnum frá 2020–2022.^{93,94} Surface elevation of Iceland's major glaciers, based on satellite data from 2020–2022.



10. mynd. Ísþykkt helstu jökla Íslands, mismunur á hæð yfirborðs og botns. Sjá má hvar ísinn er þykkastur á Vatnajökli, allt að 900 m, nærri ísaskilum Skeiðarárjökuls og Brúarjökuls. – Ice thickness of Iceland's major glaciers, showing the difference between surface and bed elevation. The thickest ice on Vatnajökull can be seen near the ice divides of Skeiðarárjökull and Brúarjökull, reaching up to 900 m.



9. mynd. Botnhæð helstu jökla Íslands. Byggt á íssjármælingum.³¹ – Bed elevation of Iceland's major glaciers based on radio-echo sounding measurements.

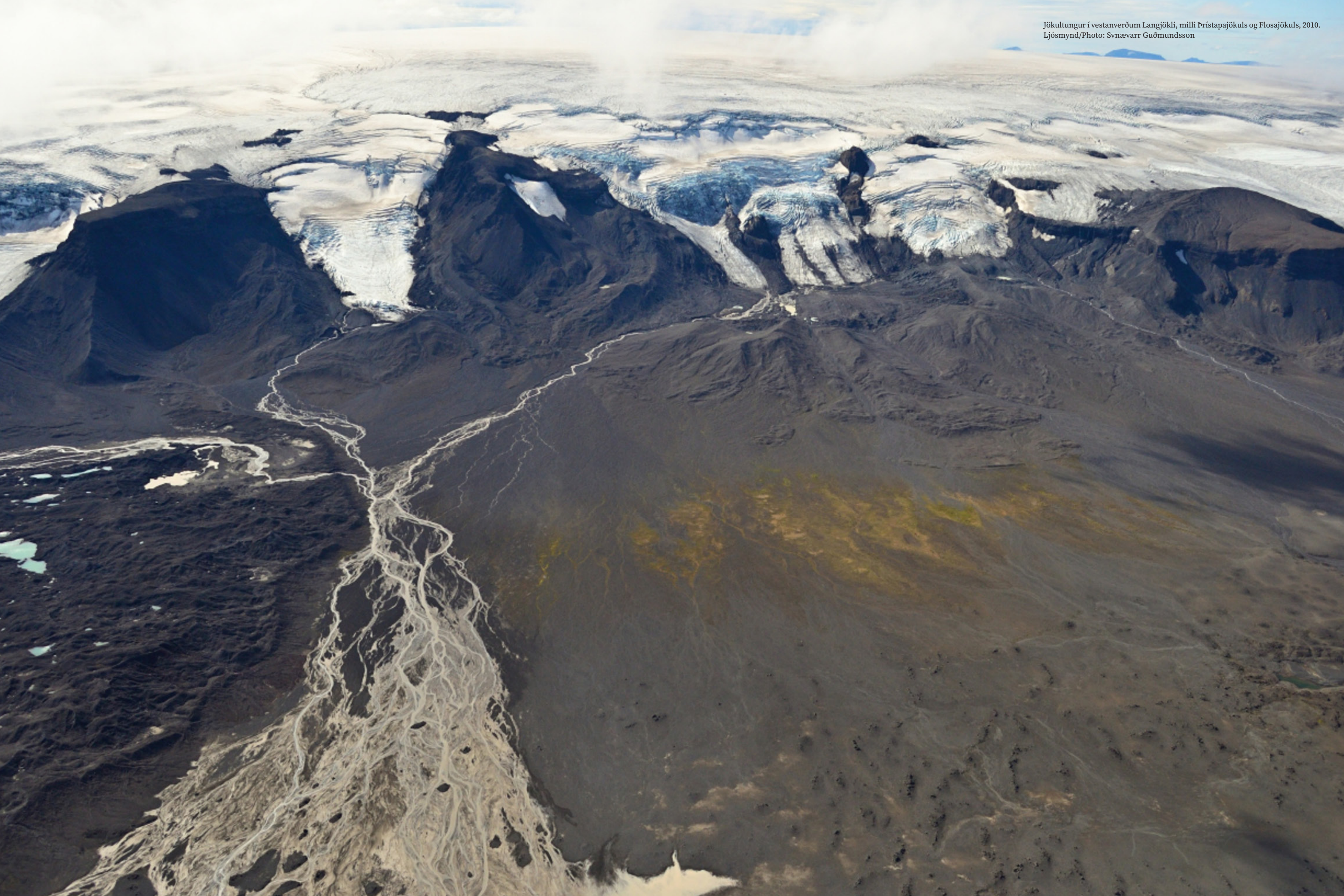


11. mynd. Skriðhraði íss á yfirborði á helstu jöklum Íslands.³⁹ – Ice surface flow velocity on the major glaciers of Iceland.



Skeiðarárjökull, horft yfir Skaftafellsfjöll. Fjær sjást Súlutindar, 2010.
Ljósmynd/Photo: Snævarr Guðmundsson







Jökultindaborg í Fossadal í Esjufjöllum, 2022.
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson





Framhlaup Tungnaárjökuls haustið 1994.
Ljósmynd/Photo: Hannes H. Haraldsson

9 15 '94

Svöludalsjökull sem mætir Breiðamerkurjökli, 2006.
Ljósmynd/Photo: Snævarr Guðmundsson





Grímsfjall og Grímsvötn. Til vinsti sjást skálar Jöklarannsóknafélagsins á Svíahnúk eystri, 2023.
Ljósmynd/Photo: Andri Gunnarsson





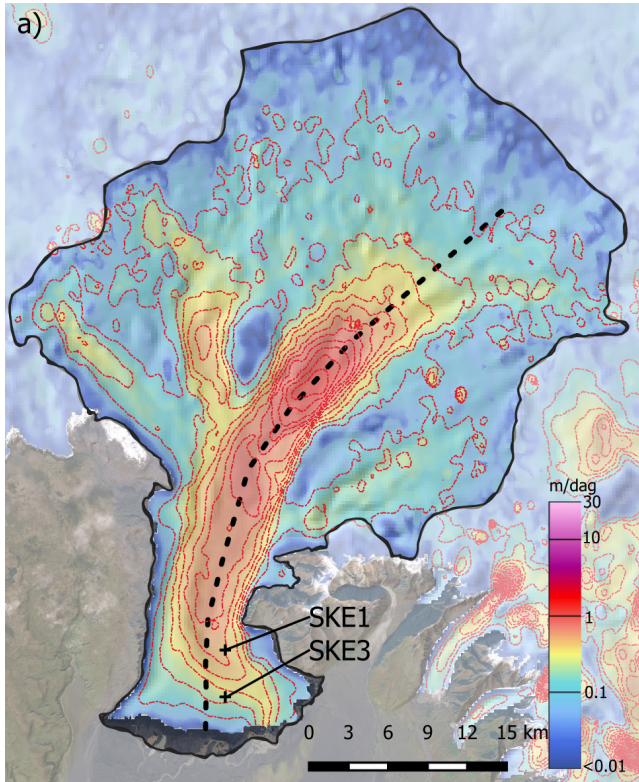
myndir í rannsóknaskyni og greina hraðabreytingar frá degi til dags á þéttu neti á áhugaverðum svæðum. Frá sjónarhóli náttúrufræðinga, sem eitt sinn fóru gangandi um jöklana, boruðu niður stikur og mældu staðsetningu þeirra með landmælingatækjum, eru þessar tækniframfarir göldrum líkastar.

Copernicus Sentinel-1A-, 1B- og 1C-gervihnettir Geimvísindastofnunar Evrópu (ESA) hafa tekið ratsjármyndir af Íslandi á 6 eða 12 daga fresti síðan haustið 2014. Hliðrunargreiningu hefur verið beitt til þess að greina skriðhraða jökla hér á landi á grundvelli þessara gagna, sem og skriðhraða á ísbreiðum heimskautanna³⁹ (11. mynd). Meðalskriðhraði íslensku jöklanna er samkvæmt þessum mælingum langmestur um miðbik þeirra. Á Skeiðarárjökli (12. mynd) og Kötlujökli getur hraðinn verið 400–800 metrar á ári þar sem hann er mestur. Á Breiðamerkurjökli mælist einnig slíkur hraði en þar nær háhraðasvæðið alveg niður að kelfandi jökulsporðinum. Hraðinn er einnig tiltölulega mikill á skriðjökum Öræfajökuls og á skriðjökum suðaustanverðs Vatnajökuls. Hraðinn á stóru skriðjökluum í norðan- og vestanverðum Vatnajökli, sem og á jökluum á miðhálandinu, Vesturlandi og Vestfjörðum, er mun minni eða nokkrir tugir metra á ári. Einnig má sjá að jökulísinn skriður mjög hægt í grennd við ísaskil og víðast nærri jöðrum jöklanna. Þessar mælingar sýna jafnframt að jöklarnir skriða hraðar að sumri en vetri eins og Jack Ives og félagar komust að (12. mynd).

Samfelldar GPS-mælingar úr mælistöðvum á leysingarsvæði Skeiðarárjökuls og Breiðamerkurjökuls sýna ekki bara árstíðasveiflur í hraða heldur einnig dægursveiflur yfir leysingartímann, sem tengjast auknu vatnsrennsli við jökulbotn⁴⁰ (12. mynd).

FRAMHLAUP JÖKLA

Framgangur eða framhlaup er óregla í hreyfingu jökla sem enn hefur ekki tekist að skýra að fullu og felst í því að jökulskriðið herðir tímabundið á sér, oft tífalt, hundraðfalt eða jafnvel meira, og jökullinn springur allur upp. Er þá sagt að gangur sé í jöklinum. Á tíma-bilum milli framhlaupa er skriðhraði jökuls ekki nægur til að bera uppsafnaða afkomu frá safnsvæðinu niður á leysingarsvæðið. Jökullinn þykknar því á safnsvæðinu en þynnist á leysingarsvæðinu, sporðurinn hopar og jökullinn verður brattari. Í framhlaupum flyst ís af safnsvæði niður fyrir jafnvægislínu, jökulyfirborð lækkar á safnsvæðinu (dæmigert um ~50 m) en þykknar á leysingarsvæðinu og sporðurinn gengur fram um hundruð metra eða jafnvel marga kílómetra. Samfara þessu eykst afrennsli frá jöklinum og vatn sprettur fram undan jökulsporði mun víðar en allajafna. Aurburður í ám sem frá jöklinum falla vex margfalt og getur haldist yfir meðallagi í nokkur ár eftir að framhlaupi lýkur.⁴¹ Fyrstu merki um framhlaup koma oft fram sem aukinn skriðhraði nærri jafnvægislínu nokkrum árum áður en verulega herðir á hraðanum.

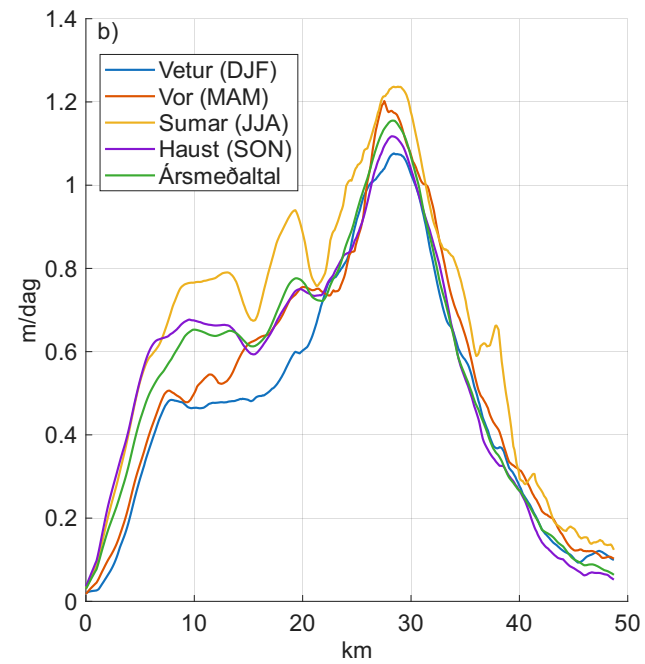


12. mynd. Dæmi um skriðhraða á Skeiðarárjökli. – Example of surface ice velocity on Skeiðarárjökull.

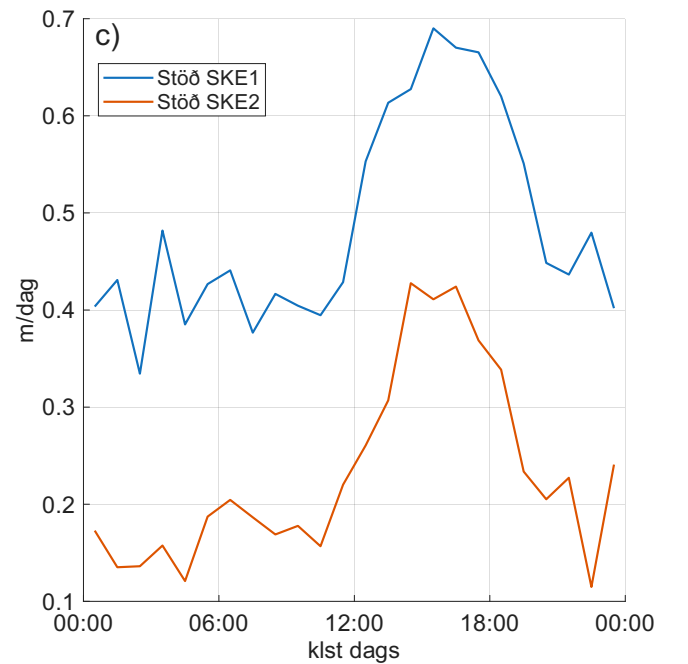
a) Gögn úr hliðrunargreiningu skriðhraða fyrir meðaltal árána 2014 til 2024.39 Gulir og rauðir litir sýna hærri hraða en bláir lægri. Svört heildregin lína sýnir ísaskil Skeiðarárjökuls og svört strikuð lína sýnir snið niður jökulinn. – Data from displacement analysis of flow velocity averaged over the years 2014–2024. Yellow and red colors indicate higher velocities, while blue colors indicate lower velocities. The solid black line shows the ice divide of Skeiðarárjökull, and the dashed black line shows a profile down the glacier.

Framhlaupa gætir í flestum stóru íslensku skriðjökluum og mörgum hinna minni.⁴² Heimildir er um framhlaup hérlandis sem ná yfir 80% af flatarmáli jökulsins. Stór framhlaup geta verið mikið sjónarspil. Þannig gekk Brúarjökull fram um hér um bil 9 km á árunum 1963 og 1964. Framrásarhraði sporðsins var um tíma yfir 100 m á dag⁴³ og mesti skriðhraði jökulsins ofan við sporðinn hefur væntanlega verið umtalsvert meiri en það. Oft verða framhlaup í ákveðnum jökli með nokkuð reglulegu millibili, afar breytilegu milli jökla. Stór framhlaup verða í Brúarjökli á um það bil 50–100 ára fresti^{41,43,44} og hafa lengstu framhlaupin þar hrúgað upp stórum jarðvegshraukum. Framhlaup verða með 25–50 ára millibili í Dyngjujökli, Tungnaárjökli og Síðujökli en einungis 5–20 ár liða á milli tiltölulega lítilla framhlaupa í Múlajökli.

Framhlaup hafa skilið eftir sig margvísleg ummerki undir jökluum og í nágrenni þeirra, meðal annars stóra jökulgarða, jökulöldur, jökulkembur, haugaruðninga, krákustíga, malarása og sprungufyllingar.^{5,45–50} Þessi ummerki hafa verið kortlögð víða á landinu af mikilli elju. Sem dæmi má nefna að landmótun framan við Brúarjökul og Eyjabakkajökul hefur verið kortlögð ýtarlega,^{51,52} og sambærileg kortlagning hefur verið



b) Skriðhraði fyrir snið sem sýnt er á a) fyrir meðaltöl árstíða, vetur, vor, sumar og haust, auk ársmeðaltals. – Surface ice velocity along the profile shown in (a) for seasonal averages, winter, spring, summer, and autumn, as well as the annual average.



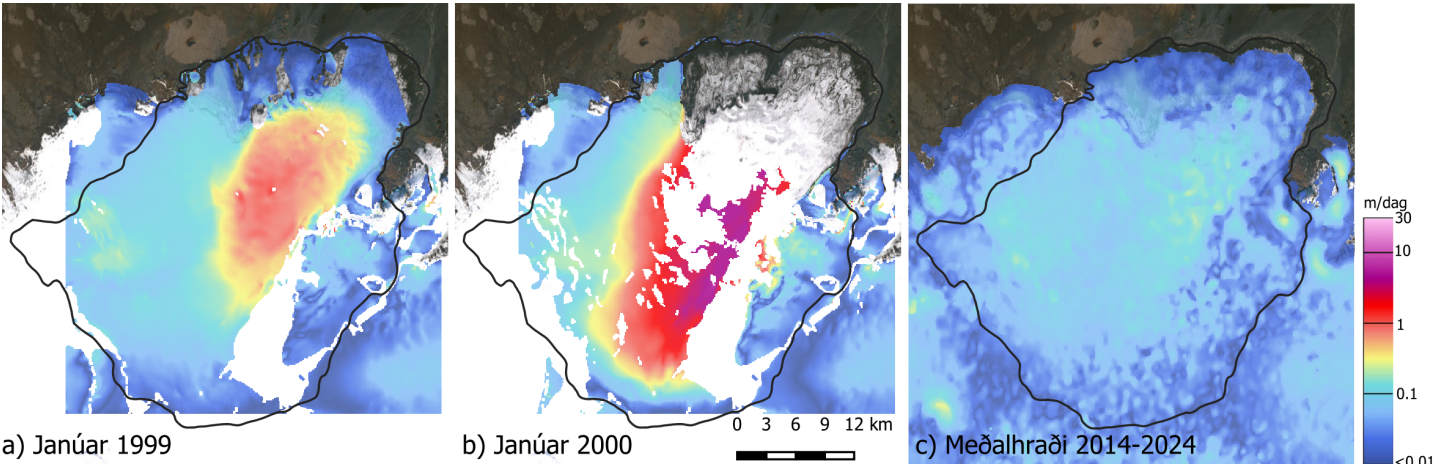
c) Mælingar úr GPS-stöð á Skeiðarárjökli í ágúst 2006 sýna breytileika í skriðhraða innan dagsins.⁴⁰ – Measurements from a GPS station on Skeiðarárjökull recorded in August 2006, showing sub-daily variability of ice flow.

unnin fyrir marga aðra jökla hér á landi.^{5,6,47} Hérlandis eru einstakar aðstæður til rannsókna á þessu sviði sökum auðvelds aðgengis að jökulsporðum og lítillar gróðurhulu framan jökuls. Þessar rannsóknir hafa aukið mjög þekkingu á landmótun af völdum framhlaupa og kennt jarðfræðingum hvernig þekja má svæði þar sem framhlaup hafa haft áhrif á landslag og mótað það.

Ekki hefur enn náðst góður skilningur á orsök eða eðli framhlaupa. Líkur benda þó til þess að vatn undir þrýstingi við jökulbotn komi þar við sögu.^{52–54} Framhlaup byrja oft tiltölulega ofarlega á jöklinum og berast síðan undan halla sem eins konar bylgja á yfirborðinu, þar sem jökulskriðið er mun hraðara ofan bylgjunnar en neðan hennar. Þegar bylgjan nær jökulsporðinum þrýstist hann fram eins og tröllsleg jarðýta, þykknar og springur. Einnig eru dæmi um að framhlaups verði vart einhvers staðar inni á miðjum jökli og það deyi út áður en það nær til sporðsins, til dæmis á Vestari-Hagfellsjökli 1998–2000, og fyrir kemur að bylgja í skriðhraða berst upp eftir jöklinum öfugt við skriðstefnuna, eins og þekkt er á Tungnaárjökli. Svo er til í dæminu að framhlaup nái einkum til leysingarsvæðisins, eins

og í framhlaupum í Þjórsárjökli árin 1991 og 1994. Sú regla sem virðist vera á tímabili milli framhlaupa í sama jökli hefur heldur ekki verið skýrð, né heldur mismunur á milli svæða á jörðinni. Á Íslandi eru framhlaup algeng⁵⁵ en miklu fátíðari í Ölpunum og Skandinavíu til dæmis. Framhlaupsjöklar á Íslandi og svæði framan við þá eru því kjörinn vettvangur fyrir ungt vísindafólk til þess að láta að sér kveða og auka þekkingu okkar á þessari hegðun jökla með frekari rannsóknum. Frá því að Sentinel-1-tunglin hófu að afla ratsjármynda árið 2014 hefur ekki komið til umtalsverðra framhlaupa í íslenskum jökluum. Þó sáust ummerki um lítið framhlaup í Kverkjökli eftir 2008,⁵⁶ í Entujökli árið 201939 og Teigardalsjökli í Svarfaðardal 2023–2025 (Skafti Brynjólfsson, munnl. uppl.). Á tímabilinu 1995–2000 öfluðu ERS1/2-gervihnettir ESA fjölda bylgjuvíxlmynda af íslenskum jökluum sem sýna sólarhringshreyfingu þeirra.⁵⁷ Þau gögn sýna Tungnaár- og Sylgjujökul (í vestanverðum Vatnajökli) og Þjórsárjökul í Hofsjökli í framhlaupi árið 1995, sem og framhlaup Dyngjujökuls 1999–2000 (13. mynd). Þegar kemur að næsta stóra framhlaupi má gera ráð fyrir að fjarkönnun á skriðhraða og hæð jökulyfirborðs komi að miklum notum við rannsóknir.

13. mynd. Skriðhraði mældur með bylgjuvúxlmyndum teknar af ERS1/2 gervitunglum ESA á Dyngjujökli. Svört lína sýnir mörk ísaskila á jöklinum. – Flow velocities measured with interferometry at Dyngjujökull. The black line shows the ice-divide boundary of Dyngjujökull.



a) Skriðhraði mældur í janúar 1999 þegar framhlaup Dyngjujökuls var í upphafsfasa. – Flow velocity measured in January 1999, when the surge of Dyngjujökull was in its initial phase.

b) Skriðhraði mældur í janúar 2000 þegar framhlaup Dyngjujökuls var nærri hámarki. – Flow velocity measured in January 2000, when the surge of Dyngjujökull was at or near its peak.

c) Meðalskriðhraði á tímabilinu 2014 til 2024. Sýnir meðalástand jökulsins þegar framhlaupa gættir ekki. – Average flow velocity for the period 2014–2024, showing the typical state of the glacier when no surge activity is present.

Oft verður yfirborð jökla í framhlaupi alsett stórum sprungum sem geta legið bæði samsíða skriðstefnunni og þvert á hana, og er jökullinn þá ófær með öllu. Þess vegna er mikilvægt að fylgjast með framhlaupum og vara jöklafera við hættulegum svæðum. Slík svæði kunna að vera merkt sem ágætlega fær á úppfærðum kortum og gögnum í GPS-tækjum sem notuð eru til þess að velja leiðir á jökli. Frá árinu 2010 hefur Landsbjörg í samstarfi við hóp vísindamanna gefið út sprungukort sem sýna þekkt sprungusvæði og sigkatla, og gagnast fyrir ferðalög um jökla.

JÖKULHLAUP

Jökulhlaup eru skyndileg vatnsflóð frá jökulum. Þau eiga oftast uppruna sinn í jökulstífluðum lónum en ísbráðnun af völdum eldgosa og jarðhita getur einnig valdið jökulhlaupum. Jökulstífluð lón geta myndast á mismunandi hátt en algengast er að vatn safnist fyrir í dölum eða dalverpum sem skriðjökla hafa lokað.⁵⁸ Jökulhulin lón myndast vegna jarðhita undir hvílt í yfirborði jökuls. Bræðsluvatn vegna ísbráðunar við botninn og yfirborðsvatn rennur með jökulbotni að slíkum hvíltum og getur myndað þar lón með svipuðum hætti og stöðuvötn verða til þar sem vatn safnast fyrir í lægðum í landslagi.⁵⁹ Hérlandis er oft talað um þessi fyrirbrigði sem katla, samanber heitin Skaftárkatlar og Kötlukatlar.

Flæði vatns í jökulhlaupum er í eðli sínu óstöðugt. Varmi frá losun stöðuorku flæðandi vatns bræðir ís. Við það stækkar vatnsfarvegurinn undir jöklinum og eykur vatnsflæðið meðan af nægu vatni er að taka.^{60,61} Þegar jökulstíflað lón nær tengingu við rennslisleiðir undir jöklinum eykst rennsli úr því og jökulhlaup

hefst. Það er misjafnt hvernig lón ná tengingu við rennsliskerfið og ólíkir flöskuhálsar stýra flæði hvers hlaups og vatnsmagni þess. Jökulhlaup geta verið hamfaraflóð sem jafnast á við stærstu fljót í heimi en eru stundum aðeins lítilliga aukinn vatnagangur í ám (14. mynd). Sem dæmi um hamfaraflóð má nefna Skeiðarárhlaupið 1996^{62,63} og Kötluhlaupið 1918,⁶⁴ en dæmi um minni jökulhlaup eru hin nær árlegu hlaup úr jarðhitaköttlum undir Mýrdalsjökli í Múlakvísl og Fremri-Emstruá.⁶⁵ Slík hlaup hafa stundum verið kölluð jarðhitaleki.

Helstu upprunastaðir jökulhlaupa á Íslandi eru jarðhitakatlar undir Mýrdalsjökli, Skaftárkatlar í vestanverðum Vatnajökli og Grímsvötn. Einnig koma hlaup úr jökulstífluðum lónum í Fossadal í Esjufjöllum og í Innri-Veðurárdal, en þeirra verður ekki mikið vart þar sem þau renna undir Breiðamerkurjökul og beint í Jökulsárlón. Einnig eru þekkt jökulhlaup úr Gengissigi í Kverkfjöllum og úr Hafrafellslóni við vestanverðan Langjökul. Það er nýlegt jaðarlón sem valdið hefur hlaupum í Svartá og Hvítá í Borgarfirði síðan 2017 að minnsta kosti.⁶⁶ Myndun Hafrafellslóns og úr Vatnsdalslóni austan Heinabergsjökuls í kjölfar þynningar jökulsins sýnir þau áhrif sem jöklabreytingar geta haft á jökulhlaup og hættu af þeirra völdum.

Á síðustu áratugum hafa eldgos eða aukin jarðhita-virkni undir jökli valdið nokkrum stórum jökulhlaupum. Má þar helst nefna Skeiðarárhlaupið 1996 í kjölfar Gjálpargossins, jökulhlaup niður Gígjökul og sunnanverðan Eyjafjallajökull samfara eldgosum 2010, hlaup undan Sólheimajökli 1999, hlaup undan Kötlujökli í Múlakvísl 2011, hlaup undan Köldukvíslar-jökli 2011 sem fór í Hágöngulón, og hlaup undan

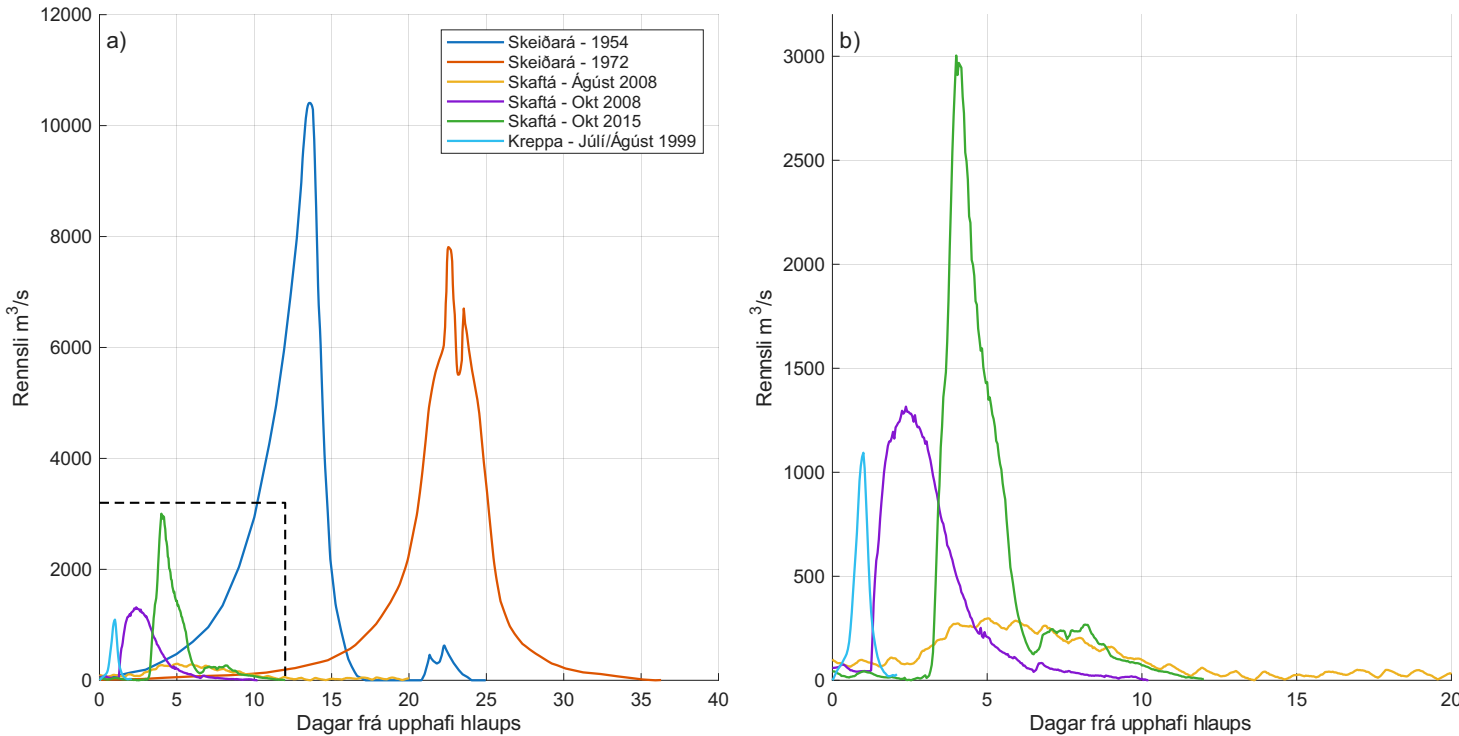
Sandfellsjökli sem gekk í Syðri-Leirá og þaðan í Skálm sumarið 2024.

Jökulhlaup eru ein helsta náttúruvá sem tengist jökulum. Hlaup hafa valdið mannskaða fyrr á öldum. Heimildir eru um mannlát í hlaupi í Jökulsá á Fjöllum 1684.¹³ Maður féll í Jökulsá á Breiðamerkursandi 1927 þegar ís yfir útfalli jökulhlaups undan jöklinum hrundi. Þá fórust maður og hestur í jökulkleri sem myndaðist við bráðnun ísjaka sem hlaup úr Grímsvötnum árið 1861 bar fram á Skeiðarársand.¹³ Jökulhlaup hafa einnig valdið miklu tjóni á innviðum, svo sem rættarlandi, vegum, brúm og byggingum.⁶⁷

Jökulhlaup eru algeng á Íslandi, einkum vegna þess að hérlandis er bæði um að ræða hlaup úr dölum eða dalverpum sem skriðjökla hafa lokað og hlaup af völdum jarðhita og eldvirkni undir jökulum. Fjölmargar lýsingar eru til á jökulhlaupum og þekking á hegðun þeirra mikil. Vísindalegar rannsóknir á jökulhlaupum hófust því fyrr hér en víðast hvar annars staðar^{68–71} og hefur það leitt til þess að í fræðilegri umfjöllun um þetta náttúrufyrirbrigði er íslenska orðið jökulhlaup notað. Orðið jökulhlaup er alþjóðlega viðurkennt fræðiorð um það sem sem á ensku er nefnt „glacial lake outburst flood“ og skammstafað GLOF.

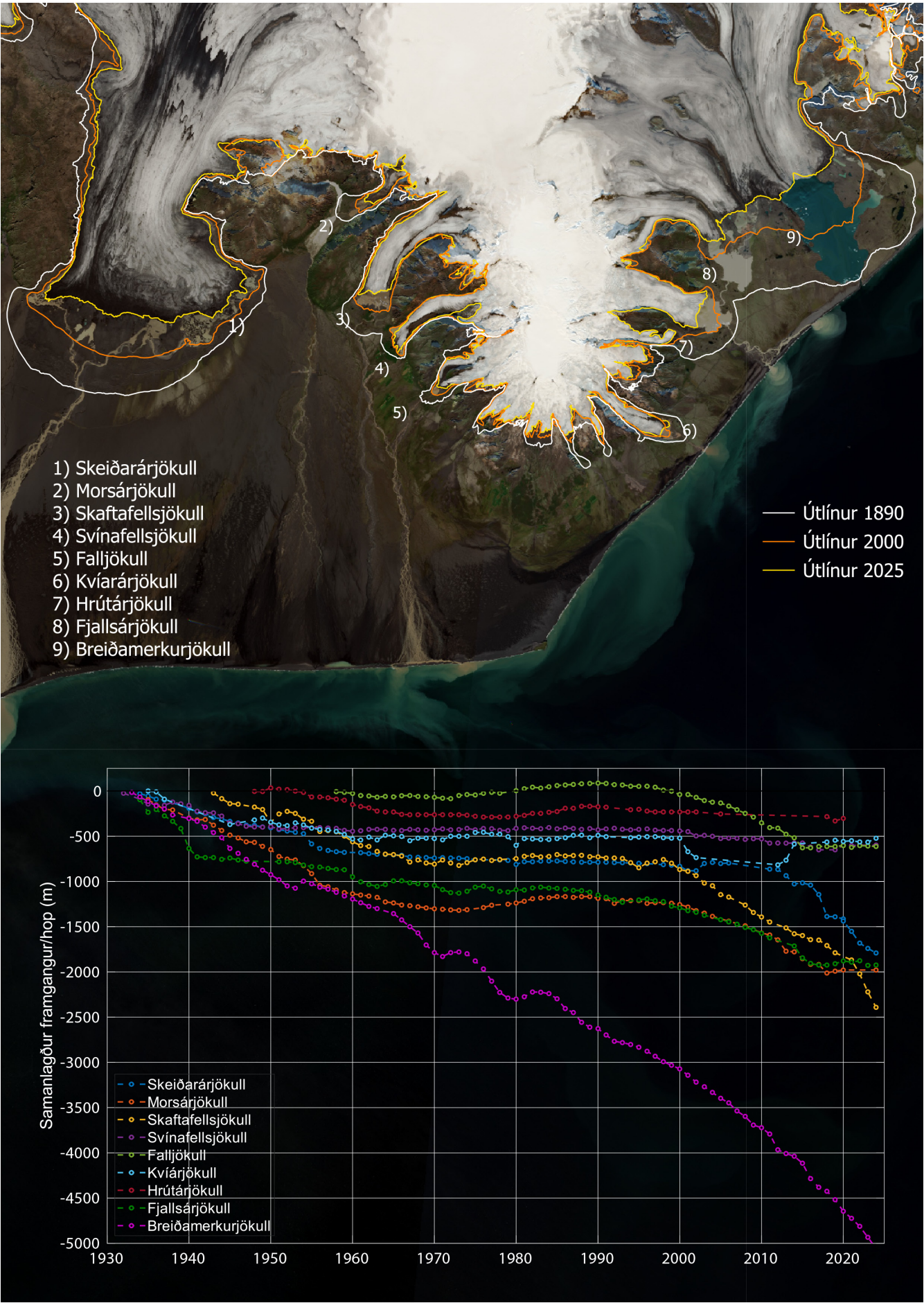
Þörfin fyrir að skilja og þekkja jökulhlaup hér á landi leiddi til þess að greining Helga Björnssonar⁶⁰ og rennslismælingar Sigurjóns Rists⁷² á hlaupum

14. mynd. Rennslisferlar valinna jökulhlaupa á Íslandi. Gögn frá Veðurstofu Íslands. – Hydrographs of selected jökulhlaups in Iceland. Data from the Icelandic Meteorological Office.



a) Valdir rennslisferlar jökulhlaupa í Skeiðará, Skaftá og Kreppu. Myndin sýnir þann mikla breytileika rennslis sem jökulhlaup hafa eftir uppruna sínum. – Selected hydrographs of jökulhlaups in Skeiðará, Skaftá, and Kreppa. The figure highlights the large flow variability that jökulhlaups can exhibit depending on their source.

úr Grímsvötnum urðu grunnurinn að fræðilegum líkanreikningum slíkra flóða.⁶¹ Grímsvatnahlaup hafa verið kölluð hægrísandi eða veldisvaxandi hlaup og rennslisrit þeirra ræðst af bráðnun hlauprásarinnar í eða undir ísnum.⁷³ Íslensk jökulhlaup hafa einnig verið nýtt til rannsókna á hraðrísandi eða línulega rísandi hlaupum, þar sem þrýstibylgja með vatnsþrýsting yfir fargþrýstingi jökulsins brýst fram.^{73,74} Rannsóknir á jökulhlaupum úr Skaftárköttlum og Grímsvötnum hafa á síðari árum sýnt að lyfting jökuls vegna vatns-söfnunar við botn getur átt sér stað í hægrísandi jökulhlaupum. Einnig geta hraðrísandi jökulhlaup runnið í rásum sem myndast við jökulbotn þar sem ís bráðnar í hluta farvegarins.⁷⁵ Báðar þessar gerðir hlaupa valda margföldun í skriðhraða jökulsins vegna hlaupvatns sem dreifist um stóran hluta jökulbotns í nágrenni rennslisleiða og virkar sem smurning á mótum botns og íss.^{57,75} Jökulhlaup falla því ekki einvörðungu í tvo meginflokka hæg- og hraðrísandi jökulhlaupa, heldur mynda róf á milli þessara megingunda. Það er því líkt á komið með jökulhlaupafræði og öðrum náttúruvísindum, og mannlífni, að tvíhyggja tveggja meginflokka dugir ekki til að lýsa að fullu fjölbreytileika náttúrunnar.



15. mynd. T.v. Útlínur Vatnajökuls á mismunandi tíma og sporðamælingar fyrir valda skriðjökla Vatnajökuls. Sporðamælistaðir, þar sem sjálfbóðaliðar Jöklarannsóknafélagsins hafa stundað mælingar áratugum saman, eru sýndir með númerum við hvern jökul. Línuritið sýnir samanlagðan framgang eða hop jöklanna frá upphafi mælinga – Glacier outlines of Vatnajökull at various times and frontal measurements for selected outlet glaciers. Individual outlet glaciers have retreated from several hundred m up to a few km since around 1890. The sites where volunteers of the Iceland Glaciological Society conduct their measurements are numbered. The plot shows the advance and retreat of selected outlet glaciers with continuous record of frontal measurements.

ÞRÓUN JÖKLA FRÁ LITLU ÍSÖLD

Jöklar í heiminum hafa hörfað frá hámarksútbreiðslu sinni á litlu ísöld, kuldaskeiðinu sem hófst á 14. öld og stóð til aldamótanna 1900. Á öðrum áratug síðustu aldar hófst hlýndaskeið hér á landi og náði hámarki á fjórða áratug 20. aldar, en um miðja öldina tók að kólna á ný og hélst sú þróun fram á miðjan tíunda áratuginn.⁷⁶ Þá hlýnaði aftur, og stendur þetta hlýnda-tímabil enn. Jöklar leitast við að vera í jafnvægi við loftslag á hverjum tíma og eru eins konar minnisbækur náttúrunnar; geyma sögu loftslagsins um aldir.

Með kortlagningu á ystu jökulgörðum, hæstu jaðarurðum, roflinum og grettistöfum má finna líklegar útlínur jöklanna þegar þeir voru hvað stærstir á litlu ísöld. Langflestir jöklar á Íslandi tóku að hörfa frá þessari hámarksstöðu um 1890, samfara hlýnandi loftslagi, en þá var jökulhulið land um 12.600 km². Jöklar hafa síðan minnkað um 2.500 km², eða um 20%, sem samsvarar því að Hofsjökull, Langjökull og Mýrdalsjökull, eins og við þekkjum þá nú, væru horfnir. Flatarmálsrýrnunin frá lokum litlu ísaldar fram á miðja 20. öld var um 1.000 km². Tæplega 40% af flatarmálsrýrnuninni síðan um 1890 varð eftir aldamótin 2000, en á síðastliðnum rúmum tveimur áratugum hafa jöklar tapað að meðaltali um 40 km² árlega.⁷⁷

Jöklar á Íslandi hylja nú (2025) um 10.009 km² (1. tafla). Stærstu jöklarnir (>500 km²) hafa tapað 10–30% af flatarmáli sínu frá hámarki litlu ísaldar, margir minni jöklar (3–40 km² árið 2000) hafa tapað allt að 80% flatarmáls og frá síðustu aldamótum hafa um 70 smájöklar horfið. Flatarmál þeirra flestra var á bilinu 0,1–3 km² í upphafi aldarinnar. Á Tröllaskaga eru horfnir rúmlega 20 jöklar sem töldust nægilega merkilegir til þess að ganga undir eigin nafni,²⁵ á Austfjörðum, 10 nærri Vatnajökli, 8 í Kerlingarfjöllum, 2 nærri Langjökli og 3 á öðrum svæðum landsins. Fyrirséð er að fleiri nafnkunnir jöklar muni hverfa á næstu áratugum. Meðal þeirra eru Hofsjökull eystri, Þrándarjökull, Torfajökull og Kaldaklofsjökull (1. tafla).⁷⁷

Á fyrri hluta 20. aldar var ljóst að margir jökulsporðar voru teknir að hopa og árið 1930 var komið á fót sjálfbóðaliðaverkefni um sporðamælingar undir forystu Jóns Eypórssonar veðurfræðings.⁷⁸ Verkefnið var síðar tekið upp hjá Jöklarannsóknafélagi Íslands við stofnun þess árið 1950 og stendur enn.⁷⁹ Á hverju hausti er mæld vegalengd að jökulsporði frá föstum viðmiðunarstað sem upphaflega var merktur

með vörðu eða járnstöng. Fyrstu áratugina voru ýmist notuð málbönd eða spotti af þektri lengd til þess að mæla fjarlægðina, en nú eru oftast notuð GPS-tæki og fjarlægðarmælar til þess að skrá stöðu sporðanna. Sporðamælingarnar eru fyrstu samfelldu og kerfisbundnu mælingar á breytingum jökla á Íslandi. Mælingarnar sýna skýr tengsl veðurfars- og jöklabreytinga en gagnasafnið geymir einnig upplýsingar um framhlaup margra skriðjökla. Ólíkt flatarmálsmati jökla, sem er byggt á kortum og loftmyndum, sem eru fáar á síðustu öld, veita sporðamælingar árlegt mat á framgangi eða hörfun jökla og geta því lýst jöklabreytingum með meiri tímaupplausn. Nú er reyndar slíkur fjöldi gervihnatta á braut um jörðu að hægt er að meta flatarmál jökla árlega, og jafnvel innan ársins. En sporðamælingar á jörðu niðri eru engu að síður gagnlegar vegna þess að í þeim felast beinar athuganir og ljósmyndun á jöklunum og nágrenni þeirra.

Frá síðustu aldamótum hafa langflestir jökulsporðar hörfað á ári hverju og er breytingin einna mest á stærri skriðjökklum Vatnajökuls, Langjökuls og Mýrdalsjökuls. Dæmi eru um að skriðjökla þeirra hörfi um allt að 100–200 m árlega. Mesta hopið sem mælst hefur er við Breiðamerkurjökul, þar sem mælingar hafa sýnt allt að 300 m hop milli ára^{80,81} (15. mynd).

Vísindamenn hafa í rúma öld leitast við að skilja þessar jöklabreytingar og orsakir þeirra og hefur afkomusaga íslenskra jökla frá lokum litlu ísaldar nýlega verið tekin saman.⁸² Þessi saga er rakin með því að nýta ólík gagnasöfn frá mismunandi tímum og aukast upplýsingar sem nýta má í slíkar rannsóknir mikið þegar kemur fram á síðari hluta 20. aldar. Áður en reglulegar afkomumælingar hófust, eða fyrir níunda áratug síðustu aldar, voru athuganir ekki nægar til að meta breytileika í afkomu milli ára eða áratuga. Því hefur verið stuðst við flatarmáls- og rúmmálslíkan til þess að áætla heildarbreytingar yfir lengri tímabil, en samband flatarmáls og rúmmáls jökla má nýta til þess að áætla massabreytingar.⁸³ Eftir níunda áratug síðustu aldar liggja hins vegar fyrir árlegar athuganir og ýtarlegri, sem gera kleift að meta bæði massa- og rúmmálsbreytingar með mun meiri nákvæmni og hærri tímaupplausn.^{18,19}

Íslenskir jöklar hafa frá lokum litlu ísaldar til ársins 2025 tapað 600 ± 130 gíгатонnum. Það jafngildir um 17 ± 4% af massa jöklanna um 1890, eða að meðaltali 4,2 ± 1,0 Gt á ári. 1 gíгатонn jafngildir ~1 cm af vatni, jafndreift yfir Ísland. Massatapið frá því um 1890 samsvarar um 1,6 mm sjávarstöðuhækkun heimshafanna. Árið 2025 var heildarrúmmál íslenskra jökla um 3.330 km³, sem svarar til um 9 mm hækkunar sjávarstöðu ef þeir bráðnuðu allir.⁸² Um helmingur jökulrýrnunarinnar eftir lok 19. aldar, 240 ± 20 Gt, hefur átt sér stað frá árinu 1994/95, og nemur að meðaltali 9,6 ± 0,8 Gt á ári. Hraðasta rýrnunin mældist á tímabilinu 1994/95 til 2009/10, að meðaltali 11,6

Tafla 1

Þróun flatarmáls jökla á Íslandi frá lokum litlu ísaldar (~1890 til 2025).⁷⁷ Dálkarnir sýna mat á flatarmáli jökla landsins á ákveðnum tímapunkti. Öftustu tveir dálkarnir sýna annars vegar hlutfallslegt tap á 20. öld (1890–2000) og svo það sem af er 21. öld (2000–2025). – Area of glaciers in Iceland for selected years since the end of the Little Ice Age (~1890 to 2025). ⁷⁷ The last two columns show area decrease of the 20th century (1890–2000) and the first quarter of the 21st century (2000–2025).

	~1890 km²	1945/1946 km²	~2000 km²	~2010 km²	2025 km²	Tap á 20. öld (1890–2000)	Tap á 21. öld (2000–2025)
Vatnajökull	8.789	8.326	8.122	7.881	7.569	7,6%	6,8%
Langjökull	1.093	992	921	896	811	15,7%	11,9%
Hofsjökull	1.038	948	892	852	788	14,1%	11,7%
Mýrdalsjökull	736	652	594	562	502	19,3%	15,5%
Drangajökull	220	161	146	144	134	33,6%	8,3%
Eyjafjallajökull	116	87	81	72	62	30,2%	23,5%
Tungnafellsjökull	53,7	39,7	39,2	34,3	30,6	27,0%	21,9%
Þórisjökull	44	30	30	24,4	22,2	31,8%	26,0%
Eiríksjökull	37,3	25,3	22,6	22,8	19,8	39,4%	12,4%
Þrándarjökull	34,5	27	17	14,9	12	50,7%	29,4%
Tindfjallajökull	22,6	16,8	15,6	13,2	11,2	31,0%	28,2%
Snæfellsjökull	25,0	13,9	12,5	9,9	7,8	50,0%	37,6%
Torfajökull	22,8	16,0	11,4	9,3	6,7	50,0%	41,2%
Hofsjökull eystri	11,6	7,1	5	3,5	2,2	56,9%	56,0%
Hrútfellsjökull	10,8	7,7	8,3	5	4	23,1%	51,8%
Okjökull	10,3	7,4	4	1,5	0	61,2%	100,0%
Kaldaklofsjökull	7,9	3,9	2,5	1,8	1,3	68,4%	48,0%
Snæfell (Tindsjökull)	8	5,3	5	4,3	3,6	37,5%	28,0%
Tröllaskagi	201	192	126	113,4	92,7	37,3%	26,4%
Flateyjarskagi	18,4	15,2	10,8	9,72	8,7	41,3%	19,4%
Austurland	10,8	6,7	5,6	5,04	4,4	48,1%	21,4%
Suðausturland	12,6	8,5	6,3	5,67	3,1	50,0%	50,8%
Kerlingarfjöll	13,6	5,8	4,9	4,41	1,5	64,0%	69,4%
Vestfirðir	5,5	3	2	1,8	0,8	63,6%	60,0%
Suðurland	2,5	1,5	1,1	0,99	0,7	56,0%	36,4%
Vesturland	4,1	0,7	0,6	0,54	0,1	85,4%	83,3%
Allir jöklar	12.549	11.600	11.087	10.693	10.099	11,7%	8,9%

± 0,8 Gt á ári. Eftir 2010 hefur meðalhraði rýrnunar hins vegar verið um helmingi hægari, þó með undantekningum. Sérstaklega stóð árið 2018/19 upp úr, þegar árlegt massatap mældist 15,0 ± 1,6 Gt.^{76,82} Gögnin sýna einnig að afkoma íslensku jöklanna fylgir vel sveiflum í hita. Á árunum 1930/31 til 1949/50 var meðalrýrnun jöklanna líklega svipuð og mælst hefur eftir 1994. Marktæk massaaukning varð á árunum 1980/81–1993/94, eða að meðaltali 1,5 ± 1,0 Gt á ári.

Miklar breytingar hafa orðið á landslagi framan við marga skriðjökla á undanförnum áratugum. Sporðlón hafa víða myndast og önnur stækkað þar sem jöklarnir hafa grafið djúpar dældir.⁸⁴ Lónin hafa áhrif á stöðu jökulsporðanna og er þess að vænta að fleiri jökulsporða bíði sömu örlög og Heinabergs-

jökuls og Hoffellsjökuls sem hafa verið að brotna upp á síðastliðnum árum.

FRAMTÍÐ ÍSLENSKU JÖKLANNA

Líkanreikningar benda til þess að jöklar heimsins rýrni tvöfalt meira við 2,7°C hlýnun en við 1,5°C hlýnun fram til 2100.⁸⁵ Spár benda til þess að jöklar í öllum heimshlutum haldi áfram að tapa massa og að núverandi stærð þeirra, ásamt hraða hlýnunar, ráði mestu um hversu fljótt þeir hverfa eða dragast verulega saman.⁸⁶ Litlu jöklarnir fara fyrst. Nú þegar eru margir þeirra alveg horfnir og líkanreikningar benda til að um 60% jökla sem eru minni en 1 km² hverfi vegna hlýnunar sem þegar hefur átt sér stað. Hlýni meira



gætu rúmlega 90% lítilla jökla í heiminum horfið.

Íslenskra jökla bíður áframhaldandi rýrnun vegna loftslagsbreytinga. Spálíkön sýna að framhaldið ræðst að miklu leyti af því hversu hratt tekst að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda á næstu áratugum. Jöklalíkön byggjast á reikningum á afkomu jökulsins og ísflæði. Til þess að hægt sé að líkja eftir viðbrögðum jökulsins við breytingum í veðurfari þarf margvísleg gögn, meðal annars botn- og yfirborðskort, og tímaraðir hita og úrkomu. Til þess að stilla líkönin eru notuð gögn um afkomu og rúmmáls- og flatarmálsbreytingar jökulsins frá fyrri tíð.

Líkanreikningar fyrir Vatnajökul sýna að fram til ársins 2100 verður rúmmálstap hans um það bil 20%, óháð sviðsmyndum um framhald loftslagsbreytinga.⁸⁷ Eftir það skiptir miklu máli hversu mikil losun gróðurhúsalofttegunda verður. Ef hlýnun takmarkast við 2°C við lok aldarinnar, í samræmi við markmið Parísarsamningsins, gæti Vatnajökull fundið nýja jafnvægisstærð í hlýrra loftslagi með um 30–60% af núverandi rúmmáli. Eldri líkanreikningar fyrir Hofs-jökul og Langjökul bentu til að 2°C hlýnun gæti orðið til þess að þeir hyrfu alveg á um 200–300 árum.⁷

Eins og komið hefur fram hverfa minni jöklarnir fyrst. Ekki hefur verið lögð jafnmikil áhersla á að meta framtíð þeirra á Íslandi og hinna stærri, meðal annars vegna þess að ófullkomnari gögn eru til um þá en stærri jöklana. Nýlega hefur framtíð Hofsjökuls eystri verið metin, enda er hann talinn eiga stutt eftir.⁸⁸ Frá lokum litlu ísaldar hefur jökullinn tapað um 80% af flatarmáli sínu (~11,6 km² um 1890, ~2,2 km² haustið 2025) og talið er að innan 30 ára verði hann allur (16. mynd).

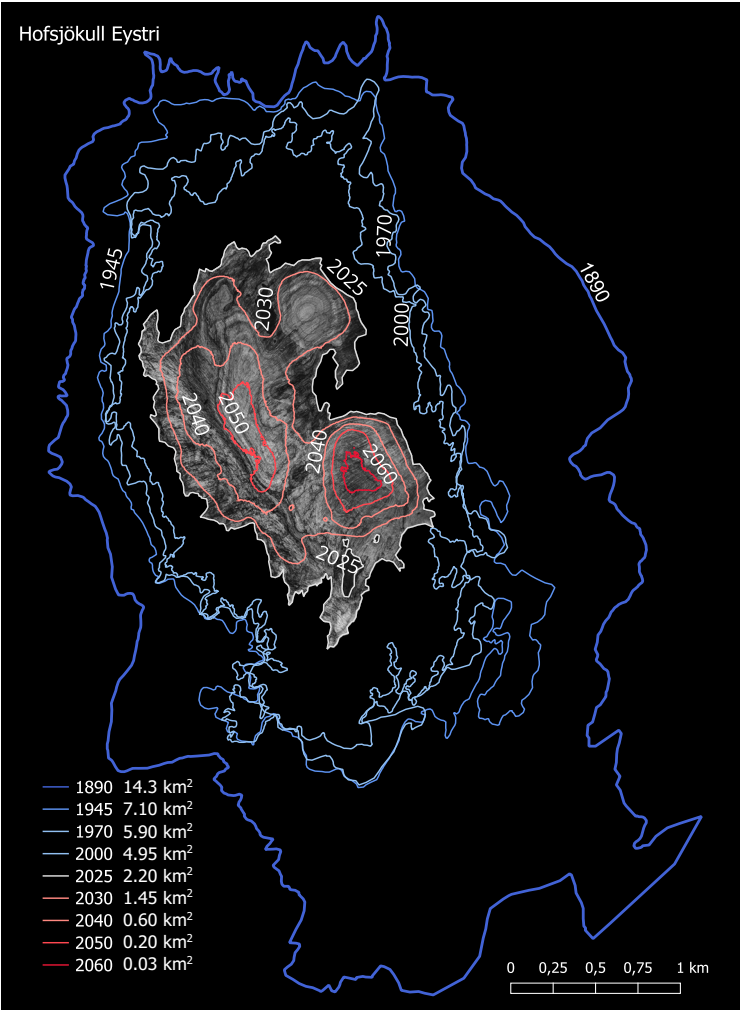
Alþjóðlegar rannsóknir, þar sem teknir eru fyrir allir jöklar í heiminum, hafa einnig rakið þróun íslenskra jökla. Í einni slíkri rannsókn er byggt á sex jöklalíkönum sem keyrð voru með fjórum loftslags-sviðsmyndum og 25 mismunandi lofthjúpslíkönum.⁸⁸ Niðurstöður rannsóknarinnar sýna að fyrir köldustu sviðsmyndina verður massatap til ársins 2100 um 18% af heildarmassa jökla í heiminum (m.v. 2015). Hins vegar verður massatapið um 36% ef hlýjasta

sviðsmyndin nær fram að ganga. Þá rýrna íslenskir jöklar um 30–50% af núverandi massa sínum, sem er í samræmi við þá líkanreikninga fyrir Vatnajökul, Hofsjökul og Langjökul sem nefndir voru hér að framan.

Margir óvissuþættir eru um þróun jökla á jörðinni og hefur þeim verið skipt í fjóra meginflokka.⁹⁰ Stærsti óvissuþátturinn á seinni hluta 21. aldar varðar losun gróðurhúsalofttegunda og kemur fram í mismunandi loftslagssviðsmyndum. Á fyrri hluta aldarinnar tengist stærsti óvissuþátturinn mismunandi jökla- og lofthjúpslíkönum. Óvissa vegna náttúrulegs breytileika í veðurfari er um 30% af heildaróvissu í upphafi aldarinnar en minnkar þegar líður á öldina. Þessi óvissa getur tímabundið haft veruleg áhrif á einstök svæði, svo sem Ísland, eyju í miðju Norður-Atlantshafi þar sem breytingar á hafstraumum geta skipt miklu máli.

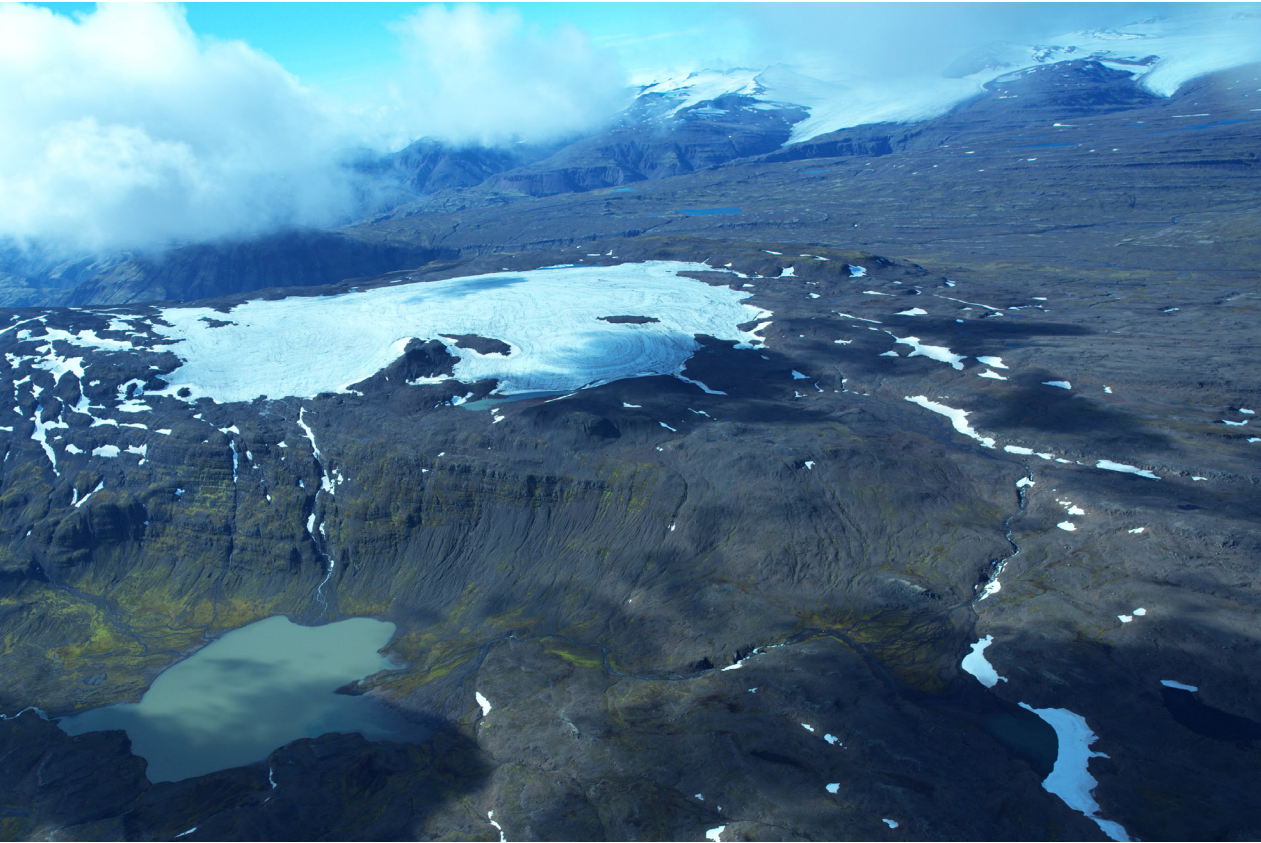
Verði hafsvæðin sunnan Íslands og Grænlands áfram kaldari en nærliggjandi svæði á næstu ára-tugum, líkt og verið hefur undanfarið, eða ef dregur úr styrk veltihringrásar hafsins í Norður-Atlantshafi, má gera ráð fyrir að rýrnun íslenskra jökla verði hæg fram undir miðja öldina en herði á sér eftir það.⁹⁰ Þetta kaldara svæði verður ekki til í öllum lofthjúpslíkönum og því er mikil óvissa um þróunina hér næstu áratugi. Í sumum líkönum er hlýnunin suður af landinu meiri, sem myndi leiða til hraðari rýrnunar jökla á Íslandi. Það yrði þá sambærileg við þróun annarra jökla heimsins, eða um 40–50% rýrnun til 2100. Rýrnun jökla á Íslandi á komandi áratugum hefur margvísleg og víðtæk áhrif á náttúru og samfélag. Þegar skriðjöklar hörfa myndast jökullón í djúpum dölum sem þeir hafa grafið og hætta eykst á skriðuföllum úr hliðum sem jöklar lágu áður upp að.⁹¹

Rennsli jökuláa eykst tímabundið með vaxandi leysingu en þegar stærð jöklanna nær ákveðnum vendipunkti dregur úr rennslinu og rennslisaukningin gengur til baka. Samhliða vaxandi rennsli eykst aurburður í ánum tímabundið. Breytingar á farvegum verða algengar. Sumir farvegir hverfa og aðrir myndast og brýr gætu staðið á þurru.



16. mynd. Fortíð og framtíð Hofsjökuls eystri. Bláar línur sýna útlínur jökulsins frá lokum litlu ísaldar fram til haustsins 2025 með hvítri útlínu og loftmynd sem tekin var í ágúst 2025. Rauðar línur sýna líklega þróun á útlínunum jökulsins miðað við þróunina undanfarin ár.⁸⁸ – Past and future of Hofsjökull eystri. The blue lines show the glacier's outlines from the end of the Little Ice Age up to autumn 2025, with a white outline and an aerial photograph taken in August 2025. The red lines show the likely future development of the glacier's outline based on the trends observed in recent years.

Hofsjökull eystri 2024. Ljósmynd /Photo: Birgir Óskarsson



Við rýrnun jökla minnkar farg þeirra á jarðskorpuna og landið rís, einkum nærri jökuljaðrinum. Þetta veldur óvissu um framtíð ýmissa mannvirkja og innviða. Sem dæmi má nefna Hornafjarðarós þar sem landris er mun hraðara en hækkun sjávarborðs. Ósinn grynnist því stöðugt, sem veldur vandræðum fyrir skipaumferð.

Rýrnun jökla hefur einnig áhrif undir yfirborði jarðar. Farglétting jarðskorpunnar er talin örva kvikuframleiðslu ofarlega í möttlinum og auka líkur á eldgosum þegar frá líður. Hérlandis á þetta einkum við um Vatnajökul.⁹² Þessi hugsanlegu tengsl milli rýrnunar jökla og aukinnar eldvirkni minna á hversu margslungin tengsl eru milli breytinga á loftslagi, jöklum og jarðfræði.

Dæmin sem rakin eru hér að framan sýna að rýrnun jökla hefur áhrif bæði á landslag og vistkerfi, náttúruvá, innviði og jafnvel eldvirkni. Hún er áminning um að jöklarnir eru ekki aðeins náttúruundur heldur lykilþáttur í náttúru landsins og breytingar á þeim hafa afleiðingar sem ná langt út fyrir jökuljaðarinn.

SAMANTEKT

Jöklarnir eru óaðskiljanlegur hluti íslenskrar náttúru og hafa mótað loftslag, vatnafar, landslag og efnahag þjóðarinnar. Rannsóknir sýna að þeir hafa rýrnað frá lokum litlu ísaldar, margir gengu fram þegar kólnaði eftir miðja 20. öld. En jökulrýrnunin hefur verið hröð frá miðjum 10. áratug síðustu aldar. Þessi þróun hefur viðtæk áhrif, allt frá landrisi, aukinni kvikuframleiðslu, myndun jökullóna og breyttu rennsli vatnsfalla til áhrifa á samfélagsinnviði, byggð og öryggi ferðamanna.

Með reglulegum mælingum, líkangerð og nýtingu fjarkönnunargagna geta vísindamenn fylgst náið með breytingum jöklanna, skriði þeirra, framhlaupum, flatarmáls- og rúmmálsbreytingum. Rannsóknir á íslenskum jöklum hafa ekki aðeins fært okkur Íslendingum dýrmæta þekkingu heldur einnig lagt mikilvægan skerf til alþjóðlegra jöklarannsókna. Þær hafa veitt innsýn í samspil jökla og eldvirkni, aukið vitneskju um orsakir jökulhlaupa, varpað ljósi á sögu loftslagsbreytinga og bætt skilning á framtíð jöklanna á jörðinni í breyttu loftslagi.

Niðurstöður jöklarannsókna eru grunnur að áreiðanlegu mati á framtíðarþróun jökla og lykilþáttur í aðlögun að loftslagsbreytingum hér á landi. Án kerfisbundinna mælinga, gagnavinnslu og miðlunar minnkar hæfni samfélagsins til þess að bregðast tímanlega við breyttum aðstæðum og nýta tækifæri sem kunna að skapast.

Brýnt er að styrkja langtímavöktun jökla, viðhalda opnum gagnasöfnum og koma skýrum og aðgengilegum upplýsingum til almennings og hagsmunaaðila. Jöklarnir eru náttúruarfur og mikilvæg auðlind fyrir samfélagið. Jöklarannsóknir og fagleg miðlun niðurstaðna eru lykillinn að skynsamlegri stefnu-

mótun og aðlögun að óhjákvæmilegum loftslagsbreytingum af mannavöldum næstu áratugina.

Síðast en ekki síst: Ef mannkyn nær ekki tókum á losun gróðurhúsalofttegunda er jökullaust Ísland ekki óljós forspá, heldur raunveruleiki sem óðfluga nálgast.

ABSTRACT

Glaciers are an integral part of Iceland's natural environment, shaping its climate, hydrology, landscape, and economy. Research shows that Icelandic glaciers have retreated since the end of the Little Ice Age, with some advances following colder climate after the mid-20th century. Glacier recession has been rapid since the mid-1990s. This ongoing retreat has widespread consequences, including land uplift, changes in river discharge, the formation of pro-glacial lakes, and impacts on infrastructure, settlements, and tourist safety.

Through continuous measurements, modelling, and the use of remote-sensing data, scientists closely monitor changes in glacier dynamics such as ice flow, surges, and variations in area and volume. Studies of Icelandic glaciers have provided not only invaluable local insights but also significant contributions to international glaciology. They have deepened our understanding of glacier-volcano interactions, glacial outburst floods, past climate variations, and the future of glaciers in a warming world.

The results of glaciological research form the foundation for reliable projections of glacier evolution and are essential for developing climate-adaptation strategies in Iceland. Without systematic monitoring, effective data management, and open dissemination of information, society's ability to respond effectively to changing conditions and emerging challenges is weakened. Strengthening long-term glacier monitoring, maintaining open data repositories, and ensuring clear and accessible communication to the public and stakeholders are therefore of utmost importance. Glaciers are a vital part of Iceland's natural heritage and an important national resource. Glaciological research and effective knowledge sharing are key to informed policymaking and adaptation to the inevitable human-driven climate changes of the coming decades. If global greenhouse gas emissions are not curbed, a glacier-free Iceland may not remain a distant possibility - but a rapidly approaching reality, bringing profound transformation to the nation's landscape.

ÞAKKIR

Við þökkum Þorsteini Jónssyni, Vilhjálmi Kjartanssyni, Sveinbirni Steinþórssyni, Hlyni Skagfjörð Pálssyni, Hannesi H. Haraldssyni, Ragnari Þórhallssyni, Sverrir Guðmundssyni, Ástvaldi Guðmundssyni, sem og sjálfbóðaliðum Jöklarannsóknafélags Íslands.

HEIMILDIR

1. Sameinuðu þjóðirnar 2025. International year of glaciers prevention. Slóð (skoðað 18.11. 2025): <https://www.un-glaciers.org/en>
2. Ólafur Ingólfsson, Hreggviður Norðdahl & Schomacker, A. 2009. Deglaciation and Holocene glacial history of Iceland. *Developments in Quaternary Science* 13. 51–68. doi: 10.1016/S1571-0866(09)01304-9
3. Ívar Örn Benediktsson, Skafti Brynjólfsson & Lovisa Ásbjörnsdóttir 2022. Iceland: Glacial landforms from the Last glacial maximum. Bls. 427–433 (55. kafli) í: *European glacial landscapes: Maximum extent of glaciation* (ritstj. D. Palacios, P.D. Hughes, J.M. García-Ruiz & N. Andrés). Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-12-823498-3.00055-8
4. Krüger, J. 1993. Moraine-ridge formation along a stationary ice front in Iceland. *Boreas* 22(2). 101–109. doi:10.1111/j.1502-3885.1993.tb00169.x
5. Ívar Örn Benediktsson, Schomacker, A., Johnson, M.D., Geiger, A.J., Ólafur Ingólfsson & Esther Rut Guðmundsdóttir 2015. Architecture and structural evolution of an early Little Ice Age terminal moraine at the surge-type glacier Múlajökull, Iceland. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 120. 1895–1910. doi:10.1002/2015JF003514
6. Snævarr Guðmundsson & Evans, D.J.A. 2022. Geomorphological map of Breiðamerkursandur 2018: The historical evolution of an active temperate glacier foreland. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 104. 298–332. doi: 10.1080/04353676.2022.2148083
7. Andri Gunnarsson, Hörður B. Helgason, Óli G.B. Sveinsson & Gunnar G. Tómasson 2024. Climate change, water resources and the hydropower system in Iceland, EGU General Assembly, í Vín 14.–19. apríl 2024. Doi:10.5194/egusphere-egu24-9926
8. Tómas Jóhannesson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Helgi Björnsson, Crochet, P., Elías B. Elíasson, Sverrir Guðmundsson, Jóna Finndís Jónsdóttir, Haraldur Ólafsson, Finnur Pálsson, Ólafur Rögnvaldsson, Oddur Sigurðsson, Árni Snorrason, Óli G.B. Sveinsson & Þorsteinn Þorsteinsson 2007. Effect of climate change on hydrology and hydro-resources in Iceland. *Orkustofnun, Reykjavík*.
9. Matti, S., Helga Ögmundardóttir, Guðfinna Aðalgeirsdóttir & Reichardt, U. 2022. Communicating risk in glacier tourism: A case study of the Svínafellsheiði fracture in Iceland. *Mountain Research and Development* 42(2). D1–D12. doi: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00051.1
10. Welling, J. & Abegg, B. 2021. Following the ice: Adaptation processes of glacier tour operators in Southeast Iceland. *International Journal of Biometeorology* 65. 703–715. doi: 10.1007/s00484-019-01779-x
11. Snorri Baldursson 2021. Vatnajökulsþjóðgarður: Gersemi á heimsvísu. JPV, Reykjavík. 176 bls.
12. Sigurður Þórarinnsson 1956. The thousand years struggle. Bls. 5–33 í: *The thousand years struggle against ice and fire: Two lectures delivered 21 and 26 February, 1952 at Bedford College, London University*. Höf. S.Þ. Menningarsjóður, Reykjavík.
13. Sigurður Þórarinnsson 1974. Vötnin stríð: Saga Skeiðarárhlaupa og Grímsvatnagosa. Menningarsjóður, Reykjavík. 254 bls.
14. Oddur Sigurðsson, Williams, R.S. Jr. & Skúli Víkingsson 2017. Jöklakort af Íslandi. 2. útg. Veðurstofa Íslands, Reykjavík.
15. Oddur Sigurðsson & Williams, R.S. Jr. 2008. Geographic names of Iceland's glaciers: Historic and Modern. *US Geological Survey (Professional Paper 1746)*, Reston. 232 bls. <https://pubs.usgs.gov/publication/pp1746>. doi:10.3133/pp1746
16. Helgi Björnsson 2016. The glaciers of Iceland: A historical, cultural and scientific overview. Atlantis Press, París. 613 bls. doi:10.2991/978-94-6239-207-6.
17. Hálf dán Ágústsson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Þorsteinn Þorsteinsson, Finnur Pálsson & Björn Oddsson 2013. Mass balance of Mýrdalsjökull ice cap accumulation area and comparison of observed winter balance with simulated precipitation. *Jökull* 63. 91–104. doi: 10.33799/jokull2013.63.091
18. Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Eyjólfur Magnússon, Sveinbjörn Steinþórsson & Hlynur Skagfjörð Pálsson 2025. Vatnajökull: Mass balance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2023–24. *Landsvirkjun (LV-2025-009)*, Reykjavík. 56 bls. Slóð (skoðað 21.11. 2025): <https://gogn.lv.is/files/2025/2025-009.pdf>
19. Þorsteinn Þorsteinsson, Tómas Jóhannesson, Oddur Sigurðsson & Bergur Einarsson 2017. Afkomumælingar á Hofsjökli 1988–2017. *Veðurstofa Íslands (VÍ 2017-016)*, Reykjavík. 82 bls.
20. Magnús Tumi Guðmundsson 2000. Mass balance and precipitation on the summit plateau of Öraefajökull, SE-Iceland. *Jökull* 48. 49–54. doi: 10.33799/jokull2000.48.049
21. Crochet, P., Tómas Jóhannesson, Trausti Jónsson, Oddur Sigurðsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson & Barstad, I. 2007. Estimating the spatial distribution of precipitation in Iceland using a linear model of orographic precipitation. *Journal of Hydrometeorology* 8. 1285–1306. doi:10.1175/2007JHM795.1
22. Ólafur Arnalds, Pavla Dagsson-Waldhauserová & Haraldur Ólafsson 2016. The Icelandic volcanic aeolian environment: Processes and impacts – A review. *Aeolian Research* 20. 176–195. doi:10.1016/j.aeolia.2016.01.004
23. Pavla Dagsson-Waldhauserová, Ólafur Arnalds & Haraldur Ólafsson 2014. Long-term variability of dust events in Iceland (1949–2011). *Atmospheric Chemistry and Physics* 14. 13411–13422. doi: 10.5194/acp-14-13411-2014
24. Helgi Björnsson 1985. The winter balance in Grímsvötn, Vatnajökull, 1950–1985. *Jökull* 35. 107–109. doi: 10.33799/jokull1985.35.107
25. Alexander, D., Shulmeister, J. & Davies, T. 2011. High basal melting rates within high-precipitation temperate glaciers. *Journal of Glaciology* 57. 789–795. doi: 10.3189/002214311798043726
26. Alexander, D., Davies, T. & Shulmeister, J. 2013. Basal melting beneath a fast-flowing temperate tidewater glacier. *Annals of Glaciology* 54(63). 265–271. doi: 10.3189/2013-AoG-63-A-259
27. Oerlemans, J. 2013. A note on the water budget of temperate glaciers. *The Cryosphere* 7. 1557–1564. doi: 10.5194/tc-7-1557-2013
28. Tómas Jóhannesson, Bolli Pálmason, Árni Hjartarson, Jaroch, A.H., Eyjólfur Magnússon, Belart, J.M.-C. & Magnús Tumi Guðmundsson 2020. Non-surface mass balance of glaciers in Iceland. *Journal of Glaciology* 66. 685–697. doi: 10.1017/jog.2020.37
29. Sigurður Þórarinnsson, Williams, R.S. Jr. & Kristján Sæmundsson 1973. ERTS-1 image of Vatnajökull: Analysis of glaciological, structural and volcanic features. *Jökull* 23. 7–17. doi: 10.33799/jokull1973.23.007
30. Williams, R.S. Jr. 1974. Satellite geological and geophysical remote sensing of Iceland. Progress report, 1 Sep 1973-28 Feb 1974. *US Geological Survey E-74-10467*, NASA-CR-136868.
31. Helgi Björnsson & Finnur Pálsson 2020. Radio-echo soundings on Icelandic temperate glaciers: History of techniques and findings. *Annals of Glaciology* 61(8). 25–34. doi: 10.1017/aog.2020.10
32. Jón Eyþórsson 1951. Fransk-íslenzki Vatnajökulsleiðangurinn, marz-apríl 1951. *Jökull* 1. 10–14. doi: 10.33799/jokull1951.01.010
33. Helgi Björnsson 1982. Drainage basins on Vatnajökull mapped by radio echo soundings. *Hydrology Research* 13(4). 213–232. doi: 10.2166/nh.1982.0018
34. Sveinn Pálsson 1945. Ferðabók Sveins Pálssonar: Dagbækur og ritgerðir 1791–1797. Útg., þýð. Jón Eyþórsson, Pálmi Hannesson, Steindór Steindórsson. Jöklaritið bls. 423–552. Snælandsútgáfan, Reykjavík. (2. útg. 1984, Örn og Örlygur, Reykjavík).
35. Torell, O. 1858. Bref om Island. Öfversigt af Kongl. Vetenskaps-Akademiens förhandlingar 1857 14. 325–335.
36. Sigurður Þórarinnsson 1939. Vatnajökull: Scientific results of the Swedish-Icelandic investigations 1936–37–38. Chapter VIII. Hoffellsjökull, its movements and drainage. *Geografiska Annaler* 21. 189–215.
37. Ives, J.D. & King, C.A.M. 1954. Glaciological observations on Morsárjökull, S.W. Vatnajökull. Pt. I: The ogive banding. *Journal of Glaciology* 2(16). 423–428. doi: 10.3189/002214354793702443
38. Ives, J.D. & King, C.A.M. 1955. Glaciological observations on Morsárjökull, S.W. Vatnajökull. Pt. II: Regime of the glacier, present and past. *Journal of Glaciology* 2(17). 477–482. doi: 10.3189/002214355793702325
39. Wuite, J., Libert, L., Nagler, T. & Tómas Jóhannesson 2022. Continuous monitoring of ice dynamics in Iceland with Sentinel-1 satellite radar images. *Jökull* 72. 1–20. doi: 10.33799/jokull2022.72.001
40. Eyjólfur Magnússon, Helgi Björnsson, Rott, H., Roberts, M.J., Finnur Pálsson, Sverrir Guðmundsson, Bennett, R.A., Halldór Geirsson & Sturkell, E. 2011. Localized uplift of Vatnajökull, Iceland: Subglacial water accumulation deduced from InSAR and GPS observations. *Journal of Glaciology* 57. 475–484. doi: 10.3189/002214311796905703
41. Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir & Helgi Björnsson 1996. Brúarjökull. Framhlaupið 1963–1964 og áhrif þess á rennsli Jökulsár á Brú. *Raunvísindastofnun Háskólans (RH-11-96)*, Reykjavík. 34 bls.
42. Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson & Flowers, G.E. 2003. Surges of glaciers in Iceland. *Annals of Glaciology* 36. 82–90. doi: 10.3189/172756403781816365
43. Sigurður Þórarinnsson 1969. Glacier surges in Iceland, with special reference to the surges of Brúarjökull. *Canadian Journal of Earth Sciences* 6(4). 875–882.
44. Ingibjörg Kaldal, Oddur Sigurðsson & Skúli Víkingsson 2001. Framhlaup Brúarjökuls á sögulegum tíma. *Glettingur* 11(2–3). 26–30.
45. Ívar Örn Benediktsson, Möller, P., Ólafur Ingólfsson, van der Meer, J.J.M., Kjær, K.H. & Krüger, J. 2008. Instantaneous end moraine and sediment wedge formation during the 1890 glacier surge of Brúarjökull, Iceland. *Quaternary Science Reviews* 27 (3–4). 209–234. doi: 10.1016/j.quascirev.2007.10.007
46. Ívar Örn Benediktsson, Ólafur Ingólfsson, Schomacker, A. & Kjær, K.H. 2009. Formation of submarginal and proglacial end moraines: Implications of ice-flow mechanism during the 1963–64 surge of Brúarjökull, Iceland. *Boreas* 38(3). 440–457. doi: 10.1111/j.1502-3885.2008.00077.x
47. Ívar Örn Benediktsson, Sverrir A. Jónsson, Schomacker, A., Johnson, M.D., Ólafur Ingólfsson, Zoet, L., Iverson, N.R. & Stötter, J. 2016. Progressive formation of modern drumlins at Múlajökull, Iceland: Stratigraphical and morphological evidence. *Boreas* 45(4). 567–583. doi: 10.1111/bor.12195
48. Óskar Knudsen 1995. Concertina eskers, Brúarjökull, Iceland: An indicator of surge-type glacier behaviour. *Quaternary Science Reviews* 14(5). 487–493. doi: 10.1016/0277-3791(95)00018-K
49. Ólafur Ingólfsson, Ívar Örn Benediktsson, Schomacker, A, Kjær, K.H., Skafti Brynjólfsson, Sverrir A. Jónsson, Korsgaard, N.J. & Johnson, M.D. 2016. Glacial geological studies of surge-type glaciers in Iceland Research status and future challenges. *Earth Sciences Reviews* 152. 37–69. doi: 10.1016/j.earscirev.2015.11.008
50. Evans, D.J.A., Twigg, D.R., Rea, B.R. & Shand, M. 2007. Surficial geology and geomorphology of the Brúarjökull surging glacier landsystem. *Journal of Maps* 3(1). 349–367. doi: 10.4113/jom.2007.94
51. Schomacker, A., Ívar Örn Benediktsson & Ólafur Ingólfsson 2014. The Eyjabakkajökull glacial landsystem, Iceland: Geomorphic impact of multiple surges. *Geomorphology* 218. 98–107. doi: 10.1016/j.geomorph.2013.07.005
52. Kamb, B., Raymond, C.F., Harrison, W.D., Engelhardt, H., Echelmayer, K.A., Humphrey, N., Brugmann, M.M. & Pfeffer, T. 1985. Glacier surge mechanism: 1982-1983 Surge of Variegated glacier, Alaska. *Science* 227. 469–479. doi: 10.1126/science.227.4686.469
53. Helgi Björnsson 1998. Hydrological characteristics of the drainage system beneath a surging glacier. *Nature* 395. 771–774. doi: 10.1038/27384
54. Raymond, C.F. 1987. How do glaciers surge? A review. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 92(89). 9121–9134. doi: 10.1029/JB092iB09p09121
55. Sevestre, H. & Benn, D.I. 2015. Climatic and geometric controls on the global distribution of surge-type glaciers: Implications for a unifying model of surging. *Journal of Glaciology* 61. 646–662. doi: 10.3189/2015JoG14J136
56. Carrivick, J.L., Tweed, F.S., James, W.M. & Tómas Jóhannesson 2016. Surface and geometry changes during the first documented surge of Kverfjökull, central Iceland. *Jökull* 66. 27–49 (2016). doi: 10.33799/jokull2016.66.027
57. Eyjólfur Magnússon, Rott, H., Helgi Björnsson & Finnur Pálsson 2007. The impact of jökulhlaups on basal sliding observed by SAR interferometry on Vatnajökull, Iceland. *Journal of Glaciology*. 53(181). 232–240. doi: 10.3189/172756507782202810
58. Helgi Björnsson 1976. Glacier lakes and explanation of jökulhlaups. Í: *Nordic Hydrological Conference, Reykjavík ágúst og september 1976*. 64–74.
59. Helgi Björnsson 1975. Subglacial water reservoirs, jökulhlaups and volcanic eruptions. *Jökull* 25. 1–14. doi: 10.33799/jokull1975.25.001
60. Helgi Björnsson 1974. Explanation of jökulhlaups from Grímsvötn, Vatnajökull, Iceland. *Jökull* 24. 1–26. doi: 10.33799/jokull1974.24.001
61. Nye, J.F. 1976. Water flow in glaciers: Jökulhlaups, tunnels and veins. *Journal of Glaciology* 17(76). 181–207. doi: 10.3189/S002214300001354X
62. Magnús Tumi Guðmundsson & Guðrún Þorgerður Larsen. Jökulhlaup. Bls. 156–170 í: *Náttúruvá á Íslandi. Eldgos og jarðskjálftar* (ritstj. Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson, Bjarni Bessason). Viðlagatrygging Íslands og Háskólaútgáfan, Reykjavík. 786 bls.
63. Árni Snorrason, Páll Jónsson, Svanur Pálsson, Sigvaldi Árnason, Oddur Sigurðsson, Skúli Víkingsson, Ásgeir Sigurðsson og Snorri Zóphóníasson 1997. Hlaupið á Skeiðarársandi haustið 1996: Útbreiðsla, rennsli og aurburður. Bls. 79–137 í: *Vatnajökull – Gos og hlaup*. Skýrsla Raunvísindastofnunar Háskólans og Orkustofnunar fyrir Vegagerðina (ritstj. Hreinn Haraldsson). Raunvísindastofnun Háskólans og Orkustofnun, Reykjavík. 184 bls.
64. Haukur Tómasson 1996. The jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology* 22. 249–254. doi: 10.3189/1996AoG22-1-249-254
65. Oddur Sigurðsson & Bergur Einarsson 2005. Jökulhlaupaannáll 1989–2004. *Orkustofnun (OS-2005/031)*, Reykjavík. 46 bls.
66. Þorsteinn Þorsteinsson, Kristjana G. Eyþórsdóttir, Esther Hlíðar Jensen, Ingibjörg Jónsdóttir, Finnur Pálsson, Gunnar Sigurðsson, Andri Gunnarsson, Hlynur Skagfjörð Pálsson, Ragnar H. Þrastarson, Oddur Sigurðsson, Tómas Jóhannesson & Roberts, M.J. 2021. Jökulhlaup úr Hafrafellslóni við Langjökul. *Veðurstofa Íslands (VÍ 2001/001)*, Reykjavík. 33 bls.
67. Helgi Björnsson 1997. Grímsvatnahlaup fyrr og nú. Bls. 61–77 í: *Vatnajökull – Gos og hlaup*. Skýrsla Raunvísindastofnunar Háskólans og Orkustofnunar fyrir Vegagerðina (ritstj. Hreinn Haraldsson). Raunvísindastofnun Háskólans og Orkustofnun, Reykjavík. 184 bls.
68. Nielsen, N. 1937. Vatnajökull: Kampen mellem Ild og Is. Hagerup, Kaupmannahöfn. 123 bls.
69. Sigurjón Rist 1955. Skeiðarárhlaup 1954. *Jökull* 5. 30–36.
70. Sigurður Þórarinnsson 1939. Vatnajökull: Scientific results of the Swedish-Icelandic investigations 1936–37–38. Chapter IX. The ice dammed lakes of Iceland with particular reference to their values as indicators of glacier oscillations. *Geografiske Annaler* 21. 216–242.
71. Sigurður Þórarinnsson & Steinþór Sigurðsson 1947. Volcano-glaciological investigations in Iceland during the last decade. *Polar Record* 5. 33–34, 60–64.
72. Sigurjón Rist 1973. Jökulhlaupaannáll 1971, 1972 og 1973. *Jökull* 23. 55–60. doi: 10.33799/jokull1973.23.055o
73. Helgi Björnsson 2003. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland. *Global and Planetary Change* 35(3–4). 255–271. doi: 10.1016/S0921-8181(02)00130-3
74. Tómas Jóhannesson 2002. Propagation of a subglacial flood wave during the initiation of a jökulhlaup. *Hydrological Scientific Journal* 47(3). 417–434. doi: 10.1080/02626660209492944
75. Bergur Einarsson, Eyjólfur Magnússon, Roberts, M.J., Finnur Pálsson, Þorsteinn Þorsteinsson 2016. A spectrum of jökulhlaup dynamics revealed by GPS measurements of glacier surface motion. *Annals of Glaciology* 57(72). 47–61. doi: 10.1017/aog.2016.8
76. Halldór Björnsson, Anna Hulda Ólafsdóttir, Bjarni Diðrik Sigurðsson, Borgný Katrínardóttir, Brynhildur Davíðsdóttir, Gígja Gunnarsdóttir, Guðfinna Th. Aðalgeirsdóttir, Guðjón Már Sigurðsson, Helga Ögmundardóttir, Hildur Pétursdóttir, Hlynur Bárðarson, Starri Heiðmarsson og Theódóra Matthíasdóttir 2023. Umfang og afleiðingar hnatttrænna loftslagsbreytinga á Íslandi: Fjórða samantektarskýrsla Vísindanefndar um loftslagsbreytingar. Veðurstofa Íslands, Reykjavík. 467 bls.
77. Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Ragnar H. Þrastarson, Snævarr Guðmundsson, Belart, J.M.-C., Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Skúli Víkingsson, Ingibjörg Kaldal & Tómas Jóhannesson 2020. A national glacier inventory and variations in glacier extent in Iceland from the Little Ice Age maximum to 2019. *Jökull* 70. 1–34. doi: 10.33799/jokull.70.001