

Hermun á framgangi Grímsvatnahlaupa framan Skeiðarárjökuls og á Skeiðarársandi

Lokaskýrsla, mars 2023

Bergur Einarsson

Þjónustu- og rannsóknasvið, Veðurstofa Íslands, 105 Reykjavík

Efnisyfirlit

EFNISYFIRLIT.....	1
MYNDASKRÁ.....	2
TÖFLUSKRÁ.....	2
1 MEGINNIÐURSTÖÐUR.....	3
2 INNGANGUR.....	3
Markmið verkefnisins.....	4
Fyrri rannsóknir á Grímsvatnahlaupum.....	4
Grímsvatnahlaupið 2021.....	5
3 AÐFERÐIR.....	5
Straumfræðilegir líkanreikningar á jökulhlaupum.....	5
Landhæðargögn.....	6
Rennslisgögn, upphafs- og jaðarskilyrði.....	7
4 NIÐURSTÖÐUR.....	8
Hermun á hlaupinu 2021.....	8
Hermun á stóru Grímsvatnahlaupi á við hlaupið 1996.....	11
5 UMRÆÐUR.....	13
Mótun á rennsli Grímsvatnahlaupa framan Skeiðarárjökuls.....	13
Áhrif lónanna framan við Skeiðarárjökul á mælda leiðni í hlaupum.....	14
Framgangur stórra Grímsvatnahlaupa.....	15
6 LOKAORÐ.....	16
ÞAKKIR.....	17
HEIMILDIR.....	17

Myndaskrá

Mynd 1. Rennslisrit Grímsvatnahlaupsins 2021 við jökuljaðar og Gígjukvíslarbrú.....	8
Mynd 2. Rennslisrit Grímsvatnahlaupsins 2021 við Gígjukvíslarbrú á hálflogra grafi.	9
Mynd 3. Rennslisrit Grímsvatnahlaupsins 2021 við Gígjukvíslarbrú á hálflogra grafi. Myndin er dregin inn að hámarki hlaupsins.....	9
Mynd 4. Mesta hermda vatnsdýpi framan Skeiðarárjökuls í Grímsvatnahlaupinu 2021.	10
Mynd 5. Mesta hermda vatnsdýpi við Gígjukvíslarbrú í Grímsvatnahlaupinu 2021.	11
Mynd 6. Mesta hermda vatnsdýpi framan Skeiðarárjökuls í Grímsvatnahlaupi áþekku hlaupinu 1996. Hér er gert ráð fyrir að vatnið komi fram í nokkrum megin útföllum undan jöklinum líkt og raunin var 1996.....	11
Mynd 7. Mesta hermda vatnsdýpi framan Skeiðarárjökuls í Grímsvatnahlaupi áþekku hlaupinu 1996. Hér er gert ráð fyrir að vatnið komi allt fram austast undan jöklinum til að kanna verra tilfelli m.t.t. hættunnar á að vatn komi aftur í farvegi Skeiðarár, Sæluhússkvíslar eða Háöldukvíslar.	12
Mynd 8. Mesta hermda vatnsdýpi við Gígjukvíslarbrú í hlaupi áþekku hlaupinu 1996.	13
Mynd 9. Mesti hermdi straumhraði við Gígjukvíslarbrú í hlaupi áþekku hlaupinu 1996.	13
Mynd 10. Samfelldar vatnshæðar- og rafleiðnimælingar á Gígjukvíslarbrú, í Grímsvatnahlaupinu 2021.	14
Mynd 11. Hermd mesta vatnshæð í hlaupum álfikum Grímsvatnahlaupinu 1996 og landhæð á þversniðum eftir farvegi Skeiðarár og Háöldukvíslar.	15

Töfluskrá

Tafla 1. Tvöföldunartímar rennslisrita Grímsvatnahlaupanna 2021, 2010 og 2004.	10
---	----

1 Meginniðurstöður

- Ferð Grímsvatnahlaupsins 2021 vestur með Skeiðarárjökli að farvegi Gígjukvíslar veldur ekki mikill dempun á hámarksrennsli hlaupsins. Hámarksrennsli hlaupsins reiknast aðeins 5% hærra við jökuljaðar heldur en það er metið niður við Gígjukvíslarbrú.
- Ferð Grímsvatnahlaupsins 2021 vestur með Skeiðarárjökli að farvegi Gígjukvíslar veldur ekki mikilli breytingu í vaxtarhraða. Tvöföldunartími reiknaðs rennslis við jökuljaðar er innan við klukkutíma styttri heldur en tvöföldunartími reiknaðs rennslis niður við brú. Tvöföldunartími hlaupsins við jaðar er aftur á móti um 10 tímum styttri heldur en tvöföldunartíminn á rennsli úr Grímsvötnum. Vaxtarhraði og tvöföldunartími hlaupsins 2021 eru verulega frábrugðnir því sem var 2004 og 2010 og þessi breyting er ekki tilkomin vegna breytinga framan jökuls.
- Ferðalag hlaupsins undir jöklinum er ennþá ráðandi þáttur í lögun rennslisrits hlaupsins. Mun meiri munur er á rennslisriti hlaupsins út úr Grímsvötnum og rennslisritinu við jaðar, heldur en á rennslisritinu við jaðar og niður við brú.
- Ekki er búist við að vatn flæði aftur um farvegi Skeiðarár, Sæluhússkvíslar eða Háöldukvíslar komi til jökulhlaups sem verður ámóta stórt og hlaupið 1996, miðað við núverandi aðstæður framan Skeiðarárjökuls. Þessi niðurstaða gildir líka þótt allt rennsli hlaups á við 1996 hlaupið sé látið koma fram austast við jökulinn. Þá vantar ennþá 7 m uppá að vatn nái aftur upp í lægsta punkt fyrrum farvegar Skeiðarár og rúma 4 m til að vatn nái aftur upp í lægsta punkt á varnargarði í fyrrum farvegi Háöldukvíslar. Sé jakaburður í hlaupinu mikill og íshrannir þrengi að flæðinu meðfram jöklinum er þó ekki hægt að útiloka að vatn geti komið fram í einhverja af þessum fyrri farvegum í stórhlaupum.
- Rúmmál lóna framan við Skeiðarárjökul er orðið umtalsvert samanborið við rúmmál vatns fyrstu dagana í hlaupum úr Grímsvötnum. Þetta minnkar næmni leiðnimælinga á Gígjukvíslarbrú fyrir upphafi hlaupa. Því er æskilegt að reka aðrar mælistöðvar sem greint geta upphaf Grímsvatnahlaupa. GPS mælingar Jarðvísindastofnunar Háskólans á hæð íshellunnar yfir Grímsvötnum sinna þessu hlutverki vel.

2 Inngangur

Grímsvatnahlaup hafa löngum valdið vandræðum í samgöngum yfir Skeiðarársand og geta ennþá ógnað vegum og brúarmannvirkjum á sandinum. Undanfarna áratugi hafa orðið miklar breytingar við jaðar Skeiðarárjökuls vegna hops hans. Lón hafa myndast við jökuljaðarinn, auk þess sem rennslisleiðir frá útföllum við jaðar jökulsins hafa breyst. Bæði fyrrum Skeiðará og Súla falla nú til sjávar um farveg Gígjukvíslar. Þessar breytingar hafa áhrif á framgang Grímsvatnahlaupa framan jökulsins og hvaða leiðir þau fara til sjávar. Þau renna nú vestur með jöklinum og um farveg Gígjukvíslar í stað þess að fara að stórum hluta um farveg Skeiðarár líkt og áður.

Til að skilja betur áhrif þessara breytinga á helstu kennistærðir Grímsvatnahlaupa, svo sem rishraða og hámarksrennsli, var toppur hlaupsins í desember 2021 rakinn, með straumfræðilegum líkanreikningum, frá jökuljaðri og niður fyrir Gígjukvíslarbrú. Notast var við straumfræðilíkanið HEC-RAS við flóðrakninguna. Mælingar á rennsli hlaupsins á brúnni eru notaðar til viðmiðunar í kvörðun líkansins. Mælingar Jarðvísindastofnunar Háskólans á útrennsli úr Grímsvötnum eru nýttar sem upphafsmat á rennsli við jökuljaðar. Innrennsli í reikningana við jökuljaðar var kvarðað þar til samsvörun fékkst við mælda rennslið á Gígjukvíslarbrú. Landhæðarlíkan frá haustinu 2021 af Vatnajökli og jöðrum hans og nýleg landhæðarlíkon af Skeiðarársandi eru notuð sem grunnöggn til að byggja hermunina á.

Uppsetning straumfræðilíkansins var svo notuð til að rekja framgang hlaups á stærð við stærstu fyrri hlaup. Hámarksrennsli og rennslisrit sviðsmyndarinnar voru miðuð við hlaupið í nóvember 1996.

Þess skal getið að kortagerð í verkinu var einfölduð til að ná að vinna fullt verk þó að ekki hafi fengist fullur styrkur. Kort í þessari skýrslu eru því aðeins skjáskot úr RAS-Mapper en GEOTiff skrár af öllum helstu niðurstöðum eru tiltækar til frekari kortagerðar. Framsetning á gröfum er einnig ekki samræmd af sömu ástæðu. Verkefnið er unnið með styrk frá Rannsóknasjóði Vegagerðarinnar, styrkur 1800-910. Höfundur skýrslunnar ber ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirrar stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

Markmið verkefnisins

Meginmarkmið verkefnisins er að kanna hvaða áhrif breytingar framan við Skeiðarárjökul, vegna hops hans, hafa á framgang og hegðun Grímsvatnahlaupa. Niðurstöður slíkrar könnunar nýtast til að meta hvort hop jökulsins hafi áhrif á hættuna sem Grímsvatnahlaup geta skapað brúm og vegum á Skeiðarársandi. Niðurstöðurnar nýtast einnig til að meta hvort ástæða sé til að breyta viðvörðunum og viðbrögðum við hlaupum.

Tveimur megin rannsóknarspurningum er svarað í verkefninu.

- i) Hvaða mótun verður á rennsli hlauptoppa á leið þeirra frá jökuljaðri og niður að Gígjukvíslarbrú? Þær niðurstöður nýtast til að greina betur mun í vaxtarhraða hlaupsins í desember 2021 og hlaupanna í október 2004 og október 2010. Með því má svo greina hvort einhverjar breytingar séu í framgangi hlaupanna undir Skeiðarárjökli eða hvort að munurinn sé tilkominn vegna breytinga framan jökuls. Niðurstöðurnar munu einnig nýtast til að meta breytingar í blöndun hlaupvatns við vatn í lónunum framan jökuls. Slíkt gæti mögulega útskýrt litla hækkun á leiðni, í upphafi hlaupsins 2021, í mælingum á Gígjukvíslarbrú. Leiðniaukning hefur annars oft verið fyrsta ábending um komu hlaupvatns fram á Skeiðarársand.
- ii) Hver yrði framgangur stórhlaupa á borð við þekkt Grímsvatnahlaup af stærstu gerð, miðað við núverandi aðstæður framan Skeiðarárjökuls? Niðurstöður nýtast til að meta hvort hlaup á við flóðið í nóvember 1996 geti nú í dag skapað hættu við Morsárbrú og Skeiðarárbrú. Niðurstöður úr þeirri hermun nýtast einnig til að meta þá hættu sem Gígjukvíslarbrú og öðrum vegamannvirkjum á Skeiðarársandi getur stafað af slíkum stórhlaupum við núverandi aðstæður.

Fyrri rannsóknir á Grímsvatnahlaupum

Jökulhlaup frá Grímsvötnum hafa verið mikið rannsökuð í gegnum tíðina. Sú rannsóknasaga fram til 1974 og saga Skeiðarárhlaupa og Grímsvatnagosa fram að sama tíma hefur verið tekin saman af Sigurði Þórarinssyni (1974). Síðan þá hafa hlaupin frá Grímsvötnum orðið vagga kenninga um hegðun og helstu eiginleika hægrísandi jökulhlaupa (Helgi Björnsson, 1974) og samanburðardæmi fyrir fræðilega líkanreikninga á rennslisritum slíkra hlaupa (Nye, 1976). Margir þættir í hegðun hlaupanna að jökuljaðri, svo sem uppsöfnun vatns undir jöklinum og lyfting jökulsins meðan á hlaupunum stendur, eru þó ennþá ekki að fullu skýrðir og því þörf á lagfæringum á fyrri kenningum (Bergur Einarsson og fleiri, 2016).

Mat og mælingar á rennsli hlaupanna hefur verið grunnurinn undir mikið af þessari rannsóknarvinnu. Rennslisrit hlaups var fyrst metið með mælingum 1954 af Sigurjóni Rist (Sigurjón Rist, 1955). Á þeim tíma og fram til 2009 var farvegur Skeiðarár frekar einfaldur beint

niður sandinn frá útfalli við jökuljaðar (Sigurður Þórarinnsson, 1974; Ágúst Þór Gunnlaugsson, 2010). Eftir 2009 hefur Skeiðará og Grímsvatnahlaup aftur á móti fallið flóknari leið í gegnum nokkur sístækkandi jökullón framan Skeiðarárjökuls og þaðan í Gígjukvísl (Ágúst Þór Gunnlaugsson, 2010; Snævarr Guðmundsson og fleiri, 2019). Fram til þessa hefur ekki verið rannsakað hvaða áhrif þessar breytingar á rennislísiðum hlaupanna hafa á mótun rennislísis þeirra frá jökli að núverandi mælistað á brúnni yfir Gígjukvísl.

Grímsvatnahlaupið 2021

Seinni hluta nóvember 2021 hófst jökulhlaup úr Grímsvötnum. Hlaupið er, ásamt hlaupunum 2004 og 2010, með stærstu hlaupum frá stóra hlaupinu í nóvember 1996. Af samfelldum GPS mælingum á hæð íshellunnar í Grímsvötnum mátti ráða að útrennsli hefði hafist þaðan í kringum 18. nóvember. Ekki verður vart við örugg merki um hlaupvatn í Gígjukvísl fyrr en í rennislismælingu þann 29. nóvember (mynd 1). Merkja má örlitla aukningu í mælingum á vatnshæð í ánni frá u.þ.b. 27. nóvember (mynd 10).

Engin auðtúlkanleg merki eru um aukningu á rafleiðni í ánni fyrstu daga hlaupsins. Skýr merki um rafleiðniaukningu koma ekki fram fyrr en 29. nóvember. Slíkt er óvenjulegt því oftast hefur aukning í rafleiðni verið fyrsta mælanlega vísbending utan jökuls um hlaup. Ekki er ljóst hvað veldur því hve óljóst upphaf hlaupsins er í leiðnimælingum.

Fræðilega fellur ris hægrísandi jökulhlaupa að aðfellufalli sem liggur mjög nærri veldisvexti (Nye, 1976; Tómas Jóhannesson, 2002). Það er því hægt að nálgast rennislísvöxt hægrísandi jökulhlaupa, líkt og flest Grímsvatnahlaup eru, með veldisfalli (Bergur Einarsson og fleiri, 2016). Með því móti má meta tvöföldunartíma hlaupanna. Hlaup fram að hlaupinu í nóvember 1996 hafa svipaðan vaxtarhraða (Bergur Einarsson og fleiri, 2016). Hlaupið 1996 er hins vegar hraðvaxandi og fellur ekki að kenningum um hægrísandi jökulhlaup (Tómas Jóhannesson, 2002). Eftir það hlaup verður svo einhver breyting á aðstæðum í jöklinum og vaxtarhraðinn eykst en er engu að síður áfram mjög svipaður milli hlaupa. Munur á vaxtarhraða í hlaupunum 2004 og 2010 er t.d. innan við 5% (Bergur Einarsson og fleiri, 2016). Vaxtarhraði í hlaupinu 2021 er aftur á móti umtalsvert frábrugðinn vaxtarhraðanum 2004 og 2010, þó að þessi hlaup séu annars öll að mörgu leyti áþekkt. Tvöföldunartíminn 2021 er 33–34 tímar en 2004 og 2010 er hann á bilinu 18 til 19 tímar, sjá nánar töflu 1.

3 Aðferðir

Straumfræðilegir líkanreikningar á jökulhlaupum

Straumfræðilíkanið HEC-RAS hefur verið talsvert notað til að rekja framgang jökulhlaupa á Íslandi. Sem dæmi má nefna rakningu á Skaftárhlaupi frá jökuljaðri að Sveinstindi (Sveinbjörn Jónsson, 2007), rakningu hlaups úr Hafrafellslóni niður Hvítá í Borgarfirði (Bergur Einarsson, 2021) og áhættumat vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli (Bergur Einarsson, 2022). Í seinni tveimur verkefnum er notast við tvívíða útgáfu líkansins. Þessi útgáfa líkansins leysir tvívíðu dýpshéilduðu Navier–Stokes jöfnurnar tölulega á samfelldu reiknineti (Brunner, 2016).

Önnur líkön hafa einnig verið notuð við straumfræðilega líkanreikninga á jökulhlaupum hérlendis. Líkanið GeoClaw hefur verið notað við hættumat vegna Skaftárhlaupa (Mattías Ásgeir Jónsson og fleiri, 2018) og hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum (Sigríður Sif Gylfadóttir og fleiri, 2017). Straumfræðilíkan Vatnaskila, AQUARIVER, hefur svo einnig verið notað í ýmsar hermanir á jökulhlaupum frá Mýrdalsjökli (t.d. Sigurður Lárus Hólm og Snorri Páll Kjarran, 2005; Vatnaskil, 2006; Helgi Gunnar Gunnarsson og fleiri, 2018).

Hvert líkan hefur sína kosti og galla en samanburður, í yfirstandandi verkefni um áhættumat vegna jökulhlaupa til suðurs og vesturs vegna eldgosa í eldstöðvakerfi Bárðarbungu, sýnir að niðurstöður með GeoClaw og HEC-RAS eru jafngildar fyrir jökulhlaupasviðsmyndir. Notast er við hina tvívíðu útgáfu HEC-RAS í þessari rannsókn. HEC-RAS hefur nú þegar verið beitt á svæðið framan Skeiðarárjökuls við gróft mat á því hvort flætt geti yfir í fyrrum farveg Skeiðarár í stórum jökulhlaupum, miðað við aðstæður um 2015.

Notast er við reikninet þar sem stærð reglulegra reita er 20x20 m fyrir mestan hluta svæðisins. Á rúmlega 3x4 km stóru svæði umhverfis brúna á Gígjukvísl er notast við þéttara reikninet með 8x8 m reglulegum reitum. Ekki kom fram teljandi munur við næmnigreiningu þar sem notast var við tvöfalt þéttara reikninet (10x10 m reitir fyrir mest allt svæðið en 4x4 m reitir á svæðinu við brúna).

Viðnámi í reikningunum er lýst með hrýfisstuðli Mannings og er notast við meðal-hrýfisstuðul fyrir Sólheimasand, $0,04 \text{ m}^{-1/3}$ s, (Bergur Einarsson og fleiri, 2022), enda má búast við því að helstu eiginleikar Sólheimasands og Skeiðarársands séu svipaðir. Matið fyrir Sólheimasand byggir á vettvangsrannsóknum Russell og fleiri (2010) á völdum þversniðum á Sólheimasandi eftir jökulhlaupið 1999. Líta má á það mat sem lægri mörk líklegra gilda því að í slíku mati er ekki tekið tillit til áhrifa setframburðar og ísjaka, sem hvort tveggja eykur núning í jökulhlaupum. Munar þar sýnu mest um ísjaka sem oft brotna úr hluta jökulsporðsins við hlaup og berast fram með flóðinu (Haukur Tómasson 1996; Guðrún Larsen, 2018). Einnig er þekkt að ísjakar myndist þar sem jökulhlaup brjóta sér leið upp á yfirborð jökulsins nærri jaðri hans og þar sem straumbungi hlaupvatns úr slíkum uppsprettum rýfur jökulyfirborðið (Matthew James Roberts o.fl., 2000). Jakarnir geta svo hlaðist upp og myndað hrannir, sem halda aftur af rennslinu, neðar í farvegi hlaupsins (Haukur Tómasson, 1996). Matið sem notast er við á því betur við hlaup líkt og 2021 hlaupið, þar sem jakaframburður var ekki mikill, heldur en stærri hlaup líkt og 1996 hlaupið sem bar fram mikinn fjölda ísjaka. Sama mat er engu að síður notað hér í reikningum fyrir bæði tilföllin.

Landhæðargögn

Notast er við þrjú landhæðarlíköni í verkefninu.

- i) Líkan af Vatnajökli og svæðum við jaðra hans, byggt á Pleiades gervihnattamynd frá 16. ágúst 2021. Líkanið er unnið af Tómasi Jóhannessyni á Veðurstofunni og Joaquin Belart hjá Landmælingum Íslands. Líkanið er lagt á 2x2 m rasta og er hliðrað bæði lárétt og lóðrétt að ÍslandsDEM útgáfu 1. Minniháttar göt í úrvinnslunni eru brúuð með teygjuvörpun með nálægðarvægi.
- ii) Lidar líkan Vegagerðarinnar frá 2017. Líkanið þekur um 2,5 km breiða ræmu utan um farveg Gígjukvíslar. Líkanið nær rúma 3 km upp eftir farvegi árinna frá Gígjukvíslarbrú og rúma 4 km niður með ánni frá brúnni. Landhæðarlíkanið var afhent sem punktský sem unnið var yfir í reglulegan 2x2 m rasta. Samanburður við ÍslandsDEM útgáfu 1 benti til að ekki væri ástæða til að hliðra líkaninu.
- iii) ÍslandsDEM útgáfa 1 frá Landmælingum í 2x2 m upplausn. Líkanið er notað sem viðmiðunarlíkan og er því notað óhliðrað. Líkanið er búið til með því að finna miðgildi margra hæðarlíkana fyrir hvern punkt. Gögnin eru því frá mismunandi árum, þau elstu frá 2008 en flest frá 2012 (Landmælingar Íslands, 2020).

Gæði og óvissa hvers líkans eru mismunandi en ekki er lagt í sérstaka greiningu á þeim atriðum hér. Það má þó búast við að nákvæmni Lidar líkans Vegagerðarinnar sé mest, svo komi ÍslandsDEM næst að gæðum og að lokum Pleiades líkanið. Pleiades líkanið hefur það þó fram yfir hin tvö að það gefur besta mynd af núverandi aðstæðum við jökuljaðarinn. Þegar landlíkönin

Þrjú eru felld saman í eitt samfellt líkan sem straumfræðireikningarnir eru keyrðir á, er því Lidar líkan Vegagerðarinnar notað á öllu því svæði sem það nær yfir, Pleiades líkanið á öllu því svæði sem það nær yfir utan þess svæðis sem Lidar líkanið hylur en ÍslandsDEM útgáfa 1 á þeim svæðum innan reikninsins sem hvorugt hinna líkananna hylur. Öll ummerki um brúna yfir Gígjukvísl eru fjarlægð úr líkaninu og svæðið í staðinn fyllt með brúun á dýptargildum farvegarins ofan og neðan brúarinnar.

Upphaflega stóð til að lónin framan jökulsins yrðu brennd ofan í landhæðarlíkanið. Við fyrstu tilraunakeyrslur þar sem grunnrennsli frá jöklinum var keyrt inn á óbreytt landhæðarlíkan kom í ljós að þrengingar í farvegi árinna mynduðu nokkurra metra djúp lón í helstu lónstæðum. Dýpi þessara lóna var að stærstum hluta á bilinu 1–10 m. Af samanburði í jökulhlaupareikningum fyrir áhættumat við Sólheimajökul (Bergur Einarsson og fleiri, 2022) mátti draga þá ályktun að umtalsverðu máli skiptir að tekið sé tillit til jaðarlóna við jökla en einnig kom í ljós að reikningarnir væru ekki viðkvæmir fyrir nákvæmri lögun lónbotnsins. Lónin sem myndast við keyrslu grunnrennslis inn á landhæðarlíkanið voru því látin duga sem túlkun lónanna í líkanreikningunum, þó að dýpi þeirra sé vanmetið miðað við raunverulegt dýpi lónanna. Engar breytingar voru því unnar á landhæðarlíkaninu í lónstæðunum.

Rennslisgögn, upphafs- og jaðarskilyrði

Notast er við rennslismælingar af Gígjukvíslarbrú á hlaupinu 2021 til samanburðar við straumfræðilegu líkanreikninga. Alls voru 13 stakar rennslismælingar gerðar á hlaupinu, dagana 29. nóvember til 9. desember. Mælingarnar voru allar gerðar með því að teyma straumsjá eftir Gígjukvíslarbrúnni. Sitthvort veldisfallið var fellt að gögnunum með aðhvarfsgreiningu, eitt fyrir rísanda hlaupsins og annað fyrir fallandann. Hámark hlaupsins er metið sem rúmlega $3650 \text{ m}^3/\text{s}$ í skurðpunkti fallanna, rétt fyrir kl. 04:00 þann 5. desember (mynd 1). Búast má við að hlauptoppurinn hafi í raun verið talsvert ávalari heldur en skurðpunktur tveggja gagnstæðra veldisfalla (persónuleg samskipti, Hilmar Björn Hróðmarsson). Raunverulegt hámarksrennsli við brúna er því eitthvað lægra. Óljóst er hversu mikið ætti að draga af hámarksrennslinu og því er notast hér við þessa stærðfræðilegu nálgun hlaupsins. Samsettur ferill veldisaðhvarfanna er kallaður mældur ferill til einföldunar í skrifum.

Mat Jarðvísindastofnunar Háskólans á útrennslinu úr Grímsvötnum, byggt á GPS mælingum Veðurstofunnar á hæð íshellunnar á lóninu, er nýtt sem fyrsta ágiskun um rennslisrit hlaupsins við jökuljaðar. Bilun varð í GPS mælingunum rétt um toppinn á útrennslinu en toppurinn er metinn með fjaðurbrúun. Vert er að hafa líka í huga að nærri toppi hlaupsins gæti það haft áhrif að íshellan undir og nærri GPS stöðinni er farin að nálgast botninn. Nái hellan að setjast á botn nærri stöðinni hefur það áhrif á sigið og dregur úr hraða þess og veldur þar með vanmati á útrennsli. Toppurinn í útrennsli gæti því hafa verið hærri en þetta mat gefur til kynna (persónuleg samskipti, Eyjólfur Magnússon). Rennslisritið er sett sem jaðarskilyrði á straumfræðilegu líkanreikningana og allt látið koma fram austast við Skeiðarárjökul, á sama stað og hlaupið 2021 kom fram. Niðurstöður úr keyrslu, þar sem fast $50 \text{ m}^3/\text{s}$ grunnrennsli frá jöklinum hefur náð jafnvægi allan farveginn niður fyrir Gígjukvíslarbrú, eru notaðar sem upphafsskilyrði fyrir hlaupreikningana.

Metið rennsli 1996 hlaupsins við jökuljaðar er notað sem jaðarskilyrði fyrir seinni hluta verkefnisins. Rennslisferlarnir eru byggðir á sjónrænu mati á rennsli vatnsfallanna Skeiðarár, Gígjukvíslar og Núpsvatna (Árni Snorrason og fleiri, 1997). Notast er við tvær útgáfur af þessum rennslisferlum. Í annarri útgáfunni er metið rennsli í i) Skeiðará, nýtt sem jaðarskilyrði austast við Skeiðarárjökul, á sama stað og 2021 hlaupið kom fram ii) Gígjukvísl, nýtt sem jaðarskilyrði við núverandi jökuljaðar beint norður af megin útfalli Gígjukvíslar við jökuljaðarinn í 1996 hlaupinu og iii) Núpsvötnum, nýtt sem jaðarskilyrði þar sem núverandi farvegur Súlu kemur að

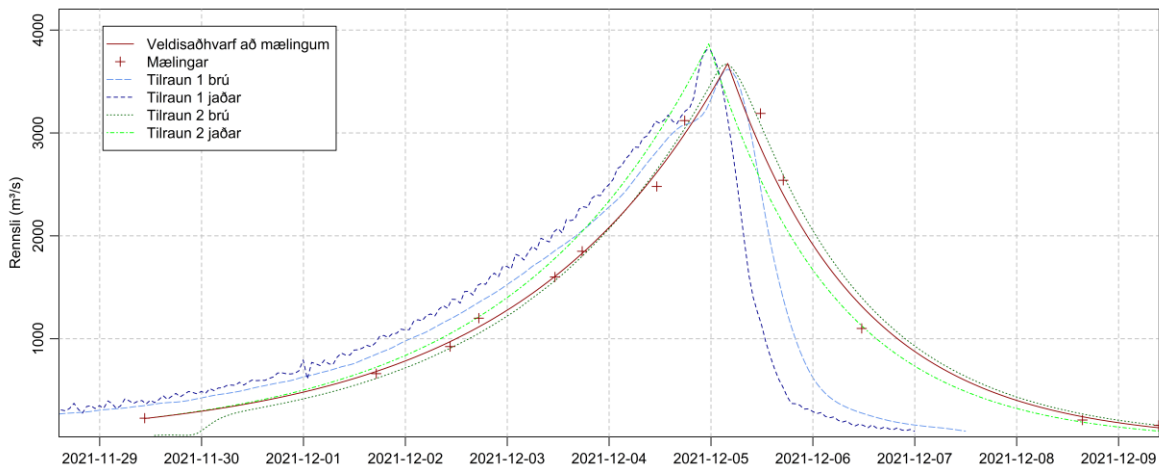
reikninetinu. Í hinni útgáfunni er allt samanlagt rennsli Skeiðarár, Gígjukvíslar og Núpsvatna í 1996 hlaupinu látið koma fram austast við jökuljaðarinn, þar sem 2021 hlaupið kom fram. Sú útgáfa er ólíkleg en nýtt sem verra mat tilfellis m.t.t. hættunnar á að vatn komi aftur í farvegi Skeiðarár, Sæluhússkvíslar eða Háöldukvíslar.

4 Niðurstöður

Hermun á hlaupinu 2021

Niðurstöður fyrstu tilraunar til hermunar á lögum rennslisrits hlaupsins 2021 niður við Gígjukvíslarbrú, þar sem notast var við metið útrennsli úr Grímsvötnum í hlaupinu sem inntak, voru ekki góðar. Umtalsverður munur var á lögum reiknaða ferilsins (Tilraun 1 brú) og mælda ferilsins niður við brú (mynd 1).

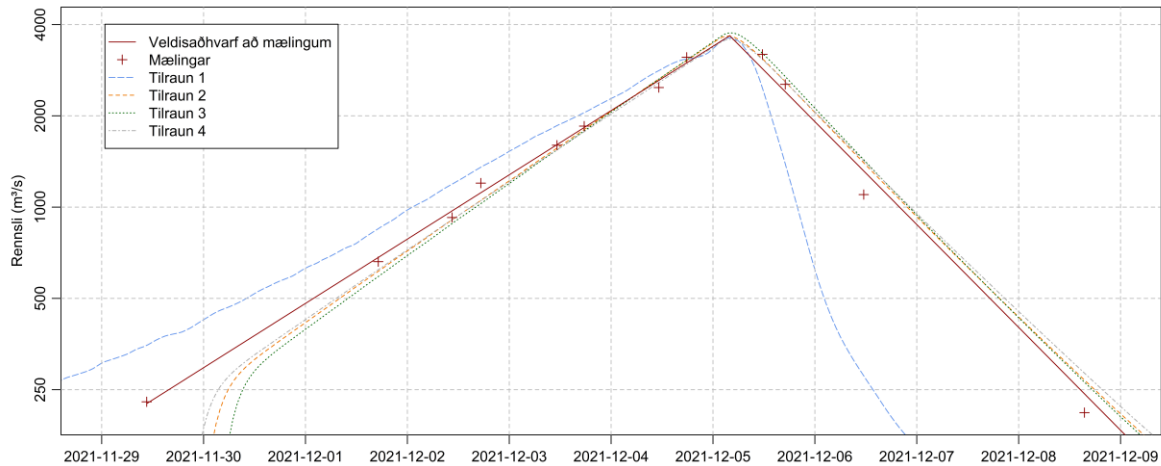
Því var næst reynt að nota skölun af mælda ferlinum niður við brú sem inntak. Í skölun á rennslisferlunum er bæði tími og rennsli skalað til að varðveita rúmmál hlauptoppsins. Tíminn er þá skalaður með andhverfu skalans sem notaður er fyrir rennslisgildin. Rishraði og fallhraði hlauptopps varðveitast aftur á móti ekki og aukast þegar hámarksrennsli er skalað til hækkunar. Ferilinn var skalaður miðað við hámarksrennsli við jaðar í fyrstu tilraun og mun á hámarksrennslis-niðurstöðu fyrstu tilraunar og mældu hámarksrennsli niður við brú. Niðurstaðan úr þessu var að í tilraun 2 var mældi rennslisferilinn niður við brú skalaður til um 5% í rennsli og tíma. Þessi tilraun gaf mun betri niðurstöður og var mismunur hámarksrennslis á reiknuðum og mældum ferli innan við $10 \text{ m}^3/\text{s}$ eða innan við 0.3%. Munurinn á lögum ferlanna varð einnig mun minni, enda jaðarskiilyrði reikninganna byggt á mælda ferlinum niður við brú. Mótun hlauptoppsins á leið hlaupsins framan jökulsins virðist því ekki vera mikil.



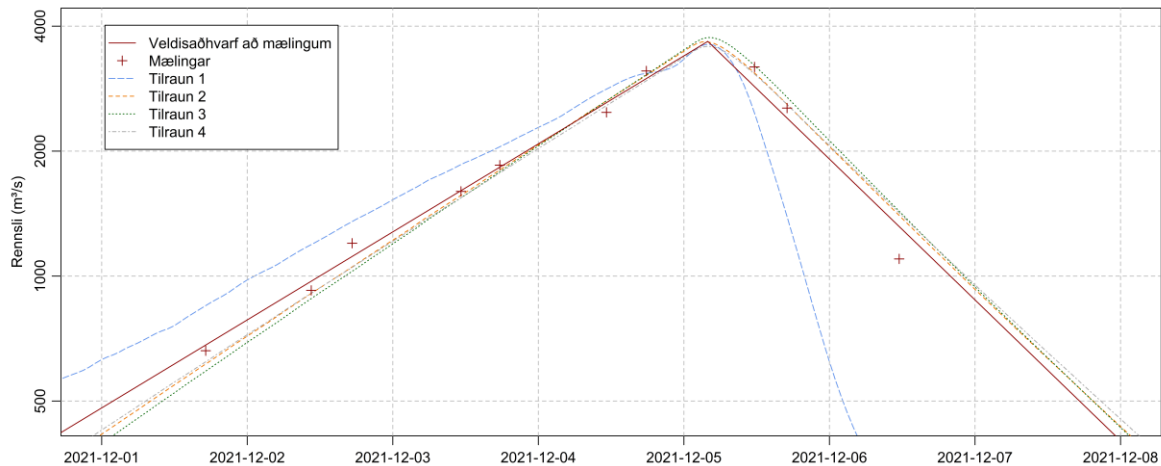
Mynd 1. Rennslisrit Grímsvatnahlaupsins 2021 við jökuljaðar og Gígjukvíslarbrú. Sýndar eru: mælingar á brúnni (rauðir krossar), samsettur ferill veldisaðhvarfa að mælingunum (rauður heill ferill), niðurstöður við brúna fyrir fyrstu tvær tilraunir straumfræðireikninga (tilraun 1, ljósblá brotalína og tilraun 2, dökkgræn punktalína) og ágiskanir á rennsli við jökuljaðar (tilraun 1, dökkblá brotalína og tilraun 2, græn brota- og punktalína).

Til samanburðar voru tvær aðrar skalanir reyndar. Í annarri var rennslisritið niður við brú skalað til um 7.5% í rennsli og tíma en í hinni var notast við skölun upp á 2.5%. Ekki kom fram mikill munur (myndir 2 og 3). Tilraun 3 með skölun upp á 7.5% fellur verr að rishraða hlaupsins heldur

en tilraun 2 og ofmetur hámarksrennsli niður við brú um 2.2%. Tilraun 4 með skölnun upp á 2.5% fellur aðeins betur að rishraða hlaupsins en vanmetur hámarksrennsli niður við brú um 2.7%. Notast er við niðurstöður tilraunar 2, skölnun á mældu rennslisriti niður við brú upp á 5%, sem megin niðurstöður í þessari skýrslu. Niðurstöður um reiknaða útbreiðslu (myndir 4 og 5) og tvöföldunartíma við jaðar (tafla 1) byggja á þessum reikningum.



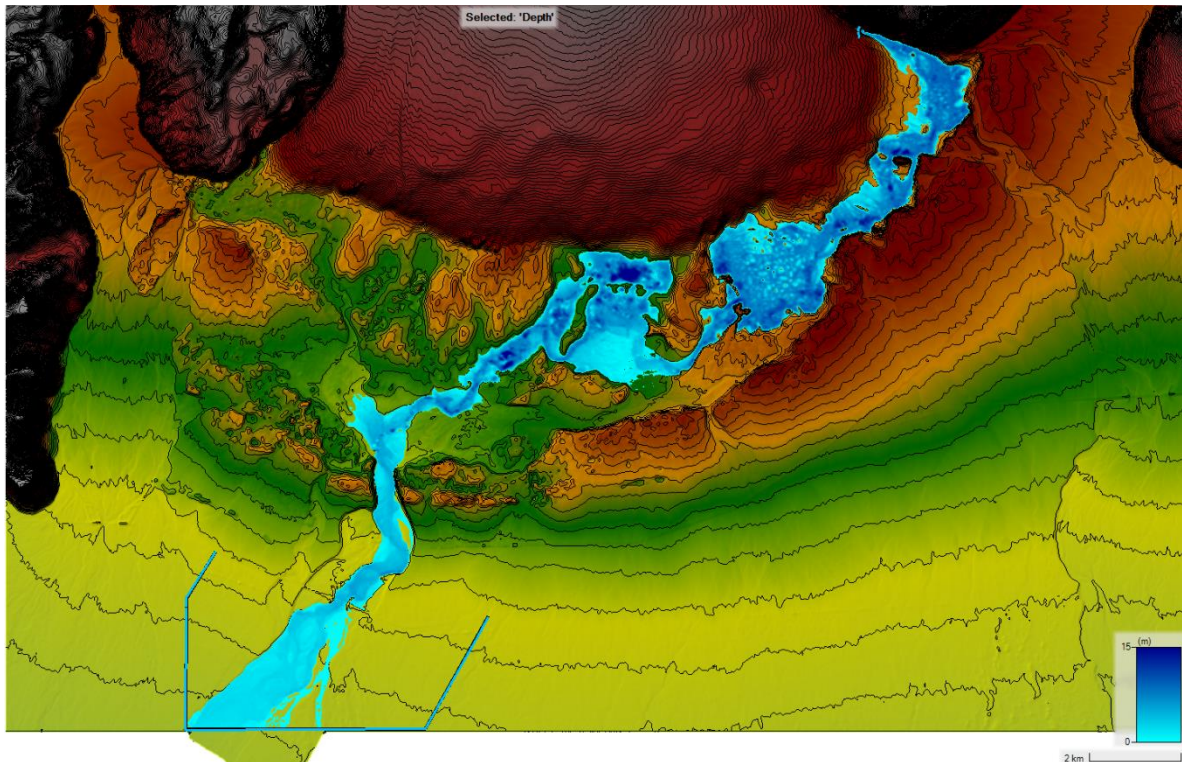
Mynd 2. Rennslisrit Grímsvatnahlaupsins 2021 við Gígjukvíslarbrú á hálflogra grafi. Sýndar eru mælingar á brúnni (rauðir krossar) og einnig samsettur ferill veldisaðhvarfa að mælingunum (rauður heill ferill). Niðurstöður við brúna fyrir allar tilraunir straumfræði-reikninganna eru einnig sýndar: tilraun 1, ljósblá brotalína; tilraun 2, appelsínugul brotalína; tilraun 3, græn punktalína og tilraun 4, grá brota- og punktalína.



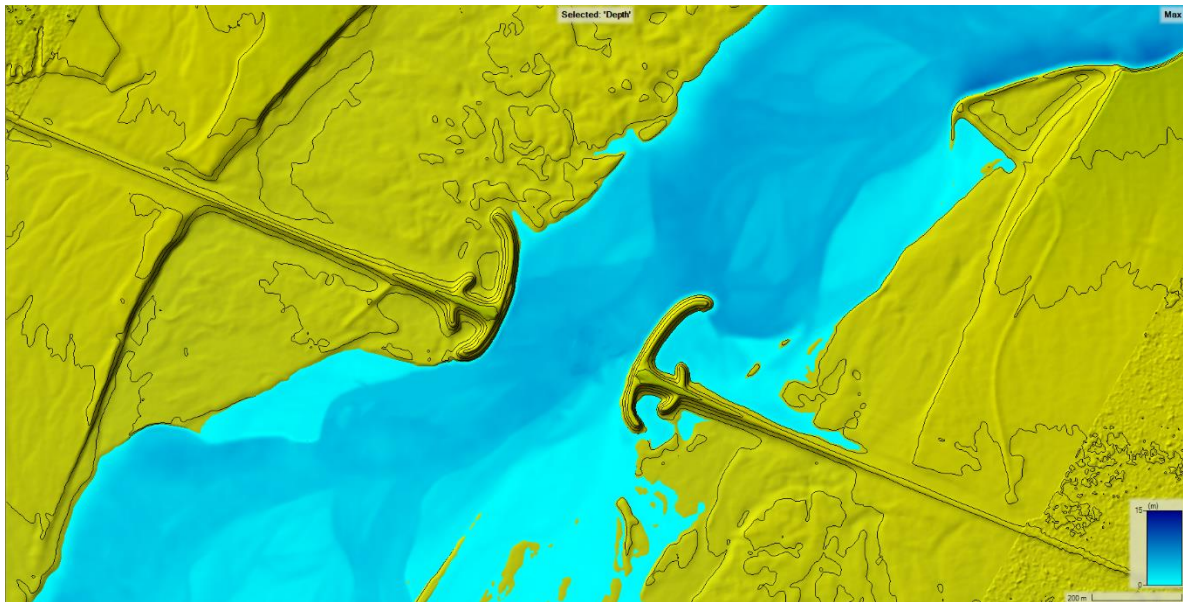
Mynd 3. Rennslisrit Grímsvatnahlaupsins 2021 við Gígjukvíslarbrú á hálflogra grafi. Myndin er dregin inn að hámarki hlaupsins. Sýndar eru mælingar á brúnni (rauðir krossar) og einnig samsettur ferill veldisaðhvarfa að mælingunum (rauður heill ferill). Niðurstöður við brúna fyrir allar tilraunir straumfræði-reikninganna eru einnig sýndar: tilraun 1, ljósblá brotalína; tilraun 2, appelsínugul brotalína; tilraun 3, græn punktalína og tilraun 4, grá brota- og punktalína.

Tafla 1. Tvöföldunartímar rennslisrita Grímsvatnahlaupanna 2021, 2010 og 2004.

Hlaup	Tvöföldunartími [klst]
Grímsvatnahlaupið 2021, útrennsli úr Grímsvötnum	42–43
Grímsvatnahlaupið 2021, rennsli við jökuljaðar	33
Grímsvatnahlaupið 2021, rennsli við Gígjukvíslarbrú	34
Grímsvatnahlaupið 2004, rennsli við Skeiðarárbrú	19
Grímsvatnahlaupið 2010, rennsli við Gígjukvíslarbrú	18



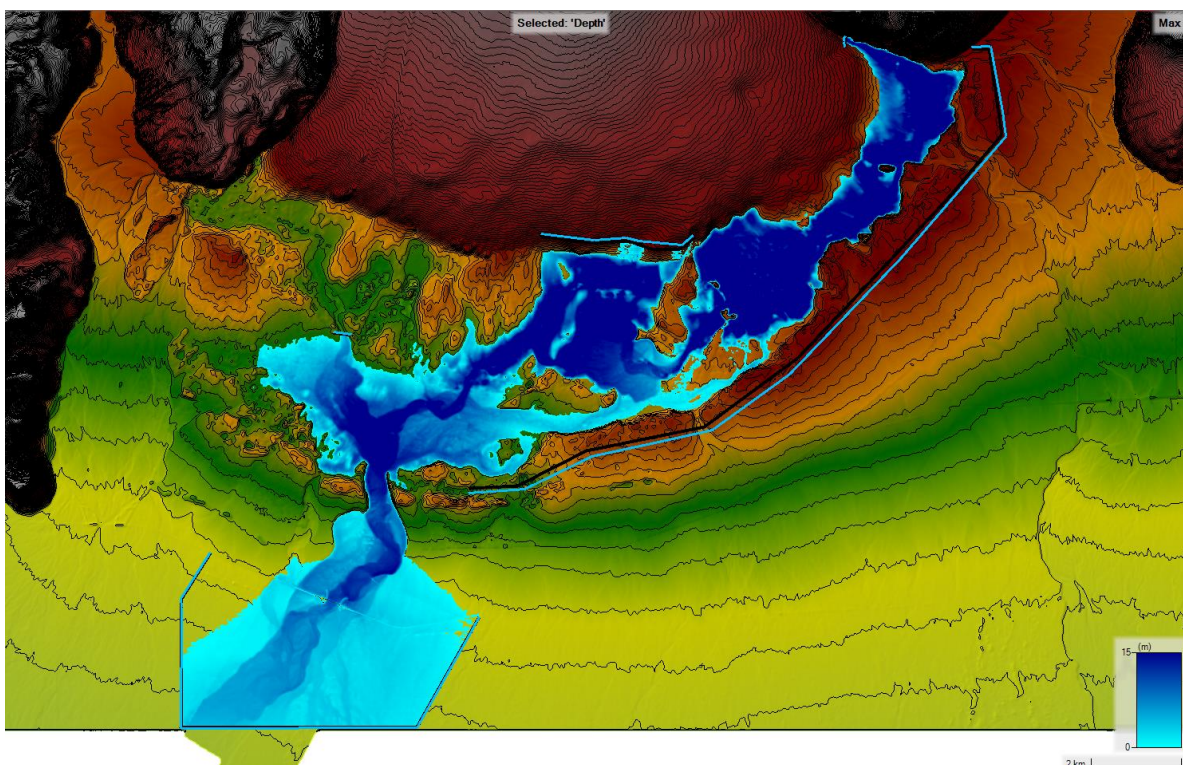
Mynd 4. Mesta hermnda vatnsdýpi framan Skeiðarárjökuls í Grímsvatnahlaupinu 2021. Jaðarskilyrði reikninganna eru sýnd sem bláar og svartar samfallandi línur, inntaksskilyrði við austurjaðar Skeiðarárjökuls og úttaksskilyrði neðan Gígjukvíslarbrúar. Dýptarkvarði er sýndur neðst í horninu til hægri.



Mynd 5. Mesta hermda vatnsdýpi við Gígjukvíslarbrú í Grímsvatnahlaupinu 2021. Dýptarkvarði er sýndur neðst í horninu til hægri.

Hermun á stóru Grímsvatnahlaupi á við hlaupið 1996

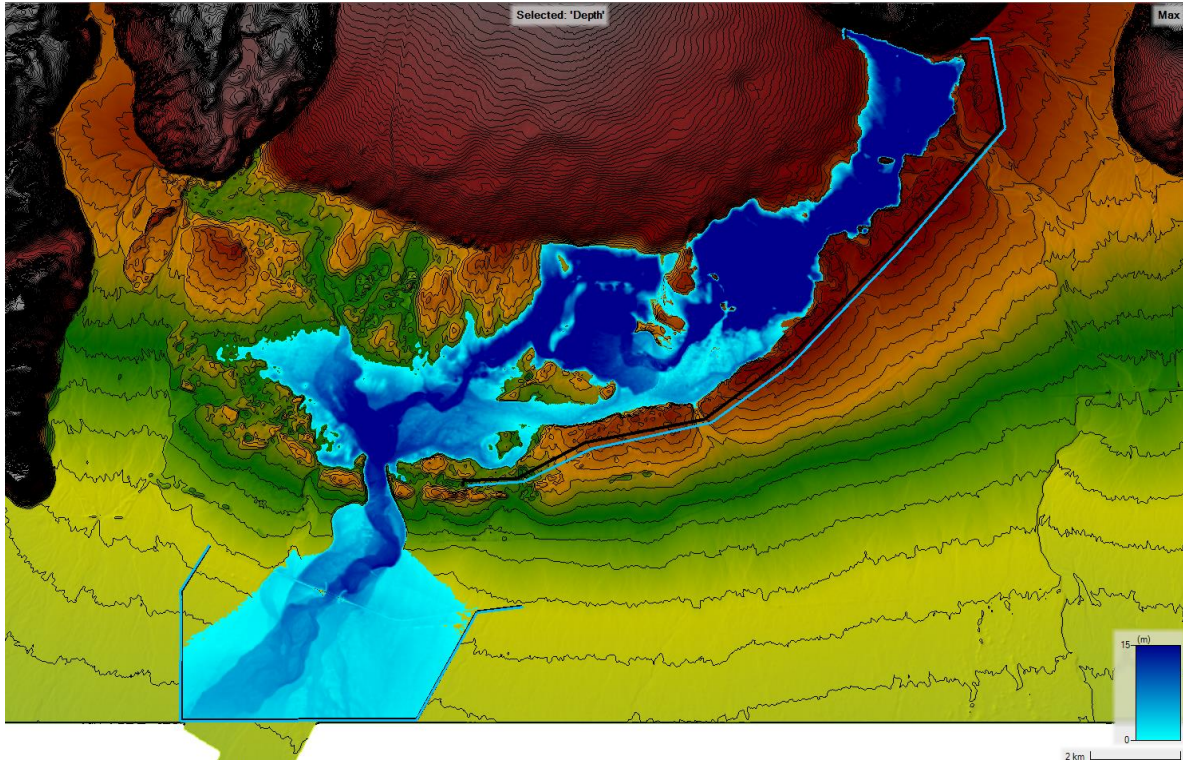
Tvær útgáfur af rennslisferli hlaups á við hlaupið 1996 voru hermdar. Niðurstöður fyrir sviðsmyndina þar sem vatnið kemur fram í nokkrum megin útföllum undan jöklinum svipað og 1996 má sjá á mynd 6.



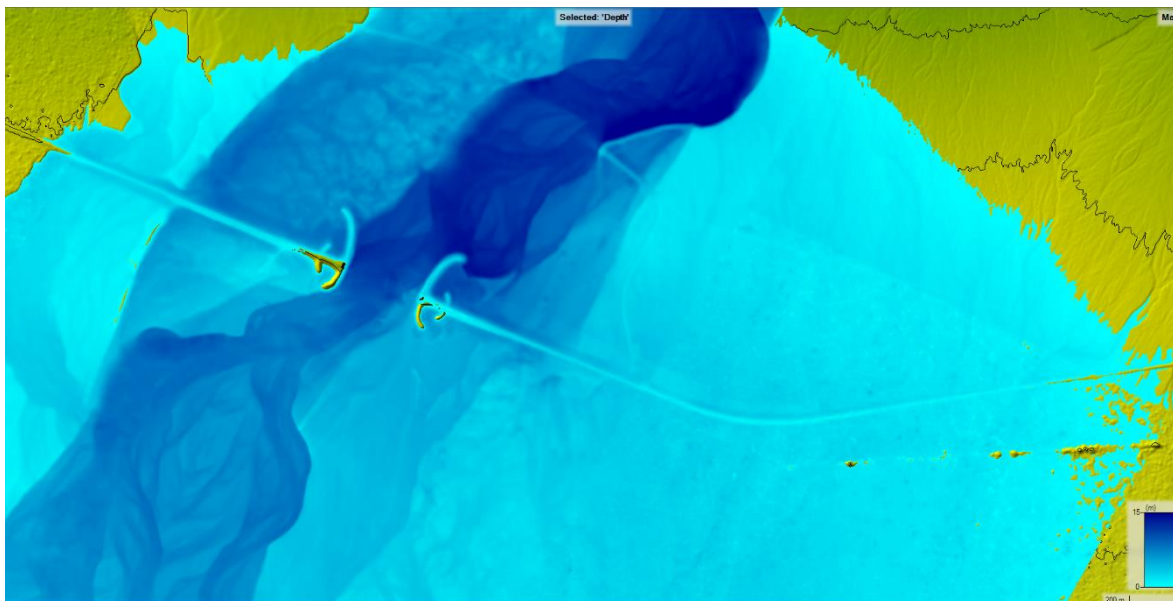
Mynd 6. Mesta hermda vatnsdýpi framan Skeiðarárjökuls í Grímsvatnahlaupi áþekku hlaupinu 1996. Hér er gert ráð fyrir að vatnið komi fram í nokkrum megin útföllum undan jöklinum líkt og raunin var 1996. Jaðarskilyrði reikninganna eru sýnd sem bláar og svartar samfallandi línur, inntaksskilyrði við austurjaðar Skeiðarárjökuls, fyrir miðjum jökli og

vestast þar sem núverandi farvegur Súlu kemur að reikninetinu. Úttaksskilyrði er sett neðan Gígjukvíslarbrúar og sunnan megin jökulgarða Skeiðarárjökuls. Dýptarkvarði er sýndur neðst í horninu til hægri.

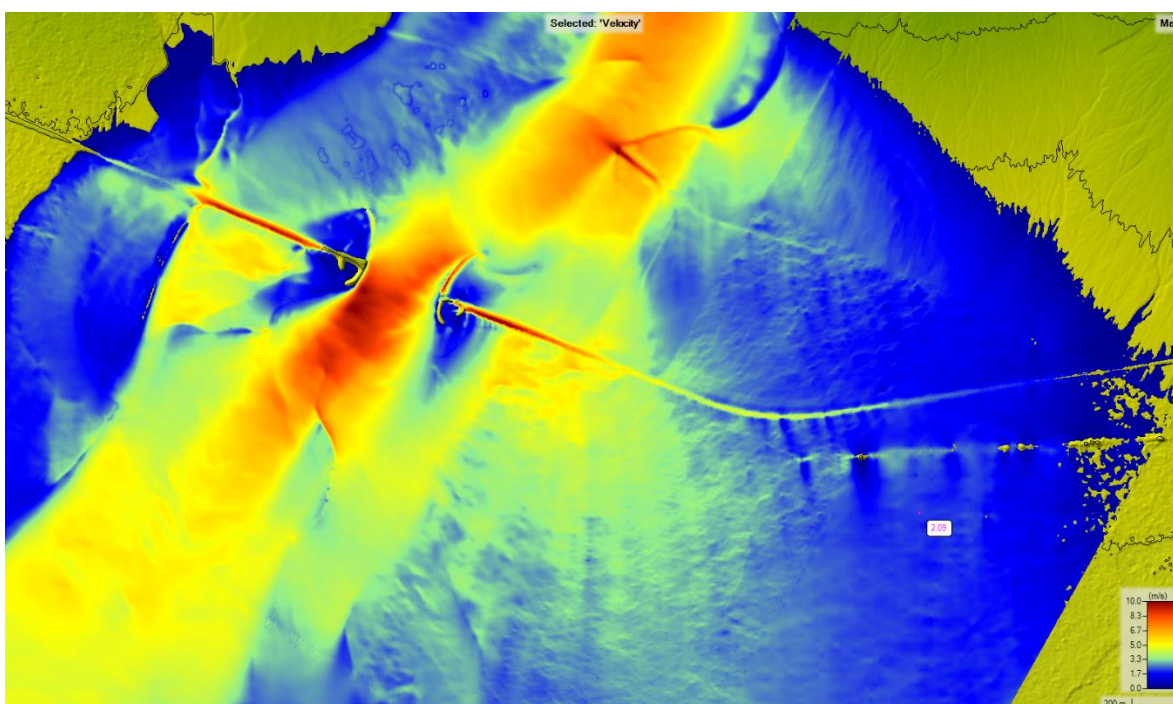
Niðurstöður seinni sviðsmyndarinnar, þar sem litið er til verra tilfellis m.t.t. hættunnar á að vatn komi aftur í farvegi Skeiðarár, Sæluhússkvíslar eða Háöldukvíslar og gert ráð fyrir að allt vatnið komi upp við austurjaðar jökulsins, eru settar fram á mynd 7. Í hvorugri sviðsmyndinni nær vatn aftur að renna um þessa fyrrum farvegi framan jökulsins. Ekki er mikill munur á niðurstöðum þegar komið er suður fyrir skarðið niður í farveg Gígjukvíslar og fram sandinn. Útbreiðsla, hraði og dýpi reiknast því mjög svipuð við Gígjukvíslarbrú í báðum sviðsmyndunum. Niðurstöður fyrri sviðsmyndarinnar á svæðinu í kringum Gígjukvíslarbrú eru sýndar á mynd 8 og 9.



Mynd 7. Mesta hermda vatnsdýpi framan Skeiðarárjökuls í Grímsvatnahlaupi á þekku hlaupinu 1996. Hér er gert ráð fyrir að vatnið komi allt fram austast undan jöklinum til að kanna verra tilfelli m.t.t. hættunnar á að vatn komi aftur í farvegi Skeiðarár, Sæluhússkvíslar eða Háöldukvíslar. Jaðarskilyrði reikninganna eru sýnd sem bláar og svartar samfallandi línur, inntaksskilyrði við austurjaðar Skeiðarárjökuls og úttaksskilyrði neðan Gígjukvíslarbrúar og sunnan megin jökulgarða Skeiðarárjökuls. Dýptarkvarði er sýndur neðst í horninu til hægri.



Mynd 8. Mesta hermda vatnsdýpi við Gígjukvíslarbrú í Grímsvatnahlaupi áþekku hlaupinu 1996. Dýptarkvarði er sýndur neðst í horninu til hægri.



Mynd 9. Mesti hermdi straumhraði við Gígjukvíslarbrú í Grímsvatnahlaupi áþekku hlaupinu 1996. Hraðakvarði er sýndur neðst í horninu til hægri.

5 Umræður

Mótun á rennsli Grímsvatnahlaupa framan Skeiðarárjökuls

Ferð Grímsvatnahlaupsins 2021 vestur með Skeiðarárjökli að farvegi Gígjukvíslar hefur ekki mikil áhrif á lögun hlauptopsins. Hámarksrennsli hlaupsins reiknast aðeins 5% hærra við jökuljaðar heldur en það er metið niður við Gígjukvíslarbrú. Tvöföldunartími reiknaðs rennslis

við jökuljaðar er líka innan við klukkutíma styttri heldur en tvöföldunartími reiknaðs rennslis niður við brú. Tvöföldunartími hlaupsins við jaðar er aftur á móti um 10 tímum styttri heldur en tvöföldunartíminn á rennslis úr Grímsvötnum (tafla 1). Hlauptoppurinn dempast því ekki undir jöklinum, heldur magnast vaxtarhraði hans.

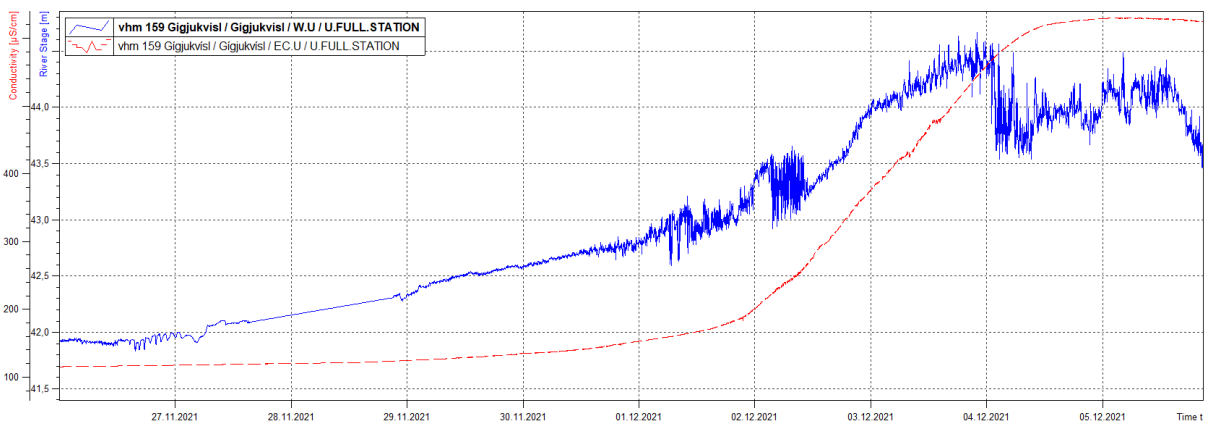
Vaxtarhraði hlaupsins 2021 er umtalsvert minni en hlaupanna 2004 og 2010 (tafla 1). Þessi breyting er ekki tilkomin vegna breytinga framan jökuls. Umtalsverð breyting mótunar jökulsins á hlauptoppum hefur sést áður. Mikill munur er á vaxtarhraða hlaupa fyrir og eftir stóra hlaupið 1996, en hann var almennt lægri fyrir 1996 (Bergur Einarsson og fleiri, 2016). Það er því líkt og einhverjar aðstæður undir jöklinum hafi breyst í þeim hamförum. Sá möguleiki virðist fyrir hendi að aðstæður séu nú að nálgast á ný ástandið fyrir 1996 hlaupið, þótt vaxtarhraðinn hafi þá verið enn lægri en nú. Tvöföldunartími hlaupsins vorið 1996 var t.d. 55 tímar (lítið hlaup vorið fyrir stóra hlaupið haustið 1996) og 64 tímar í hlaupinu 1991 (Bergur Einarsson og fleiri, 2016).

Ferðalag hlaupsins undir jöklinum er ennþá ráðandi þáttur í lögun rennslisrits hlaupsins. Lengri leið hlaupsins frá jaðri að mælistað og umtalsverð jaðarlónin sem hlaupið fer í gegnum hefur a.m.k. ekki fram til nú breytt þessu. Mun meiri munur er á rennslisriti hlaupsins út úr Grímsvötnum og rennslisritinu við jaðar, heldur en á rennslisritinu við jaðar og niður við brú.

Áhrif lónanna framan við Skeiðarárjökul á mælda leiðni í hlaupum

Það er þekkt að aukið magn jarðhitavatns í Skeiðará, með tilheyrandi jöklaflýlu, hefur oft verið fyrsta merki um upphaf Grímsvatnahlaupa (Sigurður Þórarinnsson, 1974). Þessi fyrirvari á hlaupum hefur verið frá nokkrum dögum að vikum (Sigurður Þórarinnsson, 1974). Jarðhitavatnið veldur aukinni rafleiðni í ánni. Rafleiðnimælingar hafa því reynst vel til að vakta mögulegt upphaf hlaupa og leiðnibreyting er oft sjáanleg á undan breytingum í vatnshæð eða rennslis.

Sjálfvirkum leiðnimælingum hefur því verið haldið úti í Gígjukvísl síðan Skeiðará færði sig í farveg hennar. Engin auðtúlkanleg merki eru aftur á móti um aukningu á rafleiðni í Gígjukvísl fyrstu daga hlaupsins 2021. Skýr merki um rafleiðniaukningu koma ekki fram fyrr en 29. nóvember en hægt var að merkja aukningu í vatnshæð frá 27. nóvember (mynd 10).



Mynd 10. Samfelldar vatnshæðar- og rafleiðnimælingar á Gígjukvíslarbrú, í Grímsvatnahlaupinu 2021. Vatnshæð er sýnd með samfelldri blárri línu og leiðni er sýnd með brotinni rauðri línu.

Árið 2019 var heildarrúmmál tveggja stærstu lónanna framan við Skeiðarárjökul, sem Grímsvatnahlaup fara nú um á leið sinni í Gígjukvísl, metið 132 Gl (Snævarr Guðmundsson o.fl, 2019). Búast má við að þetta mat sé nú í lægri kantinum vegna frekara hops jökulsins. Auk þess fer hlaupið um fleiri smálón en þessi tvö stærstu. Þetta mat er þó notað hér í grófan samanburð

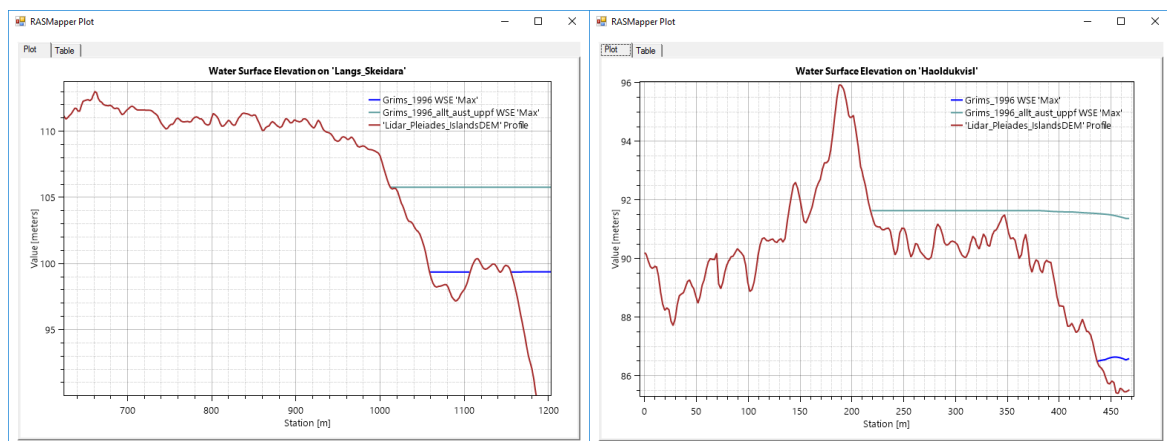
við hlauprúmmál Grímsvatnahlaupsins 2021, til að kanna áhrif vatnsins í lónunum á framgang leiðnimerkis niður að brú. Ef litið er svo á til mikillar einföldunar að hlaupvatnið þurfi að ryðja öllu vatninu úr lónunum á undan sér áður en hlaupvatn nær í gegnum lónin og að leiðnimælinum niður við brú, tekur það Grímsvatnahlaupið 2021 um 5 daga að ná því uppsafnaða rúmmáli. Samkvæmt þeirri spá sæist ekkert leiðnimerki niður við brú fyrr en um miðnætti 1. desember, en raunin er að það er komið fram 29. nóvember.

Það er mikil einföldun á straumfræðinni í lónunum að gera ráð fyrir að hlaupvatnið einfaldlega yti á undan sér öllu því vatni sem er í lónunum. Framgangur hlaupvatnsins í gegnum lónin er ekki vel þekktur og ekki hægt að herma hann í dýpiseilduðu líkani líkt og HEC-RAS. Það er þó ljóst að rúmmál vatns í lónunum er orðið umtalsvert miðað við rúmmál hlaupsins. Því er viðbúið að vatnið í lónunum seinki framgangi leiðnimerkisins frá jökli og niður að mælistaðnum á Gígjukvíslarbrú um jafnvel einhverja daga. Æskilegt er því að reka aðrar mælistöðvar til að greina upphaf Grímsvatnahlaupa. GPS mælingar Jarðvísindastofnunar Háskólans á hæð íshellunnar yfir Grímsvötnum sinna þessu hlutverki vel.

Framgangur stórra Grímsvatnahlaupa miðað við núverandi aðstæður framan Skeiðarárjökuls

Breytingar framan við Skeiðarárjökul eru nú hraðar (Hrafnhildur Hannesdóttir, 2022). Árið 2021 voru gerðar einfaldar reiknilraunir til að kanna hvort að hætta væri á að stór Grímsvatnahlaup gætu farið aftur í farveg Skeiðarár. Þar var notast við landhæðargögn úr útgáfu 1 af ÍslandsDEM. ÍslandsDEM byggir á gervihnattamyndum sem ná allt aftur til ársins 2008, þó flestar séu frá 2012. Þeir reikningar bentu til að vatn gæti komið í fyrrum farveg Skeiðarár fyrir hlaup þar sem meira en 20.000 m³/s kæmu upp austast við jökuljaðarinn.

Í þessu verkefni var framgangur tveggja sviðsmynda af hlaupi áþekku hlaupinu 1996 reiknaður, miðað við aðstæður framan jökulsins samkvæmt landhæðarlíkani byggðu á gögnum frá 2021. Í annarri sviðsmyndinni er gert ráð fyrir að vatnið komi fram í nokkrum megin útföllum undan jöklinum svipað og 1996 (Árni Snorrason og fleiri, 1997) en í hinni er litið til verra tilfellis m.t.t. hættunnar á að vatn komi aftur í farveg Skeiðarár, Sæluhússkvíslar eða Háöldukvíslar og gert ráð fyrir að allt vatnið komi upp við austurjaðar jökulsins.



Mynd 11. Hermd mesta vatnshæð í hlaupum álíkum Grímsvatnahlaupinu 1996 og landhæð á þversniðum eftir farvegi Skeiðarár (til vinstri) og Háöldukvíslar (til hægri). Vatnshæð í sviðsmyndinni þar sem gert ráð fyrir að vatnið komi fram í nokkrum megin útföllum undan jöklinum svipað og í 1996 hlaupinu er sýnd með bláum lit en vatnshæð í sviðsmynd þar sem gert er ráð fyrir að allt vatnið komi upp austast við jökulinn er sýnd með sægrænum lit.

Helstu niðurstöður eru að svæðið framan jökulsins en innan aðal-jökulgarðanna getur borið mikið vatn til vesturs og í farveg Gígjukvíslar. Í hvorugri sviðsmyndinni kemur vatn í fyrrum farvegi Skeiðarár, Sæluhússkvíslar eða Háöldukvíslar. Fyrir sviðsmyndina þar sem allt kemur upp austast vantar i) um 7 m uppá að vatnshæð nái lægsta punkti í skarðinu í gegnum jökulöldurnar, inn í fyrrum farveg Skeiðarár (mynd 11), ii) um 15 m að vatn nái upp í fyrrum farveg Sæluhússkvíslar og iii) rúma 4 m í að vatn nái upp að lægsta punkti varnargarðsins þvert yfir fyrrum farveg Háöldukvíslar (mynd 11). Komi hlaupið að stórum hluta fram undan jöklinum vestar, líkt og raunin var 1996, verður vatnshæð 5 til 6 m lægri við þessa þrjá lykilstaði og því ennþá ólíklegra að vatn komi í þessa fyrrum farvegi.

6 Lokaorð

Breyting á mótun hlauptoppa Grímsvatnahlaupa undir Skeiðarárjökli er áhugaverð. Ljóst er af þessari rannsókn að hún er ekki tilkomin vegna breytinga framan jökulsins. Æskilegt væri að rannsaka hana nánar svo greina mætti betur hver sé ráðandi þáttur mótunarinnar. Ræðst rennslisrit hlaupanna aðallega af útflæði út úr Grímsvötnum, myndun farvegar hlaupsins undir jöklinum, flöskuhálsum á leið hlaupsins undir jöklinum eða öðrum þáttum. Mögulega gætu heppilega tímasettar fjarkönnunarmyndir sem gefa möguleika á að greina breytingar í skriðhraða jökulsins samfara hlaupum eða breytingar á yfirborðshæð hans samfara vatnssöfnun undir jöklinum í hlaupum hjálpað til að svara slíkum spurningum.

Talsverð óvissa er í straumfræðilegu reikningunum í þessu verki. Í raun er ekki þekkt hvernig flæðinu í gegnum lónin framan Skeiðarárjökuls er háttað í jökulhlaupum. Flæðið gæti verið flókið vegna eðlisþyngdarmunar á vatninu í lónunum og hlaupvatni sem hefur annað setinnihald og annað hitastig. Einnig gæti skipt umtalsverðu máli hvort vatnið komi inn í lónin nærri yfirborði eða að einhverju leyti undan jöklinum djúpt í lónunum. Frekari rannsóknir á þessum þáttum eru æskilegar. Þær myndu einnig kalla á frekari líkanreikninga því að ekki er hægt að ná fram hermun af raunverulegu flæði í gegnum djúp jaðarlón í dýpisheilduðum reikningum eins og notast er við hérna.

Ákvörðun viðnámsstuðuls getur líka valdið óvissu. Hér er í raun aðeins notast við einfalt meðaltal úr fyrri rannsóknum fyrir svipuð svæði en mögulega mætti fá fram mun betra mat með rannsóknum á svæðinu. Mögulegur set- og jakaframburður í hlaupum getur líka haft mikil áhrif á viðnám (Bergur Einarsson og fleiri 2022). Ekki voru gerðar tilraunir hér til að meta þessa óvissu. Aðrir þættir svo sem áhrif jaka í lónunum sem til komnir eru vegna kelfingar jökulsins geta líka haft ófyrirséð áhrif og valdið óvissu.

Ekki náðist að keyra síðasta verkþátt verkefnisins, þar sem verkið var aðeins styrkt að hluta. Það er því eftir að reikna aftur hlaup á við 1996 hlaupið, þar sem búið væri að útbúa í landhæðarlíkaninu skörð í veginn sitthvoru megin brúarinnar. Með því móti má taka tillit til þess að mannvirkin eru hönnuð með það í huga að vegurinn sitthvoru megin brúarinnar rofni til að létta álagi á brúnni. Nýta má niðurstöður um flæði inn í farveg Gígjukvíslar, úr sviðsmyndum sem hér hafa verið keyrðar, sem inntak inn í slíka reikninga. Það er því mögulegt að framkvæma reikninga í hærri upplausn á svæðinu í kringum brúna. Í slíkum reikningum mætti kanna betur samanburð á hermdri og mældri vatnshæð og hermdum og mældum straumhraða í hlaupinu 2021. Einnig mætti skoða betur áhrif stöpla undir brúnni á flæðið og áhrif fleiri þátta.

Niðurstöður verkefnisins eru tiltækar sem GEOTiff skrár sé þess óskað til frekari skoðunar eða rannsókna.

Þakkir

Ég þakka Eyjólf Magnússyni og Kristu Hannesdóttur, Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands, fyrir gögn um útrennsli úr Grímsvötnum í hlaupinu 2021.

Heimildir

Ágúst Þór Gunnlaugsson (2010) *Breytingar á farvegum jökuláa á Skeiðarársandi: 1991–2009*. B.S. verkefni, Verkfræði- og náttúruvísindasvið Háskóla Íslands. 45 bls.

Árni Snorrason, Páll Jónsson, Svanur Pálsson, Sigvaldi Árnason, Oddur Sigurðsson, Skúli Víkingsson, Ásgeir Sigurðsson og Snorri Zóphóníasson (1997) Hlaup á Skeiðarársandi haustið 1996. Útbreiðsla, rennsli og aurburður. Birt í: Hreinn Haraldsson (ritstj.), *Vatnajökull, Gos og hlaup 1996*, Vegagerðin, 79–137.

Bergur Einarsson (2021) *Straumfræðilegir líkanreikningar á jökulhlaupum úr Hafrafellslóni við Langjökul*. Minnisblað, Veðurstofa Íslands, 12 bls.

Bergur Einarsson, Eyjólfur Magnússon, Matthew J. Roberts, Finnur Pálsson, Thorsteinn Thorsteinsson og Tómas Jóhannesson (2016) A spectrum of jökulhlaup dynamics revealed by GPS measurements of glacier surface motion. *Annals of Glaciology*, **57**, 47–61 (doi: 10.1017/aog.2016.8)

Bergur Einarsson, Einar Hjörleifsson, Tinna Þórarinsdóttir og Matthew J. Roberts (2022) *Áhættumat vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli*. Veðurstofa Íslands, skýrsla VÍ 2022-001, 100 bls.

Brunner, G.W. (2016) HEC-RAS, *River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA USA: USACE Hydrologic Engineering Center, HEC.

Guðrún Larsen (2018) *Kötluhlaup eftir 1600: Umfang, hlaupleiðir, tjón og umhverfisbreytingar, ásamt viðaukum*. Reykjavík, Jarðvísindastofnun Háskólans, rannsóknaskýrsla RH-13_2018. 66 bls.

Haukur Tómasson (1996) The jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology*, **22**, 249–254. (doi:10.3189/1996AoG22-1-249-254)

Helgi Björnsson (1974) Explanation of jökulhlaups from Grímsvötn, Vatnajökull, Iceland. *Jökull*, **24**, 1–26.

Helgi Gunnar Gunnarsson, Sveinn Óli Pálmarsson, Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og Guðrún Larsen (2018). Hermun Kötluhlaups í Múlakvísl og mat á rennsli til Víkur. Birt í: *Kötluráðstefna, 100 ár liðin frá upphafi gossins 12. október 1918 Vík í Mýrdal, 12. október 2018*, Jarðfræðifélag Íslands, 46–50.

Hrafnhildur Hannesdóttir (2022) Jöklabreytingar 1930–1970, 1970–1995, 1995–2020 og 2020–2021. *Jökull*, **67**, bls.71–80.

Nye JF (1976) Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels and veins. *Journal of Glaciology*, **17**(76), 181–207

Matthías Ásgeir Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilsson, Tómas Jóhannesson og Matthew J. Roberts (2018) *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Kvörðun straumfræðilíkans*. Veðurstofa Íslands, skýrsla VÍ 2018-007, 51 bls.

- Landmælingar Íslands (2020) *ÍslandsDEM útgáfa 1.0*, Lýsigagnagátt Landmælinga Íslands, <https://gatt.lmi.is/geonetwork/srv/api/records/e6712430-a63c-4ae5-9158-c89d16da6361>
- Matthew J. Roberts, Russell, A.J., Tweed, F.S. og Knudsen, Ó. (2000). Ice fracturing during jökulhlaups: implications for englacial floodwater routing and outlet development. *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**(13), 1429–1446. (doi: 10.1002/1096-9837(200012)-25:13<1429)
- Russell, A.J., Tweed, F.S., Roberts, M.J., Harris, F.D., Gudmundsson, M.T., Knudsen, Ó. og Marren, P.M. (2010). An unusual jökulhlaup resulting from subglacial volcanism, Sólheimajökull, Iceland. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 1363–1381.
- Sigurður Lárus Hólm og Snorri Páll Kjaran (2005). Reiknilíkan fyrir útbreiðslu hlaupa úr Entujökli. Birt í Magnús Tumi Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*. Reykjavík: Ríkislögreglustjórnin og Háskólaútgáfan, bls. 197–210.
- Sigurður Þórarinnsson (1974) *Vötnin stríð. Saga Skeiðarárhlaupa og Grímsvatnagosa*. Reykjavík, Bókaútgáfa Menningarsjóðs. 254 bls.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux og Bogi B. Björnsson (2017) *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum með GeoClaw*. Veðurstofa Íslands, skýrsla VÍ 2017-004, 41 bls.
- Sigurjón Rist (1955) Skeiðarárhlaup 1954. *Jökull*, **5**, bls. 30–36
- Snævarr Guðmundsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon, Þorsteinn Sæmundsson og Tómas Jóhannesson (2019) Terminus lakes on the south side of Vatnajökull ice cap, SE-Iceland, *Jökull*, **69**, bls. 1–34.
- Sveinbjörn Jónsson (2007) *Flóðrakning með takmörkuðum gögnum*. M.S. verkefni, Verkfræðideild Háskóla Íslands. 80 bls.
- Tómas Jóhannesson (2002) Propagation of a subglacial flood wave during the initiation of a jökulhlaup. *Hydrological Sciences Journal*, **47**(3), bls. 417–434
- Vatnaskil, Verkfræðistofa. (2006) *Sólheimajökull*, Vatnaskil 05012006. Minnisblað. 16 bls.