

**Greinargerð vegna styrks af tilraunafé árið 2023:
Samvinna um rannsóknir í Grímsvötnum.**



Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskólans
Sturlugata 7, 101 Reykjavík
Finnur Pálsson og Eyjólfur Magnússon
apríl 2024
RH-03-24



HÍ

JARÐVÍSINDASTOFNUN

Hér er gerð grein verkum sem unnið var að með stuðningi Rannsóknasjóðs Vegagerðarinnar í verkefninu: Grímsvatnahlaup: Vatnsgeymir, upphaf og rennsli.

Grímsvötn eru í lægð Grímsvatnaöskjunnar í miðjum Vatnajökli (1. mynd). Þarna er stærsta jarðhitasvæði landsins og auk bræðsluvatns af jökulyfirborði safnast þar vatn sem bráðnar vegna jarðhita við jökulbotninn. Ofan á Grímsvötnum er íshella, um 300 m þykk að jafnaði, sem flýtur upp með aukinni vatnssöfnun. Öðru hvoru brestur ísstíflan sem heldur að vatninu til austurs, göng myndast í ísinn við jökulbotn og vatn hleypur við jökulbotn frá Grímsvötnum til Skeiðarársands.

Helstu niðurstöður vinnu á árinu 2023 við könnun á aðstæðum í Grímsvötnum eru kynntar hér m.a. vatnshæð, flatarmál og rúmmál Grímsvatna, lega vatnsrása, mat á þykkt íshelli, vöktun ísstíflu, mat á líklegu hámarksrennsli í hlaupum, rennsli frá Grímsvötnum ásamt mati á núverandi stöðu í Grímsvötnum og líklegri þróun þar. Einnig afkomu ísaviðs Grímsvatna, lögum þess, ísskið og afrennsli leysingavatns til þeirra.

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirrar stofnunar sem höfundar starfa hjá.

Mælistöðvar í Grímsvötnum og á Grímsfjalli.

Í um aldarfjórðung hefur Jarðvísindastofnun vakt að vatnshæð Grímsvatna (1. mynd) með mælitækjum á íshelli Grímsvatna. Frá því í júní 2021 hefur yfirborðshæð íshelli Grímsvatna verið mæld með nákvæmu gervihnatta-staðsetningatæki. Tækið mælir á 15 sekúnda fresti þrívíða staðsetningu loftnets í tækjamastri nærri miðju fljótandi íshelli Grímsvatna. Klukkustunda meðaltöl mælinganna gefa hæð með nákvæmni upp á fáeina cm, þegar unnið hefur verið úr mælingum ásamt viðmiðunargögnum frá samskonar tæki á Grímsfjalli. Gögn frá tækjunum eru lesin á klst. fresti og birt á vefsíðu jarðvísindastofnunar (<http://husbondi.rhi.hi.is/gvth/>).

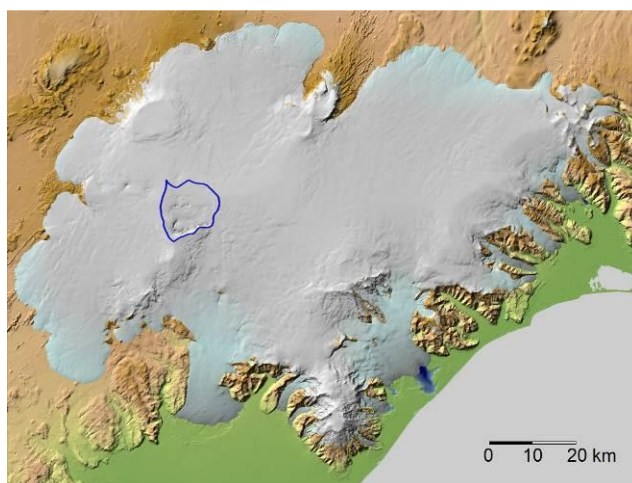
Þessi búnaður er aflfrekur og því voru hleðslubúnaður og rafgeymar endurnýjuð haustið 2021 þá sett á tækjamastrið tvö 100 W sólhlöð og 3 vörubílarafgeymar til að tryggja afl yfir sólarminnstu mánuðina.

Árið 2023 var, líkt og undanfarna áratugi, yfirborðshæð íshelli Grímsvatna einnig mæld með GPS leiðsögutæki tæki á 5 mínútna fresti en nákvæmni hverrar mælingar á hæð er ~3 m (staðalfrávik). Sú mæling er til vara ef mæling með nákvæmu tækjunum bregst. Auk þess er í tækjamastrinu mælt og skráð loftvægi (nákv. ~0,2 mb), lofthiti (nákv. ~0,5 °C), rakastig, vindhraði, sólgeislun og hæð yfir snjóyfirborði (snjósöfnun og bráðnun sem mæld er með mæli sem komið er fyrir á slá á mælitækjamastri).

Þegar íshellan er á floti undir stöðinni er vatnsborðið í íshellunni þar um 30 m neðar, breytilegt um örfáa metra eftir snjóþykkt, vatnssstöðu, innrennsli vatns og ísflæðis úr norðri.

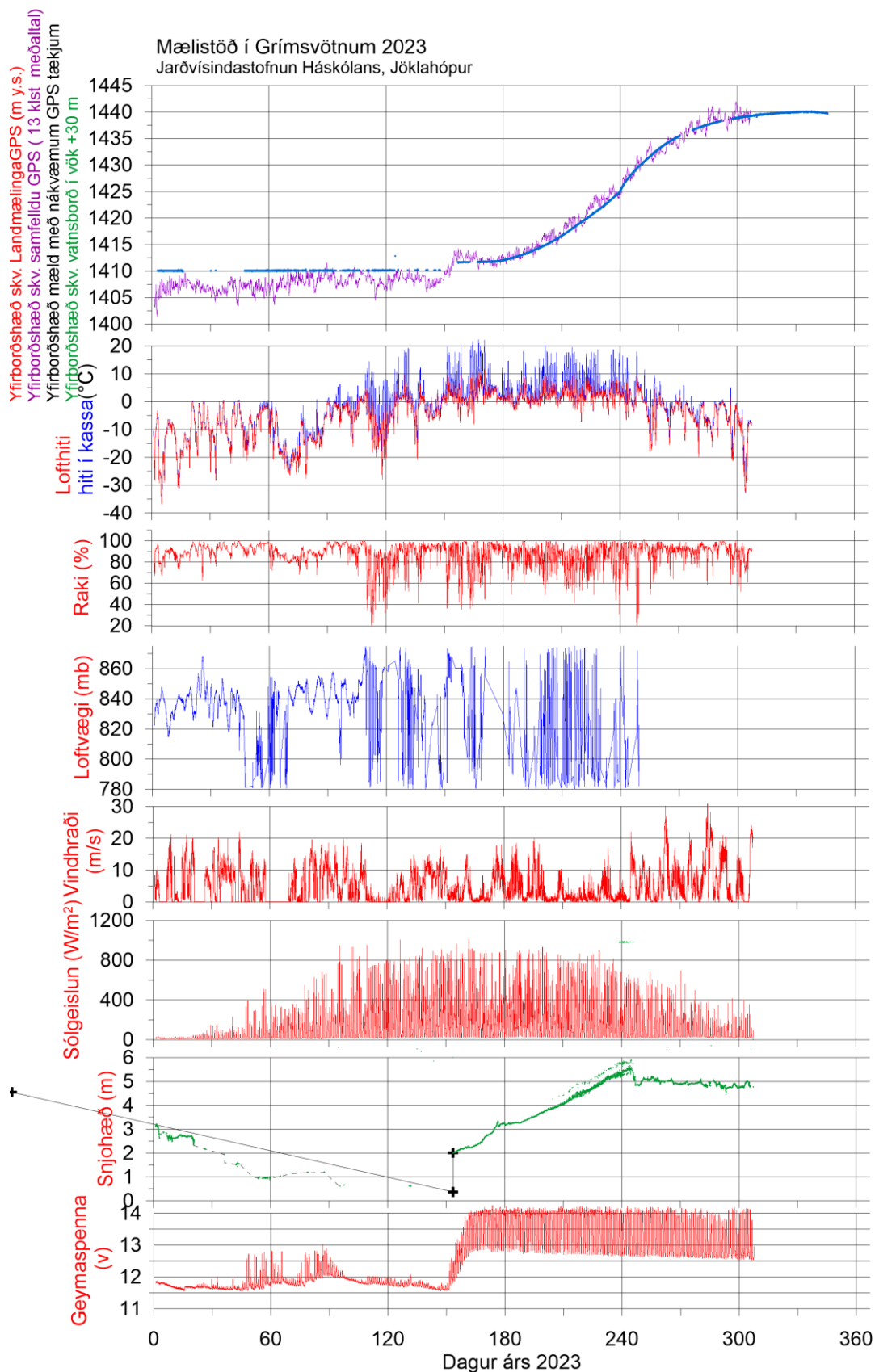
Þegar íshellan þarna situr á botni getur raunveruleg vatnshæð verið miklu lægri en sem þessu nemur, en hæð þess vatnsborðs má mæla í opnum vötnum meðfram hlíðum Grímsfjalls, t.d. yfir gosstöðvunum frá 1998 og 2004/2011 og undir hlíðinni allra vestast. Til að ná mælingu á lægri vatnstöðunni var komið fyrir GNSS mælitæki á röri sunnar og vestar á íshellunni (GRVC) þar sem hún er þynnri og fylgir vatnsborði lengra niður.

Yfirlit mælinga á mælistöð í Grímsvötnum er sýnt á 2. mynd. Einhver bilun í fjarskiptabúnaði varð í nóvember þannig að veðurgögn bárust ekki eftir það og GNSS gögn ekki eftir 19. desember. Hugað var að stöðinni 25. febrúar 2024 (félagar frá Neyðarlínu og Landsvirkjun áttu leið þarna um) og þá var að sjá að mælitæki störfuðu eðlilega og nægjanleg orka á rafgeymum.



1. mynd. Vatnajökull, ísasvið Grímsvatna er afmarkað með blárrí línu.

Ekki var meðferðis búnaður til að lesa af stöðinni, en það verður gert á í fyrstu viku maí og fjar-skiptum aftur komið í eðlilegt horf. Flest mælitæki skiluðu hnökralausum gögnum, nema loftvog er greinilega biluð og snjóhæðarmæligögn slitrótt vegna ísingar frá febrúar til maí. Ísing festir líka vindhraðamælinn öðru hvoru, ef algjört logn mælist er það oftast vegna þess (mætti kalla



2.mynd. Yfirlit mælinga í sjálfvirkri mælistöð í Grímsvötnum árið 2023.

svikalogn).

Auk þess sem fjarskipti við mælitækin í Grímsvötnum fara um búnað á Grímsfjalli rekur jöklahópur JH þar veðurstöð sem safnar gögnum um hitastig, loftþrýsting, sólgeislun, vindhraða að sumarlagi og sumarúrkomu (3. mynd). Gögn um hitastig og loftvægi nýtast til reikninga á vatnshæð Grímsvatna eftir stiglum hita og loftþrýstings með hæð, ef GNSS tækin í Grímsvötnum bregðast. Þessi mælitæki á Grímsfjalli og ýmis önnur á vegum Veðurstofunnar senda gögn til byggða um Tetra fjarskiptabúnað Neyðarlínunnar. Auk 6 W gufurafstöðvar JÖRFÍ-JH eru rafgeymar fyrir mælitæki á Grímsfjalli hlaðnir með díselrafstöð sem nú er eiga Neyðarlínunnar, en rekstur hennar samstarfsverkefni Neyðarlínu, VÍ, LV, JÖRFÍ og JH.

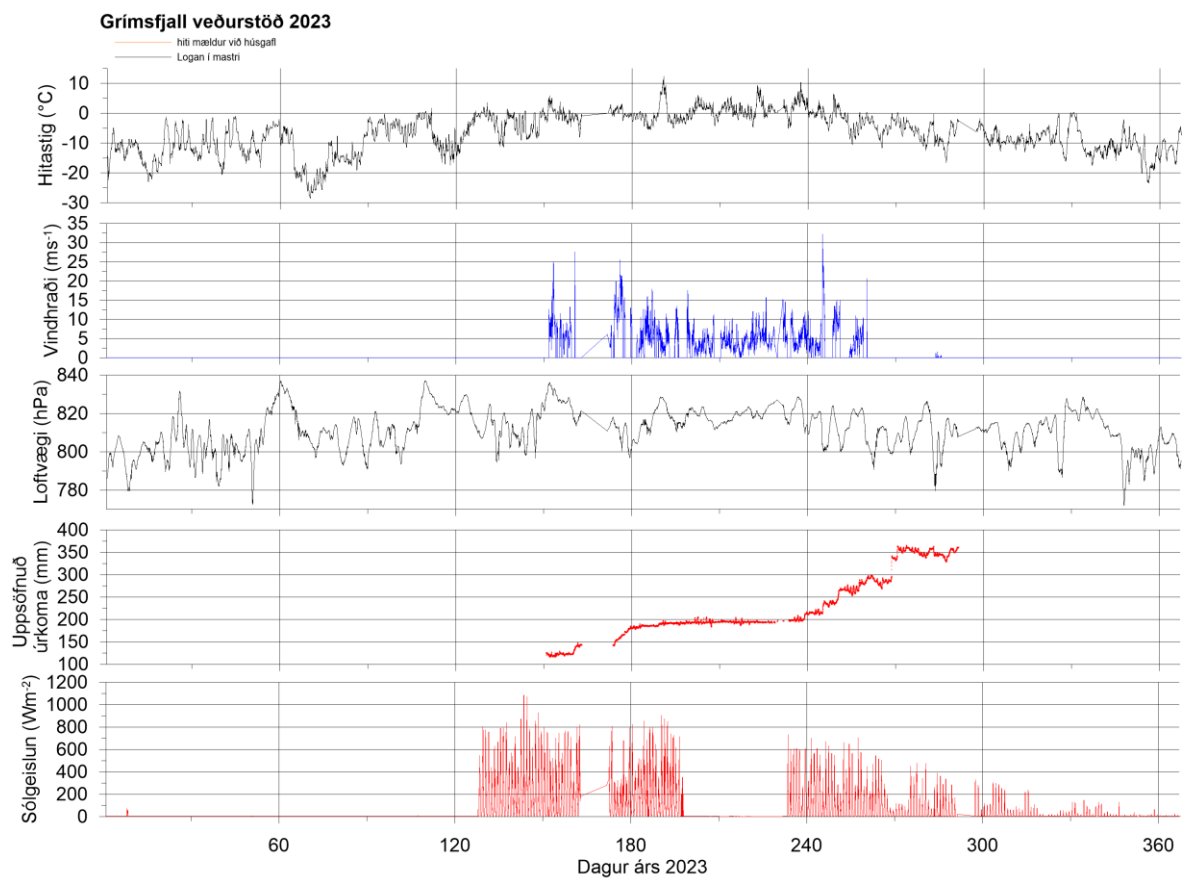
Lofthiti sumars (í um 2 m hæð) í Grímsvötnum er að jafnaði nálægt núlli, enda yfirborðið bráðnandi, en fer að deginum alloft upp í 5-10 °C, stöku sinnum aðeins hærra, en að næturlagi í oftast frost, stundum allt að -10 °C. Upphaf síðastliðins sumars sjást greinilega nærri miðjum apríl sem umskipti í lofthita og segja má að sumarástand hita hafi haldist þar til um miðjan september (bæði á Grímsfjalli og í Grímsvötnum). Verulegur vetrarkuldi varð ekki fyrr en í desemberbyrjun. Áberandi er að frá miðjum janúar til fyrstu daga mars var hitastig mjög sveiflukennt milli frá um -10°C og nærri 0°C til marks um umhleyppingatímabil og lægðagang sem sést vel í loftþrýstingi líka.

Hitastig á Grímsfjalli fer sjaldan niður fyrir -20°C, en í þau skipti er yfirleitt hægviðri, hár loftþrýstingur og enn kaldara í Grímsvötnum (öfugur hitastigull), kalda loftið sígur þangað niður. Þannig fer lofthiti þar stundum (10-15 sinnum á vetri) niður fyrir -25°C og stöku sinnum undir -30°C (3 sinnum árið 2023, til nóvember). Lægsti hiti í Grímsvötnum árið 2023 mældist aðfaranótt 5. janúar en þá fór hitinn niður í -36°C.

Ákaflega erfitt er að reka vindhraðmæli á Grímsfjalli, þeir eyðileggjast nær alltaf einhvern tíma sumars vegna ísingar, hreinlega brotna. Síðasta sumar var mælir settur upp byrjun júní og tekinn niður óskemmdur í október. Að sumri er vindur oftast undir 10 ms⁻¹ en mun hvassara að vetrarlagi; mesti mældi vindhraði (15 mínútna meðaltal) á Grímsfjalli var 32 ms⁻¹ 2. september. Árið 2023 (til nóvember) fór vindur Grímsvötnum ~15 sinnum yfir 20 ms⁻¹, og tvisvar yfir 30 ms⁻¹ (19. september og 11. október).

Snjóhæðamælingarnar í Grímsvötnum sýna að frá ársbyrjun fram í 3. viku febrúar snjóar jafnt og þétt, síðan nær ekkert þar til síðustu viku mars, og lítið eftir það. Kröftug leysing var í 3. viku júní, lítil næstu vikuna, en síðan með sviðupum hraða um þar til 1. september að snjósöfnun hófst með 50 cm snókomu. Eftir það snjóaði mjög lítið, en jafnt og þétt, fram í nóvemberbyrjun (en þá hættu mælingar að berast), samtals ~20 cm.

Úrkomumæling á Grímsfjalli (mælir settur upp í júníbyrjun og tekinn niður í þriðju viku október) sýnir að úrkoma júní til október er samtals ~240 mm, þar af 80 mm sumarmánuðina (JJÁ), nær allt í tveimur lotum í júní, nær ekkert eftir það til loka ágúst.



3.mynd. Yfirlit veðurþáttamælinga í sjálfvirkri mælistöð á Grímsfjalli árið 2023.

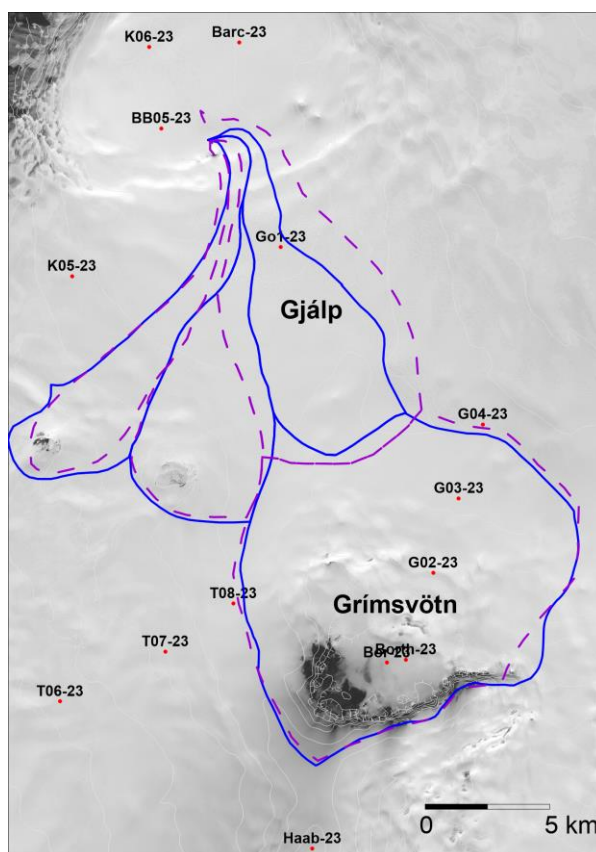
Afkoma Grímsvatna.

Vatn sem safnast í Grímsvötn er annars vegar leysingarvatn af yfirborði og rigning á vatnasviði Grímsvatna en hins vegar vatn sem bráðnar neðan af ísnum vegna jarðhita við jökulbotninn víðsvegar um vatnasviðið. Vatn vegna yfirborðs-leysingar er metið útfrá afkomumælingum sem gerðar eru á ísa- og vatnasviði Grímsvatna í samvinnu Jarðvísindastofnunar, Rannsóknasjóðs Vegagerðarinnar og Landsvirkjunar, auk þess sem afkoma er mæld á íshellu Grímsvatna í vorferðum Jöklarannsóknafélags Íslands.

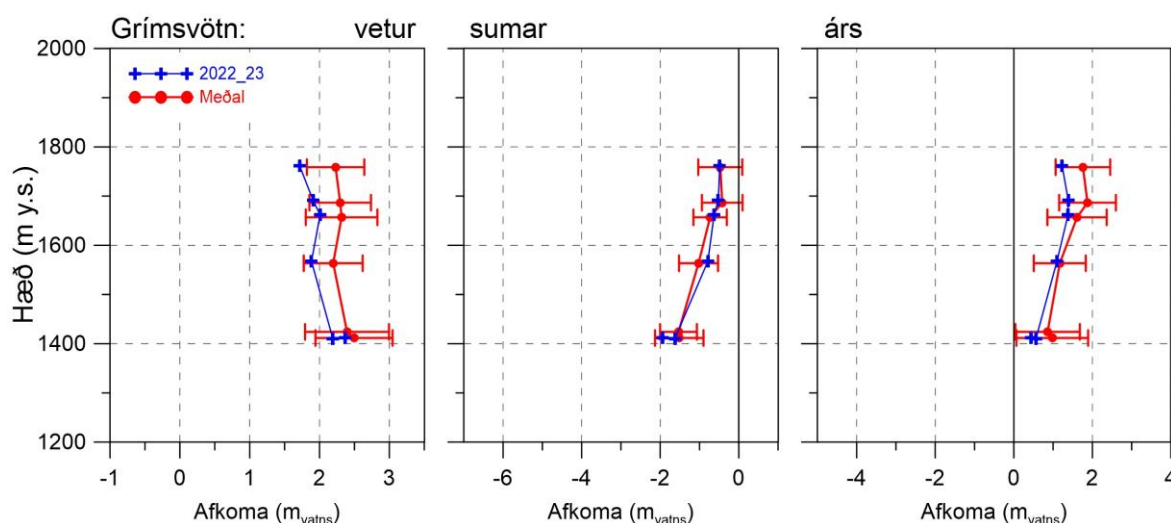
Lega mælipunktanna er sýnd á 4. mynd. Þar er líka sýnt mat ísasvæða Skaftárkatla, Gjálp og Grímsvatna, unnið eftir yfirborðshæð í júní 2010. Vatna og ísaskilin breyttust talsvert vegna framhlaups Dyngjújökuls 1998-2000. Ísskrið inn í Gjálparlægðina frá 1996 breytir lögun yfirborðsins einnig talsvert þannig að ísaskil fluttust til. Frá 2010 hafa breytingar verið hægar. Flatarmál ísasviðs Grímsvatna (ásamt Gjálparlægðarinnar) er 174 km² samkvæmt ísaskilum árið 2010.

Niðurstöður afkomumælinga í mælipunktum eru gefnar í I. töflu í viðauka hér að aftan, en á 5. mynd er sýnd vetrar-, sumar- og ársafkoma á mælisniðinu norður af Grímsvötnum. Stafræn kort hafa

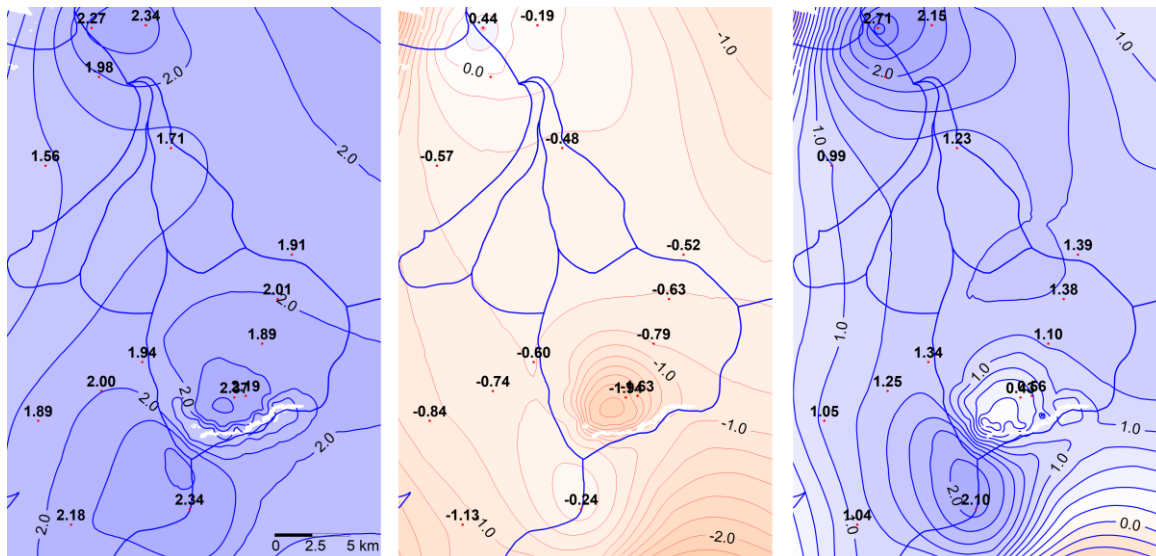
verið unnin af afkomu Grímsvatna eftir mælingunum (6. mynd). Við kortagerðina nýtast einnig afkomumælingar sem gerðar eru í Tungnaár-, Köldukvíslar- og Dyngjújökulum. Meðalafkoma ísasviðs Grímsvatna (auk Gjálp) er reiknuð með því að tegra afkomukortin yfir ísasviðið og deila með flatarmáli þess. Vetrarafkoma 2022_23 var 1,99 m_{vatns} eða um 13 % undir meðallagi (2,33 m_{vatns}) mælitímans (frá 1991_92). Sumarrýrnun var -0,78 m_{vatns} sem er nærri rýrnun



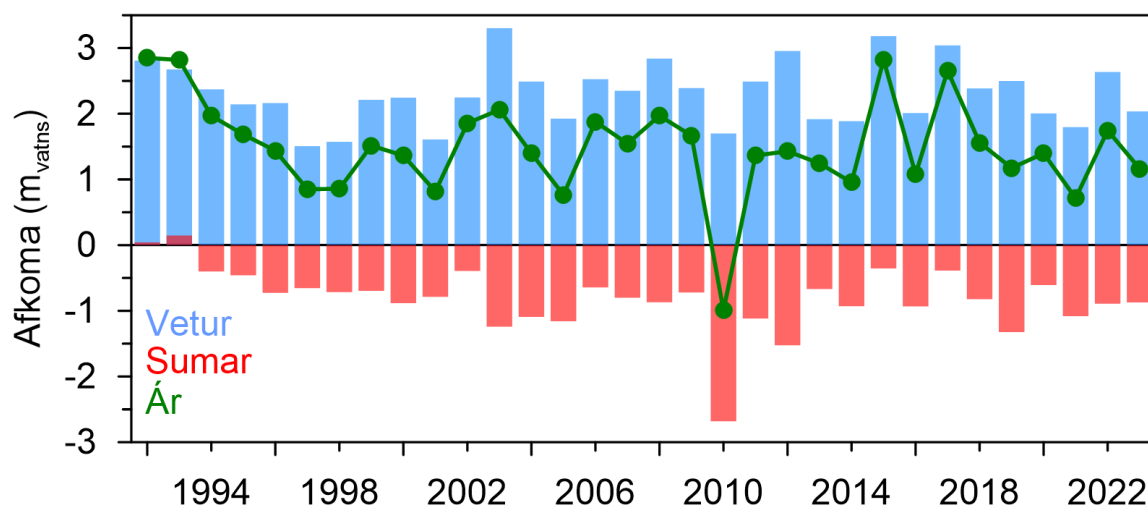
4. mynd. Afkomumælistaðir á ísasviði Grímsvatna og nágrenni jökulárið 2022-23. Í bakgrunni er yfirborð jökulsins séð með Sentinel2 gervitungli 24. ágúst 2023. Bláu línurnar afmarka ísasvið unnin eftir yfirborðskorti frá 2010 en brotnu línurnar eftir yfirborðskorti frá 1998.



5. mynd. Afkoma 2022-23 á mælisniði á ísasvæði Grímsvatna og Gjálp (blá), og meðalafkoma þar 1991-92 til 2021-22. Þverstrikin sýna staðalfrávik mæliraðar í mælipunktum.



6. mynd. Kort vetrar-, sumar-, og ársafkomu Grímsvatna og nágrennis jökulárið 2022-23 (0.2 m jafngildis-línur), unnin eftir mælipunktum (gildi í mælipunktum sýnd). Vetrar-, sumar- og ársafkoma í m vatnsjafngildis. Ísaskil eru sýnd með þykkum bláum línur.



7. mynd. Vetrar-, sumar- og ársafkoma Grímsvatnasvæðisins (Grímsvötn og Gjálp) í m vatnsjafngildis (tegruð rúmmál afkomukorta deilt með flatarmáli ísasviðs) jökulárin 1991-92 til 2022-23.

meðalárs (-0,81 m_{vatns}). Ársafkoma var jákvæð eins og nær alltaf, nú 1,21 m_{vatns} eða um 78% meðallags (1,52 m_{vatns}).

Meðalafkoma (sem vatnsgildi jafndreift yfir ísasviðið) Grímsvatna og Gjálparsvæðisins frá upphafi afkomumælinga er sýnd á 7. mynd.

(Í II. töflu í viðauka eru afkomutölur sem fall af hæð yfirborðs). Auk yfirborðsleysingar bráðna árlega ~0,2 km³ á ísviði Grímsvatna vegna jarðhita. Nánar er fjallað um það síðar í þessari skýrslu.

Helstu kennistærðir afkomu Grímsvatna jökulárið 2022-23 eru:

(B er rúmmál afkomu, b er þykkt afkomu jafndreift á flötinn, bæði gildin gefin sem vatnsjafngildi, ve, su, ár standa fyrir vetrar, sumar og jökulár)

Flatarmál 174 km²

B_{ve} = 0,34 km³_{vatns} ; b_{ve} = 1,99 m_{vatns}

B_{su} = -0,13 km³_{vatns} ; b_{su} = -0,78 m_{vatns}

B_{ár} = 0,21 km³_{vatns} ; b_{ár} = 1,21 m_{vatns}

Afrennsli yfirborðsleysingar til Grímsvatna

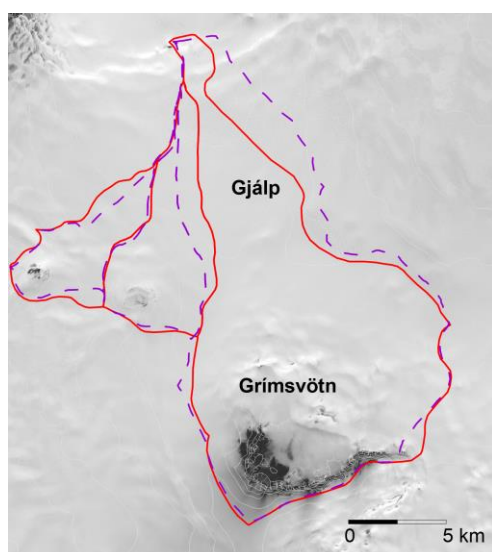
Vegna breytinga á yfirborðslögun hefur vatnasvið Grímsvatna, eins og ísasvið, breyst töluvert á frá því samfeldar mælingar afkomu Grímsvatna hófust sumrið 1992. Jökulsá á Fjöllum og eystri Skaftárketillinn fá nú afrennsli af hluta þess svæðis sem áður veitti vatni til Grímsvatna (sjá 8. mynd). Þessi svæði liggja þó mjög hátt þannig að leysing þar er lítil og þessi minnkun vatnasviðsins úr rúmlega 200 km² í 175 km² breytir því litlu um heildarafrennslið.

Afrennsli frá vatnasviðum á jökli má meta með því að heilda yfir stafrænt kort af mældri sumarafkomu á vatnasviðinu. Í þetta mat afrennslis vantar rigningavatn sumars og líka snjó sem fellur og leysir að sumrinu (það er heildarafkoma sumars sem er mæld, ekki leysing); þetta er því lágmarksmat afrennslis.

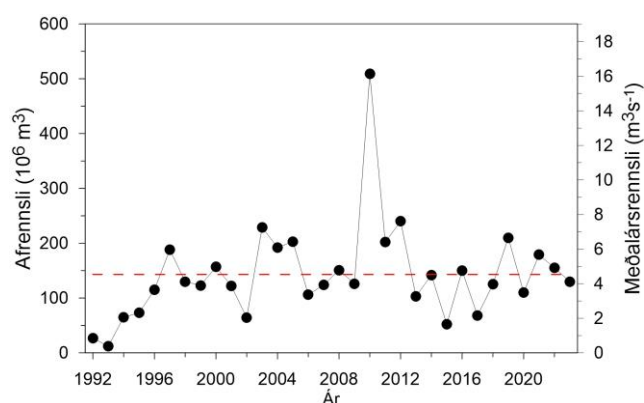
Frá 1992 hefur afrennsli leysingavatns til Grímsvatna verið mjög breytilegt (9. mynd), en að meðaltali 143*10⁶ m³ á ári (130*10⁶ m³ ef sumrinu 2010 er sleppt, en gosaska frá Eyjafjallajökli margfaldaði leysingu þá). Mesta afrennslið tengist skítugu yfirborði næsta sumar eftir eldgos, foki úr öskubunkum sem eru miklir í SV horni Grímsvatna eða ryki frá hálendinu og söndunum í þurrkatíð og berast í jökulyfirborðið og/eða óvenju hlýju og björtu sumri (1997, 1999, 2003, 2005, 2010 og 2019 og vestast á vatnsviði Grímsvatna 2022).

Sumarið 2023 er metið afrennsli leysingavatns af jökulyfirborði 130*10⁶ m³. Úrkoma sumarið 2023 mældist 80 mm á Grímsfjalli. Ef gert er ráð fyrir helmingi þess á allt vatnasvið Grímsvatna (hér er haft í huga að Grímsfjall stendur hátt yfir umhverfið og mun úrkomusamara þar í sumarveðri en á ísasviði Grímsvatna sem er í regnskugga þar norðan af) gæti heildar afrennsli til Grímsvatna vegna þess verið 175 km²*40 mm = 7*10⁶ m³ til viðbótar.

Dreifing afrennslis yfirborðsleysingavatns til Grímsvatna fyrir mismunandi hæðarbil sumarið 2022 er sýnd í III. töflu í viðauka.



8. mynd. Vatnasvið Grímsvatna og Skaftárkatla afmörkuð eftir botnkorti og yfirborðskorti frá 2010 (rautt), þau hafa ekki breyst verulega síðan þá. Brotnu línurnar sýna vatnasviðin metin eftir yfirborðskorti frá 1998 (EMISAR), skömmu eftir Gjálpargosið. Í bakgrunni er yfirborð jökulsins séð með Sentinel2 gervitungli 24. ágúst 2023.



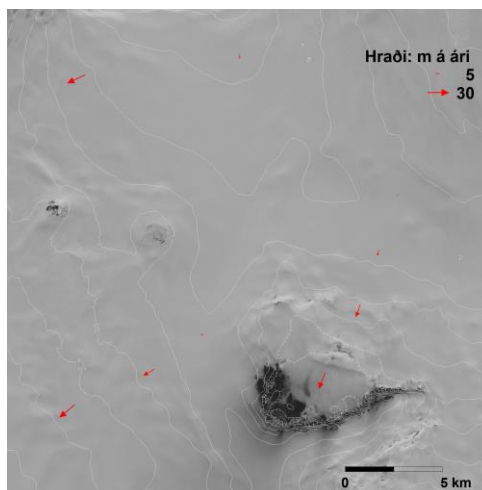
9. mynd. Afrennsli yfirborðsleysingar til Grímsvatna sumurin 1992 til 2023 metið útfrá sumarafkomumælingum (meðaltal áranna, 143, er sýnt með brotinni línu).

Ísskrið og yfirborðshæð Grímsvatnasvæðisins.

Hæð og ísskrið í afkomumælistöðvum

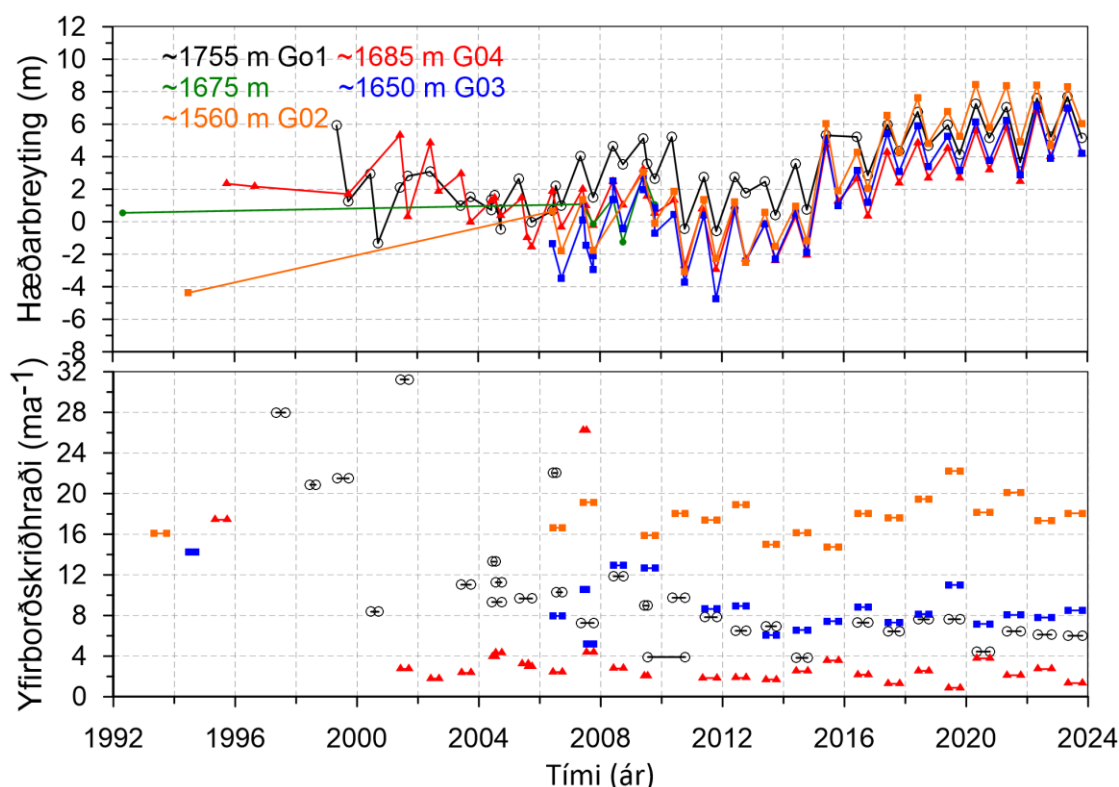
Skriðhraði á yfirborði hefur verið mældur á afkomumælistöðvum hvert ár síðan 1992, á mismörgum stöðum á ísasviði Grímsvatna. Lega afkomumælistaða er mæld inn með nákvæmum GPS tækjum vor og haust, og eftir þeim gögnum reiknuð færsla og meðalhraði á tímabilinu. Hraðavigrar í skriðmælistikum 2022 eru sýndir á 10. mynd. Hraðamælingarnar nýtast m.a. við mat ísflæðis til Grímsvatna. Á 11. mynd er sýnd þróun yfirborðshæðar og skriðhraða á afkomumælistöðvum norðan Grímsvatna. Þar sést greinilega að hin mikla rýrnun sem varð sumarið 2010 (óvanalega hlýtt og sólríkt sumar ásamt öskuslikju frá Eyjafjallajökli olli fáheyrðri leysingu) sér stað í hæðarbreytingu sem gekk ekki til baka fyrr en jökulárið 2014-15. Það ár var snjósöfnun óvenju mikil en lítil leysing að sumrinu, yfirborðið hækkaði um 3 til 5 m. Síðan þá hefur hæð flókt en að jafnaði hækkað um ~2 m enda tímabil mjög breytilegs veðurfars, og að jafnaði heldur kaldara en tímabilið frá 1995-2010.

Hnit mælipunkta eru í IV. töflu og reiknaðir hraðar í V. töflu í viðauka.



10. mynd. Meðalyfirborðsskriðhraði í Grímsvötnum og nágrenni sumarið 2023.

Í bakgrunni er yfirborð jökulsins séð með Sentinel2 gervitungli 24. ágúst 2023.



11. mynd. Efri: Hæðarbreytingar á afkomumælistöðvum norðan Grímsvatna 1992-2023. Neðri: Mældur meðalhraði að sumri á sömu mælistöðvum 1992-2023.

Mæling yfirborðshæðarsniða og hæðarlíkön.

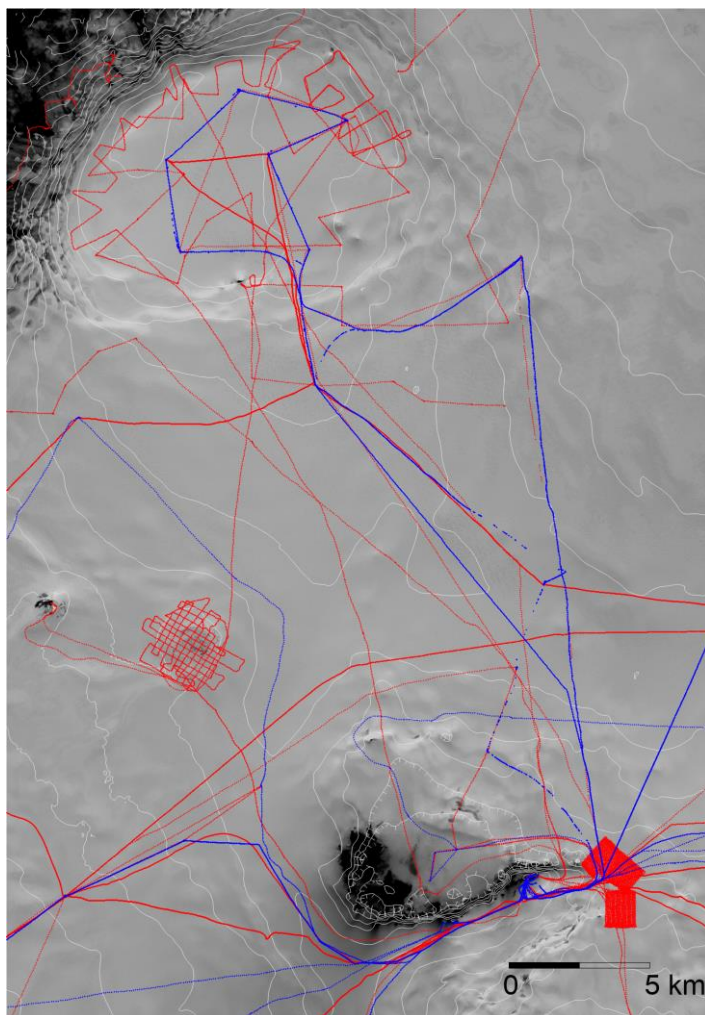
Á hverju ári er unnið að mælingu hæðarsniða á Grímsvatnasvæðinu í vorferð Jöklarannsóknafélags Íslands með „kinematiskum“ GNSS tækjum (hæðar-nákvæmni ~tugur cm) oft í samvinnu við rann-sóknahóp Magnúsar T. Guðmundssonar, og hæðarsniða er einnig aflað í afkomumælingaferðum Jarðvísindastofnunar og Landsvirkjunar vor og haust og öðrum tilfallandi ferðum.

Á 12. mynd er sýnd lega hæðarsniða sem aflað var á árinu 2023. Þessi hæðarsnið nýtast til að stilla af og meta gæði hæðarlíkana (gerð eftir gervitunglagögnum) sem aflað var á árinu.

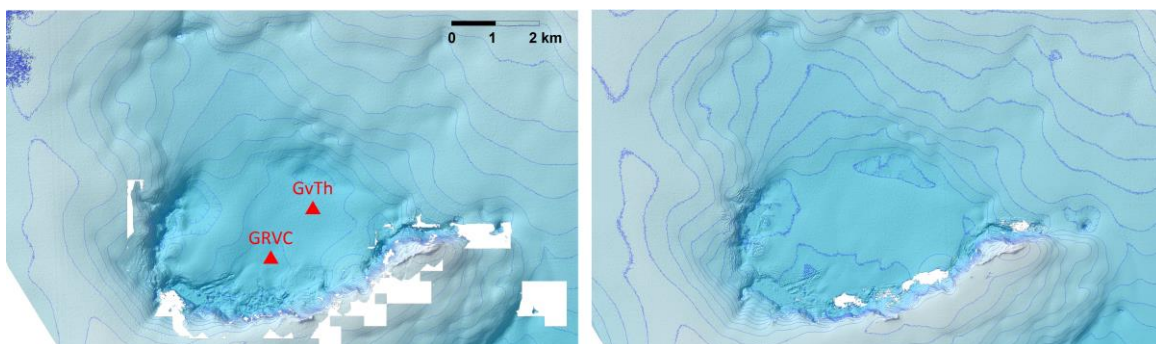
Seinni árin hefur aðgangur að yfirborðshæðarlíkönunum sem gerð eru eftir gervihnattagögnum orðið æ greiðari, mörg eru öllum aðgengileg (t.d. úr bandaríska ArcticDEM safninu) en önnur þarf að kaupa eða eru háð takmörkunum um dreifingu.

Á árinu 2023 var aflað tveggja hæðarlíkana af Grímsvötnum, 31. maí, og 7. október, (13. mynd, hæðarlíkönin eru gerð eftir steríó myndum frá Pléiades gervitunglinu sem fengust til rann-sóknarvinnu frá CNES vegna stuðnings Committee on Earth Observation Satellites við verkefnið Iceland Volcanoes Supersite).

Þessi hæðarlíkön eru notuð til að meta vatnssöfnun frá því að vötnin tæmdust mánaðarmótin í október 2022 til maí loka 2023 og aftur frá 31. maí til 7. október 2023.

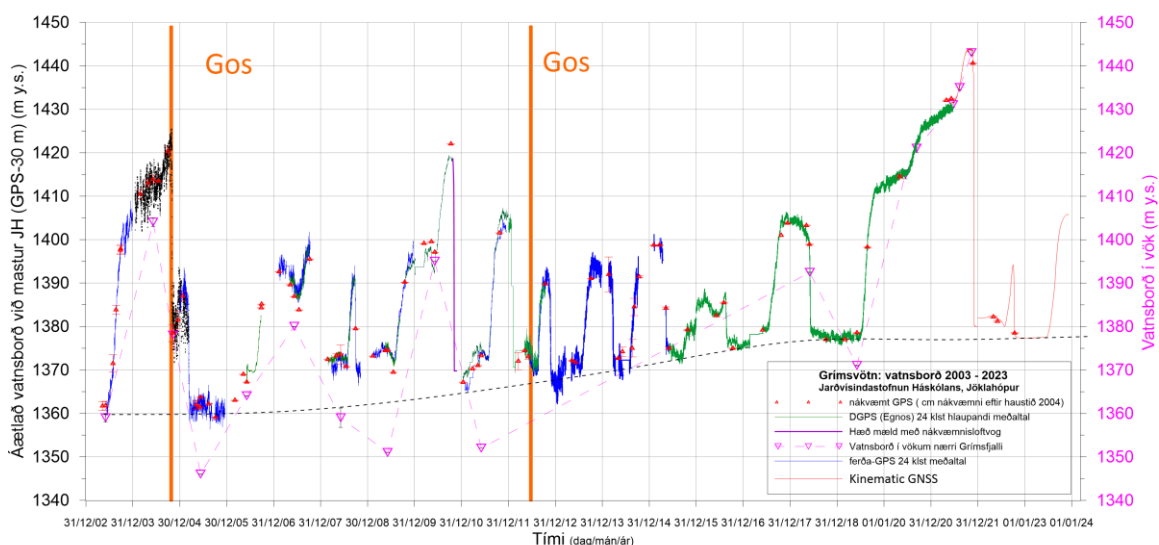


12. mynd. Lega hæðarsniða sem mæld voru með GPS landmælingatækjum árið 2023 í Grímsvötnum og nágrenni þeirra (rautt: maí og júní; blátt: október). Í bakgrunni er yfirborð jökulsins séð með Sentinel2 gervitungli 24. ágúst 2023.



13. mynd. Hæðarlíkön af Grímsvötnum 2023, gerð eftir Pléiades gervihnattamyndum 31. maí (vinstri) og 7. október (hægri). Staðsetning GvTh tækjamasturs og GNSS stöðvarinnar GRVC er sýnd með rauðum þríhyrningum á vinstri myndinni.

Vatnshæð og vatnssöfnun í Grímsvötnum

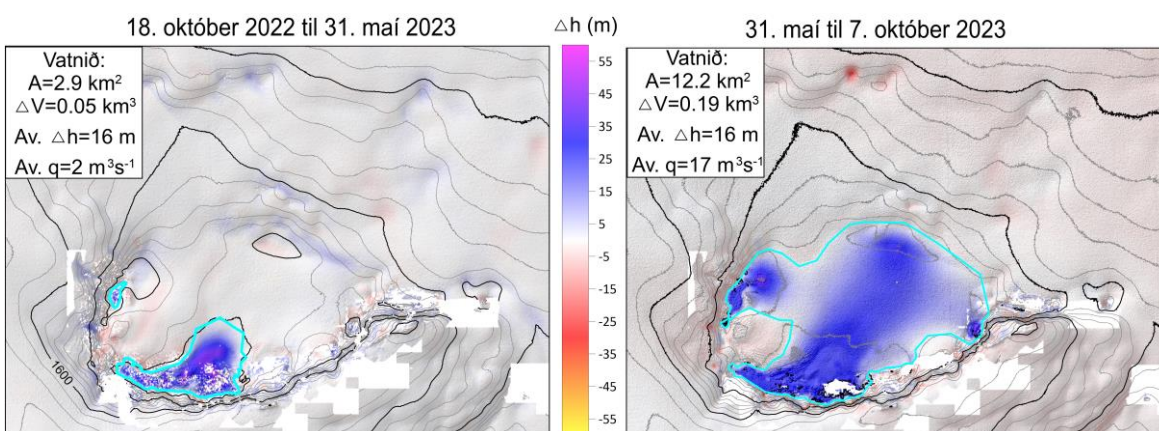


14. mynd. Vatnshæð Grímsvatna samkvæmt mælistöð frá ársbyrjun 2003 til ársloka 2023. Í lægstu stöðu þegar íshellan situr á botni á mælistað (svört brotin lína) getur vatnsborð verið enn lægra en hér er sýnt, en heildar vatnsmagn er þá lítið.

Í Grímsvötn rennur yfirborðsbræðsluvatn af um 175 km^3 vatnasviði þeirra, en einnig er ísbráð vegna jarðhita. Ummerki hans eru skýrust við suður og vesturjaðar vatnanna en einnig eru á annan tug smærri jarðhitasvæða sem mynda lægðir, sigdældir í yfirborðið, norðan og austan Grímsvatna auk Gjalpar þar sem eldgos varð í október 1996.

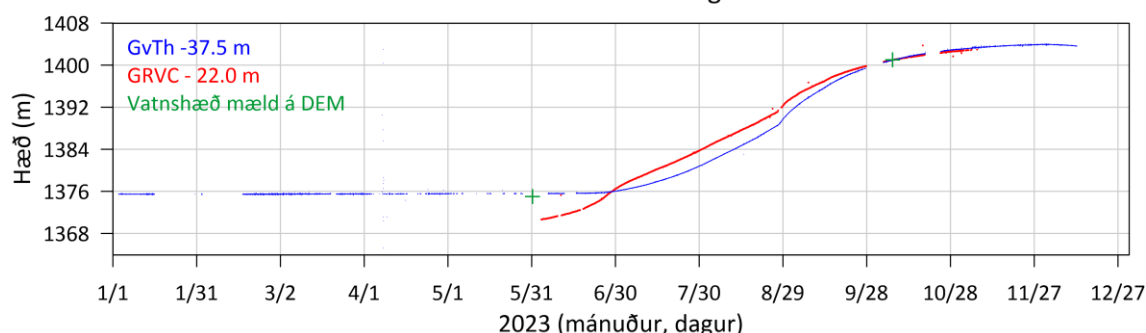
Segja má að síðan 2004 hafi jökulhlaup frá Grímsvötnum lengst af verið nærri árvisst (sjá 14. mynd). En á tímabilum inn á milli hefur verið sírennsli frá vötnunum, eða vatnssöfnun og hlaup í kjölfarið, svo lítil að ekki hefur dugað til að lyfta ísnum undir mælistöðinni. Metið er að mesta vatnsmagn í slíkum atburðum sé nærri $0,05 \text{ km}^3$. Haustið 2018 varð eitt slíkt smáhlaup, sem sást gervihnattamyndum sem lækkað vatnsborð á íslausa svæðinu yfir gosstöðvunum (sjá greinargerð ársins 2018) og fannst einnig á skjálftaritum frá mæli VÍ á Grímsfjalli (sem hátíðniórói) þegar að því var leitað.

Rúmmál vatns í Grímsvötnum hefur nokkur síðustu ár verið rakið eftir mismunakortum hæðarlíkana (sem flest eru gerð eftir gervihnattaljósmyndum), upplýsingum frá hæðarmælingu íshellunnar með GPS sniðmælingum og samfelldu GPS hæðarmælinganna í tækjamastrinu. Tegur



15. mynd. Vatnsöfnun í Grímsvötnum frá lokum hlaups úr Grímsvötnum í október 2022 til 7. október 2023, metin eftir mismuni hæðarlíkana. Hæðarlíkön 31. maí (vinstri) og 7. október 2023 (hægri) í bakgrunni. Litir sýna hæðarbreytingu, en ljósblái ferillinn afmarkar svæði íshellunnar þar sem vatn hefur þrengt sér undir hana og lyft henni. Tölur í efra vinstra hvorrar myndar sýna flatarmál fljótandi hluta íshellunnar, aukningu vatnsrúmmáls, meðalþykknun vatns og meðalinnrennsli vatns á tímabilinu.

Grímsvötn 2023 GNSS GvTh og GRVC



16. mynd. Vatnshæð í Grímsvötnum 2023 metin eftir GNSS mælingum í tveimur mælistöðvum (sjá staðsetningu á 13. mynd). Gert er ráð fyrir að vatnsborð sé 37,5. neðar en loftnetsmiðja í GvTh mælistöðinni en 22,0 m neðar en loftnetsmiðja í GRVC mælistöðinni.

yfir hæðarmun þessara hæðarlíkana (yfir fljótandi hluta íshellunnar á seinna líkaninu þegar vatnsborð er hækkandi) gefur mat á heildarrúmmáli vatns sem safnast hefur fyrir á tímabilinu.

Vegna hlaupsins sem varð í október 2022 var í upphafi árs 2023 sáralítið vatn í Grímsvötnum.

Eins og sagt er hér að ofan fengust tvö hæðarlíkön af Grímsvötnum á árinu 2023, 31. maí og 7. október. Eftir þessum hæðarlíkunum (sjá 15. mynd) var metið að rúmmál vatns í Grímsvötnum hafi verið 0,05 km³ 31. maí, en orðið 0,24 km³ í 7. október. Á 15. mynd er afmarkað (ljósbláar línur) það svæði íshellunnar þar sem vatn hefur þrengt sér undir hana og lyft henni. Aðeins hluti þessa svæðis hefur náð flotjafnvægi, ísinn flýtur ekki jafnóðum eins og korktappi á vatni, hann er þvingaður til jaðranna, hefur styrk og aflögunin tekur tíma, og er þannig líkara loki sem er fast til jaðranna en gefur eftir undan þrýstingi og aflagast með tímanum þar til kraftjafnvægi næst.

Á 16. mynd er sýnd hæðarbreyting sem mæld er með GNSS (~cm nákvæmni í mælingu þrívíðrar staðsetningar loftnetsmiðju). Hægt er að ganga út frá því að 7. október þegar verulega hefur dregið úr innrennsli frá vatnasviðinu, og rísandi hluti íshellunnar orðin verulega stór, er íshellan á mælistöðvunum mjög nærri að vera í flotjafnvægi, rétt um 10 hluti ísþykktar ofan vatnsborðs. Ef vatnshæð í vökum er mæld á hæðarlíkaninu 7. október fæst 1400,5 m, sem þýðir að hliðra þarf mældri hæð í loftneti í GvTh stöðinni niður um 37,5 m og þeirri í GRVC um 22,0 m til að nota mælingarnar sem mat á hæð vatnsborðs Grímsvatna. 7. október er í GRVC er hæð frá loftneti að snjóyfirborði ~4,5 m, sem gefur vatnsborð um ~17,5 m (ísþykkt ~180 m) undir stöðinni, en í GvTh er loftnet nærri 6 m yfir snjóyfirborði, eða vatnsborð ~31,5 undir GvTh (ísþykkt ~320 m). Þessar tölur eru raunsætt mat á dýpi niður á vatnsborð á þessum stöðum þegar flotjafnvægi er náð. Fram í júní er ísinn undir GvTh alls ekki á floti, en frá því GvVI stöðin var sett upp 3. júní má sést sést vel á mynd 16. að flotjafnvægi næst þar u.þ.b. á síðustu dögum júní en, útfrá mismuni risferlanna að flotjafnvægi í GvTh næst ekki fyrr en í lok september (þá falla ferlarnir nær alveg saman). Þó af þessu sjáist að talsvert flókið samhengi er milli mældrar hæðar í stökum punkti á yfirborði íshellunnar og vatnsrúmmáls, má gera ráð fyrir að aflögunarhraði íssins sé miklu meiri þegar vatn sigur undan honum en í risi og þá einnig einfaldara samband (án mikillar seinkunar) milli helluhæðar og rúmmáls.

GNSS mælingarnar sýna að frá 7. október þar til hámarksrisi er náð í byrjun desember er vatnshæð orðin 1404 m, og rúmmál aukist um ~0,04 km³, er þá orðið 0,28 km³.

Þegar þarna var komið fór íshellan að lækka aftur, mjög rólega með jöfnum hraða a.m.k. til 19. desember þegar mælingar hættu að berast til byggða. Þarna var í fyrstu gert ráð fyrir að hlaup væri að byrja en, þegar sýnt var að lítil eða engin hröðun var á siginu var talið líklegra að þetta væri sírennsli um göng (farveg) af nær fastri stærð. Þetta endaði þó með jökulhlaupi í janúar 2024, sem hegðaði sér svipað og 2022. Gerð verður grein fyrir því í greinargerð um rannsóknir á árinu 2024.

Lokakorð.

Hér að ofan er greint frá helstu niðurstöðum verkefnisins árið 2023, afkomu ársins, rakin þróun vatnsgeymisins og vatnssöfnun frá Grímsvötnun jökulhlaupi í október 2022.

Snjósöfnun að vetri var 13 % undir meðallagi en sumarrýrnun á yfirborði nærri meðallagi. Ársafkoma var jákvæð, eins og alltaf nema 2010, nú 78 % meðalársafkomu. Yfirborðsafkoman jafngildir 0,2 km³ vatns og meðal þykkun íss á ísasviðinu um nærri 1,35 m. Til að afkoma Grímsvatna sé í jafnvægi þyrfti leysing vegna jarðhita að bræða sem nemur ársafkomunni á jökulyfirborði, sem að meðaltali er nú nærri 0,15 km³ að vatnsgildi.

Í upphafi árs 2023 var mjög lítið vatn í Grímsvötnum en um 0,29 km³ þegar vatn fór að renna þaðan, líklega í undir lok nóvember (útrennsli orðið meira en innrennsli í byrjun desember). Innrennsli vegna yfirborðsbráðar var á árinu nærri 0,14 km³. Ef gert er ráð fyrir áþekktum jarðhita og undanfarna ártugi eða um 1,5–2,0 GW ætti 0,14–0,19 km³ (4–6 m³/s) af jarðhitabráð að hafa safnast fyrir á þessum tíma sem að viðbættu yfirborðsbráð passar ágætlega við heildarvatnsmagnið í lok nóvember. Þó virðist sem frá hlaupinu 2022 til maíloka 2023 hafi vatnssöfnun verið einungis um 2 m³/s (15. mynd) þ.e. umtalsvert minni en sem nemur væntri uppsöfnun vegna jarðhita. Sama gerðist veturinn 2021–22 eftir hlaupið í nóvember og desember þann vetur. Þetta bendir til lekið hafi úr vötnum samfelld eða með hléum mánuðina eftir hlaupin 2021 og 2022.

Þó ekki sé gerð grein fyrir því hér var unnið að viðbótum í háupplausnar kortlagningu botnsins í Grímsvatnaskarðinu með íssjá í vorferð Jökklarannsóknafélags Íslands. Bætt var við svæðið sem kortlagt vorið 2021 og 2022. Vonast er til að þessar mælingar hjálpi til skilnings á upphafi jökulhlaupanna og legu farvegs frá Grímsvötnum um skarðið, og breytileika í legu hans.

Þó ekki hafi hlaupið úr Grímsvötnum 2023, var leki þaðan í desember og hlaup svo skömmu eftir áramót í janúar 2024. Þetta er í raun svipuð hegðun og 2022, og verður fróðlegt að sjá hvort þetta er ný regla í hlauphegðun Grímsvatna, þ.e. hlaup á 1. árs fresti.

Sérstakar þakkir til:

tæknimanna Jarðvísindastofnunar Sveinbjörns Steinþórssonar og Þorsteins Jónssonar, Hlyns Skagfjörð HSSR, Andra Gunnarssonar verkfræðings hjá Landsvirkjun og einnig til þáttakenda í vorferð Jöklarannsóknafélags Íslands á Vatnajökul. Einnig er Bergi H. Bergsýni og Benedikt Ófeigssýni á Veðurstofu Íslands, Magnúsi Tuma Guðmundssýni og Þórdísi Högnadóttur við JH, þökkun samvinnan. Joaquín M.C. Belart og Sydney Gunnarson á Landmælingum Íslands er þökkun frumúrvinnsla hæðarlíkana eftir gervitunglagögnum. Síðast en ekki síst er Kristu Hannesdóttur doktorsnema við HÍ þökkun gerð sjálfvirkar úrvinnslu GPS-mælinga og myndrænnar framsetningar þeirra á vefsíðu (<http://husbondi.rhi.hi.is/gvth/>). Pléiades gervitunglaljósmyndir sem hæðarkort eru gerð eftir eru fengnar frá CNES vegna stuðnings CEOS við Iceland Volcanoes Supersite.

Kostnaður á árinu 2022:

Styrkur var : 2.500.000 kr.

Kostnaðarliðir

Vinna við frumúrvinnslu og túlkun mælinga (1.75 mannmánuðir): 1.780.000 kr.

Viðhald mælitækja og tækjamasturs: 255.000 kr.

Kostnaður við mæliferðir: 850.000 kr.

Stjórnunarkostnaður (aðstöðugjald): 62.500 kr.

Samtals kostnaður : 2.947.500 kr.

28. apríl 2024.

Finnur Pálsson og Eyjólfur Magnússon

Jöklahópur Jarðvísindastofnunar Háskóla Íslands

I. tafla: Mæld afkoma í mælistöðvum í Grímsvötnum og næsta nágrenni 2022_23.

b_w : vetrarafkoma, b_s : sumarafkoma, b_n : ársafkoma,
 l_a : nýsnjór að hausti (allar þessar stærðir í m vatns).

Staður	Staðsetning			Lengd	Hæð (m a.s.l.)	Dagur að vori	Dagur að hausti	b_w (m)	b_s (m)	b_n (m)	l_a (m)
K05-23	64	33.446	17	35.458	1679	20230506	20231025	1.558	-0.568	0.99	0.28
K07-23	64	29.115	17	42.036	1531	20230506	20231025	1.357	-1.015	0.342	0.27
S04-23	64	16.181	17	48.192	1156	20230506	20231025	1.487	-3.125	-1.638	0.14
S05-23	64	20.515	17	33.993	1451	20230506	20231025	2.176	-1.132	1.044	0.27
Haab-23	64	20.966	17	24.11	1731	20230506	20231025	2.342	-0.242	2.1	0.27
T07-23	64	25.293	17	31.215	1564	20230506	20231025	1.997	-0.743	1.254	0.21
T08-23	64	26.298	17	27.756	1637	20230506	20231025	1.94	-0.596	1.344	0.26
Bor-23	64	24.938	17	20.154	1412	20230602	20231027	2.37	-1.938	0.432	0.27
Borth-23	64	24.991	17	19.202	1410	20230507	20231027	2.19	-1.626	0.564	0.27
G02-23	64	26.847	17	17.718	1568	20230507	20231024	1.885	-0.787	1.098	0.15
G03-23	64	28.442	17	16.335	1662	20230507	20231024	2.008	-0.628	1.38	0.26
G04-23	64	30.025	17	15.027	1691	20230506	20231024	1.909	-0.523	1.386	0.35
Go1-23	64	33.967	17	24.927	1762	20230506	20231024	1.715	-0.485	1.23	0.37

II. tafla: Afkoma ísasviða Grímsvatna og Gjálpar jökulárið 2022-23.

ΔS : flatarmál á hæðarbili, $\Sigma \Delta S$: summa flatarmáls ofan hæðar, b_w : vetrarafkoma, b_s : sumarafkoma, b_n : ársafkoma, ΔB_w : rúmtak vetrarafkomu á hæðarbili, $\Sigma \Delta B_w$: rúmtak vetrarafkomu ofan gefinnar hæðar, ΔB_s : rúmtak sumarafkomu á hæðarbili, $\Sigma \Delta B_s$: rúmtak sumarafkomu ofan gefinnar hæðar, ΔB_n : rúmtak ársafkomu á hæðarbili, ΣB_n : rúmtak sumarafkomu ofan gefinnar hæðar.

Grímsvötn og Gjálpar (neðri tafla)

Elevation (m a.s.l.)			ΔS (km ²)	$\Sigma \Delta S$ (km ²)	b_w (mm)	b_s (mm)	b_n (mm)	ΔB_w (10 ⁶ m ³)	$\Sigma \Delta B_w$ (10 ⁶ m ³)	ΔB_s (10 ⁶ m ³)	$\Sigma \Delta B_s$ (10 ⁶ m ³)	ΔB_n (10 ⁶ m ³)	ΣB_n (10 ⁶ m ³)
1700	1750	1725	1.3	1.3	1927	-512	1415	2.6	2.6	-0.7	-0.7	1.9	1.9
1650	1700	1675	40.7	42.1	1973	-588	1384	80.4	83.0	-24.0	-24.7	56.4	58.3
1600	1650	1625	30.7	72.8	1985	-682	1303	60.9	143.9	-20.9	-45.6	40.0	98.3
1550	1600	1575	19.6	92.4	2021	-820	1201	39.6	183.5	-16.1	-61.7	23.5	121.8
1500	1550	1525	16.3	108.7	2064	-1001	1063	33.7	217.2	-16.3	-78.0	17.3	139.2
1450	1500	1475	9.5	118.2	2131	-1312	818	20.2	237.4	-12.5	-90.5	7.8	147.0
1400	1450	1425	13.7	131.9	2250	-1709	541	30.9	268.3	-23.5	-113.9	7.4	154.4
1350	1400	1375	1.2	133.1	2016	-1683	333	2.5	270.8	-2.1	-116.0	0.4	154.8
1900	1950	1925	0.4	0.4	2031	-158	1873	0.7	0.7	-0.1	-0.1	0.7	0.7
1850	1900	1875	0.8	1.1	1961	-210	1750	1.5	2.2	-0.2	-0.2	1.3	2.0
1800	1850	1825	1.2	2.3	1871	-279	1592	2.2	4.4	-0.3	-0.5	1.9	3.9
1750	1800	1775	5.5	7.8	1753	-431	1322	9.7	14.1	-2.4	-2.9	7.3	11.2
1700	1750	1725	23.7	31.5	1806	-474	1331	42.9	57.0	-11.3	-14.2	31.6	42.8
1650	1700	1675	7.8	39.4	1884	-489	1394	14.8	71.8	-3.8	-18.0	10.9	53.7

III. tafla: Afrennsli yfirborðsleysingar til Grímsvatna sumarið 2023.

ΔS : flatarmál innan hæðarbils þar sem sumarafkoma er neikvæð (leysing meiri en snjósöfnun sumars), $\Sigma \Delta S$: uppsafnað flatarmál, ΔQ_s : afrennsli frá hæðarbili, metið eftir sumarafkomu, $\Sigma \Delta Q_s$: uppsafnað afrennsli frá svæði ofan tiltekinnar hæðar, metið eftir sumarafkomu.

Vatnasvið Grímsvatna

Elevation (m a. s. l.)		ΔS km ²	$\Sigma \Delta S$ km ²	ΔQ_s (10 ⁶ m ³)	$\Sigma \Delta Q_s$ (10 ⁶ m ³)
1900	1950	0.4	0.4	0.1	0.1
1850	1900	1.4	1.8	0.3	0.4
1800	1850	1.7	3.5	0.5	0.8
1750	1800	4.9	8.3	2.1	2.9
1700	1750	24	32.3	11.4	14.4
1650	1700	48	80.3	27.4	41.8
1600	1650	30.7	111.0	21.0	62.7
1550	1600	19.6	130.6	16.1	78.8
1500	1550	16.2	146.8	16.2	95.0
1450	1500	9.5	156.3	12.5	107.5
1400	1450	13.7	170.0	23.5	130.9
1350	1400	1.2	171.3	2.1	133.0

IV. tafla: Mæld hnit hraðamælistika.

Hnit hraðamælistaka eru mæld með GNSS tækjum: “differential, DGPS” (I), “fast static” (FS), eða “kinematic” (K) mæliaðferð.

(Nákvæmni mælinga er 0.2-1.0 m í fleti og 0.5-2.0 m í hæð fyrir DGPS, 1-5 cm í fleti og 2-10 cm í hæð fyrir fast static og kinematic).

GPS stöðin á Höfn í Hornafirði er notuð sem viðmiðun fyrir allar mælingarnar, með föstum hnitum. Viðmiðunarkerfi er ÍSN93 datum, h_1 er hæð yfir ellipsíóðu, dL loftnets hæð, N metinn hæðarmunur ellipsíóðu og meðalsjávarborðs, H hæð yfir meðalsjávarfleti ($H = h_1 + N + dL$). X and Y eru í ÍSN93 “Lambert conformal conic” vörpun. M er gæðamerki.

Stöð	Dag númer				Ár	Breidd	Lengd	h_1	dL	N	H	X	Y	M		
	tími	Dags	#	(m y. e.)				(m)	(m)	(m y. s.)						
Bor-23	14.12	2	6	153	2023	64	24.93782	17	20.15447	1480.56	-1.26	-67.70	1411.60	580203.31	435909.79	K
Bor-23	12.83	27	10	300	2023	64	24.93314	17	20.15922	1496.23	0.00	-67.70	1428.53	580199.73	435901.00	K
G02-23	19.45	7	5	127	2023	64	26.84696	17	17.71810	1635.34	0.00	-67.73	1567.61	582064.28	439507.82	K
G02-23	11.15	24	10	297	2023	64	26.84273	17	17.72185	1634.66	-1.77	-67.73	1565.17	582061.48	439499.89	K
G03-23	18.81	7	5	127	2023	64	28.44152	17	16.33470	1729.51	0.00	-67.74	1661.78	583092.99	442499.54	K
G03-23	11.49	24	10	297	2023	64	28.43946	17	16.33598	1728.79	-2.10	-67.74	1658.95	583092.07	442495.69	K
G04-23	10.38	6	5	126	2023	64	30.02476	17	15.02675	1758.88	0.00	-67.73	1691.15	584059.71	445468.90	K
G04-23	12.45	24	10	297	2023	64	30.02508	17	15.02649	1758.43	-2.35	-67.72	1688.36	584059.90	445469.50	K
Go1-23	11.25	6	5	126	2023	64	33.96748	17	24.92679	1829.56	0.00	-67.84	1761.72	575950.18	452583.10	K
Go1-23	13.10	24	10	297	2023	64	33.96599	17	24.92618	1829.43	-2.40	-67.86	1759.17	575950.74	452580.34	K
Haab-23	10.95	6	5	126	2023	64	20.96631	17	24.11018	1798.70	0.00	-67.54	1731.16	577213.02	428451.08	K
Haab-23	10.80	25	10	298	2023	64	20.96676	17	24.10999	1795.33	0.00	-67.54	1727.79	577213.15	428451.92	K
K05-23	14.34	6	5	126	2023	64	33.44646	17	35.45784	1746.98	0.00	-67.82	1679.16	567560.40	451416.09	K
K05-23	11.91	25	10	298	2023	64	33.44370	17	35.47278	1743.61	0.00	-67.82	1675.79	567548.58	451410.70	K
K06-23	12.70	6	5	126	2023	64	38.35357	17	31.31262	2014.24	0.00	-67.88	1946.37	570659.23	460606.65	K
K06-23	17.81	24	10	297	2023	64	38.35319	17	31.31006	2014.66	-2.55	-67.88	1944.23	570661.29	460605.98	K
S05-23	11.66	6	5	126	2023	64	20.51465	17	33.99310	1518.88	0.00	-67.51	1451.36	569275.50	427421.30	K
S05-23	11.19	25	10	298	2023	64	20.51258	17	34.01067	1515.16	0.00	-67.51	1447.64	569261.43	427417.14	K
T07-23	15.36	6	5	126	2023	64	25.29334	17	31.21459	1631.41	0.00	-67.70	1563.71	571305.27	436349.26	K
T07-23	11.60	25	10	298	2023	64	25.29120	17	31.22372	1629.94	-1.90	-67.70	1560.34	571298.03	436345.11	K
T08-23	16.03	6	5	126	2023	64	26.29828	17	27.75570	1704.46	0.00	-67.75	1636.71	574037.23	438282.17	K
T08-23	11.11	25	10	298	2023	64	26.29798	17	27.75821	1701.57	0.00	-67.75	1633.82	574035.23	438281.57	K

V. tafla: Mældur hraði hraðamælistika.

Mælistöð	dagur dags.	#	dagur dags.	#	fjöldi daga	færsla (m)	(°)	hraði (sm/dag)	m/ári
Bor-23	230602	153	231027	300	147	9.47	204	6.44	23.51
G02-23	230507	127	231024	297	170	8.39	201	4.94	18.02
G03-23	230507	127	231024	297	170	3.95	195	2.32	8.48
G04-23	230506	126	231024	297	171	0.63	19	0.37	1.34
Go1-23	230506	126	231024	297	171	2.80	170	1.64	5.98
Haab-23	230506	126	231025	298	172	0.85	10	0.49	1.80
K05-23	230506	126	231025	298	172	12.98	247	7.55	27.55
K06-23	230506	126	231024	297	171	2.16	109	1.26	4.60
K07-23	230506	126	231025	298	172	1.36	284	0.79	2.89
S05-23	230506	126	231025	298	172	14.66	255	8.52	31.10
T06-23	230506	126	231025	298	172	12.85	231	7.47	27.27
T07-23	230506	126	231025	298	172	8.33	242	4.84	17.68
T08-23	230506	126	231025	298	172	2.09	255	1.21	4.43

VI. tafla: Helstu kennitölur jökulhlaupa frá Grímsötum 1998 til 2023.

	dnu- max	dnu- min	man- max	man- min	vb- max	vb-min	dz	A- max	A- min	V- max	V- min	dV	
1998,13	46	61	feb	mars	1407	1348	59	13,4	2,8	0,51	0,05	0,46	
1999,08	31	34	jan	jan	1390	1338	52	10,3	1,3	0,30	0,03	0,27	
1999,81	295	317	sept	okt	1386	1349	37	9,7	2,9	0,27	0,05	0,22	
2000,56	206	218	júl	agúst	1369	1350	19	5,6	2,9	0,12	0,05	0,07	
2001,92	337	354	des	des	1397	1391	7	11,6	10,5	0,38	0,31	0,08	
2002,20	72	106	feb	april	1399	1361	38	12,0	4,0	0,41	0,09	0,32	
2004,79	288	315	okt	nov	1422	1378	44	16,5	8,1	0,73	0,19	0,55	+0,1 bráðnun í gosi
2005,18	66	77	mars	mars	1385	1361	25	9,6	4,0	0,26	0,09	0,17	
2007,83	301	305	okt	okt	1400	1372	28	12,1	6,8	0,42	0,15	0,27	
2008,72	264	275	sept	okt	1391	1369	22	10,7	5,8	0,32	0,13	0,19	
2010,84	304	310	okt	nóv	1419	1370	49	15,8	6,1	0,68	0,14	0,55	
2012,16	28	32	jan	feb	1405	1370	35	13,1	6,1	0,50	0,14	0,36	
2012,88	323	331	nóv	nóv	1388	1367	21	11,0	5,7	0,32	0,10	0,22	
2014,21	71	86	mars	mars	1392	1371	22	11,0	5,8	0,35	0,14	0,21	
2015,36	126	138	maí	maí	1398	1374	24	12,0	7,3	0,40	0,16	0,24	
2016,62	228	239	águ	ágú	1386	1376	10	9,7	7,8	0,27	0,18	0,09	
2018,44	152	163	jún	júní	1400	1379	21	12,1	8,3	0,42	0,19	0,23	
2021,90	324	341	nóv	des	1443	~1330	~113	18,5	0,0	0,95	0,00	0,95	
2022,90	278	287	okt	okt	1393	~1330	~63	9,5	0,0	0,17	0,00	0,17	

Helstu kennitölur jökulhlaupa frá Grímsötum 1998 til 2023. Hér er da-by og da-en dagnúmer við upphaf og lok hlaups; vb-max og vb-min hæst og lægsta vatnsborð, dz vatnshæðarbreyting (m); A-max og A-min mesta og minnsta flatarmál fljótandi hluta íshellunnar (km²) V-max og V-min rúmmál vatns við upphaf og lok hlaups (km³), dV rúmmál vatns sem rann frá Grímsvötnum (km³).