



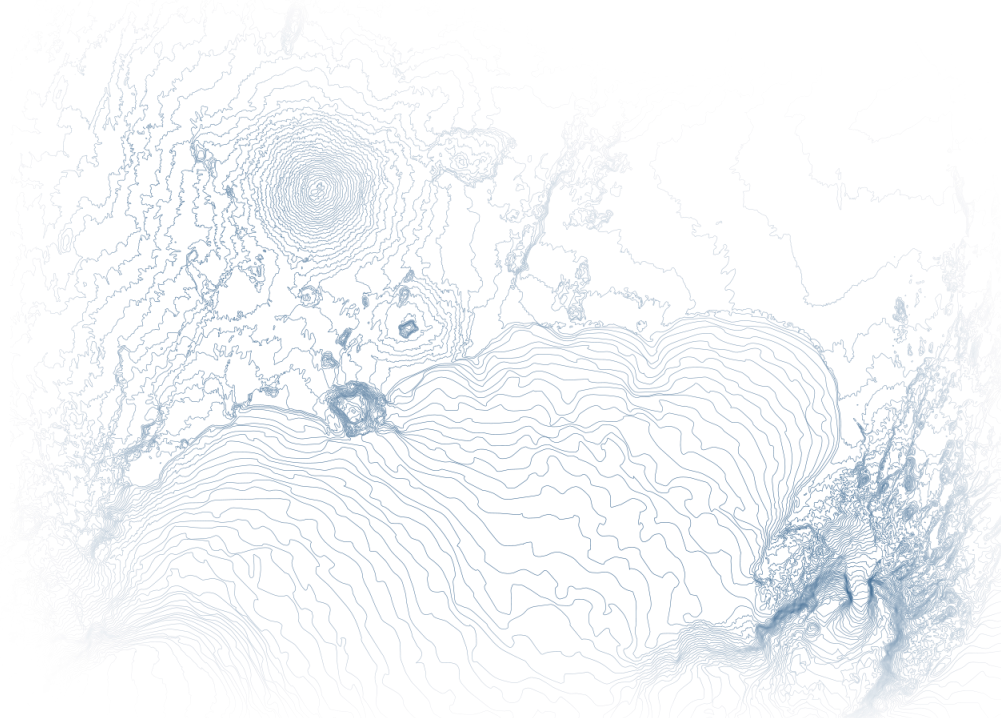
# Jökulhlaup til vesturs og suðurs frá Bárðarbungu

– Sviðsmyndir, straumfræðileg hermun og niðurstöður hættu- og áhættumats

Bergur Einarsson<sup>1</sup>, Jón Elvar Wallevik<sup>1</sup>, Þorsteinn Þorsteinsson<sup>1</sup>, Magnús Tumi Guðmundsson<sup>2</sup>, Guðrún Larsen<sup>2</sup>, Þórdís Högnadóttir<sup>2</sup>, Esther Hlíðar Jensen<sup>1</sup>, Bogi Brynjar Björnsson<sup>1</sup>, Tinna Þórarinsdóttir<sup>1</sup>, Hrafnhildur Hannesdóttir<sup>1</sup>, Matthew J. Roberts<sup>1</sup> og Eyjólfur Magnússon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Veðurstofu Íslands

<sup>2</sup>Jarðvísindastofnun Háskólans



**Skýrsla**

VÍ 2026-005



## Jökulhlaup til vesturs og suðurs frá Bárðarbungu – Sviðsmyndir, straumfræðileg hermun og niðurstöður hættu- og áhættumats

**Höfundar** Bergur Einarsson, Jón Elvar Wallevik, Þorsteinn Þorsteinsson, Magnús Tumi Guðmundsson, Guðrún Larsen, Þórdís Högnadóttir, Esther Hlíðar Jensen, Bogi Brynjar Björnsson, Tinna Þórarinsdóttir, Hrafnhildur Hannesdóttir, Matthew J. Roberts og Eyjólfur Magnússon.

**Unnið fyrir** Ofanflóðasjóð

**Samvinnuaðilar** Jarðvísindastofnun Háskólans, Landsvirkjun, Verkís

**Gerð skýrslu/verkstig** Lokaskýrsla

**Verkefnisstjóri** Tinna Þórarinsdóttir

**Yfirfarið af** Davíð Egilson

**Samþykkt af** Tinna Þórarinsdóttir Deildarstjóri Loftslag, veður, vatn, jöklar og haf

### Veðurstofa Íslands / Icelandic Meteorological Office

**Númer** VÍ 2026-005

**ISSN** 1670-8261

**Dagsetning** Febrúar 2026

**Dreifing** Opin

**Fjöldi síðna** 143

**Upplag** Rafræn útgáfa

**Verknúmer** 3721-0-0005

**Málsnúmer** 2019-0132

**DOI númer** 10.33112/MAMB1620

# Ágrip

Þessi skýrsla lýsir hættumati vegna jökulhlaupa til vesturs og suðurs frá Bárðarbungukerfinu í Vatnajökli. Eldstöðvakerfi Bárðarbungu er eitt það stærsta og virkasta á landinu og þar sem stór hluti þess er jökulhulinn verður að gera ráð fyrir að eldgos undir jöklinum geti orsakað jökulhlaup frá honum. Hlauphættan er metin með hliðsjón af eldgosasögu, tiltækum landlíkönum og straumfræðilegum líkanreikningum.

Til að kanna jökulhlaupahættuna til vesturs og suðurs eru settar fram fimm sviðsmyndir hlaupa sem upptök ættu vegna eldgosa undir Köldukvíslarjökli, Sylgjujökli, innan Bárðarbunguöskjunnar og í vesturhlíðum hennar. Jökulhlaupasviðsmyndirnar byggja á líkönum Jarðvísindastofnunar Háskólans fyrir ísbráðnun af völdum eldgosa á sprungum undir misþykkum jökli. Hámarksrennsli hlaupvatns í sviðsmyndunum er á bilinu 6.650 til 100.000 m<sup>3</sup>/s og endurkomutími reiknaðra hlaupa metinn á bilinu 500 til 10.000 ár. Straumfræðilíkanið GeoClaw er notað til að reikna útbreiðslu, vatnsdýpi og ferðatíma hlaupanna á 10x10 m kviku reiknineti, sem lagt er yfir landlíkan.

Ljóst er af niðurstöðum verkefnisins að möguleg jökulhlaup á svæðinu geta ógnað mjög mikilvægum innviðum á sunnanverðu landinu. Hætta vegna jökulhlaupa getur steðjað að byggð bæði í þéttbýli og dreifbýli t.d. á Hellu, í Árnesi, í Þykkvabæ, á Skeiðum og fleiri stöðum. Reiknuð hlaup fara einnig um virkjanamannvirki í Þjórsá, flæða yfir fjölda vega og brúa, drekkja ræktar- og beitarlandi og ógna dreifikerfi raforku. Tjónnæmi samfélagsins gagnvart hlaupunum er því mikið og þau geta því valdið víðtækri röskun og haft áhrif á efnahag.

Samkvæmt mati á framrásartíma mögulegra jökulhlaupa eru margar klukkustundir tiltækar til viðbragða frá því að hlaupin koma fram við jökuljaðar. Nægur tími ætti því að gefast til viðvarana og rýmingar í byggð. Þó þarf að tryggja að boð um rýmingu og yfirvofandi hlaup berist örugglega til allra sem dvelja á svæðinu eða eiga þar leið um og að fólk bregðist við og grípi til viðeigandi aðgerða. Huga þarf vel að ferðamönnum í þessu samhengi.

Staðaráhætta og einstaklingsbundin dánaráhætta af völdum jökulhlaupa er reiknuð í verkefninu fyrir nokkra dæmigerða staði innan útbreiðslusvæðis hlaupanna. Jökulhlaupahættan er fjarri því að vera ráðandi dánaráhætta fólks á útbreiðslusvæði hlaupanna. Til dæmis stendur fólk á Suðurlandsundirlendinu 10 til 1.000 falt meiri áhætta af almennri þátttöku í umferðinni en af jökulhlaupum. Á svæðum þar sem áhættan af völdum hlaupanna er þó mest nær hún að vera sambærileg dánaráhættu af völdum eldinga á heimsvísu. Slík áhætta er næg til þess að samfélög taka almennt tillit til hennar svo sem með leiðbeiningum um rétt viðbrögð í eldingaveðrum og viðbragðsáætlunum. Huga mætti að áhættunni af völdum jökulhlaupa með svipuðum hætti þó að viðbúnaður og viðbrögð séu ekki þau sömu.

**Lykilorð:** Jökulhlaup, hættumat, áhættumat, Bárðarbunga

## Abstract

This report describes a combined hazard and risk assessment for potential glacial outburst floods (jökulhlaup) flowing to the west and south from the Bárðarbunga volcanic system in the Vatnajökull ice cap. Bárðarbunga is one of the largest volcanic systems in Iceland and, because of high levels of eruptive activity, and the fact that a large part of the volcano is covered by glacial ice, the possibility of subglacial eruptions causing jökulhlaups must be considered. Flood hazards are assessed based on eruptive history, available digital elevation models, and hydrodynamic model calculations.

To investigate jökulhlaup hazards to the west and south, five flood scenarios are presented in connection with eruptions under Köldukvíslarjökull, Sylgjujökull, the ice-filled caldera, and on the western ice-covered slopes of Bárðarbunga. These scenarios are based on models developed at the Institute of Earth Sciences at the University of Iceland, describing ice melting that can occur during potential fissure eruptions under ice of varying thickness. The scenarios assume maximum discharges ranging from 6,650 to 100,000 m<sup>3</sup>/s and return periods between 500 and 10,000 years. The hydrodynamic model GeoClaw is used to calculate flood extents, water depths, and flood propagation speeds on a 10x10 m dynamic computational grid, superimposed on a terrain model.

It is clear from the project's results that vital national infrastructure is in the impact area of jökulhlaups from Bárðarbunga. Such floods can threaten settlements in both urban and rural areas, including Hella, Árnes, Pykkvibær, Skeið, and other locations. They also pass through reservoirs and other infrastructure related to hydropower production on the Þjórsá river, flood numerous roads and bridges, submerge agricultural land, and threaten the electricity distribution system. Society's vulnerability to these floods is therefore high, and consequently there would be widespread disruption and impact to the Icelandic economy.

According to estimates of flood propagation time, there are many hours available from the time the floods emerge at the glacier margin to the onset of hazard conditions downstream. Sufficient time should therefore be available for public warnings and the evacuation of inhabited areas. However, it must be ensured that evacuation alerts reach inhabitants and travellers reliably, and that people react immediately and take appropriate measures. Careful consideration must be given to tourists in this context.

Local risk and individual annual risk of death caused by jökulhlaups are calculated in the project for several representative locations within the flood inundation area. Hazards due to jökulhlaup are far from being the dominant risk for people in the region. Inhabitants of the South Iceland lowlands face a 10 to 1,000 times greater risk from traffic-related accidents than from jökulhlaups from Bárðarbunga. In areas where the risk due to flooding is the greatest, it is comparable to the global fatality risk from lightning. Such risk is sufficiently high that societies generally take it into account, including public guidelines on the correct responses to lightning and contingency plans for industrial sectors. The risk from glacial floods could be addressed in a similar manner, even though the preparedness and response are not the same.

**Key words:** Jökulhlaup, hazard assessment, risk assessment, Bárðarbunga

## **Þakkir**

Við þökkum hagaðilum og styrktaraðilum verkefnisins: Landsvirkjun, Vegagerðinni, Landsneti og HS-Veitum fyrir framlög þeirra til verkefnisins og ánægjulegt samstarf. Við þökkum einnig Almannaöörnum og Birni Inga Jónssyni, verkefnastjóra almannaöarna hjá lögreglustjóranum á Suðurlandi, samtöl og samráð.

Líkanreikningar voru framkvæmdir á ofurtölvum Háskóla Íslands í gegnum samstarfsverkefnið Rafræniir rannsóknarinnviðir - IREI ([www.irei.is](http://www.irei.is)), stutt af Innviðasjóði RANNÍS (Mennta- og menningarmálaráðuneytið, 2021).

# Efnisyfirlit

|   |    |
|---|----|
| Ágrip .....   | 2  |
| Abstract .....  | 3  |
| Pakkir .....  | 5  |
| Myndaskrá .....   | 9  |
| Töfluskrá .....   | 12 |
| Samantekt .....   | 13 |
| Eldstöðvakerfi Bárðarbungu .....  | 14 |
| Hermun jökulhlaupa .....  | 15 |
| Útbreiðsla hlaupa .....   | 16 |
| Hamfarahlaup undan Köldukvíslarjökli .....  | 16 |
| Stórhlaup undan Köldukvíslarjökli .....   | 17 |
| Meðalstórt hlaup undan Köldukvíslarjökli .....                                      | 17 |
| Meðalstórt hlaup úr hlíðum Bárðarbungu .....  | 18 |
| Stórhlaup undan Sylgjújökli .....   | 18 |
| Tjónmætti og framrásartími .....  | 19 |
| Hættumat .....  | 30 |
| Raforkukerfið .....   | 30 |
| Samgöngur .....   | 31 |
| Viðbragðstími og aðrir þættir .....   | 31 |
| Áhætta .....  | 32 |
| Val á stöðum .....  | 32 |
| Helstu niðurstöður .....  | 33 |
| 1 Inngangur .....   | 36 |
| 2 Bakgrunnur .....  | 38 |
| 2.1 Jarðmyndun á svæðinu .....  | 38 |
| 2.1.1 Bergmyndanir frá ísöld og nútímahraun .....                                   | 38 |
| 2.1.2 Veðurfar á svæðinu .....  | 40 |
| 2.1.3 Vatnajarðfræði svæðisins .....  | 41 |
| 2.2 Saga gosa og hlaupa frá Bárðarbungukerfi .....                                  | 45 |
| 2.2.1 Gossaga Bárðarbungukerfis, sprengigos .....                                   | 47 |
| 2.2.2 Gosstöðvar sprengigosa á jökulpakta hluta .....                               | 51 |
| 2.2.3 Jökulhlaup tengd eldsumbrotum á Bárðarbungukerfi .....                        | 52 |
| 2.2.4 Jökulhlaup til suðurs og vesturs .....  | 53 |
| 3 Aðferðir .....  | 55 |
| 3.1 Landlíkanið ÍslandsDEM og leiðréttingar þess vegna vatnafræðilegra reikninga .. | 55 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.1.1 | Landlíkanið.....   | 55  |
| 3.1.2 | Vatnafarslega rétt landlíkan .....   | 57  |
| 3.1.3 | Prófunarkeyrslur með HEC-RAS straumfræðilíkaninu .....   | 57  |
| 3.1.4 | Aðferð við lagfæringu árfarvega í landlíkani .....   | 57  |
| 3.1.5 | Lagfæringar á farvegum .....   | 58  |
| 3.1.6 | Leiðréttingar á einstökum svæðum .....   | 59  |
| 3.1.7 | Tilraunir með GeoClaw fyrir og eftir leiðréttingu landlíkans .....   | 62  |
| 3.2   | Sviðsmyndir gosa og hlaupa.....  | 62  |
| 3.2.1 | Bráðnun þar sem ís er þunnur (<200 m).....   | 63  |
| 3.2.2 | Bráðnun þar sem ís er þykkur (>200 m).....   | 64  |
| 3.2.3 | Áhrif íss og gosefna .....   | 66  |
| 3.2.4 | Stærðir eldgosa .....  | 66  |
| 3.2.5 | Sviðsmyndir fyrir Bárðarbungukerfið .....  | 70  |
| 3.2.6 | Líkur á gosum undir jökli á vatnasvæði Köldukvíslar.....   | 73  |
| 3.3   | Straumfræðilegir reikningar .....  | 74  |
| 3.3.1 | Yfirlit um GeoClaw .....   | 74  |
| 3.3.2 | Yfirlit um hugtök .....  | 74  |
| 3.3.3 | Reiknisvæðið.....  | 75  |
| 3.3.4 | Ýmis reiknivandamál og lausnir þeirra .....  | 76  |
| 3.3.5 | Samanburður á eiginleikum GeoClaw og HEC-RAS hermana .....   | 76  |
| 3.4   | Ákvörðun stuðla og næmnigreining .....   | 78  |
| 3.4.1 | Hrýfisstuðlar .....  | 78  |
| 3.4.2 | Næmnigreining fyrir hrýfisgildi.....   | 79  |
| 3.4.3 | Næmnigreining með tilliti til ástands farvegar .....   | 80  |
| 3.4.4 | Næmnigreining á upplausn reikninetts.....  | 81  |
| 3.4.5 | Greining á stöðugleika og skekkju hermana .....  | 82  |
| 3.5   | Reikningar á áhrifum uppistöðulóna og stíflna.....   | 85  |
| 3.5.1 | Forsendur varðandi uppistöðulón og stíflur .....   | 85  |
| 3.5.2 | Rennslisrit vegna rofs á stíflumannvirkjum .....   | 89  |
| 3.5.3 | Rof stíflumannvirkja – uppsetning og staðsetning .....   | 90  |
| 3.5.4 | Athugun á bakvatnsáhrifum og öðrum afleiðingum þess að rennsli í gegnum lónin er ekki að fullu hermt ..... | 91  |
| 3.6   | Hættumat.....  | 93  |
| 3.7   | Framsetning niðurstaðna og úttaksgögn úr líkanreikningum .....   | 94  |
| 4     | Niðurstöður straumfræðilegra líkanreikninga .....  | 96  |
| 4.1   | Yfirlit um uppsetningu og framkvæmd hermana .....  | 96  |
| 4.2   | Rennsli um valin þversnið .....  | 97  |
| 4.2.1 | Rennsli um farvegi Köldukvíslar og Þjósár .....  | 98  |
| 4.2.2 | Rennsli í neðri hluta farvega.....   | 101 |
| 4.3   | Yfirlit um niðurstöður .....   | 103 |
| 4.3.1 | Úttaksgögn úr líkanreikningum.....   | 103 |
| 4.3.2 | Samanburður á rennsli um farvegi Þjósár og Köldukvíslar .....  | 117 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.3.3 | Tjónmætti og framrásartími .....   | 118 |
| 5     | Hættumat .....   | 119 |
| 5.1   | Raforkukerfið .....  | 119 |
| 5.2   | Samgöngur.....   | 120 |
| 5.3   | Viðbragðstími og aðrir þættir.....   | 120 |
| 6     | Áhættumat.....   | 122 |
| 6.1   | Val á stöðum .....   | 122 |
| 6.2   | Aðferðafræði .....   | 122 |
| 6.3   | Helstu niðurstöður .....   | 124 |
| 7     | Megin óvissuþættir verkefnisins.....   | 127 |
| 7.1   | Áhrif lóna .....   | 127 |
| 7.2   | Rýni verkfræðistofunnar Verkís á forsendum og verklagi .....                       | 128 |
| 7.2.1 | Samanburður á rennslisferlum og rennslisleiðum .....                               | 129 |
| 7.2.2 | Athugasemdir varðandi rúmmál vatns í lónum .....                                   | 132 |
| 7.2.3 | Athugasemdir varðandi vatnshæð lóna í landlíkani .....                             | 133 |
| 7.2.4 | Samantekt á rýni Verkís á aðferðafræði, nálgunum og forsendum B-reikninganna ..... | 134 |
| 7.3   | Áhrif írennslis.....   | 134 |
| 7.3.1 | Möguleg mestu áhrif írennslis .....  | 134 |
| 7.4   | Samantekt .....  | 135 |
|       | Heimildir.....   | 136 |

# Myndaskrá

|  |    |
|--|----|
| Mynd 0.1 Yfirlitskort. Vatnasvið Þjórsár, Skjálfandafljóts og Jökulsár á Fjöllum auk sprungusveims og öskjurima eldstöðvakerfisins Bárðarbungu ..... | 13 |
| Mynd 0.2 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss í hlíðum Bárðarbungu, sviðsmynd Bb02 .....   | 20 |
| Mynd 0.3 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss í hlíðum Bárðarbungu, sviðsmynd Bb02 .....  | 21 |
| Mynd 0.4 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv05 .....   | 22 |
| Mynd 0.5 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv05 .....  | 23 |
| Mynd 0.6 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv02 .....   | 24 |
| Mynd 0.7 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv02 .....  | 25 |
| Mynd 0.8 Útbreiðsla hamfarajökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli eða í vestanverðri Bárðarbunguöskjunni, sviðsmynd Ham01 .....       | 26 |
| Mynd 0.9 Tjónmætti hamfarajökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli eða í vestanverðri Bárðarbunguöskjunni, sviðsmynd Ham01 .....        | 27 |
| Mynd 0.10 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Sylgjujökli, sviðsmynd Sy02 .....   | 28 |
| Mynd 0.11 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Sylgjujökli, sviðsmynd Sy02 .....  | 29 |
| Mynd 0.12 Staðaráhætta á völdum svæðum auk áhættuviðmiða vegna ofanflóðahættu til samanburðar .....  | 33 |
| Mynd 0.13 Einstaklingsbundin árleg dánaráhætta af orsökum jökulhlaupa á völdum svæðum .....  | 35 |
| Mynd 2.1. Jarðmyndun á Þjórsársvæðinu .....  | 38 |
| Mynd 2.2. Flugsýn yfir nágrenni Bárðarbungu .....  | 39 |
| Mynd 2.3. Yfirlitskort. Vatnasvið Þjórsár .....  | 41 |
| Mynd 2.4. Poruhluti jarðlaga á Íslandi .....   | 42 |
| Mynd 2.5. Lekt jarðlaga á Íslandi. ....  | 43 |
| Mynd 2.6. Einfölduð þversnið gegnum móbergshrygg og móbergsstapa .....   | 44 |
| Mynd 2.7. Lagskipting í hraunlagastafla .....  | 45 |
| Mynd 2.8. Bárðarbungukerfið, hraun sem runnið hafa frá gosum í kerfinu á Nútíma og helstu gossprungur .....  | 46 |
| Mynd 2.9. Yfirlitskort yfir hraun komin upp á Bárðarbungukerfi milli Vonarskarðs og Þórisvatns .....   | 47 |
| Mynd 2.10. Gjóskulag á kambi milli Bálkajökuls og Bárðarjökuls .....   | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Mynd 2.11. Mæling á gjóskulaginu.....  | 50 |
| Mynd 2.12. Merki um gíga og gígleifar í norðvesturhlíðum Bárðarbungu og í og við jökuljaðra í nágrenni hennar .....                      | 51 |
| Mynd 3.1. Samsett landlíkan.....   | 56 |
| Mynd 3.2. Skýringarmyndir sem sýna breytingar sem „focal statistics“ og „fill“ leiðréttingartólin gera á reitskiptu líkani (rasta) ..... | 58 |
| Mynd 3.3. Brýr á svæðinu sem landlíkanið þekur.....  | 59 |
| Mynd 3.4. Landlíkan af ármótum Þjórsár og Sandár .....   | 60 |
| Mynd 3.5. Landlíkan af hluta farvegar Köldukvíslar fyrir og eftir leiðréttingu.....  | 60 |
| Mynd 3.6. Brúin yfir Sandá fyrir og eftir leiðréttingu líkans .....  | 61 |
| Mynd 3.7. Samsett leiðrétt landlíkan af efra og neðra svæði. ....  | 61 |
| Mynd 3.8. Dæmi um hrjúfleika („hóla og dældir“) í landlíkani fyrir leiðréttingu .....  | 62 |
| Mynd 3.9. Einfalt líkan af bráðnun þar sem jökulþykkt er undir 200 m.....  | 64 |
| Mynd 3.10. Skematískt líkan af gosi undir þykkum jökli þar sem mjög hraður varmaflutningur verður við tvístrun kviku .....               | 65 |
| Mynd 3.11. Ísþykktarkort af norðvesturhluta Vatnajökuls .....  | 67 |
| Mynd 3.12. Kort af jökulbotni á norðvestanverðum Vatnajökli .....  | 68 |
| Mynd 3.13. Þversnið sem sýna jökulyfirborð og botn fyrir mismunandi sviðsmyndir .....  | 71 |
| Mynd 3.14. Rennslisrit sviðsmynda og framhald af Mynd 3.13 .....   | 72 |
| Mynd 3.15. Vatnasvið Þjórsár og leiðir þeirra jökulhlaupa, sem hermd eru.....  | 75 |
| Mynd 3.16. Þversnið notuð við samanburð reikninga.....   | 77 |
| Mynd 3.17. Rennsli í gegnum þversniðin tvö á Mynd 3.2 .....  | 78 |
| Mynd 3.18. Samanburður á rennslisritum fyrir þversniðin á Mynd 4.2.....  | 79 |
| Mynd 3.19. Áhrif breytinga í hrýfisstuðli .....  | 80 |
| Mynd 3.20. Útbreiðsla og hámarksdýpi hlaupvatns á 4 m reiknineti og 10 m reiknineti .  | 81 |
| Mynd 3.21. Hámarks-rennslisraði hlaupvatns á 4 m reiknineti og 10m reiknineti .....  | 82 |
| Mynd 3.22. Samanburður á rennsli hlaupvatns inn og út úr Hágöngulóni fyrir 4 m og 10 m reikninet .....                                   | 82 |
| Mynd 3.23. Rennslissveiflur í gegnum Kvíslavatns-þversniðið .....  | 83 |
| Mynd 3.24. Staðsetning þversniða á Myndum 3.23 og 3.25 .....   | 84 |
| Mynd 3.25. Rennslisferlar fyrir mismunandi Courant tölur og takmarkara .....   | 85 |
| Mynd 3.26. Yfirlitsmynd sem sýnir staðsetningu flóðvara við lónin .....  | 86 |
| Mynd 3.27. Hjástíflan undir norðanverðri Syðri-Hágöngu .....   | 87 |
| Mynd 3.28. Uppbyggingu stíflu með flóðvari og hvernig samspil lóns og hlaupvatns er hermt .....  | 87 |

|   |     |
|---|-----|
| Mynd 3.29. Rennslisrit fyrir sviðsmyndina Ham01 og Kkv02 við jaðar Vatnajökuls og fyrir rof á stíflumannvirkjum lóna.....   | 90  |
| Mynd 3.30. Útbreiðsla rennslis úr lóni út frá hermdu stíflurofi .....   | 91  |
| Mynd 3.31. Staðsetning mælipversniða við Hágöngulón og munur á rennsli fyrir þessi þversnið fyrir vatnslón og lón með fastri yfirborðshæð sem er steipt inn í landlíkanið ... | 93  |
| Mynd 4.1. Uppsetning á hermunum án stíflurofs (A-reikningar) og með möguleika á stíflurofi (B-reikningar).....  | 96  |
| Mynd 4.2. Staðsetning þversniða 1 til 24.....   | 98  |
| Mynd 4.3. Staðsetning þversniða 3, 6, 7, 10, 13, 14, 18 og 22.....  | 98  |
| Mynd 4.4. Rennsli í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir Ham01 .....  | 99  |
| Mynd 4.5. Rennsli í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir Kkv02.....   | 99  |
| Mynd 4.6. Rennsli í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir Kkv05.....   | 100 |
| Mynd 4.7. Rennsli í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir Bb02 .....   | 100 |
| Mynd 4.8. Rennsli í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir Sy02 .....   | 100 |
| Mynd 4.9. Staðsetning þversniða 23, 24, 22 og 19 .....  | 102 |
| Mynd 4.10 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss í hlíðum Bárðarbungu, sviðsmynd Bb02 .....   | 105 |
| Mynd 4.11 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss í hlíðum Bárðarbungu, sviðsmynd Bb02 .....  | 106 |
| Mynd 4.12 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv05.....  | 107 |
| Mynd 4.13 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv05.....   | 108 |
| Mynd 4.14 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv02.....  | 109 |
| Mynd 4.15 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv02.....   | 110 |
| Mynd 4.16 Útbreiðsla hamfarajökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli eða í vestanverðri Bárðarbunguöskjunni, sviðsmynd Ham01.....                                | 111 |
| Mynd 4.17 Tjónmætti hamfarajökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli eða í vestanverðri Bárðarbunguöskjunni, sviðsmynd Ham01.....                                 | 112 |
| Mynd 4.18 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Sylgjujökli, sviðsmynd Sy02 .....  | 113 |
| Mynd 4.19 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Sylgjujökli, sviðsmynd Sy02 .....   | 114 |
| Mynd 6.1. Staðaráhætta á völdum svæðum auk áhættuviðmiða vegna ofanflóðahættu til samanburðar.....  | 124 |

|  |     |
|--|-----|
| Mynd 6.2. Einstaklingsbundin árleg dánaráhætta af orsökum jökulhlaupa á völdum svæðum.....   | 126 |
| Mynd 7.1. Samanburður á rennsli í reikningum Veðurstofunnar með GeoClaw og Verkís með HEC-RAS .....  | 130 |
| Mynd 7.2. Samanburður á rennsli og varanda rennslisrits neðan flóðvars Hágöngulóns fyrir sviðsmynd í hermunum Verkís og rennslisrits Veðurstofu Íslands .....      | 130 |
| Mynd 7.3. Samanburður á rennsli og varanda rennslisrits neðan flóðvars Hágöngulóns fyrir sviðsmynd Ham01 í hermunum Verkís og rennslisrits Veðurstofu Íslands..... | 131 |

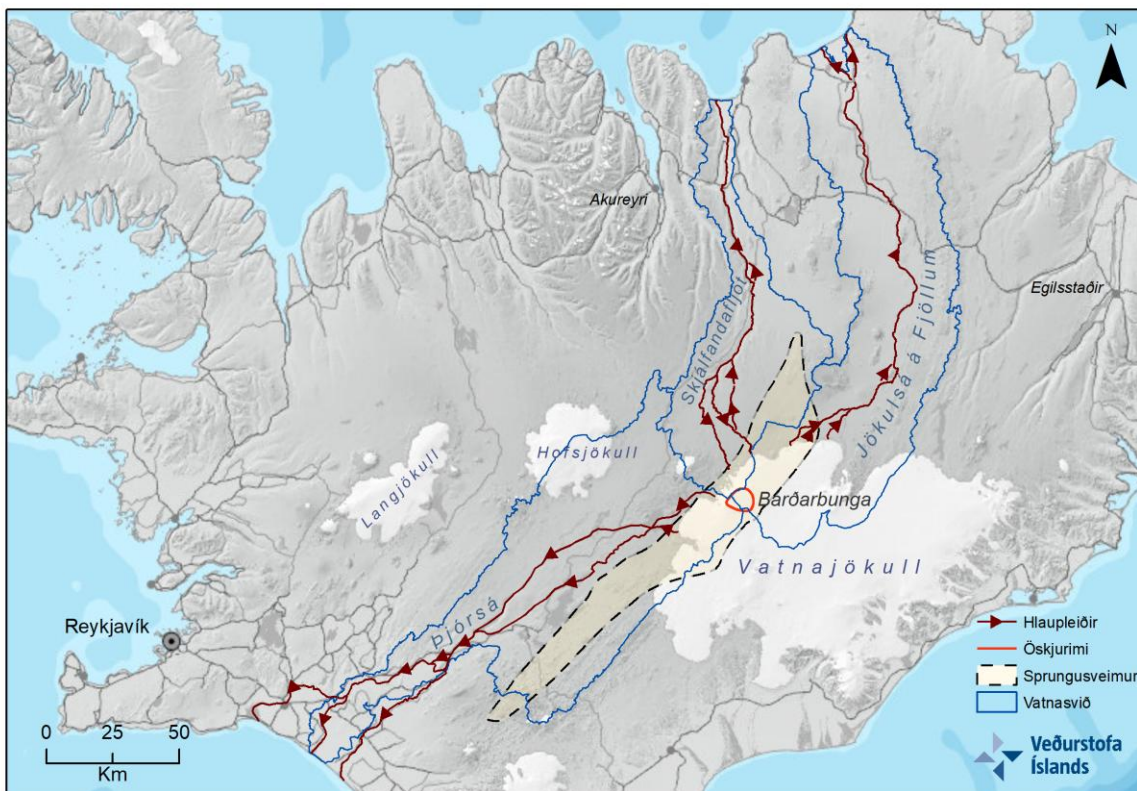
## Töfluskrá

|   |     |
|---|-----|
| Tafla 2.1. Hita- og úrkomutölur á mismunandi stöðum á vatnasviði Þjórsár.....   | 40  |
| Tafla 2.2 Yfirlit yfir eldgos á Bárðarbungukerfi á sögulegum tíma .....   | 48  |
| Tafla 3.1. Ísþykkt, bráðnun og bráðnunarhraði í völdum gosum í jökli 1918–2011. ....  | 63  |
| Tafla 3.2. Sviðsmyndir, líkön fyrir þunnan jökul – bráðnun yfir gossprungum. ....   | 69  |
| Tafla 3.3. Mat á bráðnunartölum undir þykkum jökli og gróft mat á líkum á hlaupum ....  | 69  |
| Tafla 3.4. Endurkomutími gosa – sviðsmyndir með hermunum.....   | 74  |
| Tafla 3.5 Samanburður hermana með GeoClaw og HEC-RAS. ....  | 77  |
| Tafla 3.6 Hryfisgildi [ $\text{sm}^{-1/3}$ ] á hverju 100 m hæðarbili.....  | 79  |
| Tafla 3.7. Manngerð uppistöðulón á Þjórsár-Tungnaársvæðinu. ....  | 86  |
| Tafla 3.8. Rúmmál vatns (Gígalítrar) í lónum á hlaupleiðum .....  | 88  |
| Tafla 3.9. Hæð yfirfalls og flóðvars í metrum.....  | 89  |
| Tafla 3.10. Heildarrúmmál sviðsmynda við upptakasvæði. ....   | 90  |
| Tafla 3.11 Kennitölur sviðsmynda fyrir athugun á bakvatnsáhrifum .....  | 92  |
| Tafla 3.12. Hætta sem fólki stafar af flóði, samkvæmt flokkun tjónmættisgilda. ....   | 94  |
| Tafla 4.1. Tímasetning á stíflurofi/rofi á flóðvörum fyrir B-reikningana .....  | 97  |
| Tafla 4.2. Rennslisrúmmál [GI] í gegnum þversniðin 23, 24, 22 og 19 .....   | 102 |
| Tafla 4.3. Tímasetning á aðkomu hlaups í klst:mín. ....   | 103 |
| Tafla 4.4. Meðaldýpi hlaupvatns og flatarmál þess svæðis sem hlaup nær yfir í hverri sviðsmynd .....  | 117 |
| Tafla 4.5. Meðaldýpi hlaupvatns og flatarmál þess svæðis sem hlaup nær yfir í hverri sviðsmynd, fyrir þau svæði þar sem tjónmættið $hr \geq 0.75$ ( $DF = 0.5$ )..... | 117 |
| Tafla 4.6. Hámarksrennsli og rúmmál fyrir þversnið 4 og 7 yfir 10 daga tímabi .....   | 118 |

## Samantekt

Frá árinu 2018 hefur verið unnið að hættumati vegna eldgosa og jökulhlaupa frá Bárðarbungukerfinu í Vatnajökli. Verkefnið er hluti stærra hættumatsverkefnis, sem ber heitið GOSVÁ og er kostað af Ofanflóðasjóði, auk stuðnings frá Landsvirkjun, Vegagerðinni, Landsneti og HS-Veitum. Meginmarkmið þessa hluta verkefnisins er að meta þá hættu vegna jökulhlaupa sem steðjað gæti að virkjunum og öðrum mikilvægum innviðum á svæðinu vestan Vatnajökuls og að byggð á Suðurlandsundirlendinu. Hér í þessari samantekt er farið í gegnum helstu atriði þessa verkefnis og lykil niðurstöður kynntar. Nánari útlitun á bakgrunni verkefnisins, aðferðafræði, niðurstöðum og óvissupáttum má svo finna í köflum meginskýrslunnar hér á eftir.

Líkur á hamförum sem þessum eru litlar og áhættan því í ýmsum samanburði lítil. Full ástæða er þó til að kanna mögulega hlauphættu á svæðinu því tjónmætti hlaupanna getur verið mikið og tjónnæmi samfélagsins umtalsvert. Hættan getur því verið veruleg þó áhættan sé lítil. Hlauphættan er metin með hliðsjón af eldgosasögu, tiltækum landlíkönnum og straumfræðilegum líkanreikningum. Hætta vegna hlaupa frá Bárðarbungu, niður Skjálfandafliót og Jökulsá á Fjöllum (Mynd 0.1), hefur verið könnuð í tveimur öðrum sambærilegum verkefnum (Jón Elvar Wallevik o.fl., 2024a,b).



Mynd 0.1 Vatnasvið Þjórsár, Skjálfandaflióts og Jökulsár á Fjöllum auk sprungusveims og öskjurima eldstöðvakerfisins Bárðarbungu. Helstu leiðir mögulegra jökulhlaupa, vegna eldgosa á Bárðarbungukerfinu undir jökli, eru einnig sýndar.

## Eldstöðvakerfi Bárðarbungu

Eldstöðvakerfi Bárðarbungu er um 190 km langt og allt að 30 km breitt (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998) og er eitt það stærsta á landinu. Bárðarbunga rís í um 2000 m y.s. og í henni er ísfyllt 65 km<sup>2</sup> askja (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2016). Þrjú skörð eru í barma öskjunnar, til suðvesturs, norðausturs og austurs (dýpst). Eldgosasaga Bárðarbungukerfisins hefur verið rakin með kortlagningu á hraunum og rannsóknum á gjóskulögum og er nú nokkuð vel þekkt. Á Bárðarbungukerfinu hafa orðið mikil hraungos á Nútíma (Holocene, síðustu rúmlega 11.000 ár) og stærstu hraunin runnu til sjávar á Suðurlandi (Þjórsárhraun) og langt norður eftir Bárðardal. Eldgos á hinum jökulpakta hluta Bárðarbungukerfisins eru sprengigos sem skilja eftir gjóskulög í jarðvegi, setlögum og jökulís. Færa má rök fyrir að um 400 slík sprengigos hafi orðið undir jökli á síðustu 11.000 árum. Einnig hafa orðið stór sprengigos á Veiðivatnarein vegna hárrar grunnvatnsstöðu, síðast á Veiðivatnagossprungu árið 1477 (Guðrún Larsen o.fl., 2013).

Í ljósi þess hve virkt eldstöðvakerfi Bárðarbungu hefur verið, verður að gera ráð fyrir að eldgos geti orðið í jökli á sprungureinunum til norðurs og norðausturs, til suðvesturs og í hlíðum Bárðarbungu að norðvestan. Mikil umbrot urðu í Bárðarbungukerfinu 2014–2015 og var jarðeldur þá uppi í Holuhrauni við norðanverðan Vatnajökul. Slík umbrot geta einnig valdið kvikuhlaupum til suðvesturs og eldgosum vestan jökulsins, með tilheyrandi hraunrennsli og gjóskufalli. Þá eru umtalsverðar líkur á eldsupptökum undir jöklinum, sbr. Gjálpargosið 1996. Auk gosa á sprungum sem væru í beinu framhaldi af nýlegum gossprungum á Veiðivatnarein (t.d. Tröllagígum 1862–64), geta gos á vatnasviði Köldukvíslar orðið nokkru austar þar sem ís er um eða yfir 600 m þykkur og aðstæður líkar og við Gjálp. Ekki er hægt að útiloka gos í suðvesturhorni Bárðarbunguöskjunnar, þar sem ísþykkt er einnig mjög mikil og vatn leitar til suðvesturs. Ef gos þar yrði af svipaðri stærð og t.d. Kötlugosið 1918, myndi það valda hamfarahlaupi (rennsli um eða yfir 100.000 m<sup>3</sup>/s).

Með örfáum undantekningum hafa öll þekkt jökulhlaup vegna eldvirkni á Bárðarbungukerfi komið í Jökulsá á Fjöllum. Það þýðir að gos sem valda hlaupum, og jafnframt tíðustu gosin, hafa orðið norðan- og/eða austan til á jökulpakta hluta kerfisins - eða tengjast öskju Bárðarbungu. Miðað við gossögu Bárðarbungu og að teknu tilliti til allra þátta sem eldvirkni á jökulpakta hlutanum fylgir eru minnstar líkur á jökulhlaupum til vesturs og suðurs. Líklegast er að bræðsluvatn sem leitar til vesturs frá gosi á jökulpakta hluta kerfisins, fari í Köldukvísl og/eða Skjálfandafljót.

Stórhlaup til vesturs vegna eldsumbrota í Bárðarbungukerfinu gæti náð niður í efstu byggð í Þjórsárdal á hálfum sólarhring og að nokkrum þéttbýlisstöðum á Suðurlandi á innan við sólarhring. Allstór svæði í landbúnaðarhéraðum Suðurlands færu undir vatn í slíku hlaupi auk þess sem hætta mundi steðja að vatnsaflsvirkjunum á vatnasviði Þjórsár og Köldukvíslar. Afl þessara virkjana er tæpur þriðjungur af uppsettu vatnsafl í landinu og þær framleiða yfir 20% af allri raforku landsins (Raforkueftirlitið, 2025). Vegakerfi landsins stafar einnig hætta af þessum hlaupum.

## Hermun jökulhlaupa

Til að kanna jökulhlaupahættuna til vesturs og suðurs eru settar fram fimm sviðsmyndir hlaupa sem upptök ættu vegna eldgosa undir Köldukvíslarjökli, Sylgjujökli, innan Bárðarbunguöskjunnar og í vesturhlíðum hennar. Fjórar þeirra miðast við meðalstór eða stór hlaup með hámarksrennsli á bilinu 6.650 til 31.300 m<sup>3</sup>/s. Ennfremur er reiknað hamfarahlaup með hámarksrennsli 100.000 m<sup>3</sup>/s. Jökulhlaupasviðsmyndirnar byggja á líkönum Jarðvísindastofnunar Háskólans sem lýsa ísbráðnun sem getur orðið af völdum eldgosa á sprungum undir misþykkum jökli. Þessi líkön og bráðnunartölur sem notaðar eru, verða að flokkast sem versta tilfelli fyrir hverja sviðsmynd, þ.e. sprungugos af hámarks lengd miðað við stærð svæðisins. Lagt er gróft mat á endurkomutíma atburða sem myndu framkalla mismunandi sviðsmyndir og er hann á bilinu 500 til 2.000 ár fyrir minni sviðsmyndirnar undan Köldukvíslarjökli en 1.000 til 10.000 ár fyrir hamfarahlaup og hlaup undan Sylgjujökli.

Straumfræðilíkanið GeoClaw er notað til að reikna útbreiðslu, vatnsdýpi og ferðatíma hlaupanna á reiknineti, sem lagt er yfir landlíkan. Hugbúnaður GeoClaw nýtir fræðilegar jöfnur sem lýsa streymi vatns yfir landsvæði og í farvegum með mismunandi viðnámi yfirborðsins gagnvart rennsli vatns. GeoClaw er opinn hugbúnaður og reikningar með honum hafa verið keyrðir á ofurtölvunum Elju og Garpi, sem eru í umsjá Háskóla Íslands. Hlaup samkvæmt áðurnefndum fimm sviðsmyndum hafa verið hermd, hvert þeirra í tveimur útgáfum, samtals tíu hermanir. Stærstu hermanirnar þurfa allt að 90 daga reiknitíma á ofurtölvunni og auk þess hafa ýmsir tilraunareikningar verið gerðir. Samstarf við ofurtölvusetur Háskóla Íslands ([www.irei.is](http://www.irei.is)) hefur því verið mikilvægt. Samanlögð gagnanotkun í þessu verkefni er umfram 50 Terabæti.

Samspil miðlunarmannvirkja og hlaupanna getur verið flókið og farið að hluta til eftir vatnsstöðu í lónum, sem er breytileg eftir árstíðum. Við lága vatnsstöðu geta lón dempað hlaup komi ekki til stíflubrots en við háa vatnsstöðu og rof á flóðvari eða stíflubrot getur vatn úr lónum sem bætist við hlaupin leitt til hækkunar flóðtopps. Hér í þessu verkefni er reynt að magntaka óvissuna sem þetta veldur með því að búa til umlykju utan um líkleg tilfelli með tveimur útgáfum af reikningunum. Í svokölluðum A-reikningum hafa hlaup engin áhrif á stíflurnar eða flóðvör þeirra. Vatn úr lónunum bætist því ekki við hlaupvatnið. Í svokölluðum B-reikningum er aftur á móti gert ráð fyrir hárri vatnsstöðu í lónum og að flóðvör rofni og stíflur að hluta til ef hlaupvatn nær vissri vatnshæð yfir hæð flóðvara. Í þeim reikningum ákvarðar líkanið því sjálft við hvert lón hvort stíflurof verði og ef svo er, þá bætist vatnið úr lóninu við hlaupvatnið. A-reikningarnir lýsa því frekar heppilegum sviðsmyndum þar sem lón magna ekki hlaupin meðan að B-reikningarnir lýsa nærri því verstu sviðsmyndum þar sem stíflur rofna og vatn úr lónum magnar hlaupin.

Mögulegt er að í raun yrðu áhrif lóna til meira gagns en A-reikningarnir lýsa því að lón geta dregið úr hættu af umtalsverðum jökulhlaupum. Ef stíflur halda og næg rýmd er til staðar í lóninu til að grípa hluta eða jafnvel allt rúmmál hlaupvatnsins geta lónin dempað framgang hlaupa eða jafnvel stöðvað hann alveg. Dæmi um slíkt er hlaupið sem kom undan Köldukvíslarjökli árið 2011 og gekk fram í Hágöngulón (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2016). Áætlað hámarksrennsli hlaupsins var um 2.200 m<sup>3</sup>/s og heildarrúmmál hlaupvatns um 35

GI (Laufey B. Hannesdóttir, 2011). Þetta var því umtalsvert jökulhlaup en þó ekki nema um tíundi hluti af heildar miðlunargetu lónsins, sem er yfir 300 GI (Unnar Númi Almarsson o.fl., 2020). Fyrir hlaupið var lónið á yfirfalli en áhrif hlaupsins urðu þó ekki önnur en tæplega eins metra hækkun í lóninu og aukning í rennsli á yfirfallinu (Laufey B. Hannesdóttir, 2011). Mest varð rennslið á yfirfallinu 242 m<sup>3</sup>/s eða aðeins um tíundi hluti af hámarksrennsli hlaupsins. Lónið dempaði því hlaupið gríðarlega og dró mikið úr tjónmætti og hættunni af hlaupinu. Við lægri vatnsstöðu hefði lónið getað alveg gleypt og stöðvað umtalsvert stærra flóð.

Hæðarlíkanið ÍslandsDEM, útbúið af Landmælingum Íslands, hefur verið notað í þessu verkefni. ÍslandsDEM er samsett úr gögnum sem ná samanlagt að þekja allt Ísland. Veigamest er ArcticDEM landlíkanið, sem nær yfir allt Norðurskautssvæði Jarðar (Porter o.fl., 2018) en einnig er notast við nýleg hæðarlíkön af jöklum landsins, sem aflað hefur verið með flugleysimælingum (LiDAR-mælingum) (Tómas Jóhannesson o.fl., 2013). Ennfremur hefur verið notast við líkan Samsýnar af vatnasviði Hvítár-Ölfusár. Nýjasta útgáfa ÍslandsDEM er frá árinu 2020 (Landmælingar Íslands, 2020). Nokkrar lagfæringar á líkaninu hafa reynst nauðsynlegar vegna hinna vatnafræðilegu reikninga, einkum þar sem helstu farvegir jökulhlaupanna koma fram.

Stór hluti útbreiðslusvæðis hlaupanna á efri hluta vatnasviðs Þjósár er hulinn mikið gropnum nútímahraunum og getur írennsli því haft umtalsverð áhrif á niðurstöður hættumatsins. Töluverð óvissa er þó um hvaða áhrif þetta ferli geti haft. Séu hraunin hulin lítt gegndræpu hjarni að vetrarlagi eru áhrifin hverfandi en á öðrum árstíðum geta þau verið gríðarleg. Grunnvatnsstaða á útbreiðslusvæði hlaupanna getur einnig haft áhrif á hversu miklu írennsli hraunin geta tekið á móti. Einfalt mat á mögulegum áhrifum sýnir að þáttur írennslis getur verið allt frá því að vera lítill sem enginn yfir í að heilu stórhlaupin hverfi ofan í lek og gropin nútímahraun á hálendinu vestan við Vatnajökul. Ákveðið var að horfa ekki til þessa ferlis í reikningunum, líkt og að hlaup kæmi fram á versta tíma vetrar, til þess að horft sé til verri mögulegrar útkomu í hættumati.

## Útbreiðsla hlaupa

Til að fá heildstætt samhengi í samantektina eru myndir af helstu niðurstöðum fyrir hverja af sviðsmyndunum fimm sem hermdar voru sýndar á Myndum 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 og 0.10 Mynd 0.10. Þær eru einnig birtar ásamt nánari umfjöllun í kafla 4. Niðurstöðum um heildarútbreiðslu hlaupvatns í hverri sviðsmynd verður nú lýst að nokkru.

### Hamfarahlaup undan Köldukvíslarjökli

Sviðsmynd HAM01, stórgos í suðvestur hluta Bárðarbungu öskjunnar eða undir þykkasta hluta Köldukvíslarjökuls, hámarksrennsli 100.000 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 1422 GI, sjá Mynd 0.8. Árlegar líkur á gosi sem þessu eru 0,1 til 0,01%, sem jafngildir 1.000 til 10.000 árum á milli gosa að jafnaði.

Hlaupvatn fellur beint í Hágöngulón þar sem gert er ráð fyrir að stíflumannvirki rofni í B-reikningunum. Áframhaldandi lýsing miðast hér við B-reikningana. Hluti hlaupvatnsins fer í farveg Köldukvíslar og breiðir allmikið úr sér á leið niður undir Þórisvatn. Hlaupvatn flæðir

aðeins að litlum hluta inn í Þórisvatn en vatnið finnur sér leið yfir stíflumannvirkin við Sauðafellslón og helst svo áfram í farvegi Köldukvíslar niður í Sporðöldulón. Önnur grein hlaupvatnsins fer til vesturs frá Hágöngulóni yfir í Kvíslavatn og svæðið þar um kring og þar rofna flóðvör og hlutar Svartárstíflu og Þúfuversstíflu 5. Vatnið safnast svo í farveg Þjórsár og fellur í honum til suðurs niður í Sultartangalón. Þar verður stíflurof líkt og í Sporðöldulóni og báðar greinar hlaupsins sameinast ofan Búrfells. Hluti hlaupvatnsins í þessari sviðsmynd nær vestur af Hafinu og niður í Gjána í Þjórsárdal. Sá hluti heldur svo áfram um Rauða yfir í Fossá og niður Hjálparfoss.

Hlaupvatn dreifir úr sér í Þjórsárdalnum og neðan hans. Grein úr hlaupinu berst í Ytri Rangá og fellur í farvegi hennar um Hellu, niður í Landeyjar og síðan til sjávar. Mestur hluti hlaupvatnsins fer um farveg Þjórsár, breiðir úr sér á flatlendi Skeiða og leitar þar til norðurs. Vörðufell verður umflotið og norðan þess leitar hlaupvatn um 10 km til norðurs eftir farvegi Hvítár eystri. Einnig flæðir vatn inn í Hestvatn austan frá. Í Flóanum fer stórt svæði undir vatn og flóðvatn nær að Selfossi austan- og sunnanverðum. Við ströndina verður hlaupvatnið sem hafsjór sem teygir sig um 50 km leið frá vesturjaðri Ölfusár um Eyrarbakka, Stokkseyri og Þykkvabæ austur á Landeyjasand.

Ekki kemur fram mikill munur á útbreiðslu þessa hlaups í A- og B-reikningum. Síðarnefndu reikningarnir sýna þó meiri útbreiðslu norðvestan Kvíslavatns og er norðurjaðar hlaupvatnsins þá aðeins 2 km frá jaðri Múlajökuls, sem gengur suður úr Hofsjökli. Útbreiðsla í B-reikningum er einnig áberandi meiri á láglandi, kringum Vörðufell og sums staðar á undirlendinu nærri sjó.

### **Stórhlaup undan Köldukvíslarjökli**

Sviðsmynd Kkv02, stórgos undir neðri hluta Köldukvíslarjökuls, hámarksrennsli 31.300 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 687 Gl, sjá Mynd 0.6. Árlegar líkur á gosi sem þessu eru 0,2 til 0,05%, sem jafngildir 500 til 2.000 árum á milli gosa að jafnaði.

Ekki er verulegur munur á útbreiðslu þessa hlaups og hamfarahlaupsins Ham01. Munur á Kkv02 í A- og B-reikningum kemur einkum fram í Þjórsárdal og á Suðurlandsundirlendi, þar fer meira land undir vatn í hinum síðarnefndu. Vatn nær ekki vestur af Hafinu og ofan í Gjána í A-reikningunum.

### **Meðalstórt hlaup undan Köldukvíslarjökli**

Sviðsmynd Kkv05, gos svipað Gjálpargosinu 1996 en undir Köldukvíslarjökli, hámarksrennsli 8.000 m<sup>3</sup>/s og hámarki er haldið í 4 daga sem er mun lengur en í öðrum sviðsmyndum, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 2765 Gl, sjá Mynd 0.4. Heildar rúmmál hlaupvatnsins er því mikið og meira heldur en í bæði Kkv02 og Ham01, þó hámarksrennsli þeirra sviðsmynda sé meira. Árlegar líkur á gosi sem þessu eru 0,2 til 0,05%, sem jafngildir 500 til 2.000 árum á milli gosa að jafnaði.

Útbreiðsla ekki miklu minni á Kvíslavatnssvæðinu en í Ham01 og Kkv02, en vatnsdýpi minna. Svipað á við á neðri svæðunum og útbreiðsla þar jafnvel meiri heldur en fyrir Kkv02. Munur á útbreiðslu í A- og B-reikningum er einna mestur á svæðinu sunnan Vörðufells og austan Hestvatns.

## Meðalstórt hlaup úr hlíðum Bárðarbungu

Sviðsmynd Bb02, gos í hlíðum Bárðarbungu, hámarksrennsli 6.650 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 100 Gl, sjá Mynd 0.3. Árlegar líkur á gosi sem þessu eru 0,2 til 0,05%, sem jafngildir 500 til 2.000 árum á milli gosa að jafnaði.

Hér er áberandi munur á útbreiðslu í A- og B-reikningum og skýrist hann af viðbótarvatni úr lónum við stíflurof. Vert er að taka fram að neðri stíflurof í B-reikningunum fyrir Bb02 byggja á að hlaupið nái að rjúfa flóðvarið og stífluna í Hágöngulóni, sem er efsta lón á hlaupleiðinni. Mjög litlu munar að hlaupið nái ekki að valda rofi þar og í samanburðar reikningum Verkís verður ekki rof fyrir þá sviðsmynd, sjá nánar kafla 7. Því er mikil óvissa um hvort að B-reikningarnir séu raunsönn mynd af verstu útgáfu sviðsmyndarinnar Bb02. A-reikningarnir eru því kynntir sem meginniðurstaða þeirrar sviðsmyndar og niðurstöður aðeins þeirra sýndar á Mynd 0.3. Rennsli helst nánast að öllu leyti innan núverandi farvega í A-reikningum.

## Stórhlaup undan Sylgjujökli

Sviðsmynd Sy02, gos undir þykkari hluta Sylgjujökuls, hámarksrennsli 19.450 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 450 Gl, sjá Mynd 0.10. Árlegar líkur á gosi sem þessu eru 0,1 til 0,01%, sem jafngildir 1.000 til 10.000 árum á milli gosa að jafnaði.

Þetta hlaup hefur sérstöðu því vatnið kemur undan jökli sunnar en í hinum tilvikunum og ekkert hlaupvatn berst í Hágöngulón eða Kvíslavatn. Meginrennslið berst eftir farvegi Sylgju og fer síðan eftir farvegi Köldukvíslar til suðvesturs. Útbreiðsla neðan Sultartangalóns er áþekkt og í hinum stórhlaupunum í bæði A- og B-reikningum. Í B-reikningunum nær hluti hlaupvatnsins í þessari sviðsmynd vestur af Hafinu og niður í Gjána í Þjórsárdal. Sá hluti heldur svo áfram um Rauða yfir í Fossá og niður Hjálparfoss. Grein úr þessu hlaupi fer niður í Tungnaá en ekki gætir mikillar aukningar í rennsli hennar í þessari hermun. Rennsli frá jaðri Sylgjujökuls stendur aðeins yfir í tæplega 7 klukkustundir og áhrif hlauptoppsins dofna því tiltölulega fljótt í farvegi Tungnaár. Hins aukna rennslis gætir því ekki lengur nálægt Krókslóni. Ef sviðsmynd hlaups undan Sylgjujökli hefði gert ráð fyrir að hlaupið hefði varað lengur, t.d. eins og gildir fyrir Kkv05 (fjórir dagar), þá hefði rennsli eftir farvegi Tungnaár reiknast meira og áhrif hlaupsins náð lengra en í sviðsmynd Sy02. Fjögurra daga hlaup hefði að líkindum haldið áfram í gegnum Krókslón, þaðan í Hrauneyjalón og sameinast svo aftur meginstraumi hlaupsins í Sporðöldulóni. Rennslið til Tungnaár verður mest 500 m<sup>3</sup>/s en sá toppur stendur aðeins yfir í stutta stund og er því rúmmálslítill. Þetta rennsli yfir í Tungnaá yrði mun minna í sviðsmynd með rennslisrit á við Kkv05. Það má því áætla að rennsli í Tungnaá samfara hlaupum undan Sylgjujökli yrði aldrei meira en almenn úrkomu- og leysingaflóð í ánni sem geta orðið hátt í 500 m<sup>3</sup>/s til viðbótar við grunnrennsli árinna (Vatnamælingar Orkustofnunar, 2003).

Hér er ekki sérstaklega hugað að mögulegum hlaupum frá gosum undir Tungnaárjökli. Slík hlaup eru möguleg og myndu að sjálfsögðu valda mun meiri áhrifum á Tungnaá heldur en hér er lýst. Sjá nánari umræðu í 5. kafla.

## Tjónmætti og framrásartími

Tjónmætti, sem byggist á stærð og afli náttúruhamfara og líkindum á að hamfarirnar eigi sér stað, er gjarnan notað til þess að meta hvort straumhraði og vatnsdýpi verði umfram það sem líklegt er að mannvirki þoli eða hvort fólki stafi hættu af flóðum af ákveðinni stærð (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022).

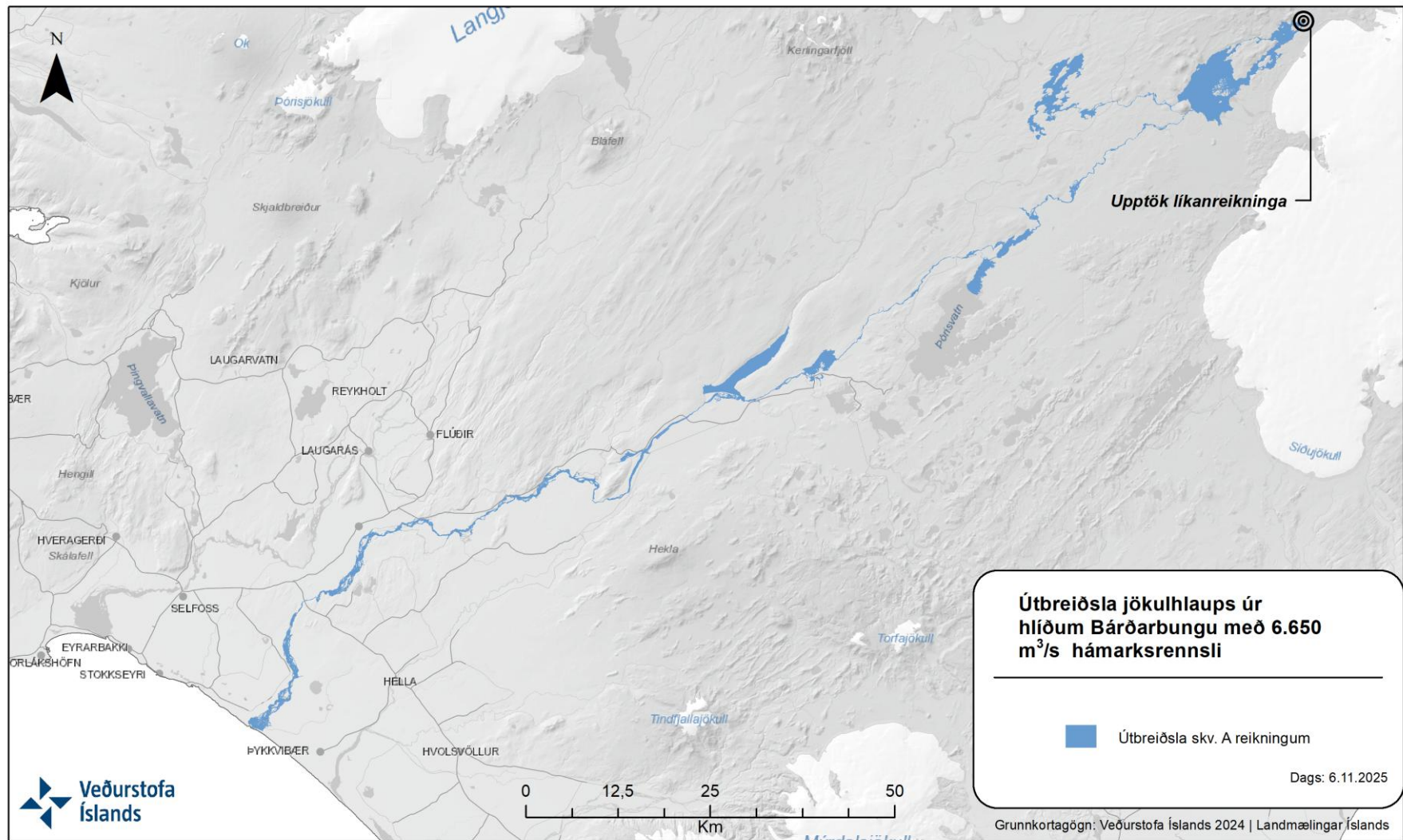
Hættu vegna vatnsflóða má lýsa t.d. með aðferð sem þróuð hefur verið á Bretlandi (DEFRA, 2006a,b). Þar er tjónmætti flóða/hlaupa lýst með jöfnunni  $hr = (v + 0,5) \cdot d + DF$ , þar sem  $hr$  stendur fyrir mat á tjónmætti (stytting á Hazard Rating) og stærðirnar  $v$  og  $d$  eru straumhraði og dýpi. Fastanum 0,5 er bætt við straumhraðann í þessari jöfnu svo djúpt vatn með lítinn straumhraða flokkist ekki sem hættulaust. Stuðullinn  $DF$  (e. debris factor) gefur til kynna hve mikið af lausagrjóti, ísjökum, braki og öðru efni berst með hlaupinu og tekur hann gildi á bilinu 0–1. Gildið 0 á við hægfara hlaup sem ekki ber með sér grjót og jaka, gildið 0,5 á við hlaup sem ber með sér lausagrjót, ísjaka og brak og gildið 1 á við flóð sem ber með sér mikið af slíku. Í þessu verkefni er ávallt notast við  $DF = 0,5$ .

Venja er í hættumati að horfa frekar til þess að ofmeta hættu heldur en að vanmeta hana. Hér á Myndum 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 og 0.11 eru því aðeins sýndar niðurstöður útreiknaðs tjónmættis sem byggir á niðurstöðum B-reikninganna, sem mynda efri mörk umlykju um líklegar niðurstöður fyrir hverja sviðsmynd (þ.e. efri mörk hættu).

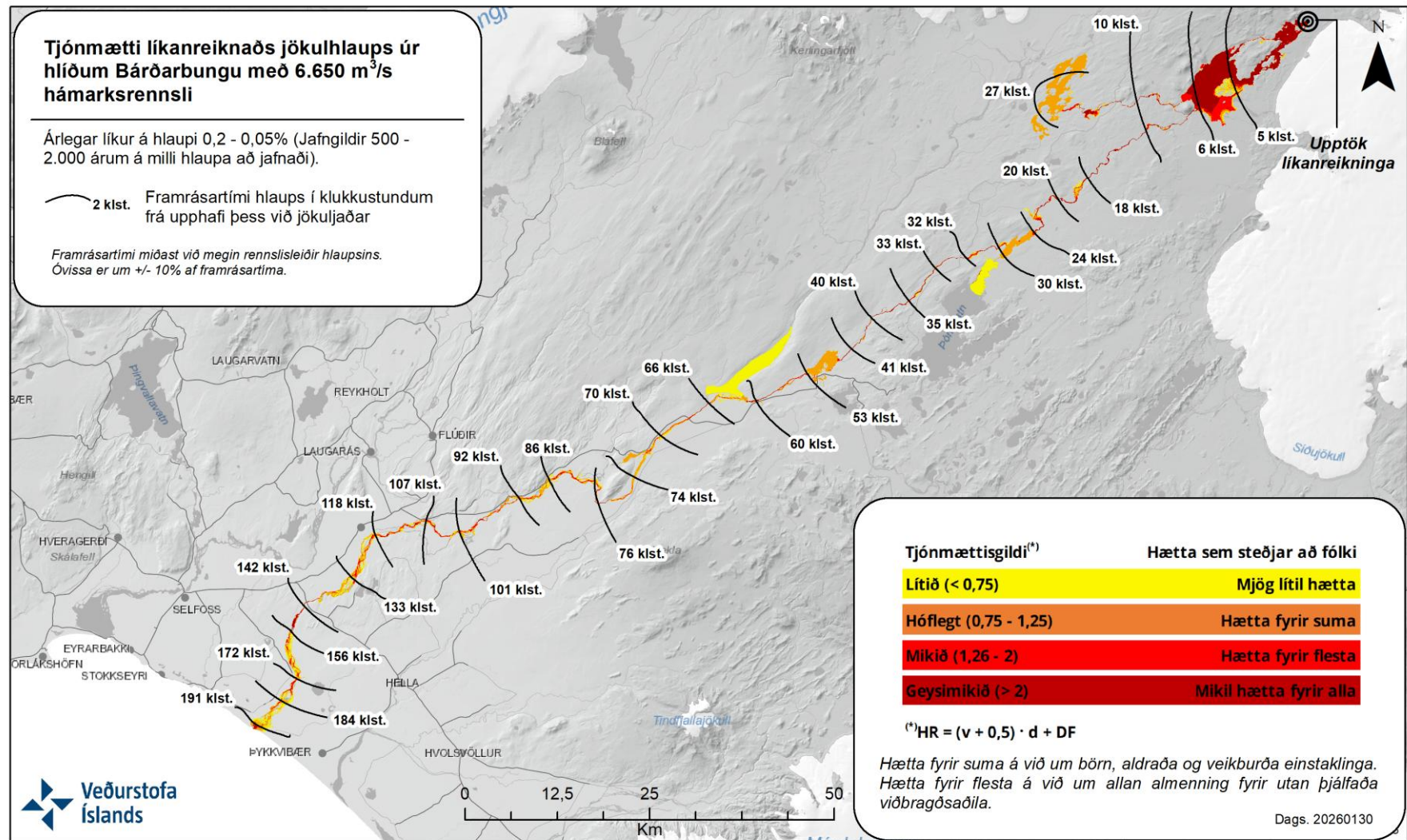
Mynd 0.9 sýnir tjónmætti stærsta atburðar, sem reiknaður er í þessu verkefni; hamfarahlaupsins Ham01. Tjónmættið reiknast yfir gildinu 2, sem jafngildir geysimikilli hættu, á stærstum hluta áhrifasvæðis hlaupsins og bendir hermunin því til að stórtjón gæti orðið í slíku hlaupi, á stíflumannvirkjum, vegum, rafmagnslínum og landbúnaðarsvæðum. Framrásartíma hlaups af þessari stærð má lesa af svörtum jafngildislínum á myndinni: Hlaupið færi úr Hágöngulóni 2 klst eftir útrennsli við jökul og væri í farvegum Köldukvíslar og Þjórsár á móts við Þórisvatn eftir 6–7 klst. Eftir 11 klst væri hlaupið komið niður í Þjórsárdal og niður að Hellu í austurgrein hlaupvatns (farvegi Ytri Rangár) eftir 14 klst. Þar fyrir neðan næði hlaupið til sjávar um 20 klst eftir upphaf þess við jökuljaðar. Vesturgreinin í farvegi Þjórsár mundi að hluta til umlykja Vörðufell eftir um 20 klst og umhverfi Selfoss væri náð eftir 22 klst. Sú grein hlaupvatns, sem bærast í Ölfusá, væri síðust til að ná ströndinni, eftir rúmar 30 klst.

Mynd 0.5 sýnir útreiknað tjónmætti í hlaupsviðsmyndinni Kkv05. Þar er um stórhlaup að ræða og tjónmætti reiknast verulegt, en þó heldur minna en fyrir hlaupið Ham01 neðarlega á hlaupsvæðinu. Framrásartími er nokkru lengri, 15 klst niður í Þjórsárdal og 28–36 klst til sjávar.

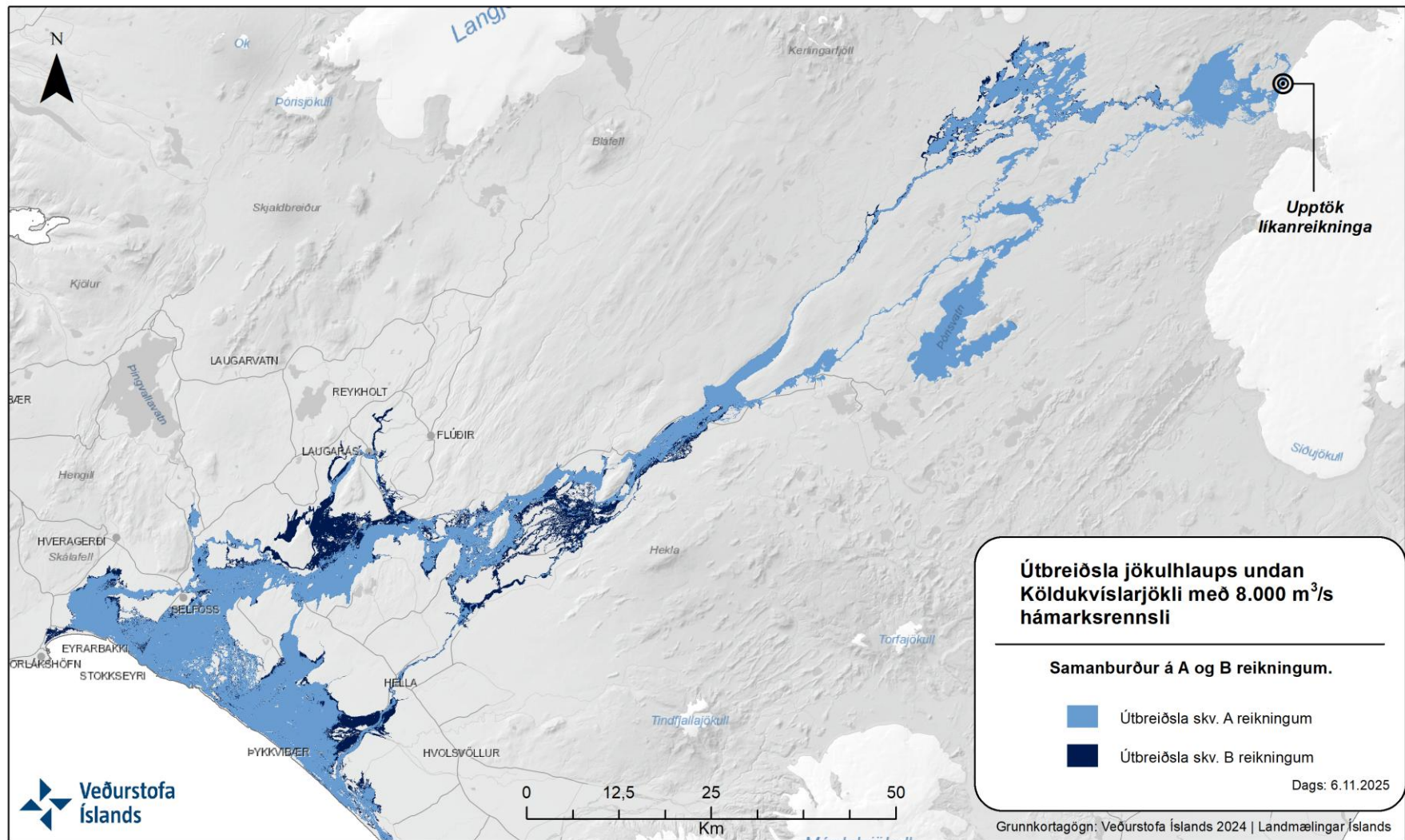
Fyrir rúmmálsminni hlaupin Kkv02 og Bb02 (Myndir 0.3 og 0.7) er tjónmætti enn verulegt og framrásartími tvöfaldast. Fyrir stórhlaupið frá Sylgjujökli (Sy02) reiknast tjónmætti einnig verulegt í farvegi Sylgju og Köldukvíslar og neðan Sultartangalóns (Mynd 0.11).



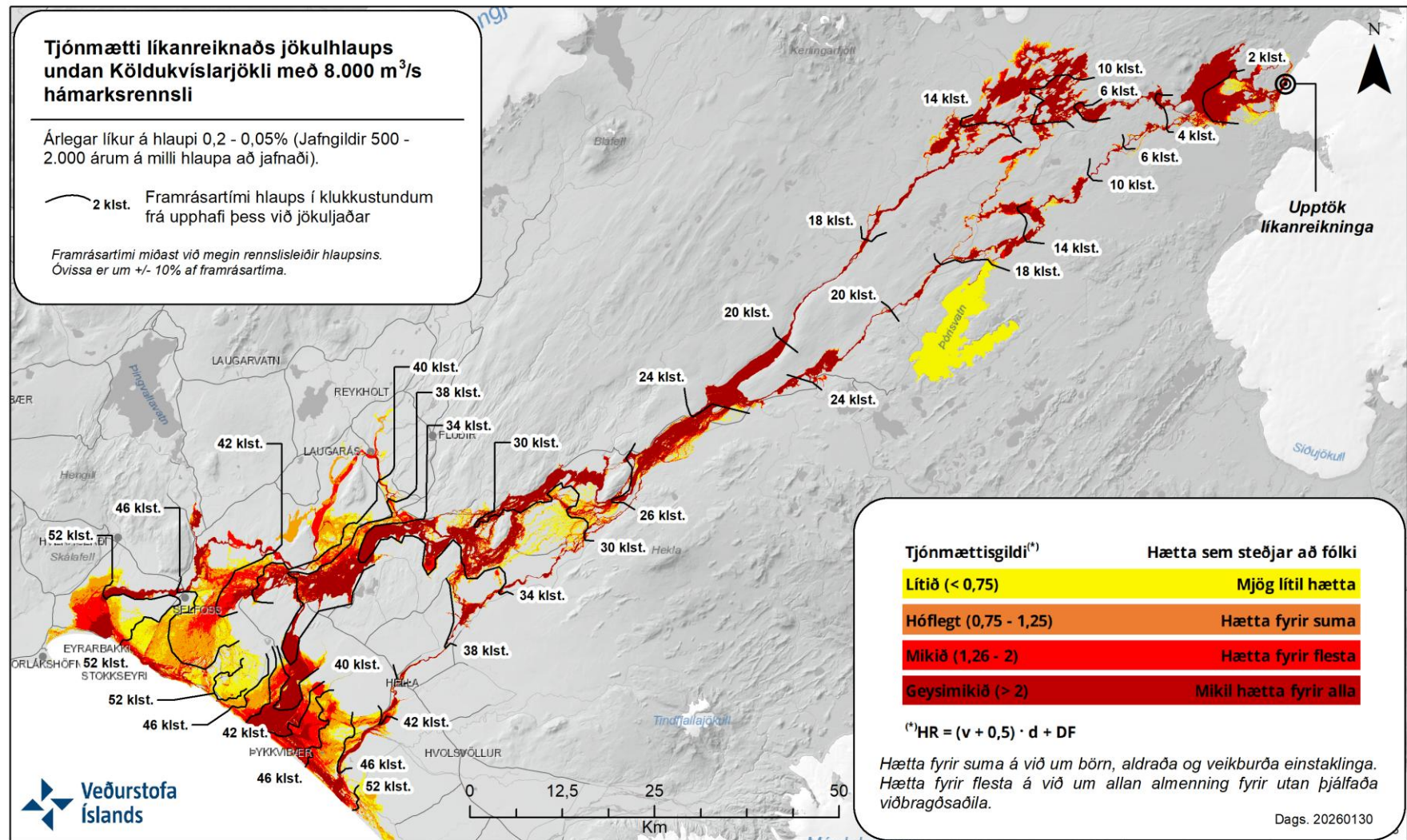
Mynd 0.2 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss í hlíðum Bárðarbungu, sviðsmynd Bb02. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,2 – 0,05%. Líkur á rofi á flóðvörum virkjanamannvirkja eru litlar í þessari sviðsmynd og niðurstöður A-reikninganna því aðeins birtar.



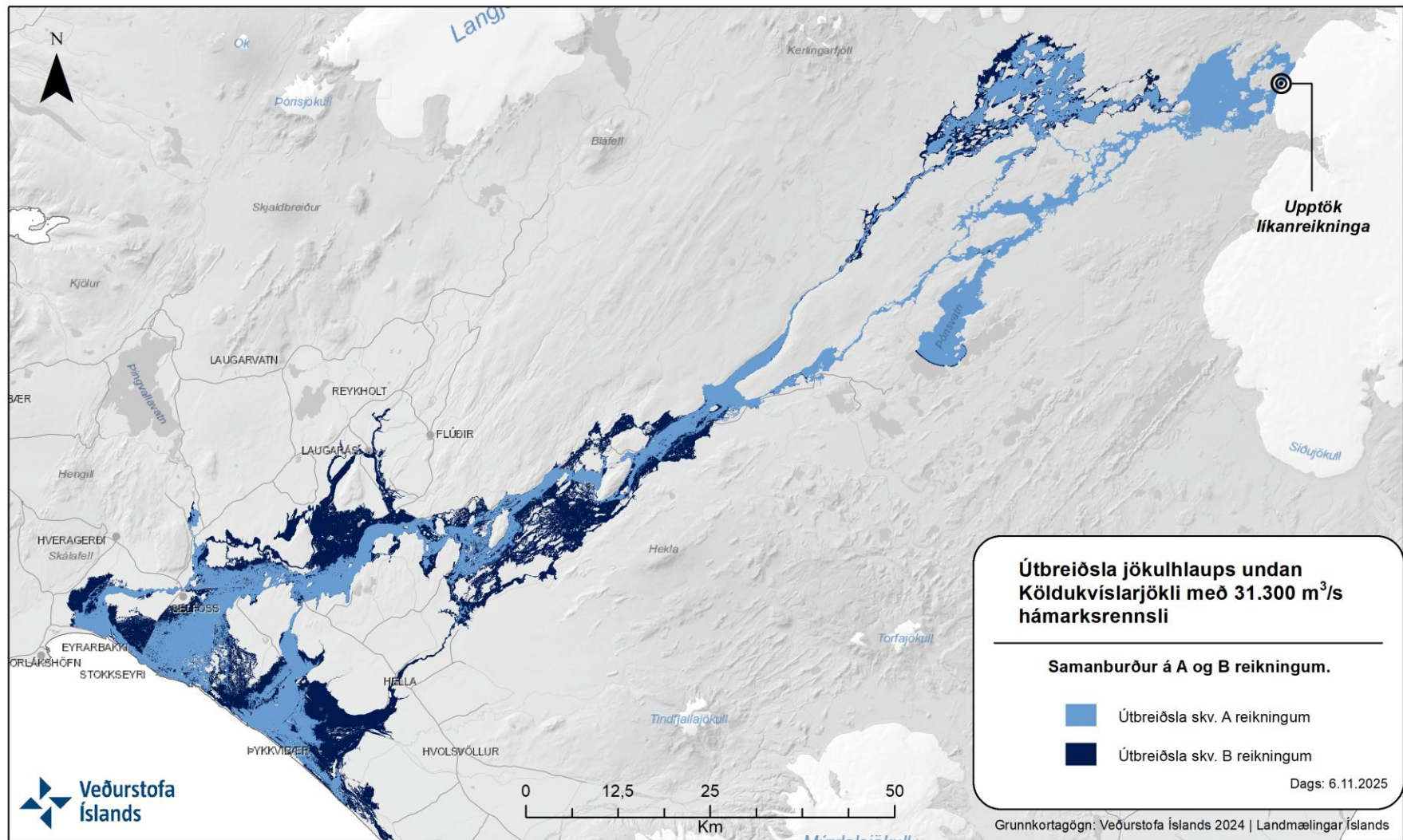
Mynd 0.3 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss í hlíðum Bárðarbungu, sviðsmynd Bb02. Líkur á rofi á flóðvörum virkjanamannvirkja eru litlar í þessari sviðsmynd og tjónmættiskortið byggir því á niðurstöðum A-reikninganna í þessu tilfalli.



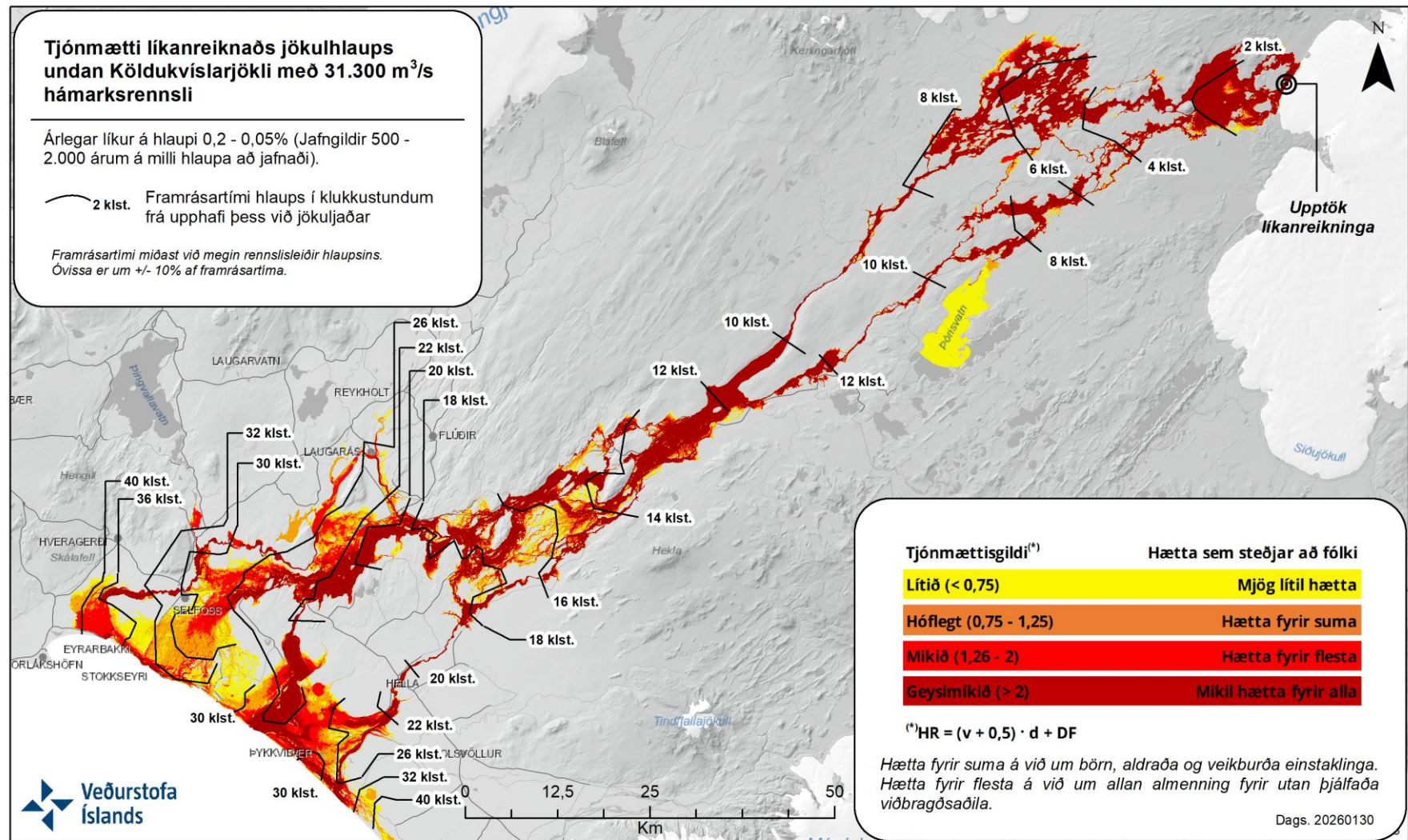
Mynd 0.4 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv05. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,2 – 0,05%. Varandi hámarks rennslisritsins í þessari sviðsmynd er mun lengri en í öðrum sviðsmyndum, alls 4 dagar, og hlaupið því vatnsmikið.



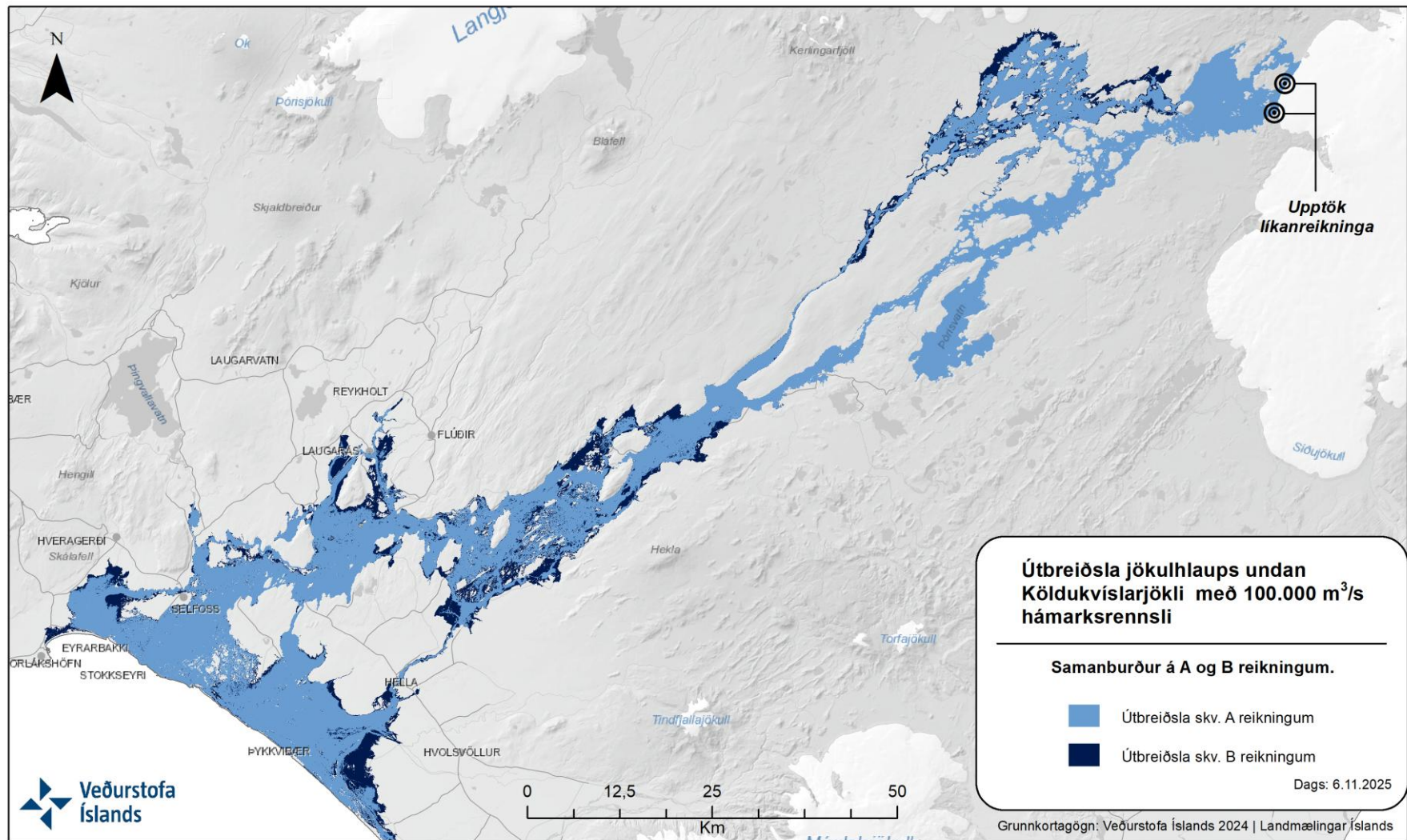
Mynd 0.5 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv05. Varandi hámarks rennsliðsritsins í þessari sviðsmynd er mun lengri en í öðrum sviðsmyndum, alls 4 dagar, og hlaupið því vatnsmikið.



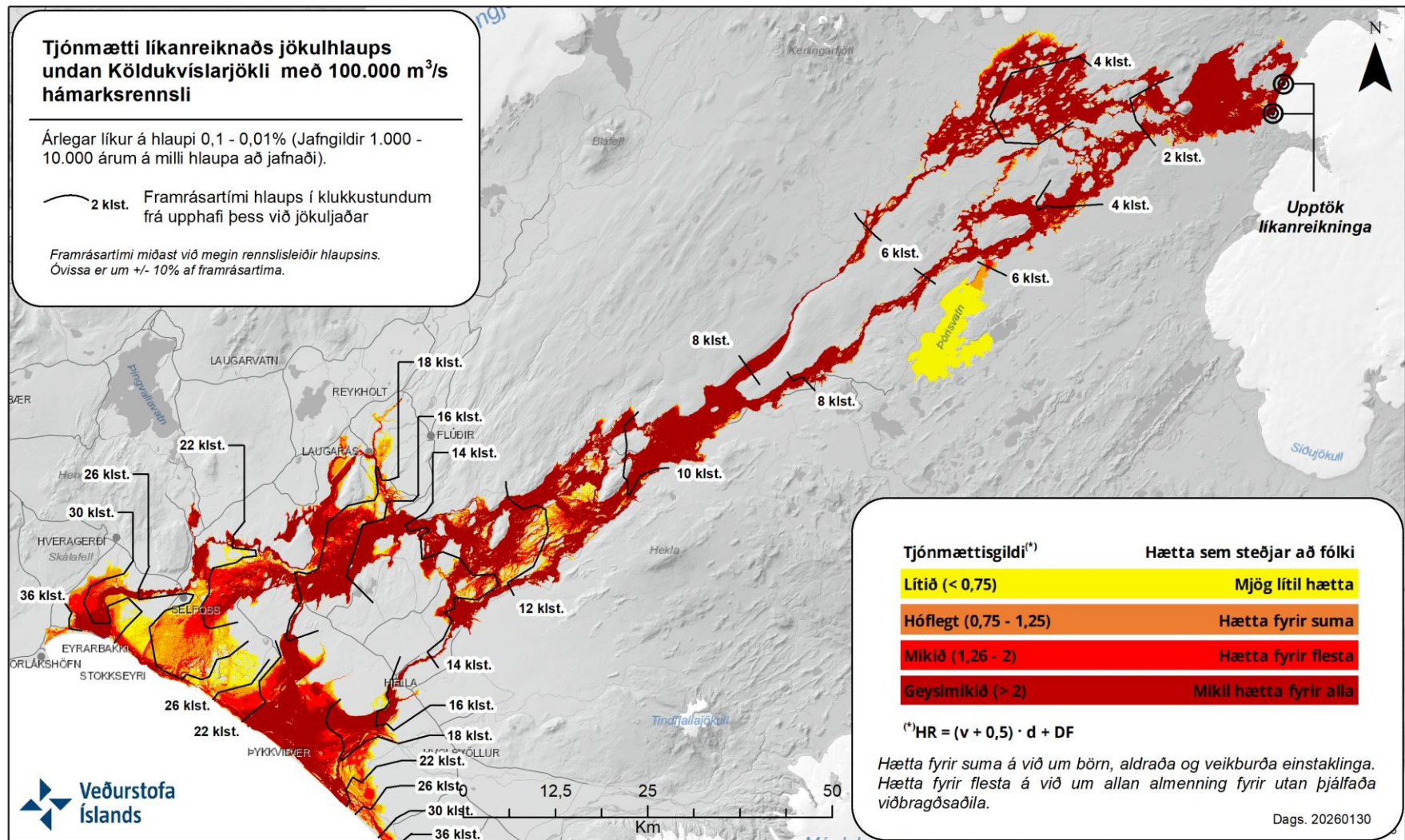
Mynd 0.6 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvislarjökli, sviðsmynd Kkv02. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,2 – 0,05%.



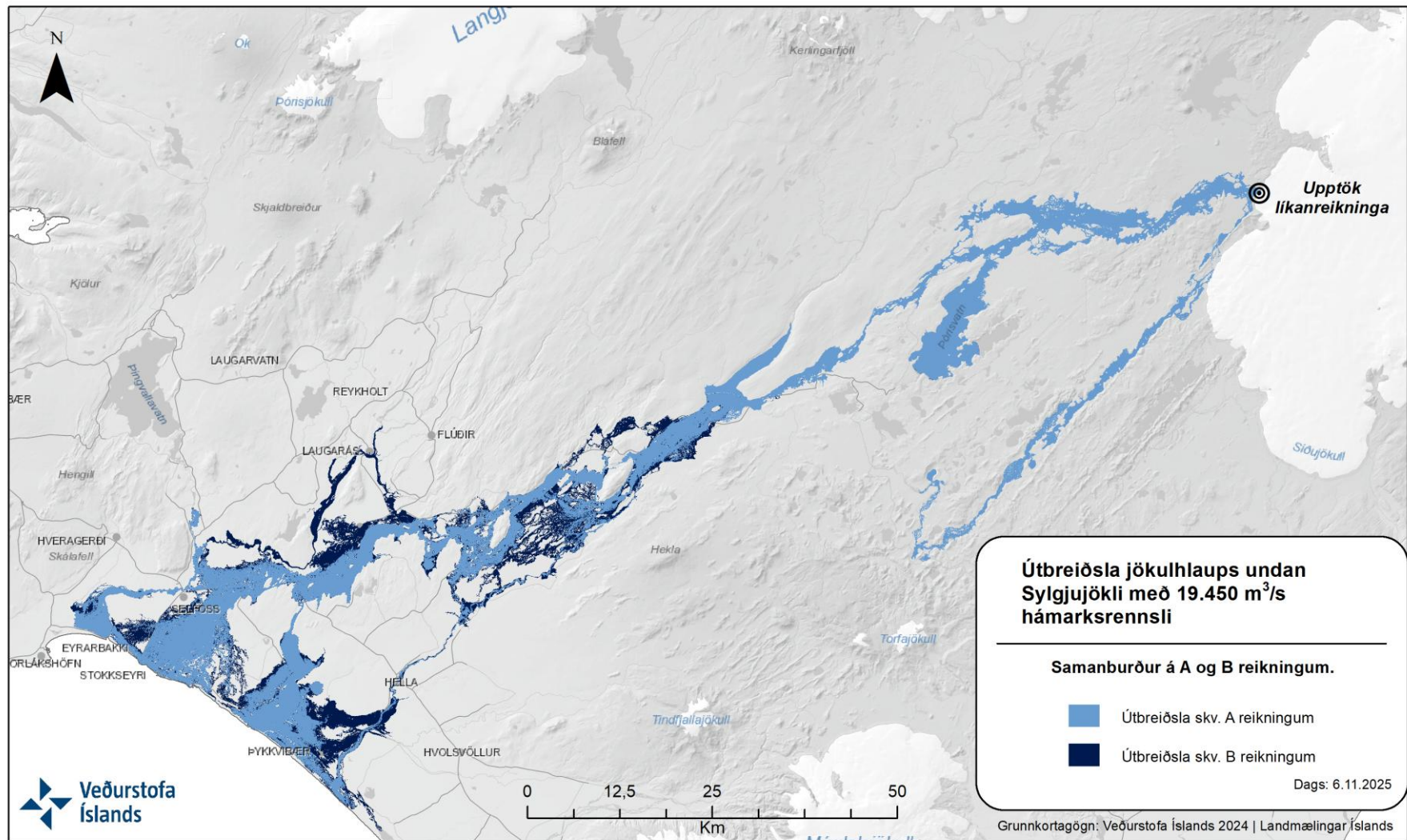
Mynd 0.7 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv02.



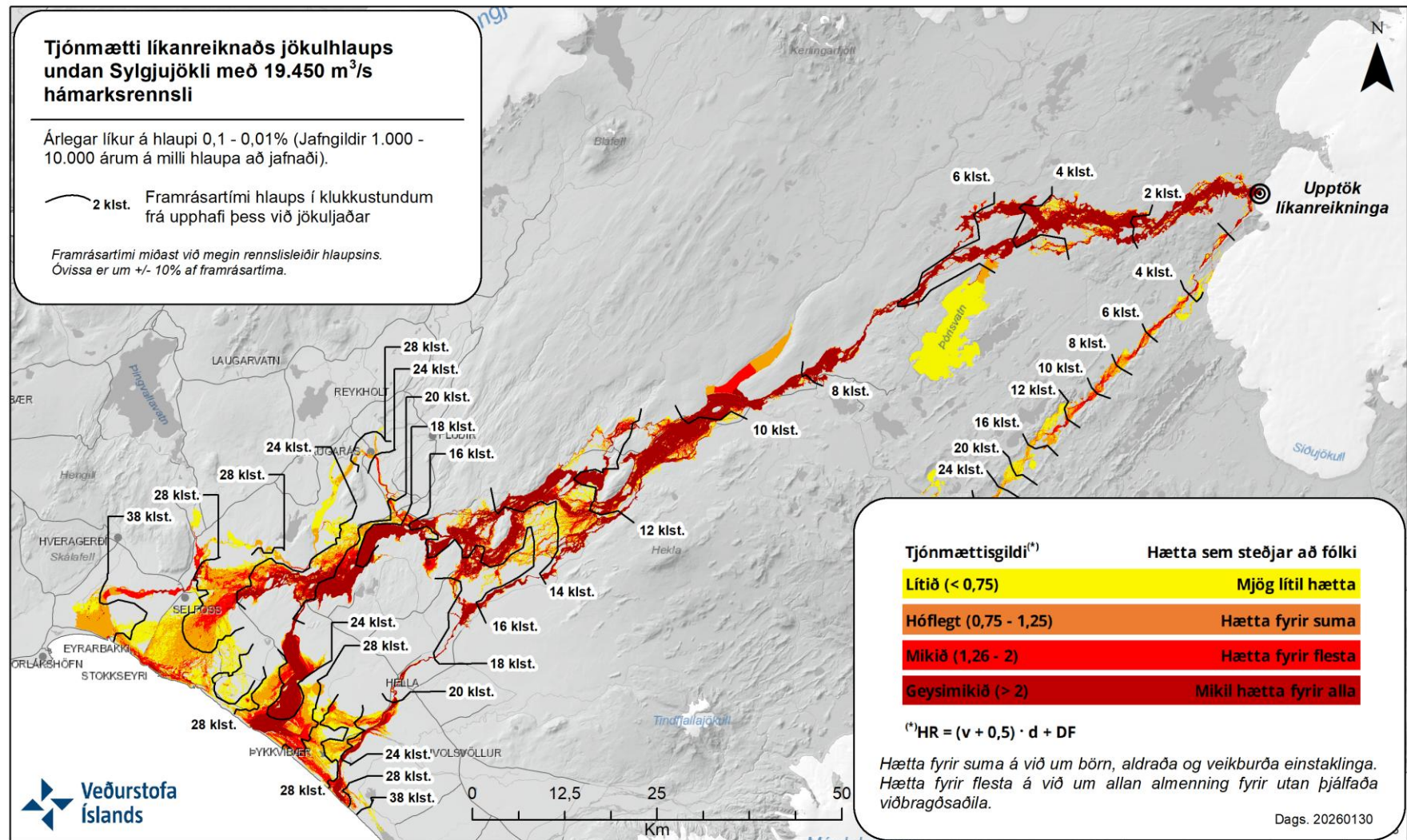
Mynd 0.8 Útbreiðsla hamfarajökulhlaups af völdum mjög öflugs eldgoss undir Köldukvislarjökli eða í vestanverðri Bárðarbunguöskjunni, sviðsmynd Ham01. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,1–0,01%.



Mynd 0.9 Tjónmætti hamfarajökulhlaups af völdum mjög öflugss eldgoss undir Köldukvíslarjökli eða í vestanverðri Bárðarbunguöskjuni, sviðsmynd Ham01.



Mynd 0.10 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Sylgjujökli, sviðsmynd Sy02. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,1–0,01%.



Mynd 0.11 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Sylgjujökli, sviðsmynd Sy02.

## Hættumat

Ljóst er af niðurstöðunum hér að framan að á því svæði þar sem jökulhlaup geta farið um eru mjög mikilvægir innviðir fyrir íslenskt samfélag. Hlaupin geta ógnað byggð bæði í þéttbýli og dreifbýli. Þau mundu einnig fara um virkjanamannvirki í Þjórsá, flæða yfir fjölda vega og brúa, drekkja ræktar- og beitarlandi og ógna dreifikerfi raforku. Áhrif slíkra hlaupa á samfélagið og efnahag geta því verið víðtæk og mundu vara lengur heldur en það tekur meginflóðtoppinn að ganga yfir, enda líða margir dagar þar til hlaupvatn væri að fullu sjatnað auk þess sem skemmdir standa eftir.

Hver hagaðili hefur mesta þekkingu á sínu tjónnæmi. Hér er því ekki farið djúpt í greiningu á því hvaða hættu jökulhlaupin geta skapað í mismunandi geirum samfélagsins, heldur aðeins tæpt á helstu atriðum. Grunniðurstöðum líkanreikninga hefur verið dreift til hagaðila til frekari úrvinnslu og samanburðar við innviði viðkomandi aðila.

## Raforkukerfið

Stærri jökulhlaupasviðsmyndirnar eru langtum stærri en önnur flóð á vatnasviði Þjórsár af völdum veðurtengdra þátta svo sem úrkomu og leysingar (Kristín Martha Hákonardóttir, 2019). Þær eru því stærri en hönnunarflóð yfirfalls á stíflumannvirkjum tengdum vatnsaflsvirkjunum á leið hlaupanna. Sem dæmi má skoða Hágöngulón. Allar sviðsmyndir sem fara um lónið (Ham01, Kkv02, Kkv05), utan sviðsmyndarinnar Bb02, eru umfram hönnunarflóð stíflumannvirkjana, sjá Unnar Núma Almarsson o.fl. (2020). Því er líklegt að flóðvarið í hjástíflunni norðan Syðri-Hágöngu rofni í öllum sviðsmyndum utan Bb02. Fyrir stærstu tvær sviðsmyndirnar Ham01 og Kkv02 er rennsli um hjástífluna og aðalstífluna líka meira heldur en flóðvarið ber. Þar gæti því orðið enn meira tjón á mannvirkjum og stíflurof átt sér stað.

Svipað gildir fyrir önnur stíflumannvirki á leið hlaupanna, þ.e. að búast má við a.m.k. rofi á flóðvörum og jafnvel rofi á stíflum fyrir allar sviðsmyndir utan Bb02. Hlaupin geta því haft áhrif á Hágöngulón, Kvíslavatn, Sauðafellslón, Sporðöldulón, Sultartangalón, Bjarnalón og önnur miðlunarmannvirki. Hlaupin ganga ekki nema að litlu leyti inn í Þórisvatn því að vatn leitar frekar út úr Sauðafellslóni til vesturs í fyrrum farveg Köldukvíslar (Myndir 0.2, 0.4, 0.6 og 0.8). Vatnsfellsstöð, Sigöldustöð og Hrauneyjafossstöð eru því utan áhrifasvæðis hlaupanna. Miðlun til þeirra um Sauðafellslón og Þórisvatn gæti þó orðið fyrir áhrifum. Hlaupin fara aftur á móti um inntakslón Búðarhálsstöðvar, Sultartangastöðvar og Búrfellsstöðvar og gætu því mögulega valdið skemmdum á vatnsaflstöðvunum sjálfum í þeim tilfellum. Vindorkuverið í Vaðölduveri gæti einnig orðið fyrir skemmdum af völdum hlaupanna. Hlaupin geta því haft bein áhrif á hátt í 20% af raforkuframléiðslu á Íslandi og til viðbótar raskað miðlun um 15% af samanlögðu uppsettu afli.

Auk þess að hafa áhrif á sjálfa framléiðslu raforkunnar má búast við því að raforkuflutningskerfið geti orðið fyrir miklum áhrifum. Búðarháslína 1, Hrauneyjafosslína 1, Sigöldulína 3 og Sultartangalína 2, Búrfellslínur 1, 2 og 3, Flúðalína 1 og Hvolsvallarlína 1 eru t.d. allar að hluta innan útbreiðslusvæðis flestra sviðsmyndanna (Myndir Mynd 0.2, Mynd 0.4, Mynd 0.6, Mynd 0.8 og Mynd 0.10). Auk áhrifa á möstur flutningslína má einnig

búast við áhrifum á önnur mannvirki svo sem spennustöðvar innan útbreiðslusvæða flóðanna. Það mætti því búast við mikilli röskun á flutningi raforku frá Þjórsár-Tungnaár virkjanasvæðinu í stórhlaupi, jafnvel þó að hluti virkjana væri starfshæfur. Einnig gætu hlaup valdið frekari truflun á dreifingu raforku með skemmdum á línun innan útbreiðslusvæða flóðanna á Suðurlandsundirlöndinu.

### **Samgöngur**

Búast má við miklum skemmdum á vegum, brúm og öðrum samgöngumannvirkjum á svæðinu. Stórir hlutar þjóðvegjar 1 í Flóanum og á Skeiðum eru á kafi í vatni í öllum sviðsmyndum utan Bb02 (Myndir Mynd 0.2, Mynd 0.4, Mynd 0.6, Mynd 0.8 og Mynd 0.10). Sama gildir um hluta Skeiðavegar, Þjórsárdalsvegjar, Landvegjar og hluta ýmissa annarra minni vega á svæðinu. Samgöngutruflanir yrðu því miklar í hlaupum sem þessum. Búast má við því að brúna á þjóðvegi 1 yfir Þjórsá taki af í öllum sviðsmyndum í B-reikningunum en óljóst er með afdrif hennar í minni sviðsmyndum í A-reikningunum. Sama á við eldri brúna við Þjótanda. Búast má við að brúna á Þjórsá, á Þjórsárdalsvegi, við Sultartanga taki af í öllum sviðsmyndum utan Bb02. Flæði um Ytri-Rangá er umtalsvert í öllum sviðsmyndum utan Bb02 og það mikið að búast má við að brúna við Hellu taki af. Sama á við brúna á Þingskálavegi. Flæði um Ölfusá í jafnvel verstu sviðsmyndum (Ham01 í B-reikningunum) verður ekki meira heldur en um 2.300 m<sup>3</sup>/s. Þetta er á við úrkomu- og leysingaflóð með um 100 ára endurkomutíma (Emmanuel Pagneux o.fl., 2019). Það má því búast við að brúarmannvirki í Ölfusá standist hlaupin, nema svo ólíklega vilji til að þau falli saman við mikil veðurtengd flóð.

### **Viðbragðstími og aðrir þættir**

Í stærri sviðsmyndum, Ham01 í A-reikningunum og Ham01, Kkv02 og Sy02 í B-reikningunum, nær vatn vestur af Hafinu og niður í Gjána innst Þjórsárdal (Myndir Mynd 0.6, Mynd 0.8 og Mynd 0.10). Þaðan finnur flóðið sér leið um Rauðá yfir í Fossá og niður Hjálparfoss. Hjálparfoss og Gjáin eru því dæmi um vinsæla ferðamannastaði sem getur stafað hætta af hlaupunum. Þetta eru aðeins tvö dæmi en hætta getur stafað að mun fleiri viðkomustöðum ferðamanna.

Samkvæmt mati á framrásartíma mögulegra jökulhlaupa eru margar klukkustundir, frá því að hlaupin koma fram við jökuljaðar, tiltækar til viðbragðs í flestum tilfellum (Myndir Mynd 0.3, Mynd 0.5, Mynd 0.7, Mynd 0.9 og Mynd 0.11). Þessu til viðbótar má ætla að einhver tími gefist til viðbótar því hlaup af þessari stærð verða aðeins vegna eldgosa undir jökli og líklegt er að greina megí aðdraganda goss með jarðskjálfta- og órómælingum, auk þess sem gosinu sjálfu fylgir gosórói. Einnig er mögulegt að framrás hlaupsins undir jöklinum fylgi hlaupórói sem mætti greina og jafnvel staðsetja (Eibl et al., 2020). Þó verður að hafa í huga að mælist upphaf hlaupsins undir jöklinum ekki á jarðeðlisfræðilegum mælistöðvum í kringum Bárðarbungu verður hlaupanna ekki vart fyrir en i) í Hágöngulóni, komi þau undan Köldukvíslarjökli eða úr hlíðum Bárðarbungu eða ii) í Sauðafellslóni, komi hlaup undan Sylgjujökli. Slíkt myndi stytta viðbragðstíma um allmargar klukkustundir miðað við uppgefna tíma á Myndum Mynd 0.3, Mynd 0.5, Mynd 0.7, Mynd 0.9 og Mynd 0.11.

Af matinu á framrásartímunum er ljóst að nægur tími ætti að gefast til viðvarana og rýmingar í byggð. Það þarf þó tryggja að boð um rýmingu og yfirvofandi hlaup berist örugglega til allra íbúa og annarra, sem leið eiga um svæðið. Einnig þarf að tryggja að fólk bregðist við og grípi til viðeigandi aðgerða. Huga þarf vel að ferðamönnum í þessu samhengi en ferðamannastraumur og breytt hegðun varðandi útivist hefur aukið berskjöldun þeirra gagnvart jökulhlaupum.

Að mörgum öðrum þáttum er að huga í viðbrögðum við yfirvofandi hlaupi, svo sem björgun verðmæta og húsdýra. Tjónmættið og hættan í þessum flóðum er þó svo mikil að gæta þarf þess vel að slíkt tefji ekki rýmingar, svo ekki komi til manntjóns. Tjónmætti flestra sviðsmyndanna er geysimikið á stórum svæðum (MyndirMynd 0.3, Mynd 0.5, Mynd 0.7, Mynd 0.9 og Mynd 0.11). Á slíkum svæðum er öllum hætta búin, jafnvel vel búnum viðbragðsaðilum (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2020).

Framgangstími hlaupanna er a.m.k. hálfur dagur fyrir jafnvel verstu sviðsmyndirnar (Mynd 0.9) og því er hugsanlegt að hægt verði með fjarkönnun eða eftirlitsflugi að kanna og meta umfang goss og hlaups á upphafsstigum atburðanna. Slíkt mat mætti þá nota til að stilla af viðbrögð varðandi verðmætabjörgun og aðra þætti aðgerða sem eru tímafrekari en einföld rýming. Í þessum efnum mætti líka horfa til lykilþátta í framgangi flóðanna sem hafa áhrif á stærð og útbreiðslu vissra sviðsmynda, svo sem hvort rof verði á stíflumannvirkjum eða flóðvörum Hágöngulóns og Kvíslavatns.

## Áhætta

Staðaráhætta og einstaklingsbundin dánaráhætta af völdum jökulhlaupa er reiknuð í verkefninu fyrir nokkra dæmigerða staði innan útbreiðslusvæðis hlaupanna. Búast má við að mesta hættan af völdum hlaupa sem þessara sé ekki manntjón heldur það tjón sem þau geta valdið á byggingum, innviðum, gróðri og öðrum náttúrugæðum, auk röskunar á samgöngum, atvinnulífi og annarri starfsemi, líkt og rætt er að ofan. Tölulegar niðurstöður um áhættu hjálpa til við að sannreyna þá fullyrðingu og setja áhættuna í samhengi.

Hér er notast við aðferðafræði sem breska ríkisstofnunin DEFRA hefur lagt fram til þess að meta áhættu fólks vegna vatnsflóða (DEFRA, 2006a,b), líkt og í fyrri útgáfum áhættumats fyrir jökulhlaup (Bergur Einarsson o.fl., 2022). Frekari útlistun á aðferðafræðinni og notkun hennar fyrir áhættu af völdum jökulhlaupa má finna hjá Tinnu Þórarinsdóttur o.fl. (2020).

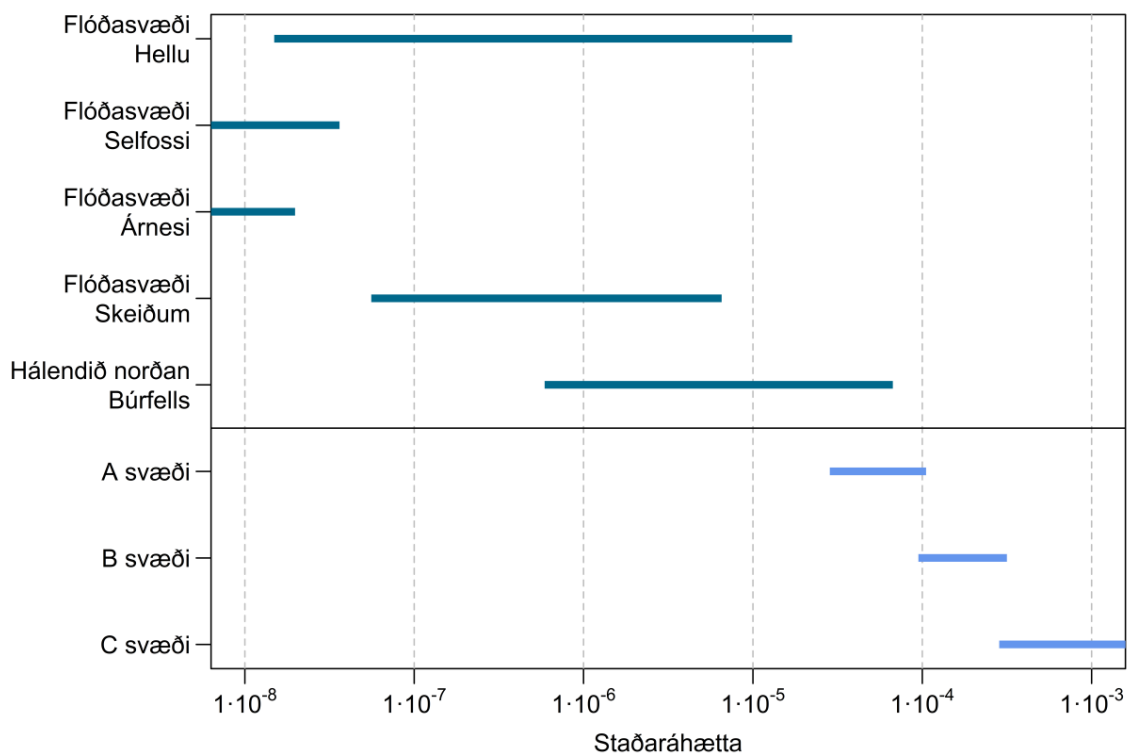
## Val á stöðum

Samtals voru 5 staðir valdir til skoðunar. Árnes, Hella og Selfoss voru valin sem þéttbýliskjarnar og bæir. Horft var til þess að vera með staði dreifða um flóðasvæðið og að berskjöldun íbúa gagnvart hlaupunum væri umtalsverð. Því til viðbótar var hugað að dreifbýli á Skeiðunum þar sem hættan á láglandi utan meginfarvega er einna mest og byggð umtalsverð. Að lokum var áhættan svo einnig könnuð á Hafinu, hálendinu norðan við Búrfell. Þar er umtalsverð umferð ferðamanna og virkjanamannvirki með viðveru vegna viðhalds og eftirlits. Viðvera er því einhver þó að engin búseta sé á því svæði. Líta má á niðurstöður fyrir hálendið ofan Búrfells sem efra mat fyrir ferðafólk á ferðamannastöðum í Þjórsárdal, svo sem Gjánni og við Hjálparfoss. Niðurstöður fyrir starfsmann á hálendinu

norðan Búrfells væri þá efra mat fyrir áhættu leiðsögufólks með mikla viðveru á ferðamannastöðum innan útbreiðslusvæðis flóðanna í Þjórsárdal. Í öllum tilfellum er miðað við áhættu innan flóðasvæða á viðkomandi stað og niðurstöðurnar alls ekki þannig að allt land á viðkomandi stöðum fari undir vatn.

### Helstu niðurstöður

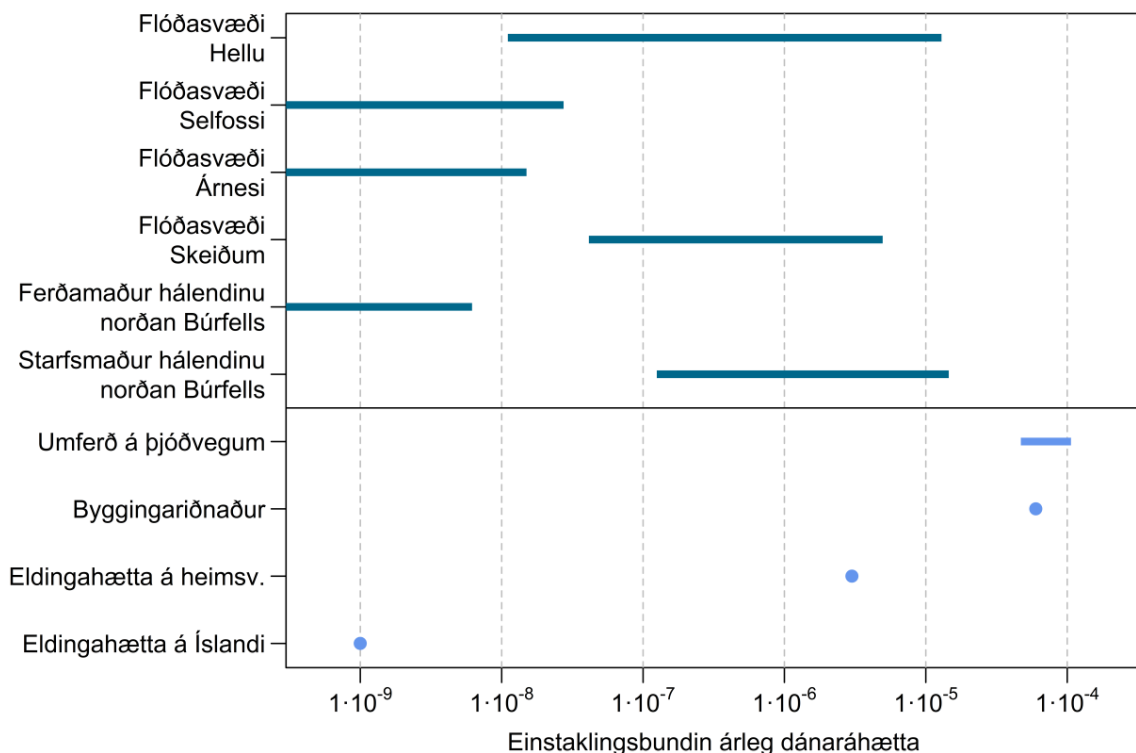
Umtalsverður munur er þegar á milli A og B reikninganna í niðurstöðum fyrir dýpi og straumhraða flóða. Því til viðbótar er mikil breidd í áætluðum líkum hverrar flóðasviðsmyndar og mati á þeim stuðlum sem ákvarða þarf fyrir DEFRA reikningana. Talsverð óvissa er því í inntaksgögnum áhættureikninganna. Lokaniðurstaða matsins er því í hverju tilfalli sett fram sem bil milli mögulegra efri og neðri marka. Bilið í niðurstöðum fyrir hvern stað spannar stærðarþrep (Myndir Mynd 0.12 og Mynd 0.13). Samanburður við önnur þekkt áhættugildi er samt gagnlegur, þrátt fyrir þessa umtalsverðu óvissu.



Mynd 0.12 Staðaráhætta á völdum svæðum auk áhættuviðmiða vegna ofanflóðahættu (A, B og C svæði) til samanburðar. Athugið að þessi áhætta gildir alls ekki um allt svæðið á viðmiðunarstöðunum heldur aðeins á þeim hluta sem flóð fer yfir. Til dæmis má nefna að jafnvel í allra verstu sviðsmyndum fer innan við helmingur landsvæðis Hellu undir hlaupvatn. Samkvæmt reglugerð um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða (nr. 505/2000) eru engar kvaðir utan A svæðis. Innan A svæðis má byggja nýbyggingar en kvaðir eru á um sérstyrkingar á skólum, samkomuhúsum, fjölbýlishúsum og öðrum sambærilegum byggingum. Innan B svæðis er nýbygging skóla og annarra sambærilegra bygginga ekki heimil. Áhættan er svo mest innan C svæðis og þar er einungis heimilt að reisa ný mannvirki þar sem ekki er búist við stöðugri viðveru fólks til búsetu eða vinnu. X-ás grafsins er lograkvarði.

Niðurstöður eru í samræmi við almennar ályktanir um að árleg dánaráhætta einstaklings af völdum jökulhlaupa sé ekki umtalsverð á þessum stöðum. Staðaráhættan í byggð er mest á Hellu, enda er bæjarfélagið staðsett mjög nærri árfarvegi Ytri-Rangár og flóðin hlaupa yfir í hana í öllum sviðsmyndum utan minnstu sviðsmyndarinnar, Bb02 (Mynd 0.2). Því næst koma Skeiðin með því sem næst sambærilega áhættu. Áhættan er svo umtalsvert minni á Selfossi og í Árnesi.

Samanborið við viðmið um áhættu vegna ofanflóða er staðaráhættan í byggð alstaðar undir neðri mörkum fyrir svokölluð A svæði (Reglugerð um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða nr. 505/2000). Fyrir ofanflóð eru engar kvaðir um byggð utan A svæða. Efri mörk á mati fyrir staðaráhættu á flóðasvæðum á hálendinu norðan við Búrfell skarast við mat fyrir A svæði. Innan A svæða er almennt ekki kveðið á um takmarkanir á nýbyggingum aðrar en þær að hús með mikilli viðveru þar sem fólk safnast saman, svo sem skólar, samkomuhús og fjölbýlishús skuli vera sérstyrkt (Reglugerð um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða nr. 505/2000). Erfitt getur reynst að verjast hamfarajökulhlaupum með verkfræðilegum vörnum og ekki nóg að hús standi að mestu óskemmd eftir flóðin til að fólk sé öruggt í þeim í slíkum hlaupum. Því væri vert að huga vel að staðsetningu byggingarreita í skipulagi standi til að byggja upp húsnæði með mikilli viðveru og næturgistingu innan mögulegra flóðasvæða norðan Búrfells. Best fer á að halda áhættu sem lægstri með því að staðsetja slíkar byggingar utan hættusvæða og þar með skipuleggja sig frá hættunni. Eðlilegt er að draga þessa sömu ályktun fyrir öll flóðasvæði ofan hálendisbrúnarinnar.



Mynd 0.13 Einstaklingsbundin árleg dánaráhætta af orsökum jökulhlaupa á völdum svæðum. Athugið að þessi áhætta gildir alls ekki um allt svæðið á viðmiðunarstöðunum heldur aðeins á þeim hluta sem fer undir vatn í flóði. Til dæmis má nefna að jafnvel í allra verstu sviðsmyndum fer innan við helmingur landsvæðis Hellu undir hlaupvatn. Áhætta af völdum nokkurra annarra orsaka er sýnd til samanburðar (Óli H. Þórðarson á.á.; HSE, 2001; Þórður Arason, 2013). X-ás grafsins er lograkvarði.

Líkt og með staðaráhættuna er dánaráhætta fyrir dæmigerðan einstakling innan hvers svæðis ekki mikil. Jökulhlaupahættan er langt frá því að vera ráðandi dánaráhætta, jafnvel í efstu mörkum matsins (Mynd 0.13). Að öllum líkindum stendur fólki á Suðurlandsundirlendinu 10 til 1.000 falt meiri áhætta af almennri þátttöku í umferðinni en af jökulhlaupum.

Á svæðum þar sem áhættan af völdum hlaupanna er þó mest nær hún að vera sambærileg dánaráhættu af völdum eldinga á heimsvísu (Þórður Arason, 2013). Slík áhætta er næg til þess að samfélög taka almennt tillit til hennar svo sem með leiðbeiningum um rétt viðbrögð í eldingaveðrum og viðbragðsáætlunum fyrir t.d. sundstaði. Huga mætti að áhættunni af völdum jökulhlaupa með svipuðum hætti þó að viðbúnaður og viðbrögð séu ekki þau sömu.

# 1 Inngangur

Frá árinu 2018 hefur verið unnið að hættumati vegna eldgosa og jökulhlaupa frá Bárðarbungukerfinu í Vatnajökli. Verkefnið er hluti stærra hættumatsverkefnis, sem ber heitið GOSVÁ og er kostað af Ofanflóðasjóði, auk stuðnings frá Landsvirkjun, Vegagerðinni, Landsneti og HS-Veitum. Veðurstofa Íslands stýrir verkefninu, sem mótað hefur verið í náinni samvinnu sérfræðinga Veðurstofunnar og vísindamanna á öðrum stofnunum. Meginmarkmið þessa hluta verkefnisins er að meta þá hættu sem stafað gæti að virkjunum og öðrum mikilvægum innviðum á svæðinu vestan Vatnajökuls og að byggð á Suðurlandsundirlendi. Þá hefur aukin umferð útivistarfólks um áhrifasvæði eldgosa og jökulhlaupa aukið líkur á mannskaða af þeirra völdum. Líkur á hamförum sem þessum eru litlar og áhættan því í ýmsum samanburði lítil. Full ástæða er þó til að kanna mögulega hlauphættu á svæðinu því tjónmætti hlaupanna getur verið mikið og tjónnæmi samfélagsins umtalsvert. Hættan getur því verið veruleg þó áhættan sé lítil. Hlauphættan er metin með hliðsjón af eldgosasögu, tiltækum landlíkönum og straumfræðilegum líkanreikningum.

Mikil umbrot urðu í Bárðarbungukerfinu 2014–2015 og var jarðeldur þá uppi í Holuhrauni við norðanverðan Vatnajökul. Slík umbrot geta einnig valdið kvikuhlaupum til suðvesturs og eldgosum vestan jökulsins, með tilheyrandi hraunrennsli og gjóskufalli. Þá eru umtalsverðar líkur á eldsupptökum undir jöklinum, sbr. Gjálpargosið 1996. Stórhlaup til vesturs vegna eldsumbrota í Bárðarbungukerfinu gæti náð niður í efstu byggð í Þjórsárdal á hálfum sólarhring og að nokkrum þéttbýlisstöðum á Suðurlandi á innan við sólarhring. Allstór svæði í landbúnaðarhéröðum Suðurlands færu undir vatn í slíku hlaupi auk þess sem hætta mundi stafa að vatnsaflsvirkjunum á vatnasviði Þjórsár og Köldukvíslar. Afl þessara virkjana er tæpur þriðjungur af uppsettu vatnsafli í landinu og þær framleiða yfir 20% af allri raforku landsins (Raforkueftirlitið, 2025). Samspil miðlunarmannvirkja og hlaupanna getur verið flókið og farið að hluta til eftir vatnsstöðu í lónum, sem er breytileg eftir árstíðum. Við lága vatnsstöðu geta lón dempað hlaup komi ekki til stíflubrots en við háa vatnsstöðu og stíflubrot getur vatn úr lónum sem bætist við hlaupin leitt til hækkunar flóðtopps. Vegakerfi landsins stafar einnig hætta af þessum hlaupum.

Settar eru fram fimm sviðsmyndir jökulhlaupa sem upptök ættu vegna eldgosa undir Köldukvíslarjökli, Sylgjujökli, innan Bárðarbunguöskjunnar og í vesturhlíðum hennar. Fjórar þeirra miðast við meðalstór eða stór hlaup með hámarksrennsli á bilinu 6.650 til 31.300 m<sup>3</sup>/s. Ennfremur er reiknað hamfarahlaup með hámarksrennsli 100.000 m<sup>3</sup>/s.

Straumfræðilíkanið GeoClaw er notað til að reikna útbreiðslu, vatnsdýpi og ferðatíma hlaupanna á reiknineti, sem lagt er yfir landlíkanið. Hugbúnaður GeoClaw nýtir fræðilegar jöfnur sem lýsa streymi vatns yfir landsvæði og í farvegum með mismunandi viðnámi yfirborðsins gagnvart rennsli vatns. GeoClaw er opinn hugbúnaður og reikningar með honum hafa verið keyrðir á ofurtölvunum Elju og Garpi, sem eru í umsjá Háskóla Íslands ([www.irei.is](http://www.irei.is)). Hlaup samkvæmt áðurnefndum fimm sviðsmyndum hafa verið hermd, hvert þeirra í tveimur útgáfum, samtals tíu hermanir. Stærstu hermanirnar þurfa allt að 90 daga

reiknitíma á ofurtölvunni og auk þess hafa ýmsir tilraunareikningar verið gerðir. Samanlögð gagnanotkun í þessu verkefni er umfram 50 Terabæti.

Upphaflega stóð til að Veðurstofan og verkfræðistofan Verkís ynnu í sameiningu reikninga sem tækju tillit til mögulegra áhrifa miðlunarlóna á framgang hlaupanna. Ætlunin var að Veðurstofan reiknaði rennsli hlaupa að tilteknu lóni og veitti Verkís aðgang að niðurstöðunum. Verkís mundi síðan reikna framgang hlaupsins í gegnum lónið og áhrif hlaupsins á stíflumannvirkin. Niðurstöður um rennsli neðan hvers lóns yrðu svo aftur afhentar Veðurstofunni til að rekja það rennsli áfram að næsta lóni eða til sjávar neðan neðsta miðlunarlóns. Í tilraunum með þetta verkferli við efsta lónið, Hágöngulón, kom fljótlega í ljós að þessi aðferðafræði væri of flókin og utan við kostnaðarramma verkefnisins.

Þess vegna var aðeins notast við reikninga með GeoClaw með meiri nálgunum og þar með einfaldari aðferðafræði. Í þeim reikningum ákvarðar líkanið sjálft við hvert lón hvort að stíflurof verði og hver sviðsmynd er rakin frá jökuljaðri til sjávar í einni keyrslu. Ljóst var að umtalsverðar einfaldanir væru gerðar í reikningunum á rofi flóðvara og stíflna. Verkís var því fengin til að rýna aðferðafræðina, nálganirnar og forsendur reikninganna. Verkfræðistofan framkvæmdi einnig samanburðarreikninga á þremur sviðsmyndum fyrir efsta hluta flóðfarvegarins, þ.e. frá jaðri Köldukvíslarjökuls og niður fyrir Hágöngulón (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024). Heildarniðurstaða rýninnar er að forsendur reikninganna og nálganir teljist ásættanlegar fyrir vinnu við hættumat og viðbragðsáætlanir.

Hæðarlíkanið ÍslandsDEM, útbúið af Landmælingum Íslands, hefur verið notað í þessu verkefni. ÍslandsDEM er samsett úr gögnum sem ná samanlagt að þekja allt Ísland. Veigamest er ArcticDEM landlíkanið, sem nær yfir allt Norðurskautssvæði Jarðar (Porter o.fl., 2018) en einnig er notast við nýleg hæðarlíkön af jöklum landsins, sem aflað hefur verið með flugleysimælingum (LiDAR-mælingum) (Tómas Jóhannesson o.fl., 2013). Ennfremur hefur verið notast við líkan Samsýnar af vatnasviði Hvítár-Ölfusár. Nýjasta útgáfa ÍslandsDEM er frá árinu 2020 (Landmælingar Íslands, 2020). Nokkrar lagfæringar á líkaninu hafa reynst nauðsynlegar vegna hinna vatnafræðilegu reikninga, einkum þar sem helstu farvegir jökulhlaupanna koma fram.

Afurðir verkefnisins eru hættumatskort og áhættumat fyrir valda staði, sem aðgengileg eru Almannavörnum, sveitarfélögum og hagaðilum innan orku- og samgöngugeirans. Á hættumatskortum koma fram helstu niðurstöður um útbreiðslu hlaupvatns, dýpi og straumhraða. Innan áhættumats er litið til mögulegra persónulegrar áhættu fyrir íbúa og ferðalanga á tilteknum svæðum innan áhrifasvæða hlaupanna. Við matið var höfð hliðsjón af aðferðum bresku umhverfis-, matvæla og byggðastofnunarinnar, DEFRA.

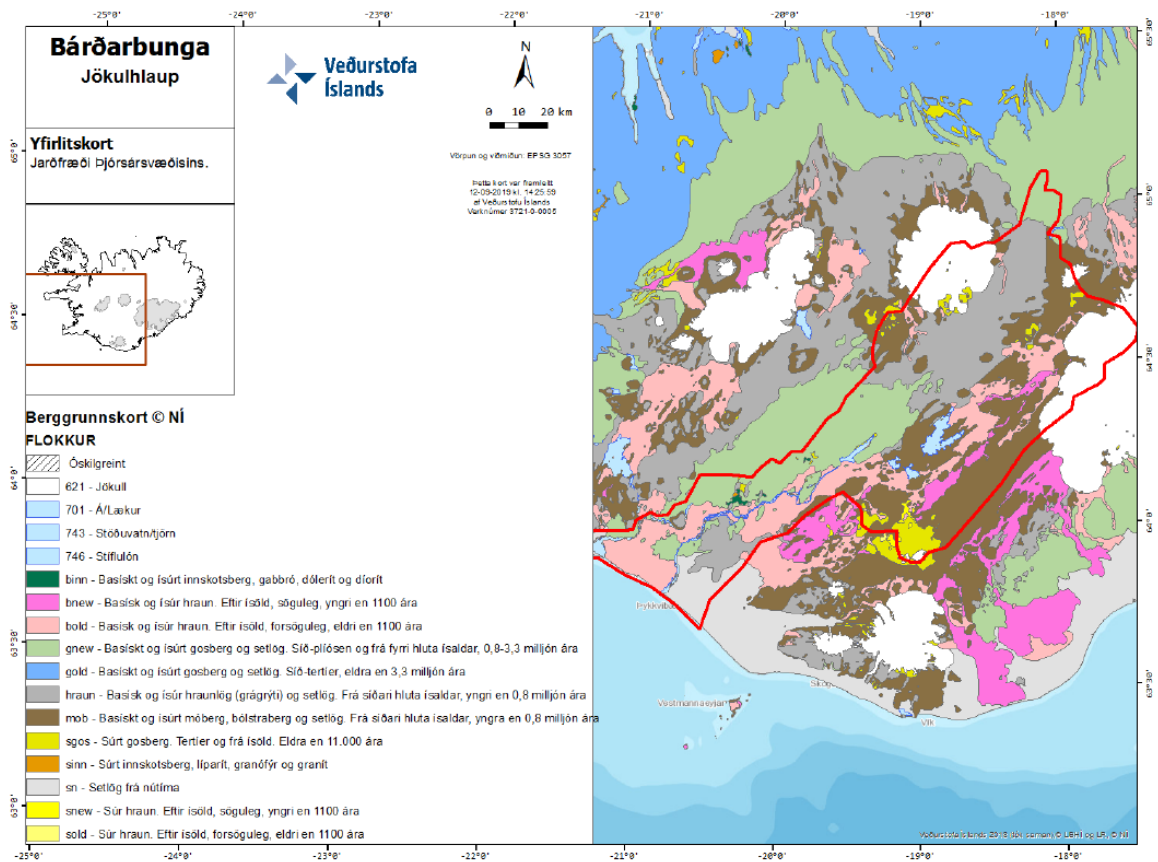
## 2 Bakgrunnur

### 2.1 Jarðmyndun á svæðinu

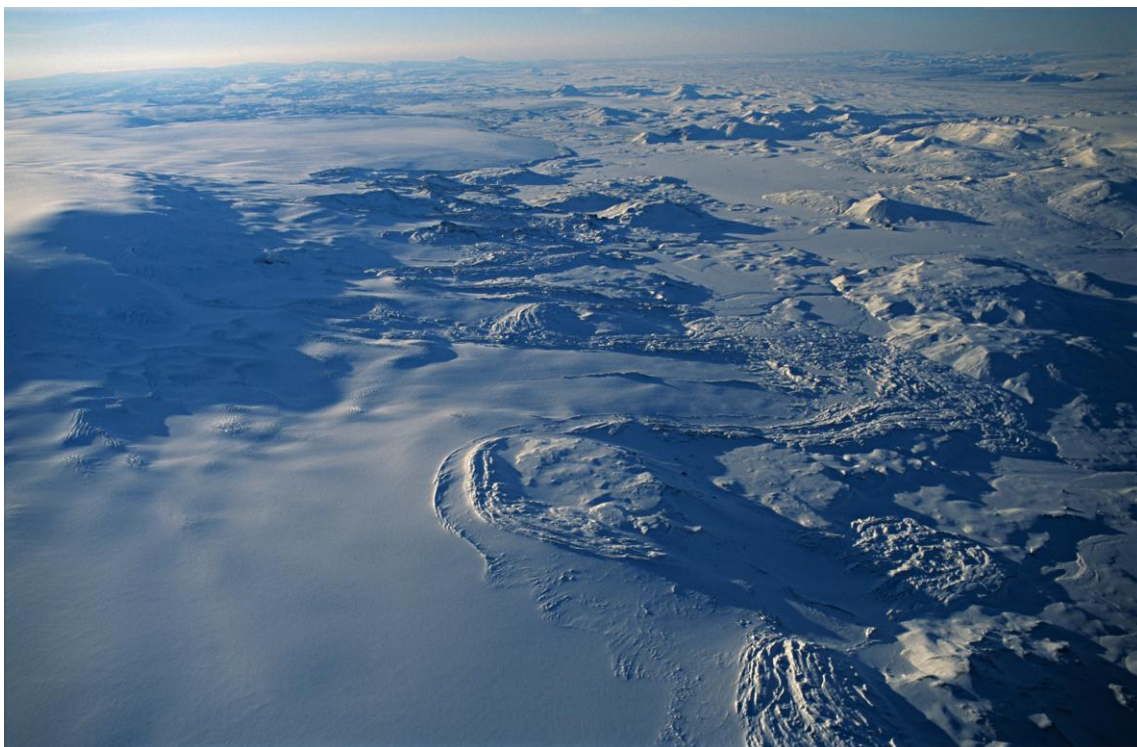
#### 2.1.1 Bergmyndanir frá ísöld og nútímahraun

Leiðir jökulhlaupa frá þeim hluta Vatnajökuls, sem hér er til umfjöllunar, mundu liggja innan vatnasviðs Þjórsár, sem er 7.530 km<sup>2</sup> að flatarmáli (Sigurjón Rist, 1956) og nær rúma 200 km frá ósum árinna inn til efstu upptakakvísla hennar á Sprengisandi. Vatnasviðið teygir sig um 70 km leið milli öskju Bárðarbungu og öskju Hofsjökuls en fer svo mjókkandi til suðvesturs. Sjá Mynd 2.1, sem einnig sýnir jarðmyndun á vatnasviði Þjórsár.

**Móbergsmýndanir.** Austurhluti vatnasviðsins er innan eystra gosbeltisins og ber þar mest á móbergsfjöllum frá síðari hluta ísaldar, mynduðum við eldgos á stökum gígum eða sprungum undir ísaldarjöklinum. Móbergið á þessu svæði er frá Brunhes-segulskeiði, yngra en 800.000 ára. Áberandi eru Hágöngur (nyrðri og syðri), myndaðar í gosum undir jökli á ísöld, sem rísa nær 500 m yfir umhverfið vestan Hágöngulóns. Önnur þekkt móbergsfjöll á svæðinu eru Hamarinn í vesturjaðri Vatnajökuls, Tungnafellsjökull og Miklafell í norðaustanverðum Hofsjökli. Einnig eru móbergsmýndanir ríkjandi í Vonarskarði og undirhlíðum Bárðarbungu. Sjá Mynd 2.2.



Mynd 2.1. Jarðmyndun á Þjórsásvæðinu. Rauði ferillinn afmarkar vatnasvið Þjórsár ásamt Tungnaá og Köldukvísl. Byggt á Jarðfræðikorti af Íslandi (Haukur Jóhannesson, 2014). Útlínur vatnasviðs eru dregnar samkvæmt kortagrunni Veðurstofu Íslands.



Mynd 2.2. Flugsýn yfir nágrenni Bárðarbungu (t.v. á myndinni). Rjúpnabrekkujökull er fyrir miðri mynd, Köldukvíslarjökull er fjær, ofarlega t.v. framan við Köldukvíslarjökul má greina Nyrðri- og Syðri-Hágöngur. Ljósmynd: Oddur Sigurðsson.

Yfir móbergsmýndanir svæðisins hafa allvíða runnið hraun á núverandi hlýskeyði ísaldar (Nútíma, Holocene) og eru þau öll yngri en 10.000 ára. Á þessum tíma hefur mikil framleiðsla hrauna og annarra gosfna verið á gosrein þeirri, sem kennd er við Veiðivatn og frá henni hafa runnið hraun austan og norðaustan Þórisvatns og vestan Köldukvíslarjökuls, Sylgjujökuls og Tungnaárjökuls. Þeirra helst eru *Veiðivatnahraun*, *Hágönguhraun* og *Tröllahraun*. Lega þessara hrauna gefur til kynna að þau séu ættuð úr Bárðarbungukerfinu (Guðrún Larsen o.fl., 2013). Hið sama á við um hið mikla *Þjórsárhraun*, sem rann frá þessari gosrein fyrir um 8.700 árum (Sæmundur Halldórsson o.fl., 2008). Upptök þess voru austan Þórisvatns en yngri hraun þekja það að mestu á því svæði. Þjórsárhraunið er hins vegar áberandi á yfirborði í neðri hluta Þjórsárdals og á allstóru svæði milli Þjórsár og Ölfusár. Hraunið rann um 130 km til sjávar og er talið mesta hraun, sem runnið hefur í einu gosi á jörðinni eftir ísöld.

*Tungnaárhraun* er samheiti yfir um tug forsögulegra gosa sem einnig áttu upptök sín á Veiðivatnagosreininni (Elsa G. Vilmundardóttir, 1977). Þau eru öll yngri en Þjórsárhraunið og hafa víða runnið yfir það. Á sögulegum tíma hafa runnið hraun í Vatnaöldugosinu um 870, sem myndaði landnámsgjóskuna, í Veiðivatnagosinu 1477 sem varð á 65 km langri en slitróttri gossprungu og frá Tröllagígum 1862–64 sem einnig eru á Veiðivatnagosreininni (Guðrún Larsen, 1984; Guðrún Larsen o.fl., 2013).

Vatnasvið Þjórsár nær inn á Torfajökulssvæðið, þar sem súrt gosberg<sup>1</sup> er meira áberandi en annars staðar á landinu. Þetta svæði er þó utan áhrifasvæðis jökulhlaupa frá vestanverðum Vatnajökli og verður því ekki til umfjöllunar í þessari skýrslu. Rétt er þó að nefna að gjóska úr gosum á þessu svæði gæti fallið á nálæga árfarvegi og uppistöðulón og þar með valdið áþekkingu truflunum á samgöngum og starfsemi virkjana og gjóskufall innan áhrifasvæðis Bárðarbungukerfisins. Svipað á við um Heklu, hún er utan vatnasviðs Þjórsár en mikið öskufall hefur orðið í Þjórsárdal og nágrenni í stórgosum í þessari þekktustu eldstöð landsins (Sigurður Þórarinnsson, 1968).

**Grágrýtismyndunin** svonefnda er ríkjandi á allstórum hluta norðantil á vatnasviði Þjórsár, austan og sunnan Hofsjökuls (Myndir 2.1 og 2.3). Þjórsárkvíslar og Þjórsárver eru innan þessa svæðis og einnig Kvíslaveiturnar. Grágrýtið mynda basísk og ísúr hraunlög<sup>1</sup> yngri en 800.000 ára, runnin á hlýskeyðum á síðari hluta ísaldar, auk setlaga. Suðvestur af þessu svæði taka við myndanir svipaðrar gerðar (basískt og ísúrt gosberg, auk setlaga), frá fyrri og miðhluta ísaldar (0,8–3,3 milljón ára). Berggrunnur á neðsta hluta vatnasviðs Þjórsár telst til grágrýtismyndunarinnar en þar ofan á eru víða setlög frá Nútíma og einnig Þjórsárhraunið áður nefnda.

### 2.1.2 Veðurfar á svæðinu

Ársúrkoma innan vatnasviðs Þjórsár er víðast hvar á bilinu 800–3.000 mm, minnst um miðbik þess hluta vatnasviðsins sem liggur norðaustan Búrfells. Ársafkoma efst á Hofsjökli (1790 m y.s.) hefur að jafnaði mælst um 3.300 mm (vatnsgildi) (Þorsteinn Þorsteinsson o.fl., 2017; sjá einnig <https://islenskirjoklar.is>), en ársúrkoman er talsvert meiri, því mælingar á jöklinum ná ekki til þess hluta úrkomunnar, sem fellur sem regn (einkum á sumarhelmingi ársins). Ofan við 1500 m hæð fellur úrkoma nær eingöngu sem snjór að vetrarlagi en jafnt sem snjór og rigning að sumarlagi. Í mælipunkti á Bárðarbungu (1950–1970 m y.s.) hefur vatnsgildi ársafkomu að jafnaði mælst um 2.400 mm (sjá t.d. Finnur Pálsson o.fl., 2022; sjá einnig <https://islenskirjoklar.is>). Tafla 2.1 sýnir ársmeðalhita og ársúrkomu á þremur veðurstöðvum, sem staðsettar eru ofarlega, miðja vegu og neðst á vatnasviði Þjórsár.

Tafla 2.1. Hita- og úrkomutölur á mismunandi stöðum á vatnasviði Þjórsár. Gögn Veðurstofu Íslands og Landsvirkjunar.

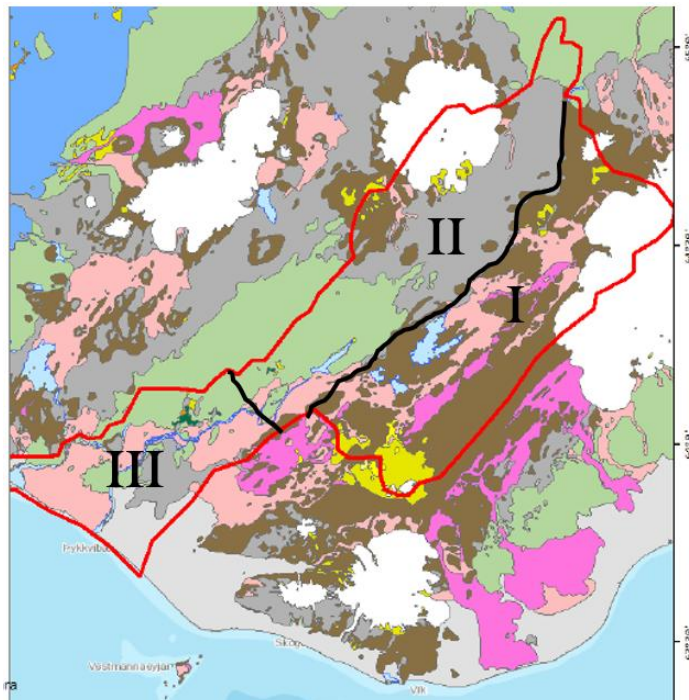
| Veðurstöð  | Tímabil mælinga | Ársmeðalhiti | Ársúrkoma |
|------------|-----------------|--------------|-----------|
| Eyrarbakki | 1961–1990       | 4,1 °C       | 1370 mm   |
| Búrfell    | 1971–1993       | 2,2 °C       | 974 mm    |
| Hágöngur   | 2005–2023       | -0,2 °C      | 780 mm    |

<sup>1</sup>Gosberg á Íslandi er flokkað eftir innihaldi kísildíoxíðs í basískt berg (<52% SiO<sub>2</sub>, t.d. blágrýti eða basalt), ísúrt berg (52–65% SiO<sub>2</sub>, t.d. andesít) og súrt berg (>65% SiO<sub>2</sub>, t.d. ljósgrýti eða rhyólít).

### 2.1.3 Vatnajarðfræði svæðisins

**Almennt yfirlit.** Á Mynd 2.3 eru afmörkuð 3 svæði innan vatnasviðs Þjórsár: Móbergs- og hraunasvæðið norðaustantil, grágrýtissvæðin norðvestantil og svo svæðið milli Þjórsárdals og sjávar. Vatnafræðilegir eiginleikar þessara jarðmyndana og viðnám þeirra gegn rofi eru mjög mismunandi og við hermun jökulhlaupa þarf að taka tillit til þess hvort vatn sem rennur fram á yfirborði geti hripað niður í berggrunn í miklu magni og sameinast grunnvatni. Gera má ráð fyrir að rennsli stórra jökulhlaupa af völdum eldgoss undir jökli muni leita í farvegi sem fyrir eru, en einnig stjórnast að talsverðu leyti af sprungustefnu á svæðinu. Hlaup geta einnig fundið sér farveg í kverkinni milli móbergshryggja og hrauna og grafið sig þar niður.

**Grunnvatn.** Írennsli er það kallað þegar vatn af yfirborði jarðar hripar niður um lek jarðlög og verður að grunnvatni. Að uppruna getur þetta vatn verið úrkoma, snjóbráð eða jökulbráð. Þyngdaraflið knýr svo hægt streymi í átt til sjávar um grunnvatnsgeyma eða grunnvatnsstrauma sem ákvarðast af jarðfræðilegri byggingu ákveðins landsvæðis. Stærð tiltekins grunnvatnsgeymis ákvarðast af rúmmáli og vatnsrýmd jarðlaganna en lekt þeirra ræður hversu auðveldlega vatnið rennur til og frá grunnvatnsströumum (Davíð Egilson, 2016).

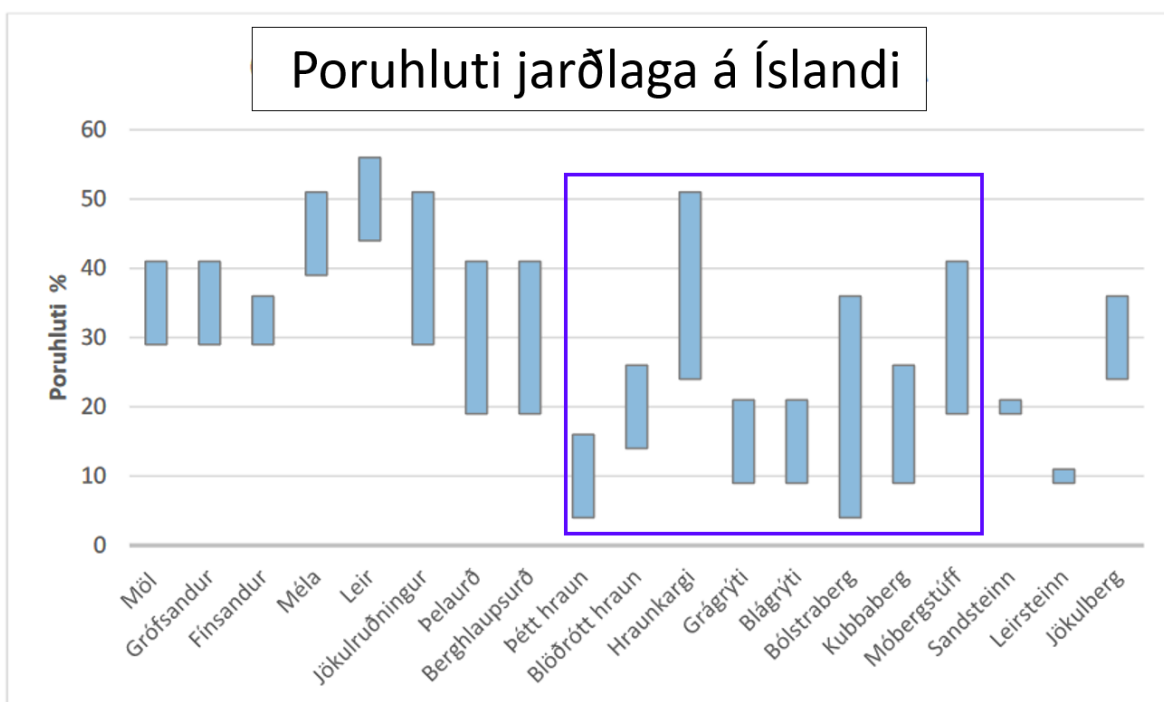


Mynd 2.3. Rauði ferillinn afmarkar vatnasvið Þjórsár. Svarti ferillinn sýnir grófa skiptingu vatnasviðsins í þrjú svæði: I – Móbergsmýndanir innan eystra gosbeltisins, víða þaktar hraunum frá Nútíma. Þetta svæði nær yfir yfir alla rennslisleið Köldukvíslar (og mögulegra hlaupa) úr Vonarskarði, um Hágöngulón og niður í Þórisvatn. II – Grágrýtismýndanir frá Ísöld, innan hálendisbrúnar. Grátt er yngra en 0,8 milljón ára, grænt er 0,8–3,3 milljón ára. Hlauprennsli til vesturs úr Hágöngulóni yfir í Kvíslavatn og þaðan niður eftir farvegi Þjórsár færi um þetta svæði. III – Láglandi frá Þjórsárdal til sjávar. Hraunlög frá Nútíma, set og gróðurþekja, en grágrýti undir. Hlaupvatn mundi breiða úr sér á þessu svæði.

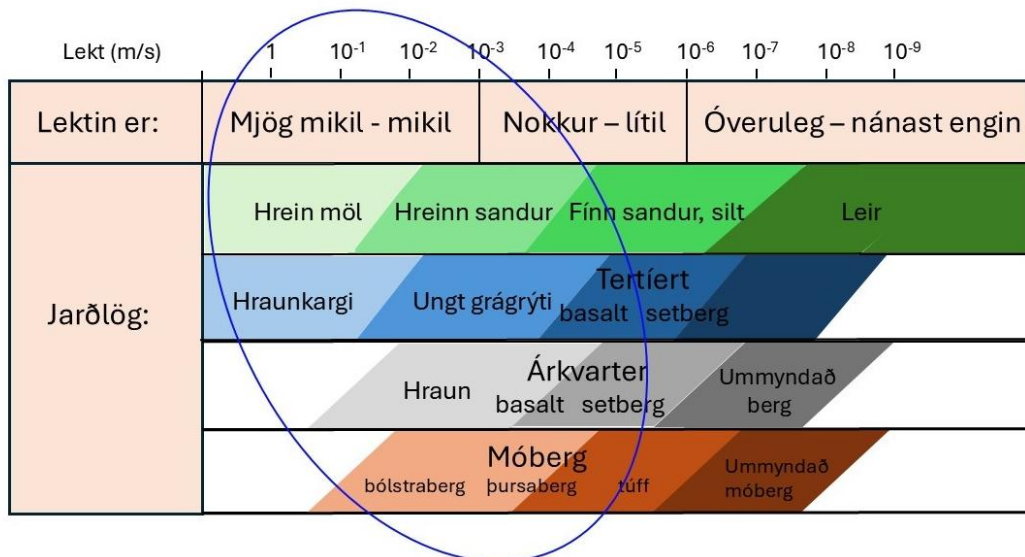
*Poruhluti* (e: porosity) er hlutfall holrýmis í bergi af heildarrúmmálinu. Er þar átt við holrúm milli korna og kristalla, blöðrur, glufur og sprungur (Árni Hjartarson, 1978). Poruhluti bergs og lausra jarðlaga á yfirborði er á bilinu 0,01 upp í > 0,5 og breytist oft með tíma. Greint er á milli heildar-poruhluta (e: total porosity) og virks poruhluta (e: effective porosity), því sum holrými geta verið einangruð frá streymi vatns um bergið.

*Lekt* (e: permeability) er skilgreind sem það vatnsmagn, sem streymir um ákveðinn flöt, hornréttan á strauminn, á tímaeiningu (við 1 atm þrýsting) (Árni Hjartarson, 1978, s. 19). Lektin er að nokkru komin undir eiginleikum efnisins (virkum poruhluta), en einnig seigju vatnsins, hitastigi og þrýstingi. Lektin er tjáð með lektarstuðlinum  $K$  og einingin er  $m/s$  (þ.e.  $(m^3/s)/m^2$ ).

Mynd 2.4 sýnir poruhluta helstu jarðmyndana héraendis og Mynd 2.5 sýnir tölur um lekt jarðlaga.



Mynd 2.4. Poruhluti jarðlaga á Íslandi. Myndin er fengin úr skýrslu Davíðs Egilson o.fl., 2019, Mynd 20, bls. 29). Þar er hún útbúin skv. gögnum Árna Hjartarsonar (1978). Blái ramminn afmarkar jarðlög þeirrar gerðar, sem mest eru áberandi á reiknisvæði þessarar skýrslu. Poruhlutar einstakra myndana: Þétt hraun 4–16%; blöðrótt hraun 14–26%; hraunkargi 24–52%; grágrýti og blágrýti 9–21%, bólstraberg 4–36%; kubbaberg 9–27%; móbergstúff 19–42%.



Mynd 2.5. Lekt jarðlaga á Íslandi. Myndin er fengin úr skýrslu Davíðs Egilson o.fl. (2019, Mynd 21 á bls. 30). Þar er hún endurgerð skv. Freysteini Sigurðssyni og Jóni Ingimarssyni (1987). Blái sporbaugurinn afmarkar helstu berg- og setgerðir á reiknisvæðinu.

Umfang og áhrif flóða stjórnað talsvert af því hvort þau renna öll fram á yfirborði eða hvort írennsli til jarðlaga dregur úr vatnsmagni á yfirborðinu. Lekt jarðlaganna ákvarðar hversu hratt vatnið rennur um þau. Lekt nútímahrauna er mikil (allt að 1 m/s) og vatnsgeymd þeirra einnig (Freysteinn Sigurðsson og Guttormur Sigbjarnarson, 1985), sjá Myndir 2.4 og 2.5. Vatnsrennslið er einkum á lagmótum hrauna og getur lárétt lekt verið tífalt meiri en lóðrétt. Á svæðum þar sem írennslis gætir verulega þarf að taka tillit til þess við líkanreikninga á útbreiðslu, hegðun og hámarksrennsli flóða.

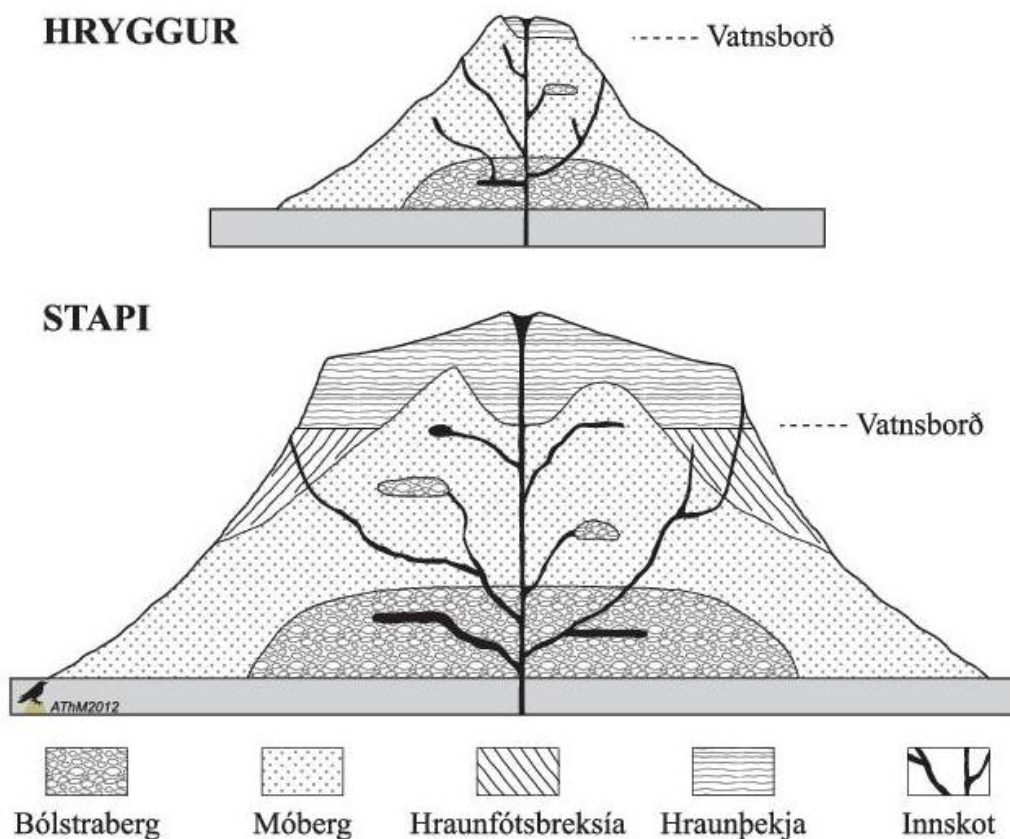
Á austasta hluta vatnasviðs Þjórsár (Svæði I á Mynd 2.3) ber mikið á sprungureinum sem liggja í SV-NA stefnu og bera vitni um gliðnun innan austurgosbeltisins. Sem dæmi má nefna Heljargjá, sem er innan Bárðarbungukerfisins. Grunnvatn á greiða leið eftir höggunarsprungum innan þessara reina og er rennsli þess innan Bárðarbungukerfisins því fyrst og fremst frá norðaustri til suðvesturs. Það eykur svo á lektina að bergið er ungt og hefur því ekki náð að þéttast vegna útfellinga. Grunnvatnsstraumur þess svæðis sem hér er til umfjöllunar nær inn undir Vatnajökul norðvestanverðan.

Eldvirkni hefur verið samfara gliðnuninni jafnt á hlýskeiðum sem jökulskeiðum og móbergsslandslag er einkennandi fyrir svæðið. Á svæðinu sunnan Tungnaár og kringum Langasjó eru t.d. 20–30 km langir móbergshryggir með SV-NA stefnu mjög áberandi. Í móbergsfjöllum finnur vatnið sér lekaleiðir eftir sprungum en einnig eftir bólsrabergi í kjarna þessara myndana (Mynd 2.6). Rof móbergsfjalla hefur leitt til myndunar setlaga af ýmsum toga, t.d. sandsteins, völuþurva og jökulbergs en slíkar setmyndanir eru yfirleitt lítið vatnsleiðandi. Grunnvatn í móbergsfjöllum er því oft einangrað frá grunnvatni sem rennur um nálæg nútímahraun.

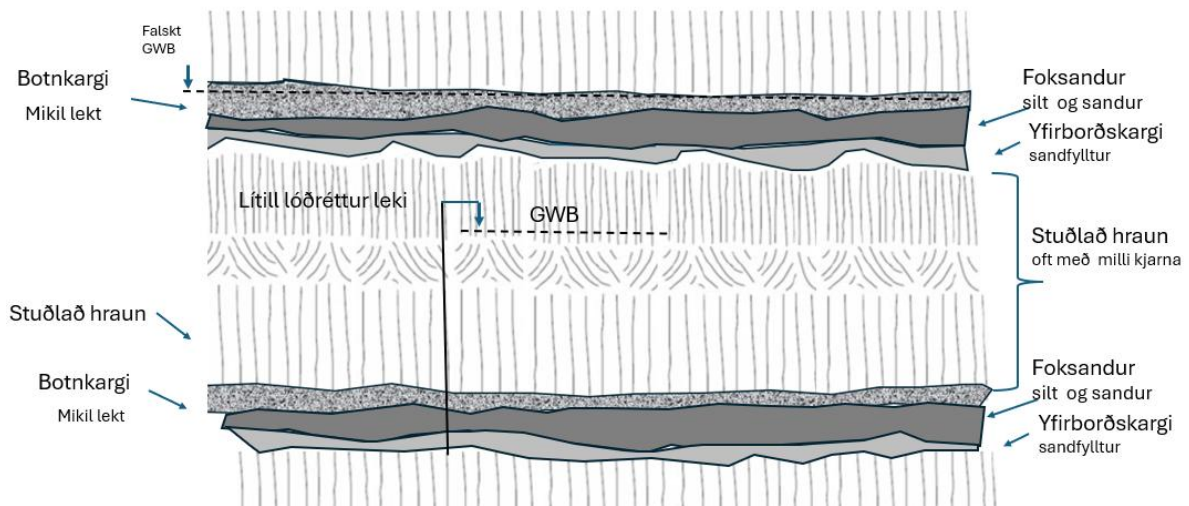
Nútímahraunin eru yfirleitt stuðluð og þétt um miðbikið og lárétt lekt lítil. Efst er hins vegar yfirborðskargi með hraunbrotum, sem fyllist smám saman af vikri, foksandi og fokmold á öldum og árpúsundum. Renni svo annað hraun þar yfir steypast undir það margvíslega

löguð hraunbrot og mynda botnkarga sem ekki nær að fyllast af seti. Sá kargi er yfirleitt gropinn og vel vatnsleiðandi (Mynd 2.7).

Grunnvatnsstaða hefur verið mæld í borholum frá upphafi virkjunarframkvæmda á svæðinu. Alls eru mælistaðir 44 innan Þjórsár-Tungnaárvæðisins og margar mæliraðanna ná nú yfir 4–5 áratugi. Innan hvers árs sveiflast grunnvatnsstaðan oft 1–2 metra upp og niður fyrir ársmeðaltalið og áratugasveiflur úrkomu og leysingar valda langtímasveiflum. Mannvirki á svæðinu hafa einnig áhrif á grunnvatnsstöðuna (Davíð Egilson, 2016).



Mynd 2.6. Einfölduð þversnið gegnum móbergshrygg og móbergsstapa, sem myndast hefur við gos undir jökli. Veðrunarkápan úr ummyndaðri ösku og gjalli er gjarnan þétt en vatn streymir greiðlega um bólstrabergslagíð neðantil (Sveinn P. Jakobsson og Magnús Tumi Guðmundsson, 2012).



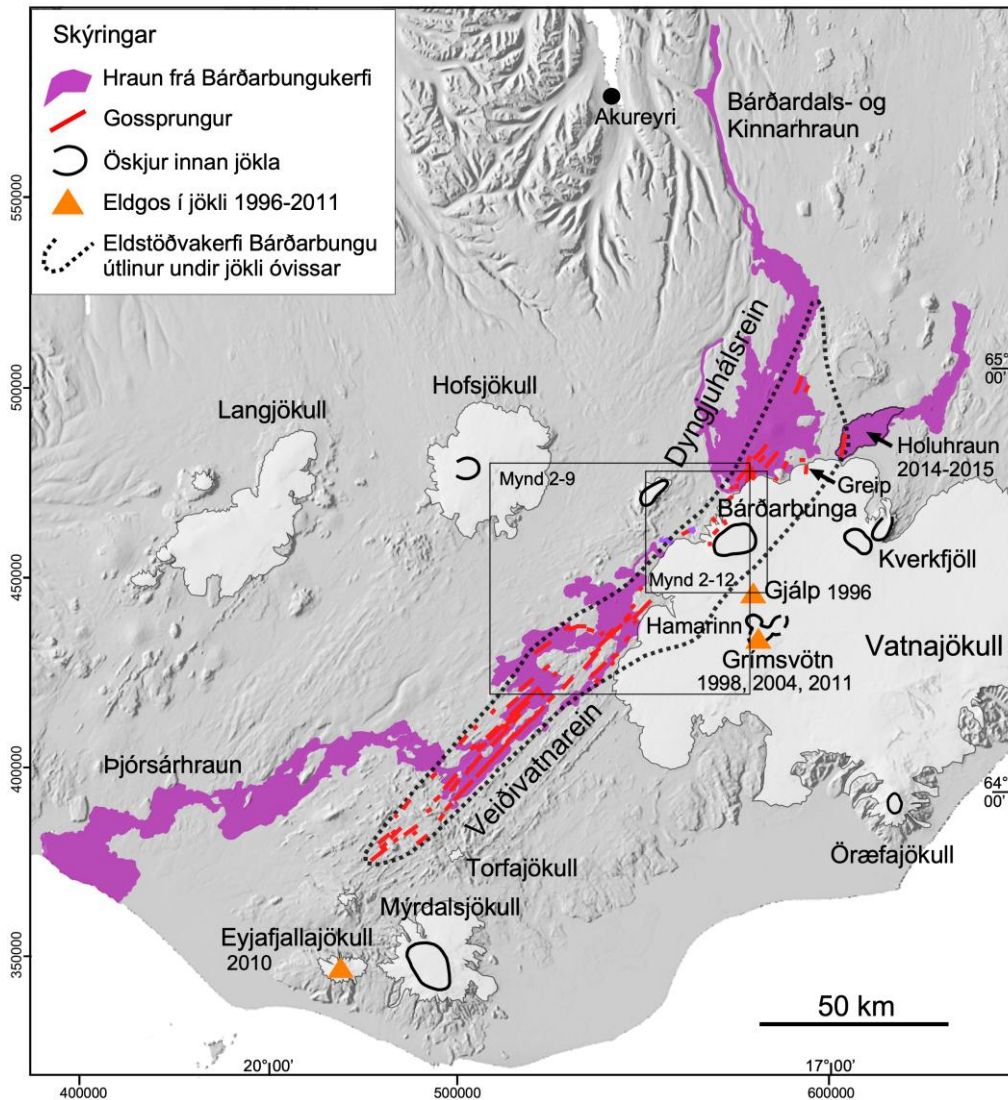
Mynd 2.7. Lagskipting í hraunlagastafla. Botnkargi myndast þegar seigfljóttandi hraun rennur fram og storknuð hraunbrot á yfirborði velta fram fyrir hrauntunguna og lenda síðan undir henni. Botnkarginn er grófgerður og lekt hans er mikil. Veðrun myndar yfirborðskarga sem fyllist af seti og jarðvegi á löngum tíma. Lekt hans er því minni en botnkargans en getur þó verið umtalsverð. Eftir Birgi Jónssyni (1983). (GWB = grunnvatnsborð).

Í berggrunni svæðis II á Mynd 2.3 er grágrýti (og sumsstaðar móberg) frá síðari hluta ísaldar, að stærstum hluta yngra en 800.000 ára (Brunhes segulskeið) en eldra en 800.000 ára (Matuyama segulskeið) á Búðarhálsi og norðan Sultartangalóns (Myndir 2.1 og 2.3). Þessi jarðmyndun nær upp í Þjórsárver og inn undir Hofsjökul. Berggrunnur er þarna vel þéttur og mikill hluti úrkomu og leysingar rennur fram á yfirborði. Gróðurþekja er allvíða á svæðinu og getur hún haft áhrif á vatnafar og grunnvatnsstöðu.

Á svæði III á Mynd 2.3 eru hraunlög frá Nútíma, set og gróðurþekja á yfirborði, en grágrýti undir. Byggð er á stórum hluta þessa svæðis og jarðvegur ræktaður. Flatlent er nærri hafi og ljóst að hlaupvatn mundi flæmast víða í stórum jökulhlaupum og spilla ræktarlandi, vegum og öðrum mannvirkjum.

## 2.2 Saga gosa og hlaupa frá Bárðarbungukerfi

Eldstöðvakerfi Bárðarbungu er um 190 km langt og allt að 30 km breitt (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson 1998) og er eitt hið stærsta á landinu. Það skiptist í megineldstöðina Bárðarbungu og tvær sprungureinar, Veiðivatnarein til suðvesturs og Dyngjuhálsrein til norðausturs (Mynd 2.8). Hamarinn liggur á Veiðivatnareininni, um 20 km suðvestur af Bárðarbungu og ber ýmis einkenni megineldstöðvar. Um 70 km af eldstöðvakerfinu, megineldstöðin og hluti sprungureinanna beggja vegna, eru undir norðvestanverðum Vatnajökli (frá Holuhrauni að Kerlingum). Bárðarbunga rís í um 2000 m y.s. og í henni er ísfyllt 65 km<sup>2</sup> askja (t.d. Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2016). Þrjú skörð eru í barma öskjunnar, til suðvesturs, norðausturs og austurs (dýpst).



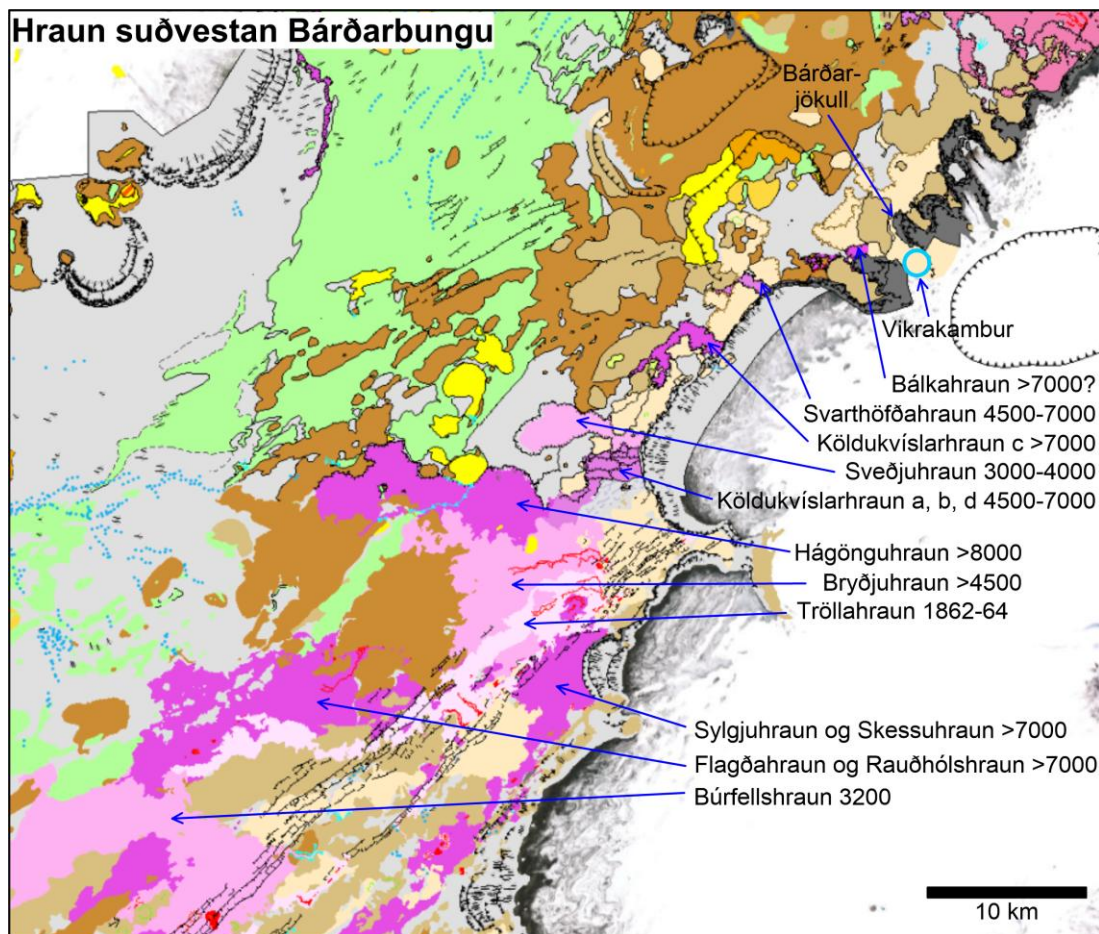
Mynd 2.8. Bárðarbungukerfið, hraun sem runnið hafa frá gosum í kerfinu á Nútíma og helstu gossprungur. Gosstöðvar, þar sem gos hafa orðið í jökulum á síðustu 30 árum og stærð og atburðarás er vel skorðuð, eru merktar. Rammarnir sýna útmörk kortanna á myndum 2.9 og 2.12.

Eldgosasaga Bárðarbungukerfisins hefur verið rakin með kortlagningu á hraunum og rannsóknnum á gjóskulögum og er nú nokkuð vel þekkt (t.d. Elsa G. Vilmundardóttir o.fl., 1999a, 1999b; Bergrún A. Óladóttir o.fl., 2011; Kristján Sæmundsson o.fl., 2012; Esther R. Guðmundsdóttir o.fl., 2012; Guðrún Larsen o.fl., 2013, 2025; Magnús Á Sigurgeirsson o.fl., 2015; Ingibjörg Kaldal o.fl., 2018; Árni Hjartarson o.fl., 2019).

Á Bárðarbungukerfinu hafa orðið mikil hraungos á Nútíma og stærstu hraunin runnu til sjávar á Suðurlandi (Þjorsárhraun) og langt norður eftir Bárðardal (Mynd 2.8). Yfirlit um hraun úr Bárðarbungukerfi milli Vonarskarðs og Þórisvatns má sjá á Mynd 2.9.

Eldgos á hinum jökulpakta hluta Bárðarbungukerfisins eru sprengigos sem skilja eftir gjóskulög í jarðvegi, setlögum og jökulís. Færa má rök fyrir að um 400 slík sprengigos hafi orðið undir jökli á síðustu 11.000 árum. Einnig hafa orðið stór sprengigos á Veiðivatnarein

vegna hárrar grunnvatnsstöðu, síðast á Veiðivatnagossprungu árið 1477 (t.d. Guðrún Larsen o.fl., 2013). Fjallað er sérstaklega um sprengigosin hér á eftir.



Mynd 2.9. Hraun (rauðbleikur litaskali, ljósast = yngst) komin upp á Bárðarbungukerfi milli Vonarskarðs og Þórisvatns (Árni Hjartarson o.fl., 2019; Ingibjörg Kaldal o.fl., 2018). Upptök allmargra hrauna eru hulin jökli eða jökulurð. Brotalínur og misgengi á Veiðivatnarein hverfa undir Köldukvíslarjökul. Víkrakambur (Myndir 2.10 og 2.11) vestan í Bárðarbungu er merktur með ljósbláum hring. Aldur hrauna (tala á eftir nafni) samkvæmt jarðfræðikortum Ísor. Kort: Jarðfræðikort Ísor: <https://arcgisserver.isor.is>

### 2.2.1 Gossaga Bárðarbungukerfis, sprengigos

Á síðustu 11 öldum eru um 25 basísk sprengigos á jökulpakta hluta Bárðarbungukerfis þekkt af gjóskulagarannsóknum og af heimildum (Tafla 2.2). Langflest gjóskulaganna eru varðveitt í ís Vatnajökuls. Sýnum var safnað á leysingasvæðum með stuttum borkjörnum 1994–2005 (Guðrún Larsen o.fl., 1998) og með 400 m löngum borkjarna á Bárðarbungu 1972 (Sigurður Steinþórsson, 1978). Stærstu gjóskulögin finnast í jarðvegi og í sjávarseti í 150–210 km fjarlægð (Guðrún Larsen, 1982; Esther R. Guðmundsdóttir o.fl., 2012).

Tafla 2.2 Yfirlit yfir eldgos á Bárðarbungukerfi á sögulegum tíma. Að hluta byggt á óbirtum gögnum. Gjóskulög í Bárðarbungukjarna hafa verið endurskoðuð (aldur, uppruni). Reiknuð gosár: tímasetning reiknuð út frá því hvar gjóskulag liggur með tilliti til næstu leiðarlaga fyrir ofan og neðan lagið. Sum reiknuð gosár eru enn óviss og geta breyst. Sjá einnig Töflu 3-1 í Guðrún Larsen o.fl., (2025).

| Eldgos á sögulegum tíma, Bárðarbungukerfi 2015-877 |                   |                |                    |                             |
|--|-------------------|----------------|--------------------|-----------------------------|
| Gosár/<br>skráður atb                              | Gosár,<br>reiknað | Eldstöðvakerfi | Jökulhlaup         | Valdar heimildir            |
| <b>2014</b>  |                   | Bárð           |                    | MTG o.fl. 2016 (Holuhraun)  |
| <b>1910</b>  |                   | Óvissar gosst  |                    | GL o.fl. 2013               |
| <b>1902</b>  |                   | Bárð           | Skjálf. Jök. á Fj. | ÓJ 1945, SP 1974            |
| <b>1872</b>  |                   | Óvissar gosst  |                    | SP 1974, ÓJ 1945            |
| <b>1862</b>  |                   | Bárð           |                    | SP & GES 1972 (Tröllahraun) |
| <b>1797</b>  |                   | Bárð?          |                    | SP 1974                     |
|  | <b>1768</b>       | Grí (+Bárð?)   |                    | SSt 1978 endursk            |
| <b>1766</b>  | <b>1766</b>       | Ísúr+Bárð?     | Þjórsá             | SSt 1978 endursk            |
|  | <b>1764</b>       | Bárð           |                    | SSt 1978 endursk            |
|  | <b>1743</b>       | Bárð           |                    | SSt 1978 endursk            |
| <b>1729</b>  | <b>1729</b>       | Bárð           | Jökulsá á FJ. x2   | SP 1950, SSt 1978           |
| <b>1726</b>  | <b>1726</b>       | Bárð +Grí      | Jökulsá á FJ. x5   | SP 1974, SSt 1978           |
| <b>1725 1726</b>                                   | <b>1725/26</b>    | Bárð +súr      |                    | SP 1974, SSt 1978 endursk   |
| <b>1724 1725</b>                                   | <b>1724/25</b>    | Bárð           |                    | SP 1974, SSt 1978 endursk   |
| <b>1723</b>  | <b>1723</b>       | Bárð           |                    | SSt 1978 endursk            |
| <b>1717</b>  | <b>1717</b>       | Bárð           | Jökulsá á Fj.      | SSt 1978 endursk            |
| <b>1716</b>  | <b>1716</b>       | Bárð           | Jökulsá á Fj.      | SSt 1978 endursk            |
| <b>1711-1712</b>                                   | <b>1711-1712</b>  | Bárð           | Jökulsá á Fj.      | SSt 1978 endursk            |
| <b>1684/85</b>                                     |                   | Óvissar gosst  | Jökulsá á Fj.      | SSt 1978 endursk            |
| <b>1644/1645</b>                                   | <b>1642</b>       | Bárð           |                    | ÓJ 1945                     |
| <b>1598</b>  |                   | Óvissar gosst  |                    | SP 1974                     |
| <b>1477</b>  | <b>1480</b>       | Bárð           |                    | GL ofl 2013 (Veiðivatnagos) |
|  | <b>1410-1423</b>  | Bárð           |                    | GL o.fl. 2014               |
| <b>1340 1341</b>                                   | <b>1343 1345</b>  | Bárð           |                    | GLMTG ób                    |
|  | <b>1294-1295</b>  | Bárð           |                    | BAÓ o.fl. 2011              |
|  | <b>1265</b>       | Bárð?          |                    | GLMTG                       |
|  | <b>fyrir 1262</b> | Bárð           |                    | MÁS o.fl. 2015 (Frambruni)  |
|  | <b>1215</b>       | Bárð           |                    | GLMTG ób                    |
|  | <b>1080</b>       | Bárð           |                    | GL 1982,                    |
|  | <b>1030</b>       | Bárð           |                    | BAÓ o.fl. 2011              |
|  | <b>950</b>        | Bárð           |                    | MÁS o.fl. 2002              |
|  | <b>920</b>        | Bárð           |                    | GL 1982                     |
|  | <b>905</b>        | Bárð           |                    | BAÓ o.fl. 2011              |
|  | <b>877±4</b>      | Bárð           |                    | GL 2016 (Vatnaöldugos)      |

BAÓ, Bergrún A. Óladóttir; GES, Guðmundur E. Sigvaldason; GL, Guðrún Larsen;  
MÁS, Magnús Á. Sigurgeirsson; MTG, Magnús T. Guðmundsson; ÓJ, Ólafur Jónsson;  
SSt, Sigurður Steinþórsson; SP, Sigurður Þórarinnsson.

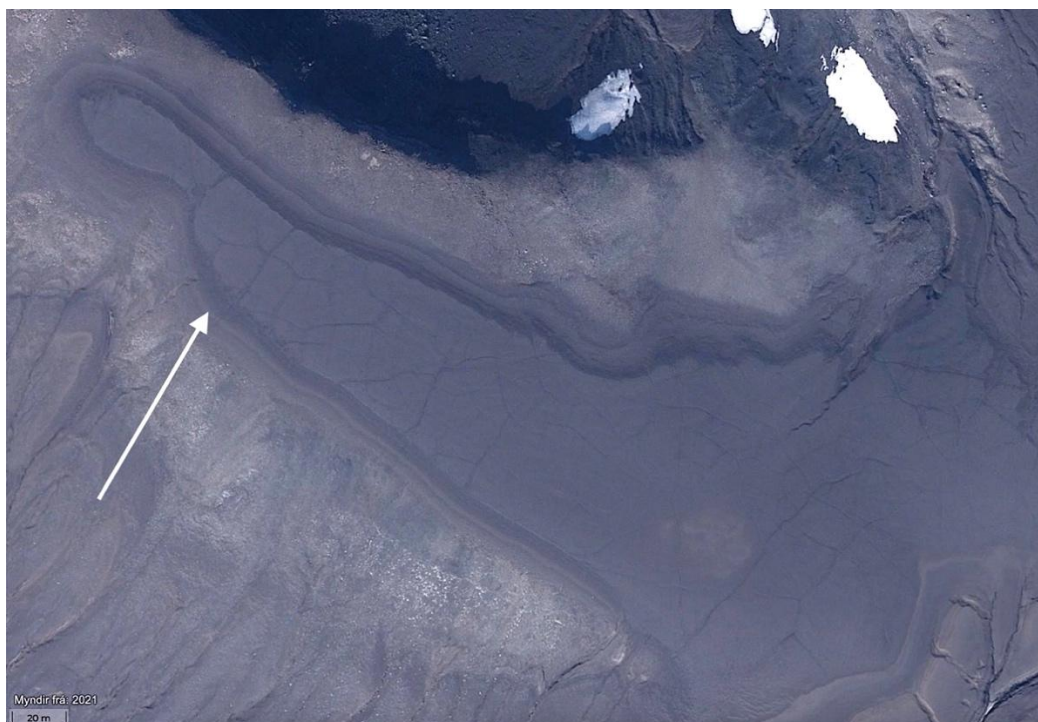
Vatnajökull var lengst af ókannað svæði og heimildir um gosstaði oft óljósar eða gosin tengd þekktum eldstöðvum, oft að ósekju. Ef gosa er getið í annálum eða öðrum heimildum eru upplýsingar um gosár yfirleitt áreiðanlegar eða nærri lagi. Engar heimildir eru til um sum gjóskulögin og er tímasetning (reiknað gosár) þá reiknuð út frá legu þess í sniði með tilliti til þekkra gjóskulaga (leiðarlaga), t.d. úr Kötlu eða Heklu.

Í Töflu 2.2 eru öll þekkt gjóskulög frá Bárðarbungukerfi ásamt gosárum, bæði úr heimildum og reiknuð gosár samkvæmt þykkt íss eða jarðvegs. Öll gjóskulög eldri en frá 1797 hafa verið efnagreind til staðfestingar á uppruna. Gostíðnin samkvæmt Töflu 2.2 er 1–4 gos á öld nema á 18. öld þegar gosin eru a.m.k. 12 talsins. Meðaltalið er rúmlega tvö eldgos/100

ár. Í Töflu 2.2 eru einnig fimm sprungugos á Bárðarbungukerfi utan Vatnajökuls, tvö sprengigos vegna hárrar grunnvatnsstöðu (877, 1477) og þrjú flæðigos (13. öld, 1862–4, 2014–15). Meðaltalið er eitt eldgos/200 ár. Þótt goshrinan á 18. öld skekki þennan samanburð er gostíðnin á jökulpakta hluta kerfisins mun hærri en utan jökulsins.

Flest gos á hinum jökulpakta hluta Bárðarbungukerfisins síðustu 11 aldir virðast hafa verið fremur lítil. Til þess bendir hátt hlutfall Bárðarbungugjós kulaga sem eingöngu finnast í ís í Vatnajökli. Fátæklegar frásagnir annála/gamalla heimilda benda til hins sama. Aðeins stærstu gjóskulögin bárust út fyrir jökulinn og ógróin eða uppblásin svæði umhverfis hann. Þrjú af hverjum fjórum gjóskulögum finnast því eingöngu í ísnum í Vatnajökli. Stærstu gjóskulögin úr sprengigosum á jökulpakta hluta Bárðarbungukerfisins eru úr gosum um 950 og 1717 (Magnús Á. Sigurgeirsson o.fl., 2002, 2013; Guðrún Larsen o.fl., 2014). Bæði gjóskulögin eru illa varðveitt og engar mælingar til á þykkt þeirra innan 50 km frá Bárðarbungu (miðað við miðja öskju). Með samanburði við þykktardreifingu Grímsvatnagjósku frá 2011 má álykta að nýfallin gjóska í þessum tveim gosum hafi verið af svipuð að rúmmáli eða 0,6–0,8 km<sup>3</sup> (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2013).

Eina vel varðveitta gjóskulagið sem fundist hefur nær Bárðarbungu en 50 km er 2,5–3 m þykkt og gróft gjóskulag (Myndir 2.10 og 2.11) á hæðarkambi milli Bálkajökuls og Bárðarjökuls vestnorðvestan í Bárðarbungu (staðsetning á Mynd 2.9), um 8 km frá miðri öskjunni (Guðrún Larsen o.fl., 2025). Gjóska hefur efnasamsetningu einkenni Bárðarbungukerfis og grófleiki bendir til nálægra gosstöðva, e.t.v. gígaraðar í hlíð Bárðarbungu. Útlit og varðveisla bendir til fremur ungs aldurs og því var kannað hvort þetta gjóskulag tengdist hugsanlega tímasettum gosum og/eða hlaupum. Sérstaklega var athugað hvort gjóskulagið tengdist gosi á Bárðarbungukerfi 1766, en það sumar voru vatnavextir í Þjórsá taldir stafa af hlaupum í Tungnaá (Sigurður Þórarinnsson 1974). Einnig hvort gjóskulagið gæti tengst gosi á Bárðarbungukerfi 1716, en þá barst gjóska til norðvesturs. Ekki tókst að sýna fram á tengsl við gos á sögulegum tíma með tiltækum gögnum. Grófleiki og efnasamsetning benda helst til tengsla við illa varðveitt, um 30 cm þykkt og gróft ~1300 ára gamalt gjóskulag í Nýjadal, um 30 km frá Bárðarbungu.



Mynd 2.10. Gjóskulag á kambi milli Bálkajökuls og Bárðarjökuls, ör sýnir mælistað.



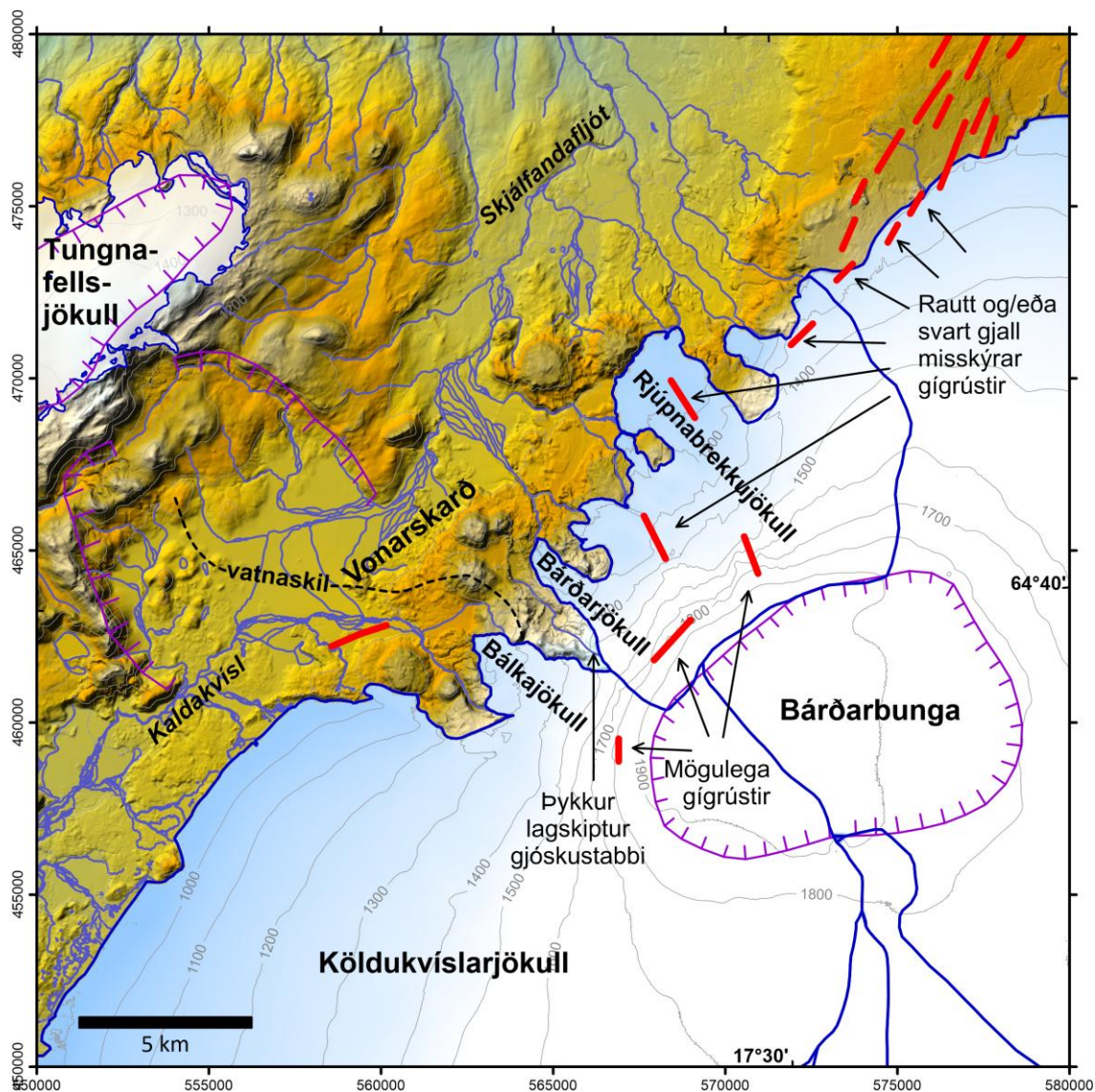
Mynd 2.11. Mæling á gjóskulaginu, neðsta holan markar botn þess. Gjóskan er lagskipt, þykkt hér 2,5–3 m (botnlag e.t.v. eldra). Veðrunarurð, bergbrot úr gjóskulaginu, þekur allt lagið.

Gjóskulög frá forsögulegum tíma eru varðveitt í jarðvegi og setlögum en upplýsingarnar verða slitróttari með hækkandi aldri (Bergrún A. Óladóttir o.fl., 2011; Esther R. Guðmundsdóttir o.fl., 2016). Alls hafa fundist um 100 gjóskulög með einkenni Bárðarbungukerfis, þau elstu um 11.000 ára. Sé notað sama hlutfall um varðveislu utan jökuls og gildir um gos á sögulegum tíma gætu gosin hafa verið um 400 á 10.000 árum

eða 4 gos á öld að jafnaði. Stærstu forsögulegu gjóskulögin voru af svipaðri stærð og G-2011, um 0,8 km<sup>3</sup>, miðað við þykktardreifingu í 50–100 km fjarlægð.

### 2.2.2 Gosstöðvar sprengigosa á jökulpakta hluta

Gosstöðvar sprengigosa á hinum jökulpakta hluta Bárðarbungukerfisins eru ekki þekktar, e.t.v. með nokkrum undantekningum, sbr. hér á eftir. Mynd 2.12 sýnir hvar gjallrimar og gígrústir eru að koma í ljós í hlíðum Bárðarbungu og í jökulruðningi við jökuljaðra. Utan jökuls stefna gígaraðir á Dyngjuhálsi inn undir ísinn.



Mynd 2.12. Merki um gíga og gígleifar í norðvesturhlíðum Bárðarbungu og í og við jökuljaðra í nágrenni hennar. Gígaraðir á Dyngjuhálsi, vestan Kistufells, í efra hægra horni. Bláu línurnar eru vatnaskil í jökli, punktalínan sýnir vatnaskil í Vonarskarði. Sjá einnig Myndir 5-1, 5-4 og V1-1 í Guðrún Larsen o.fl., 2025.

Upptök þykka og grófa gjóskulagsins við jökuljaðarinn norðvestan Bárðarbungu (Mynd 2.12, merking: Þykkur lagskiptur gjóskustabbi) eru í nokkurra (3–5) kílómetra fjarlægð og gætu tengst „gígaröð“ (Mynd 2.12, merking: Mögulega gígrústir) sem er að koma í ljós í norðvesturhlíð hennar (Guðrún Larsen o.fl., 2025). Bræðsluvatn vegna gosa þar hefur

leitað niður með litlu skriðjökklunum niður í Vonarskarð. Vatnaskil í Vonarskarði eru framan við Bálkajökul og bræðsluvatn hefur getað leitað bæði til Köldukvíslar og Skjálfafljóts.

Mið á gosið í Vatnajökli 1910 frá Orustustöðum á Brunasandi (16 km ANA af Kirkjubæjarklaustri) liggja um Sylgjujökul-Hamarinn-Köldukvíslarjökul (Sigurður Þórarinnsson, 1974). Ef sú lína er framlengd lenda upptökin í vestur- og norðvesturhlíðum Bárðarbungu. Málverk af gosmekkinum bendir til upptaka austar, um Skaftárkatla (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2013). Gjóska úr þessu gosi hefur ekki fundist.

Allmargar gígaraðir á Dyngjuhálsi liggja að eða hverfa inn undir Dyngjujökul, langflestar (6–7) á stuttum kafla um 5 km vestan Kistufells og stefna inn í norðvesturhlíðar Bárðarbungu (Mynd 2.12). Austan Kistufells-Urðarháls stefna gossprungur í Gígöldum og Holuhrauni undir Dyngjujökul. Stór gígrúst (Greip) úr sprengigosi er í jaðri Dyngjujökuls við Urðarháls, líklega frá 16. öld en tengsl við Bárðarbungukerfið eru óljós.

Gígaraðir á Veiðivatnarein stefna inn undir Köldukvíslarjökul og í vesturhlíðar Bárðarbungu (Myndir 2.8 og 2.9). Hraun koma fram undan núverandi Köldukvíslarjökli á þrem stöðum en gosstöðvarnar eru nú undir jökli. Sé miðað við að gosstöðvar undir Köldukvíslarjökli séu „í framhaldi“ af gossprungum Tröllahrauns og Bryðjuhrauns suðvestan jökulsins liggja þær 4–8 km innan núverandi jökuljaðars. Þessi hraun, og hraun frá gígaröð við Fremsta Bálkafell, eru fremur lítil en hafa runnið 5–15 km frá upptökum.

### 2.2.3 Jökulhlaup tengd eldsumbrotum á Bárðarbungukerfi

Með örfáum undantekningum hafa öll þekkt jökulhlaup vegna eldvirkni á Bárðarbungukerfi komið í Jökulsá á Fjöllum. Það þýðir að gos sem valda hlaupum, og jafnframt tíðustu gosin, hafa orðið norðan- og/eða austantil á jökulpakta hluta kerfisins - eða tengjast öskju Bárðarbungu.

Lítum fyrst á síðustu 11 aldirnar. Þekking á jökulhlaupunum byggist alfarið á heimildum (annálar, jarðabækur, fornbréf). Samkvæmt þeim hafa a.m.k. sjö eldgos valdið hlaupum í Jökulsá á Fjöllum (Tafla 2.2). Gjóskulög úr fimm þessara gosa eru þekkt og uppruni í Bárðarbungukerfi staðfestur.

Árin 1711–12, 1716, 1717, 1726 og 1729 komu hlaup í Jökulsá og í a.m.k. tveimur tilfellum komu fleiri en eitt jökulhlaup þegar eldur var uppi. Um árið 1726 segir einn annáll frá gosi um þorrakomu en annar að Jökulsá hafi hlaupið fimm sinnum um veturinn og vorið. Þegar grannt er skoðað kemur í ljós að fyrsta hlaupið var 10. nóvember 1725, tvö hlaup í mars og önnur tvö í apríl 1726 (Sigurjón P. Ísaksson, 1985). Tvö fyrstu hlaupin voru stærst og stóðu í nokkra daga hvort, í hlaupinu 18.–23. mars er hámarksrennsli áætlað um 20.000 m<sup>3</sup>/sek. Tvö hlaup komu í Jökulsá vetur og sumar 1729, goss er ekki getið en stórt gjóskulag í Bárðarbungukjarna er frá þessu ári.

Elsta hlaup í Jökulsá sem heimildir (Jarðabók) nefna var á dögum Finnboga lögmans í Ási í Kelduhverfi en þar bjó hann frá 1467. Vera má að í Bárðarbungueldstöðinni hafi einhver gosvirkni orðið samtímis gosinu á Veiðivatnarein 1477 og valdið jökulhlaupi. Yngsta hlaup sem heimildir tengja eldgosin kom 1902, þegar hlaup kom í Skjálfafljót (Sigurður Þórarinnsson, 1974) en gjóskulag er ófundið. Óvíst er hvort jökulhlaup árið 1655 í Jökulsá

á Fjöllum tengist eldvirkni á Bárðarbungukerfi en gjóskulag frá Grímsvötnum er með reiknað gosár 1653.

Vatnavextir eða hlaup í Þjórsá öðru hverju um sumarið 1766 voru taldir stafa af gosi í Vatnajökli í júlí það ár, eignað Grímsvötnum sem Sigurður Þórarinnsson (1974) taldi þó óvíst. Ekki er getið um tjón af völdum vatnavaxtanna. Gjóska frá því ári, með einkenni Bárðarbungukerfis og Heklukerfis, er í Bárðarbungukjarna, en líklegt er að gjóskan úr Heklugosinu, sem hófst í apríl 1766, og gosi á Bárðarbungukerfinu innan jökuljaðars það sama sumar hafi blandast saman.

Leit í annálum að vatnavexti í Þjórsá þau ár þegar vitað er um eldvirkni á jökulpakta hluta Bárðarbungukerfisins skilaði engu nema hvað „Þrír menn drukknuðu af ferju á Þjórsá“ árið 1712 (Fitjaannáll og Hestsannáll, Annálar 1400–1800 II, 385 og 564) en óvíst hvort tengsl séu við eldvirknina 1711/12.

Vatnavextir komu í Þjórsá og Skaftá meðan á Skaftáreldum stóð 1783 og einnig fyrir Skaftárelda (Þorvaldur Thoroddsen 1924). Það er því ekki einhlítt að hlaup eða vatnavextir í Þjórsá bendi til eldgosa á Bárðarbungukerfi. Vafalaust hafa fleiri eldgos eða tengd umbrot valdið hlaupum þótt þau séu ekki skráð.

Forsöguleg hlaup í Jökulsá á Fjöllum tengd eldvirkni á Bárðarbungukerfi eru þekkt frá tímabili fyrir um 7.100 árum þar til fyrir um 2.200 árum. Þá er átt við hlaup sem báru fram glerríkt set með einkennum Bárðarbungukerfis og tengjast gjóskulögum með samsvarandi efnasamsetningu (Guðrún Larsen o.fl., 2026). Ummerki eftir 20 hlaup eru þekkt, öll nema þrjú frá tímabilinu 7100–4100. Í 15 þessara hlaupa er Bárðarbungugler ríkjandi. Mat á hámarksrennsli er á bilinu 30–100 þúsund m<sup>3</sup>/s. Tvö yngstu hlaupin eru um 3.000 og 2.200 ára gömul. Eldra mat á stærð yngsta hlaupsins er 400–500 þúsund m<sup>3</sup>/s (Haukur Tómasson, 1973).

Ummerki um forsöguleg hlaup til vesturs og suðurs vegna eldvirkni á Bárðarbungukerfi eru fá. Flóð frá Sylgjujökli fyrir um 7200 árum gæti tengst jökulhlaupi (Elsa G. Vilmundardóttir o.fl., 1999a). Aðeins sáust ummerki setflutninga en engin ummerki um rof. Vatnsmagn virðist því ekki hafa verið mikið.

Setlag undir Þjórsárhraunum sem tengt hefur verið forsögulegu hlaupi er að mestu gler með Grímsvatnaeinkennum (Elsa G. Vilmundardóttir o.fl., 1979), eins og sandar undir Þjórsárhraunum og meðfram Ytri-Rangá (Guðrún Larsen, óbirt gögn) og hafa líklega borist fram þegar ísaldarjökklar hörfuðu af svæðinu.

#### **2.2.4 Jökulhlaup til suðurs og vesturs**

Miðað við gossögu Bárðarbungu og að teknu tilliti til allra þátta sem eldvirkni á jökulpakta hlutanum fylgir eru minnstar líkur á jökulhlaupum til vesturs og suðurs. Líklegast er að bræðsluvatn sem leitar til vesturs frá gosi á jökulpakta hluta kerfisins, fari í Köldukvísl og/eða Skjálfafljót.

Eldgos í norðvesturhlíðum Bárðarbungu yrðu undir þunnum jökli sem takmarkar magn hlaupvatns. Gjóskubykkt næst eldstöðvunum getur skipt metrum eins og gjóskan á Vikrakambi er dæmi um. Vatnaskil Köldukvíslar og Skjálfafljóts eru við Bárðarjökul.

Líklegt er að hlaupvatn beri með sér vikur og sá hluti sem fer í Köldukvísl getur borist í Hágöngulón.

Eldgos undir Köldukvíslarjökli á gossprungum „í framhaldi“ af gossprungum Tröllahrauns og Bryðjuhrauns (Elsa G. Vilmundardóttir o.fl., 1999a, 1999b) yrðu undir 100–300 m þykkum jökli (Helgi Björnsson o.fl., 1992).

Eldgosið í Gjálpi 1996 (Mynd 2.8) er talið hafa stafað af kvikuhlaupi til suðurs frá Bárðarbungu og er sú túlkun byggð á mikilli jarðskjálftavirkni og aflögun auk merkja um ísbráðnun í suðvesturhorni bungunnar (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2004). Jafnframt hafi kvikan stungist inn í ísúra leif af kviku sem væntanlega hafði setið þar síðan í gosinu norðan Grímsvatna 1938. Þessi túlkun er byggð á því að gjóskan sem kom upp á yfirborð í litlu sprengigosi, ber að mestu einkenni Grímsvatna (Olgeir Sigmarsson o.fl., 2000) en nokkur glerkorn (<2%) sem greind hafa verið úr gjóskunni eru með Bárðarbungusamsetningu (Irma Gná Jóngeirsdóttir, 2022). Hlaupvatnið rann til suðurs um Grímsvötn til Skeiðarársands.

Ekki er vitað um eldgos innan Bárðarbunguöskjunnar á sögulegum tíma. Eins og samantektin hér að framan ber með sér hafa þær gosstöðvar sem þekktar eru verið á sprungureinunum til suðvesturs (1766), suðurs (Gjálpi) og norðurs/norðausturs (Greip).

Sé horft lengra aftur, verður að teljast líklegt að komið hafi tímabil með gosum innan Bárðarbunguöskjunnar. Vegna stærðar hennar og dýpis gæti hafa safnast þar fyrir mikið vatn, e.t.v. með svipuðum hætti og gerst hefur í Grímsvötnum síðustu aldir (Sigurður Þórarinnsson, 1974; Helgi Björnsson, 1988). Er það líkleg skýring á stórhlaupunum í Jökulsá á Fjöllum sem ummerki hafa fundist um frá tímabilinu fyrir 7100 til 2200 árum.

Í ljósi þess hve virkt eldstöðvakerfi Bárðarbungu hefur verið, verður að gera ráð fyrir að eldgos geti orðið í jökli á sprungureinunum til norðurs og norðausturs, til suðvesturs og í hlíðum Bárðarbungu að norðvestan. Auk gosa á sprungum sem væru í beinu framhaldi af nýlegum gossprungum á Veiðivatnarein (t.d. Tröllagígum 1862–64), geta gos á vatnasviði Köldukvíslar orðið nokkru austar þar sem ís er um eða yfir 600 m þykkur og aðstæður líkar og við Gjálpi. Ekki er hægt að útiloka gos í suðvesturhorni Bárðarbunguöskjunnar, þar sem ísþykkt er einnig mjög mikil. Ef gos þar yrði af svipaðri stærð og t.d. Kötlugosið 1918, myndi það valda hamfarahlaupi (rennsli um eða yfir 100.000 m<sup>3</sup>/s). Líkur á slíkum atburði verða að teljast mjög litlar en nauðsynlegt er að kanna hver áhrifin yrðu á vatnasvæði Þjórsár, og Suðurlandsundirlendi.

Nánar er fjallað um mögulega legu gossprungna í kafla 3.2. Þar er m.a. kort sem sýnir ísþykkt í norðvesturhluta Vatnajökuls, skiptingu í vatnasvið, hvar gossprungur gætu legið og hvaða sviðsmyndir mögulegra gosa eru notaðar í greiningu á ísbráðnun og stærð hlaupa sem gosin gætu valdið.

## 3 Aðferðir

### 3.1 Landlíkanið ÍslandsDEM og leiðréttingar vegna vatnafræðilegra reikninga

#### 3.1.1 Landlíkanið

Nákvæmt, reitskipt landlíkan er frumskilyrði þess að unnt sé að framkvæma raunhæfa straumfræðilega reikninga á framgangi jökulhlaupa og annarra flóða sem fylgja farvegum vatnsfalla og flæmast yfir stærri svæði þegar um stórhlaup er að ræða. Í þessu verkefni hefur verið notast við landlíkanið ÍslandsDEM<sup>2</sup> (Landmælingar Íslands, 2020), búið til úr eftirtöldum landhæðargögnum sem samanlagt þekja allt Ísland:

ArcticDEM landlíkanið er unnið af Polar Geospatial Center við Minnesota-háskóla og nær yfir allt Norðurskautssvæðið norðan við 60°N<sup>3</sup> (Porter et al., 2018). Líkanið er unnið úr myndpörum teknum af WorldView gervitunglunum á árunum 2009–2015. Greiniahæfni myndanna er 31–46 cm og minnstu reitir landlíkansins 2x2 m. Líkanið deilir því öllu Íslandi upp í 4 m<sup>2</sup> reiti og gefur hverjum slíkum reit eitt hæðargildi. ArcticDEM er aðgengilegt til niðurhals í misstórum ræmum fyrir ákveðnar dagsetningar. Margar myndræmur af tilteknu svæði, teknar á mismunandi árum, eru notaðar við gerð hæðarlíkansins og þannig má fækka mjög villum af völdum skugga, snjóskafla eða skýja.

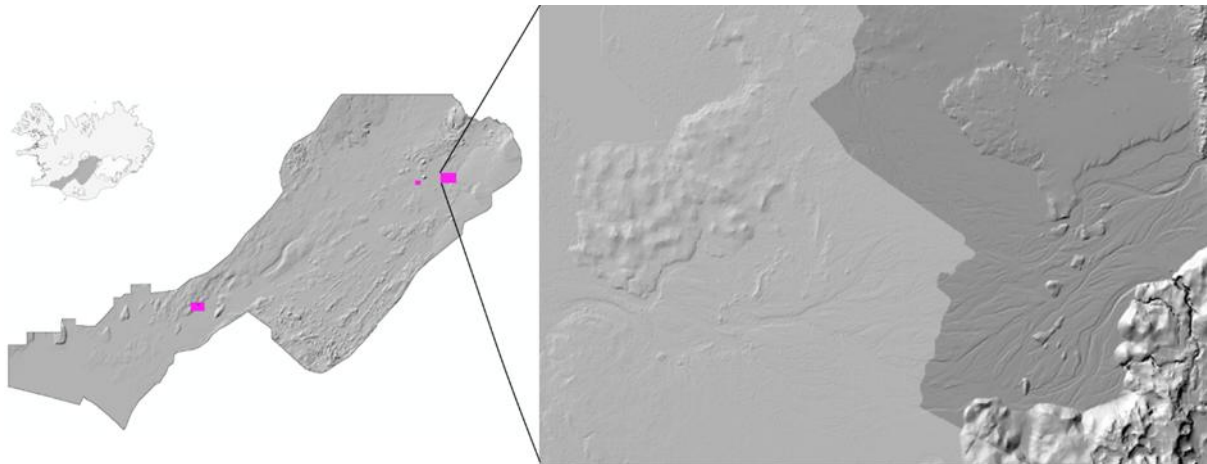
LiDAR gögn af jöklum og svæðum næst þeim var safnað með flugleysimælingum yfir landinu á árabílinu 2008–2013 (Tómas Jóhannesson o.fl., 2013). Flatarmál mældra svæða var samtals 15.000 km<sup>2</sup> og alls náðist að mæla 90% af heildarflatarmáli jökla landsins. Fyrirtækið TopScan GmbH í Þýskalandi sá um mælingarnar með Optech ALTM 3100 leysiskanna, í samstarfi við Veðurstofu Íslands, Jarðvísindastofnun, Landmælingar, Landsvirkjun og Vegagerðina. Mælt var úr 2500 m hæð á línunum með 1200 m millibili. Að jafnaði náðist ein mæling á hverjum 3 m<sup>2</sup> og úr niðurstöðunum var útbúið landlíkan með reitastærðina 5x5 m. Einnig var útbúið 2x2m líkan á vegum Landmælinga Íslands. Í þessu verkefni nýtast fyrst og fremst mæligögn frá svæðinu framan við vestanverðan Vatnajökul. Sjá dæmi um samsetningu landlíkana á því svæði á Mynd 3.1.

Við hættumat vegna flóða í Ölfusá var útbúið landlíkan fyrir svæðið umhverfis Hvítá og Ölfusá úr loftmyndum teknum árin 2007–2009 (landlíkan Samsýnar). Það er talið nákvæmara í neðri hluta Hvítár/Ölfusár en ÍslandsDEM líkanið og var því ákveðið að skeyta því við hið stærra líkan af Þjórsársvæðinu og nágrenni. Auk gróðurs voru byggingar fjarlægðar úr gögnunum í Samsýnarlíkaninu (Pagneux o.fl., 2019).

---

<sup>2</sup> Sjá: <https://www.pgc.umn.edu/news/arcticdem-mosaic-4-1-release-august-2023/>

<sup>3</sup> LiDARGögn af yfirborði Surtseyjar eru hluti af ÍslandsDEM en koma að sjálfsögðu ekki við sögu í þessu verkefni.



*Mynd 3.1. Á efra svæðinu er landlíkanið samsett úr ArcticDEM og Lidar gögnum. Dökkgráa svæðið hægra megin er úr Lidargögnum. Svæðið á myndinni er milli vesturjaðars Köldukvíslarjökuls og Hágöngulóns.*

Hæðargildi líkansins, sem miðast við sporvölu WGS84<sup>4</sup>, voru umreiknuð yfir í Landshæðarkerfið 2004 með því að draga frá láflatarfrávik reiknað af Landmælingum Íslands (2011).

Villur koma fyrir í flestum landlíkönum og er nauðsynlegt að laga þær fyrir notkun í flóðareikningum. Eyður koma fyrir og eins óeðlilegir hólar og tindar og má nota útreikninga á krappa landforma (e: landform curvature) til að greina slík frávik (Pike o.fl., 2009)). Enn fremur er landlíkan saman sett úr mörgum ræmum og þarf að gæta þess að engar misfellur komi fram þar sem jaðrar þeirra mætast.

Vegir eru mjög víða upphleyptir og koma þannig fram í landlíkönum en brýr koma hins vegar fram sem stíflur í farvegum vatnsfalla og þarf þar að lagfæra landlíkanið svo hlaupvatn eigi greiða leið gegnum brúarstæði í vatnafræðilegum líkanreikningum.

Í landlíkani getur óeðlilegur hrjúfleiki komið fram í farvegum vatnsfalla. Útreikningur á hæð vatnsyfirborðs í farvegi nýtir margar tunglmyndir og byggist á að leita uppi myndpunkta (e: pixels) sem sameiginlegir eru tveimur myndum. Straumkast í vatninu og glampar á yfirborði vatnsins geta ruglað algrímið (reikniregluna) sem reiknar landlíkanið og geta þá komið fram óeðlilegar misfellur. Yfirborð stöðuvatna getur komið óeðlilega út af svipuðum ástæðum. Í verkefni þessu er sérstök áhersla lögð á að landlíkanið sýni yfirborð lóna og vatnsfalla sem sléttast og þar með fullt af vatni. Landhæð í árfarvegum lýsir sem sagt ekki botni árinna heldur vatnsborði árinna við rennsli nærri meðalrennsli. Það þarf því að líta svo á að það sé ákveðið grunnrennsli í ám sem straumfræðireikningarnir komi svo ofan á.

Síðar í kafla 3.1 er gerð grein fyrir lagfæringum á landlíkaninu, sem nær yfir farvegi (eða hluta af farvegum) Köldukvíslar, Þjórsár, Tungnaár, Ytri-Rangár, Hvítár og Ölfusár.

---

<sup>4</sup> WGS84 = World Geodetic System 1984 er alþjóðlegur landmælingastaðall kortagerðarmanna og siglingafræðinga.

Straumfræðilíkonin HEC-RAS og GeoClaw voru notuð við prófanir fyrir og eftir endurbætur á landlíkaninu.

### 3.1.2 Vatnafarslega rétt landlíkan

Talað er um að landlíkan sé vatnafarslega rétt (e: hydrologically conditioned) ef yfirborð landsins, sem líkanið lýsir, skilar vatni réttar leiðir til sjávar eða í þekktu pytti (e: sinks) í landslaginu. Til eru sérstök reiknitól í landfræðiforritum (GIS-forritum) sem útbúa rennslislínur (e: drainage network) og var ArcHydro tólið frá ESRI<sup>5</sup> notað í þessu verkefni. Vísað er í nánari lýsingu á ArcHydro í greinargerð um vatnagrunn Veðurstofu Íslands (Bogi Brynjar Björnsson og Esther Hlíðar Jensen, 2021). Tilraunir með ArcHydro leiddu í ljós nauðsyn leiðréttinga á farvegum í landlíkaninu.

Líkaninu var skipt í tvennt, annars vegar hálenda hluta vatnasviðsins og hins vegar hinn láglenda. Línan sem skiptir líkaninu í tvennt liggur frá vestri til austurs og sker miðbik Sultartangalóns og sunnanvert Þórisvatn. Útbúið var þríhyrningalíkan (e: Triangulated Irregular Network, TIN) af landlíkaninu til að loka eyðum sem greinst höfðu og TIN-líkaninu síðan umbreytt í rastagögn (þ.e. reitskipt gögn) til innlestrar í straumfræðilíkon.

### 3.1.3 Prófunarkeyrslur með HEC-RAS straumfræðilíkaninu

Tvær tilraunakeyrslur voru gerðar til að kanna gæði landlíkansins, önnur á efra svæðinu og hin á því neðra. Fyrst var rennsli reiknað á 20x20 m neti sem nær yfir um 7 km breiða rönd frá Hágöngulóni niður með Köldukvísl og síðan gegnum Sauðafellslón niður í Þórisvatn. Í keyrslu með grunnrennsli var gert ráð fyrir 100 m<sup>3</sup>/s rennsli í Köldukvísl sem kæmi saman við jafnmikið vatnsmagn úr Illugaverskvísl. Síðan var hermd rennslishegðun 10.000 m<sup>3</sup>/s hlaups á hinum 40 km langa farvegi milli Hágöngulóns og Þórisvatns. Þessi prófun sýndi óeðlilegan grófleika og straumköst í farveginum vegna áðurnefndra galla á landlíkani.

Á neðra svæði var reiknað sumarrennsli Þjórsár (400 m<sup>3</sup>/s) á 30x30 m reiknineti sem nær frá virkjanasvæðinu ofan Búrfells niður fyrir Þjórsárdal. Könnuð voru þversnið á svæðinu milli Grensháls (nyrst í Skarðsfjalli) sunnan Þjórsár og Miðfells norðan árinna. Einnig voru athuguð þversnið við Gaukshöfða. Á þessu svæði virðist sem gróður á bökkum árinna hafi áhrif á yfirborð landlíkansins.

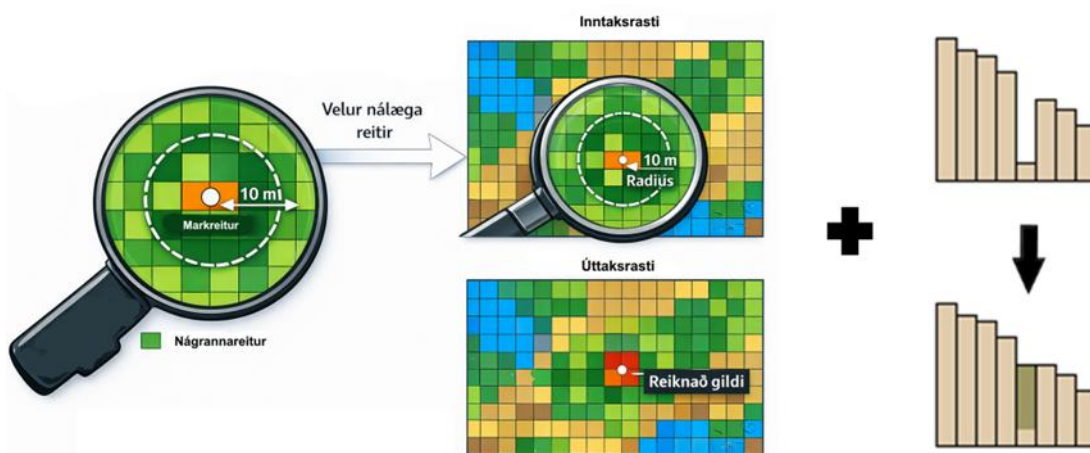
### 3.1.4 Aðferð við lagfæringu árfarvega í landlíkani

Við hermanir flóða og hlaupa er gert ráð fyrir að hlaupvatn renni ofan á farvegi sem þegar er fullur af vatni og að yfirborð hans sé slétt. Óslétt yfirborð farvegar í landlíkani veldur því skekkju í hermuninni sem eykst með minnkandi rennsli. Því er nauðsynlegt að slétta sem mest úr ójöfnum þeim í farvegi landlíkans sem orsakast af endurkasti ljóss frá vatnsfletinum og hreyfingum vatnsins.

---

<sup>5</sup> ESRI = Environmental Systems Research Institute, framleiðandi ArcGIS hugbúnaðarins.

Unnt er að fjarlægja eyður og óeðlilega toppa í landlíkani með handvirkum leiðréttingum en sú aðferð er tímafrek þegar unnið er með stór svæði. Í ArcGIS forritinu er völ á leiðréttingatóli sem velur tiltekna myndeiningu (pixel) líkansins og reiknar meðalhæð nálægra eininga með miðpunkta innan við 10 m rafiús frá miðu hinna völu eininga. Með þessari aðferð má velja þröskuldsgildi sem leiða til þess að fyllt er í óeðlilega djúpar lægðir (=eyður í líkaninu) eða óeðlilegir toppar lækkaðir. Mynd 3.2. Skýringarmynd sem sýnir breytingar sem „focal statistics“ og „fill“ leiðréttingartólin gera á reitskiptu líkani (rasta). „Focal statistics“ tólið velur næstu nágranna hvernar myndeiningar (e. pixel) ( í þessu tilfelli fundnir með hring með 10 m rafiús) og reiknar meðaltal þeirra. „Fill“ tólið fjarlægir lægðir af rasterfleti. Lægð er reitur eða hópur af reitum umkringdur hærri hæðargildum, þar sem vatn myndi „lóna“ og ekki renna út. skýrir þetta nánar. Útbúin var sjálfvirk aðferð til að slétta farvegi vatnsfalla í líkaninu.



Mynd 3.2. Skýringarmynd sem sýnir breytingar sem „focal statistics“ og „fill“ leiðréttingartólin gera á reitskiptu líkani (rasta). „Focal statistics“ tólið velur næstu nágranna hvernar myndeiningar (e. pixel) ( í þessu tilfelli fundnir með hring með 10 m rafiús) og reiknar meðaltal þeirra. „Fill“ tólið fjarlægir lægðir af rasterfleti. Lægð er reitur eða hópur af reitum umkringdur hærri hæðargildum, þar sem vatn myndi „lóna“ og ekki renna út.

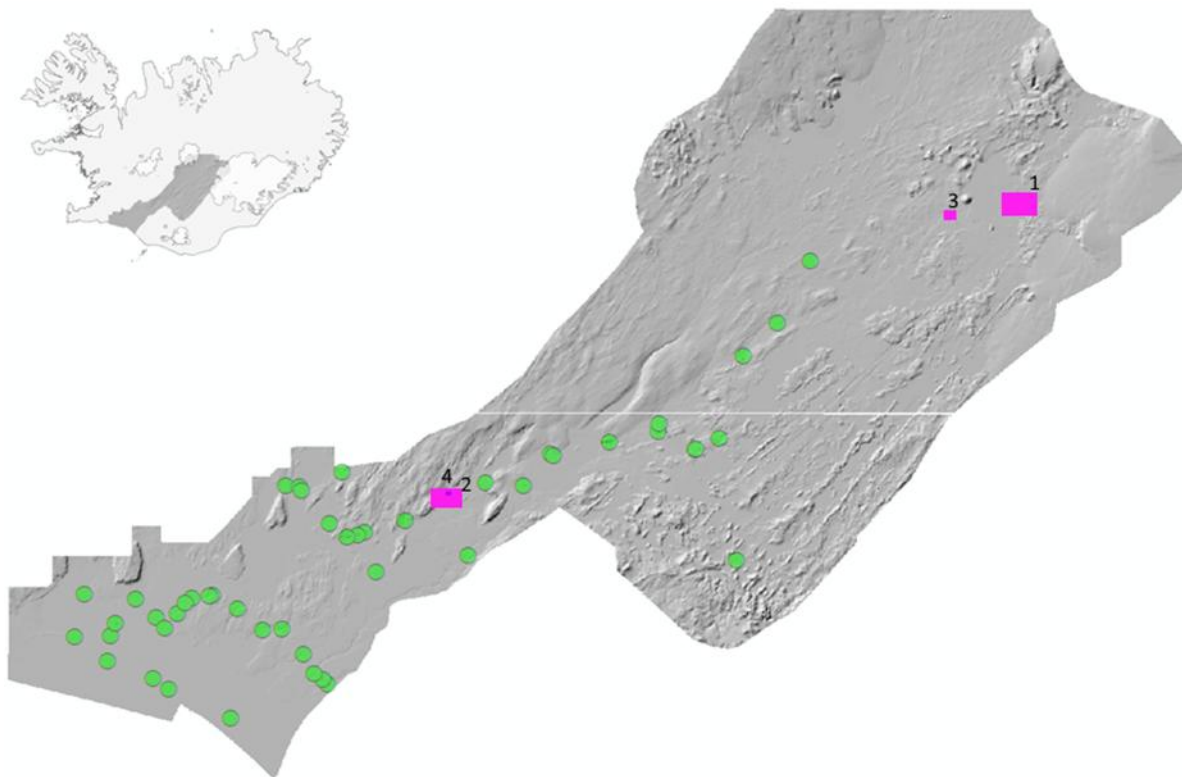
### 3.1.5 Lagfæringar á farvegum

Útlínur farvega voru afmarkaðar með sjálfvirkri myndgreiningu á nýlegum loftmyndum sem Veðurstofa Íslands hefur aðgang að í gegnum vefkortapjónustu Loftmynda ehf. Birtutölur myndeininga voru klasagreindar (Jenks, 1967; Emmanuel Pagneux o.fl., 2018) og birtutöluklasar sem túlkaðir voru sem farvegir voru vistaðir. Greinihæfni þessarar farvegakortlagningar er nærri upplausn hæðarlíkansins, þ.e. ~0,5 m að meðaltali.

Reitskipt svæði sem innihélt útlínur farvega var "klippt" út úr hæðarlíkaninu. Áður nefndri sjálfvirkri leiðréttingu ("focal statistics", sjá Mynd 3.2) var svo beitt á farveginn og þannig jafnaðar út óeðlilegar ójöfnur. Einnig var handvirkum leiðréttingum beitt þar sem þess reyndist þörf.

Í landlíkönum koma brýr yfir djúpum farvegum fram sem stíflur eða fyrirstöður sem sjálfvirka leiðréttingin nær ekki að fjarlægja. Þarf þá að beita handvirkri leiðréttingu til þess að þar sé opin rennislíeið undir komi til hlaups. Þeir bútar landlíkans sem innihalda brýr

eru leiðréttir með því að útbúa safn hæðarpunkta (punktaský) sem nær yfir bótana og lagfæra svo þær einingar punktastöfnsins sem sýna yfirborð brúarinnar. Í stað yfirborðs brúarinnar er sett landslagið undir brúnni og bóturinn settur inn í landlíkanið á ný með þeirri breytingu. Staðsetning brúa á reiknisvæðinu er sýnd á Mynd 3.3.

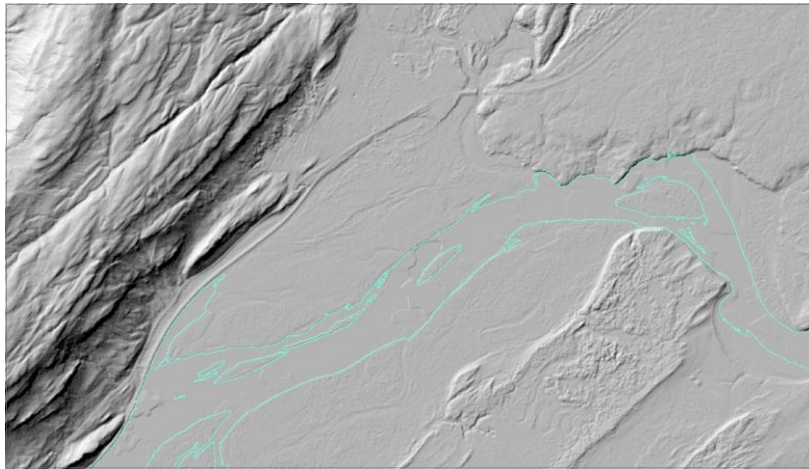
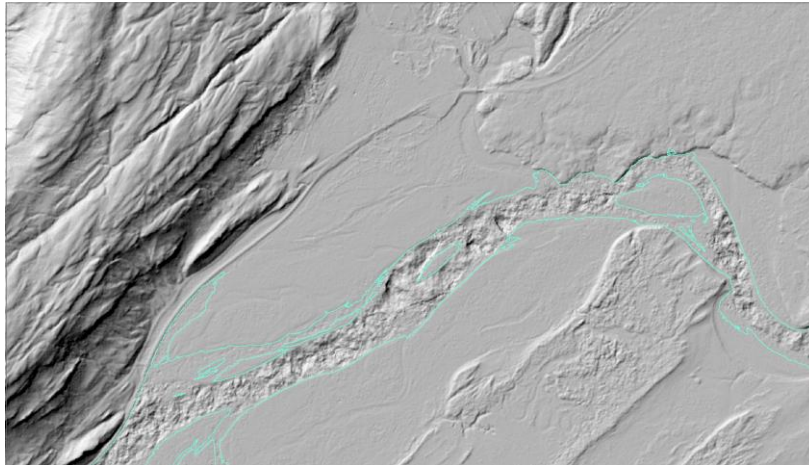


Mynd 3.3. Alls eru 49 brýr á svæðinu sem landlíkanið þekur skv. upplýsingum frá Vegagerðinni. Þrjár þeirra eru á efra svæðinu og 46 á neðra svæðinu; hluti hinna síðarnefndu er þó utan áhrifasvæðis jökulhlaupa frá Bárðarbungu. Hvíta línan markar skiptingu milli efra og neðra svæðis á landlíkaninu. Bleiku númeruðu fletirnir vísa í svæði sem sýnd eru á Myndum 3.1 = 1, 3.4 = 2, 3.5 = 3 og 3.6 = 4.

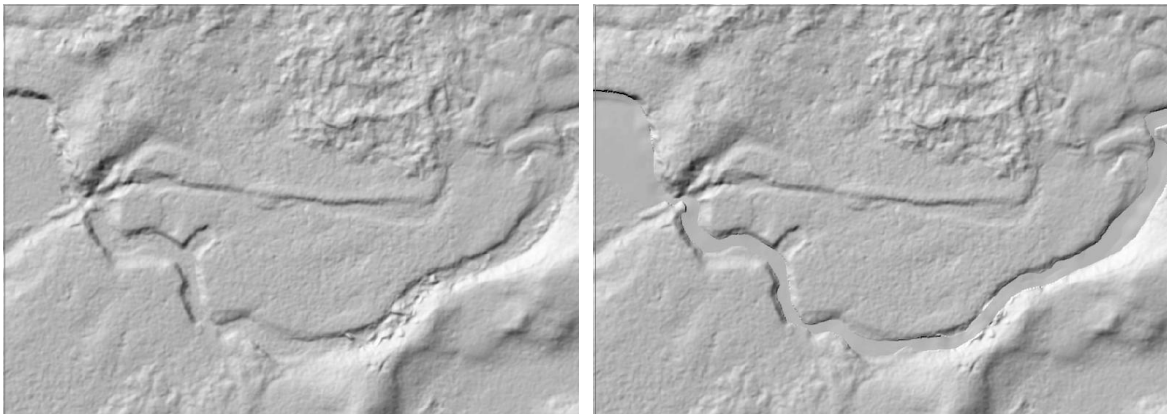
### 3.1.6 Leiðréttingar á einstökum svæðum

Mynd 3.4 sýnir dæmi um leiðréttingu farvega Þjórsár með sjálfvirku aðferðinni. Dæmi þetta er frá neðra svæðinu, þar sem meiri leiðréttinga er þörf, því þar breiðkar Þjórsá að mun og þarf því að leiðrétta stærri vatnsflöt.

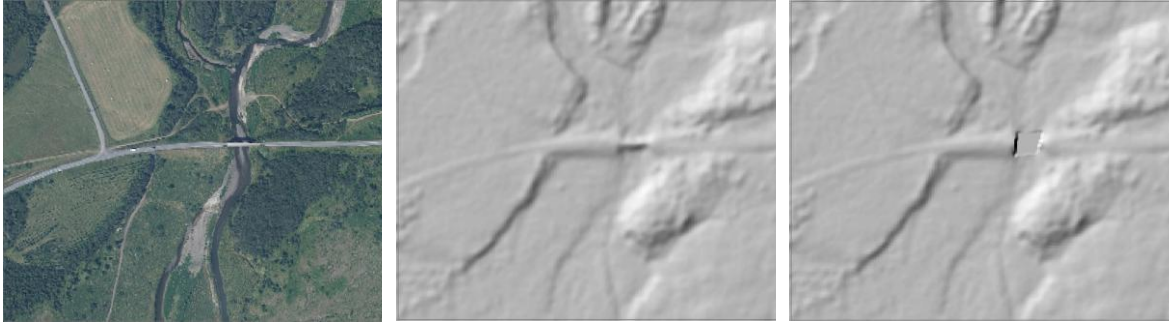
Á efra svæðinu eru farvegir betur afmarkaðir og minna um ójöfnur í landlíkani en á neðra svæðinu, af völdum endurkastis ljóss frá vatnsfleti. Þó eru slík dæmi á efra svæðinu, sjá t.d. dæmi um lagfæringu á farvegi Köldukvíslar á Mynd 3.5. Á hluta efra svæðisins er ArcticDEM og LiDAR líkönunum skeytt saman (Mynd 3.1). Upplausn LiDARlíkansins er betri en á því eru skuggar vegna skýja og brattrra hlíða algengari og þurfti því að leiðrétta staka bóta í landlíkaninu á slíkum svæðum.



Mynd 3.4. Landlíkan af ármótum Þjórsár og Sandár. Efri myndin sýnir óleiðréttu farvegi en hin neðri sömu farvegi eftir leiðréttingu. Ójöfnur í farvegnum hverfa við leiðréttinguna. Ljósbláir ferlar afmarka farvegina. Sjá svæði 2 á Mynd 3.3. Brúin yfir Sandá sést í líkaninu ofarlega fyrir miðri mynd (sjá einnig Mynd 3.6).



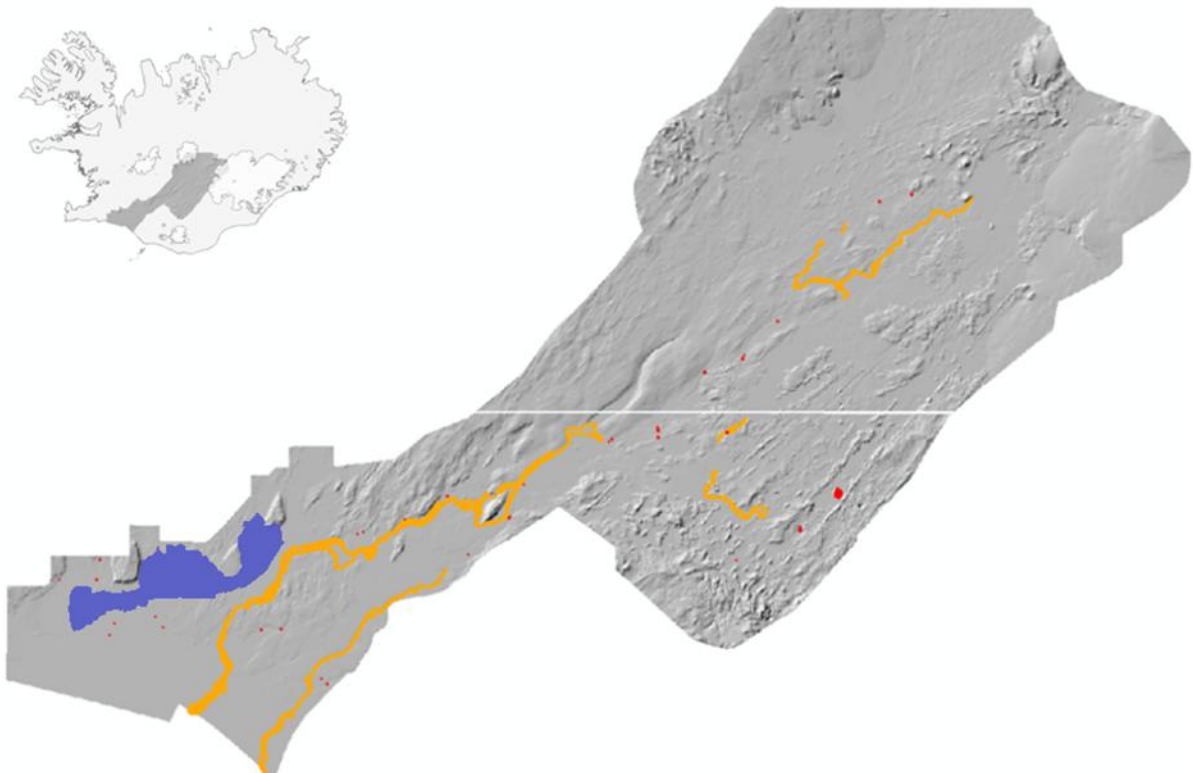
Mynd 3.5. Hluti farvegar Köldukvíslar fyrir (t.v.) og eftir (t.h.) leiðréttingu. Sjá svæði 3 á Mynd 3.3.



*Mynd 3.6. Brúin yfir Sandá fyrir og eftir leiðréttingu líkans. Myndin til vinstri er loftmynd af brúnni, miðmyndin sýnir óleiðrétt landlíkan og hægri myndin sýnir landlíkan eftir leiðréttingu þar sem brúin hefur verið fjarlægð. Sjá svæði 4 á Mynd 3.3 (en brúin sést einnig á mynd 3.4).*

Mynd 3.6 sýnir leiðréttingu landlíkans neðarlega í farvegi Sandár í Þjórsárdal. Í fyrstu útgáfu hæðarlíkansins kemur brúin fram sem stífla í farvegi árinna, sem fjarlægð er með leiðréttingunni. Þar með opnast rennslisleið í vatnafræðilegu líkani.

Þegar búið var að leiðrétta farvegi og ljúka bútasauri var öllum bútum steypt saman en skipting um efra og neðra svæði látin halda sér. Sjá Mynd 3.7. Svæðið sem Samsýnarlíkanið þekur sést sem blár flötur vinstra megin á myndinni. Leiðréttir farvegir sjást sem rauðgular útlínur. Rauðir flekkir sýna staðsetningu búta sem leiðréttir voru.

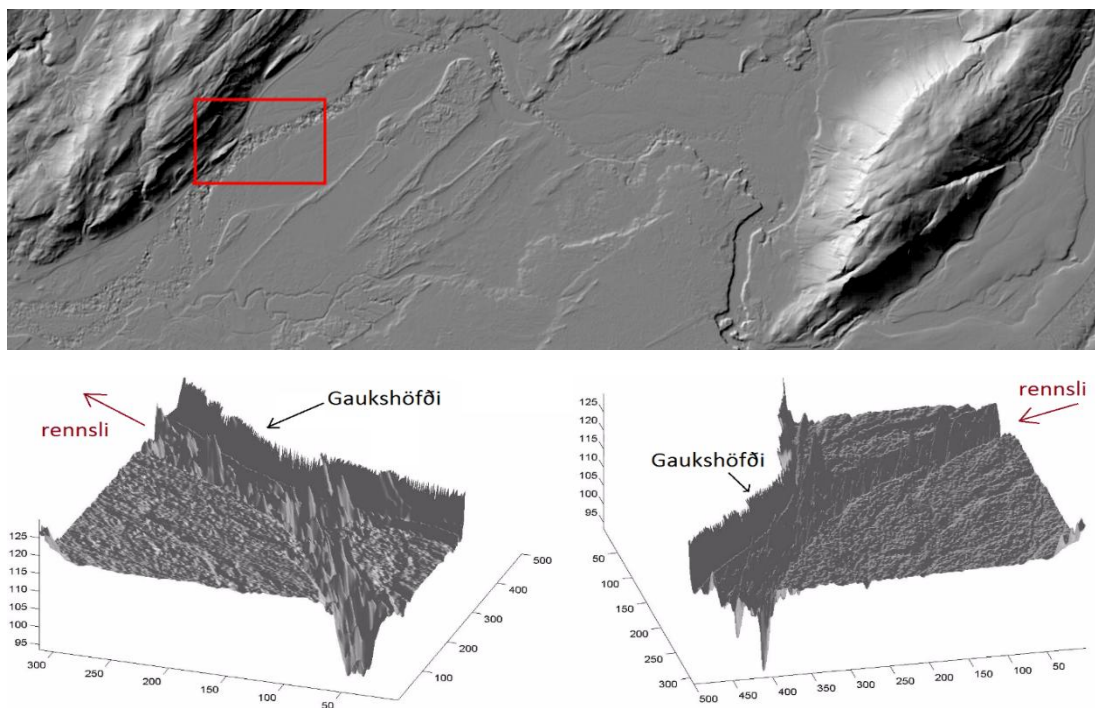


*Mynd 3.7. Samsett leiðrétt landlíkan af efra og neðra svæði. Rauðgular línur eru útlínur farvega sem voru leiðréttir. Blár flötur er svæðið sem Samsýnarlíkan þekur. Rauðir flekkir eru svæði þar sem landlíkanbútar voru leiðréttir.*

### 3.1.7 Tilraunir með GeoClaw fyrir og eftir leiðréttingu landlíkans

Áhrif skemmda í landlíkaninu voru könnuð með GeoClaw straumfræðiforritinu. Sumir þessara tilraunareikninga eru ekki nauðsynlega rökréttir í vatnafræðilegum skilningi en nýtast vel til að meta áhrif hrjúfleika farvega á rennslið og árangur af áðurnefndum lagfæringum farvega.

Mynd 3.8 sýnir prófunarsvæði í farvegi Þjórsár undir Gaukshöfða, skammt neðan Búrfells. Farvegurinn er sýndur eins og hann kemur fram í landlíkani fyrir leiðréttingu og kemur hrjúfleikinn fram sem allt að 30 m háir toppar er teygja sig upp úr farveginum. Væru þeir raunverulegir mundu þeir veita mótstöðu gegn vatnsrennsli og kom slík mótstaða fram í niðurstöðum tilraunareikninga: Þegar hleypt var 240 m<sup>3</sup>/s rennsli í farvegin ofan Bjarnalóns fór vatnið 30 km leið niður að Hagaey á 15.5 klst fyrir leiðréttingu farvegar, en fór 35 km eftir leiðréttingu á jafnlöngum tíma. Rennlishraðinn jókst því um 17%. Sambærileg hraðaaukning fékkst í tilraun með rennslið 430 m<sup>3</sup>/s. Einnig breiddi hlaupvatn meira úr sér á flatlendum svæðum í rennslistilraun fyrir leiðréttingu farvegar.



Mynd 3.8. Dæmi um hrjúfleika („hóla og dældir“) í landlíkani fyrir leiðréttingu í farvegi Þjórsár við Gaukshöfða. Hér er z-ás réttur (hæð yfir sjávarmáli), hins vegar eru x og y-ás taldir í reitum landlíkansins (2x2 m) og því þarf að margfalda gildin með 2 til að fá fram metra (t.d. “200” eru 400 metrar, o.s.frv.).

## 3.2 Sviðsmyndir gosa og hlaupa

Mat á ísbráðnun sem orðið getur í eldgosum í jöklum er að mestu skorðað með gögnum um gos sem orðið hafa á hér á landi, einkum eftir 1996, en einnig nokkrum eldri gosum. Á þeim gögnum byggjast einföld líkön sem tengja saman stærðir eins og íspykkt, lengd gossprungu og ákafa gosanna. Gögn um bráðnun þar sem umtalsverðar skorður eru á stærð og ákafa atburða ná aftur til Kötlugossins 1918 og allt fram til gossins í Grímsvötnum 2011. Varðandi Kötlu 1918 er óvissan mikil en þegar kemur að gosunum í Gjálpi 1996,

Grímsvötnum 1998, 2004 og 2011 og Eyjafjallajökli 2010, er óvissan mun minni vegna samtímamælinga á viðbrögðum jökulsins og stærð jökulhlaupa sem tengjast gosunum.

Yfirlit um ísbráðnun í gosunum er í Töflu 3.1. Þar er annars vegar heildarbráðnun meðan á gosinu stóð og hins vegar mat á hraða ísbráðnunar í fyrsta fasa, sem er yfirleitt 1–3 klukkustundir. Í Gjalpargosinu 1996 eiga tölurnar um hraða bráðnunar við fyrstu þrjá sólarhringa gossins. Það gos varð að langmestu leyti undir mjög þykkum jökli (600–750m) þar sem aðeins um 2% gosefna náði upp úr jöklinum og féll sem gjóska. Til samanburðar féll meirihluti gosefna í Grímsvatnagosunum sem gjóska, á Vatnajökul og nágrenni hans.

Tafla 3.1. Ísþykkt, bráðnun og bráðnunarhraði í völdum gosum í jökli 1918–2011.

| Gos                   | Ísþykkt (m) | Heildar bráðnun í gosi (km <sup>3</sup> ) | Hraði bráðnunar í upphafsfasa (m <sup>3</sup> /s) | Heimildir/byggt á gögnum frá  |
|-----------------------|-------------|---|---|---|
| Katla 1918            | 300–400     | 4–8                                       | ~100.000 – 200.000                                | Tómasson, 1996; Guðmundsson og Högnadóttir 2006                     |
| Gjalp 1996            | 600–750     | 3   | 5.000–8.000                                       | Guðmundsson o.fl., 2004   |
| Grímsvötn 1998        | 50–200      | 0,06                                      | 2.000   | Guðmundsson o.fl., 2000   |
| Grímsvötn 2004        | 150–200     | 0,07                                      | 2.000–4.000                                       | Oddsson o.fl., 2012   |
| Grímsvötn 2011        | 0–200       | 0.10                                      | 2.000–4.000                                       | Guðmundsson o.fl., 2013   |
| Eyjafjallajökull 2010 | 170–200     | 0.22                                      | 1.000–1.500                                       | Magnússon o.fl., 2012, Oddsson o.fl., 2016, Guðmundsson o.fl., 2012 |

~ óvissa varðandi mat á Kötlugosinu 1918 mun meiri en fyrir seinni gosin.

Eins og í fyrri skýrslum þar sem ísbráðnun hefur verið metin (Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005, 2006; Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2015), eru notuð tvö einföld líkön fyrir þunnan ís og það þriðja fyrir þykkann ís.

### 3.2.1 Bráðnun þar sem ís er þunnur (<200 m)

Í gosunum í Grímsvötnum 1998, 2004 og 2011 og Eyjafjallajökli 2010 var ísþykktin breytileg en alstaðar undir 200 m. Hegðun þessara gosa fellur þokkalega að því einfalda líkani að gosið myndi gjá í jökulinn og ísbráðnun sé í hlutfalli við lengd gossprungu. Bráðnunartölur í þessum gosum eru 1–1,5 m<sup>3</sup>/s á hvern lengdarmetra gossprungu. Ef sprunga er t.d. 1.000 m löng hefur bráðnunin verið 1.000–1.500 m<sup>3</sup>/s. Tölurnar eru ekki nákvæmlega áætlaðar en teljast þó þokkalegt mat á stærðarprepi ísbráðnunar fyrir gos undir þunnum jökli (<200 m).

Nánar er fjallað um aðferðirnar í fyrri skýrslum (t.d. Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2006) og er hér aðeins gefið stutt yfirlit, og vísað til fyrrgreindrar skýrslu um nánari umfjöllun og bakgrunn.

Mynd 3.9 sýnir fyrra líkanið af tveimur sem notað er fyrir myndun ísgjár í þunnum jökli (<150–200 m). Þau fjögur tilfelli sem lögð eru til grundvallar eru gosin á Deception Island við Suðurskautslandið 1969, í Grímsvötnum 1998, 2004 og Eyjafjallajökli 2010 (Tafla 3.1). Gjáin sem sem myndaðist í ísinn yfir gossprungunni í upphafsfasa þessara gosa víkkaði um

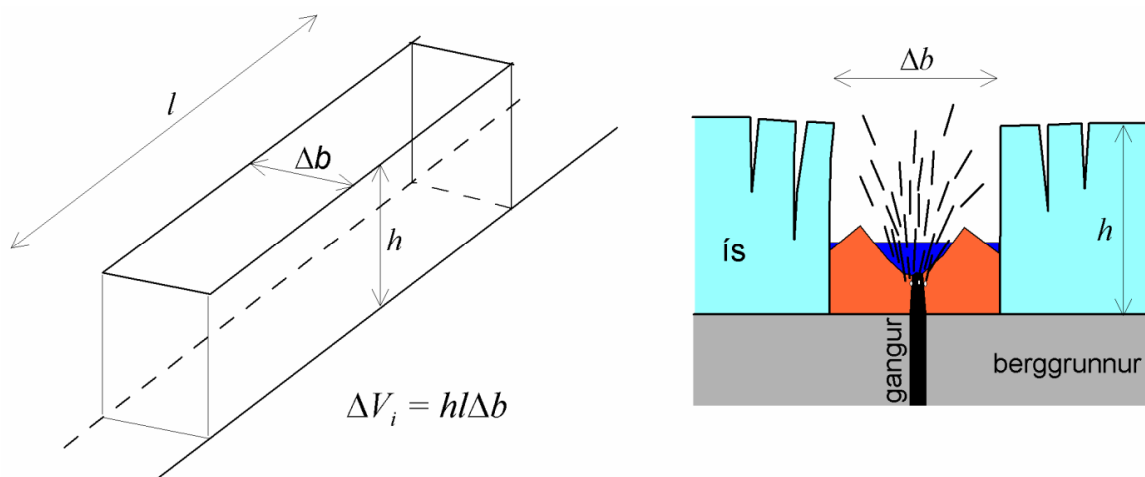
0.9–1.4 sentimetra á sekúndu (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2015, Tafla III-3). Til að reikna magn bræðsluvatns á tímaeiningu er notuð eftirfarandi jafna:

$$Q_1 = \frac{\rho_i}{\rho_w} hl \frac{\Delta b}{\Delta t} \quad (3.1)$$

$Q_1$  er vatnsmagn ( $m^3/s$ ) sem bráðnar,  $\rho_i$  er eðlismassi jökulíssins ( $900 \text{ kg}/m^3$ ),  $\rho_w$  eðlismassi vatns ( $1000 \text{ kg}/m^3$ ),  $h$  íspykktin,  $l$  lengd gossprungu,  $b$  er vídd gjárinnar, og  $\Delta b/\Delta t$  er víkkunarhraðinn. Seinna líkanið er enn einfaldara, þar sem reynslutölurnar um bráðnun á lengdarmetra við víkkun ísgjárinnar eru notaðar beint. Þá er vatnsmagnið reiknað sem

$$Q_2 = ql \quad (3.2)$$

Við líkangerðina er hér notað efra gildið,  $q = 1.4 \text{ m}^2/s$  (Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005, 2006; Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2015).



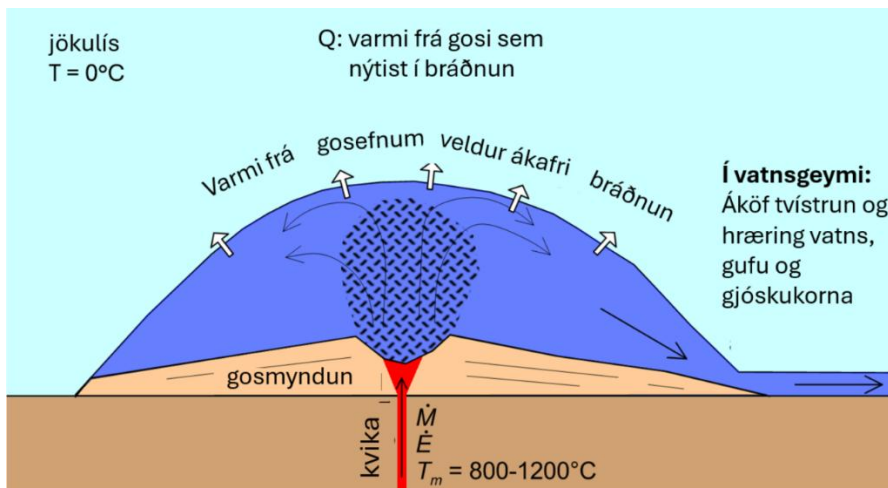
Mynd 3.9. Einfalt líkan af bráðnun þar sem jökulþykkt er undir 200 m (Mynd A1 í Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2006).

### 3.2.2 Bráðnun þar sem ís er þykkur (>200 m)

Gögn um gos í jökli þar sem ís er meira en 200–300 m þykkur koma einkum úr Gjálpargosinu 1996, en einnig eru töluverðar vísbendingar úr Kötlugosum, þar sem ísinn í öskju Kötlu er víðast 300–600 m á þykkt. Í Gjálp leið 31 klukkustund frá byrjun goss þar til það hafði brætt sig gegnum jökulinn, en íspykkt á þeim stað var um 600 m fyrir gosið (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2004). Í Kötlu eru vísbendingar um að þessi tími sé nokkuð breytilegur, að í stærri gosum (t.d. 1918) sé hann varla meiri en 1–2 klukkustundir, meðan hann er allnokkrar klukkustundir í minni gosum (t.d. 1860 og 1823). Við þessar aðstæður, þar sem ísinn telst þykkur, ræðst hraði bráðnunar fyrst og fremst af kvikuflæðinu í gosinu. Í öllum ofangreindum gosum virðist tvístrun kvikunnar vera ráðandi ferli. Kvikan snöggkólnar og tvístrast og myndar fínkorna gler. Hraði varmaflutnings frá kvikunni yfir í vatnið umhverfis (bræðsluvatn úr ísnum) ræðst þá af kornastærð glersins. Kornin tapa varma í hlutfalli við  $1/r^2$ , þar sem  $r$  er radíus kornanna. Fyrir korn sem er 1 mm í þvermál er kólnunartíminn um 1 sekúnda, sé þvermálið 1 cm er hann af stærðarþrepinu 100 sek. og fyrir bergmola sem er 10 cm í þvermál fer kólnunartíminn yfir eina klukkustund. Af þessu

leiðir að tvístrun og myndun gjósku sem kemur upp í sprengigosum í jöklum eða berst fram með hlaupvatni er mjög hröð.

Gögn úr Gjálpargosinu (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2004) benda til þess að varmanýtni hafi verið á bilinu 60–80%. Varmanýtnin er það hlutfall varma sem berst nánast samstundis til bræðsluvatnsins sem umlykur gjóskukornin af heildarvarma kvikunnar sem flæðir upp á hverjum tíma. Nýtnin yrði ekki nema brot af þessu þar sem bólstraberg myndast í gosum. Í gosum sem verða undir jökli þar sem kvikan tvístrast, verður bráðnunarhraðinn því í hlutfalli við hve stórt gosið er, þ.e. hve mikil kvika kemur upp á tímaeiningu.



Mynd 3.10. Skematískt líkan af gosi undir þykkum jökli þar sem mjög hraður varmaflutningur verður við tvístrun kviku og 60–80% varmastraumsins nýtist hratt til bráðnunar (uppfærð Mynd III-4 í: Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og Matthew Roberts, 2015).

Varmaflæðið,  $dE/dt$  (J/s) sem nýtist til bráðnunar í þessu tilfalli er reiknað út frá:

$$\frac{dE}{dt} = f \rho_m Q_m C_g \Delta T = f \frac{\Delta M}{\Delta t} C_g \Delta T \quad (3.3)$$

Hér er  $\rho_m$  eðlismassi kvikunnar,  $Q_m$  er kvikuflæðið ( $m^3/s$ ),  $C_g$  er eðlisvarmi, nærri 1000 J/(kg K) og  $\Delta T = T_i - T_f$ , þar sem  $T_i$  er hiti kvikunnar og  $T_f$  er hiti gjóskunnar eftir kólnun. Stuðullinn  $f$  er varmanýtnin, eins og kemur fram hér að framan,  $f = 0,6-0,8$ . Massaflæðið ( $\Delta M/\Delta t$ ) er margfeldi eðlismassa ( $\rho_m$ ) og rúmflæðisins ( $Q_m$ ).

Rúmmál vatns sem verður til vegna bráðnunar á tíma er reiknað sem:

$$Q = \frac{1}{L_i \rho_w} \frac{dE}{dt} = \frac{1}{L_i \rho_w} f \frac{\Delta M}{\Delta t} C_g \Delta T \quad (3.4)$$

Í reikningunum hér á eftir er notast við  $L_i = 334000$  J/kg (bræðsluvarmi íss),  $C_g = 1000$  J  $kg^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ ,  $\Delta T = 1100 \text{ } ^\circ C$  (á vel við um basalt), eðlismassa vatns ( $\rho_w = 1000$   $kg \text{ } m^{-3}$ ) og nýtnistuðullinn  $f = 0,7$ . Rétt er að taka fram að reiknað er með því að hiti íssins sé við frostmark, og að varmi sem berst frá gosefnum nýtist allur til ísbræðslu. Umtalsverður hluti bráðnunarinnar verður yfir hlaupaleiðinni undir jöklinum. Þetta sást m.a. vel í Gjálpargosinu, og í farvegi hlaupvatnsins þaðan út úr Grímsvötnum. Þar var vatnshiti við

gosstað metinn 15–20° (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2004). Hitinn gæti vel hafa verið meiri í sumum öðrum gosum þar sem ákafinn var meiri, t.d. Kötlugosum, þar sem verulegur hluti gosefna berst með bræðsluvatninu undir jöklinum. Varmaskiptin milli íssins og vatnsins eru hröð; hlaupvatn sem rennur undir þykkum jökli er yfirleitt við frostmark þegar það kemur undan jöklinum.

### 3.2.3 Áhrif íss og gosefna

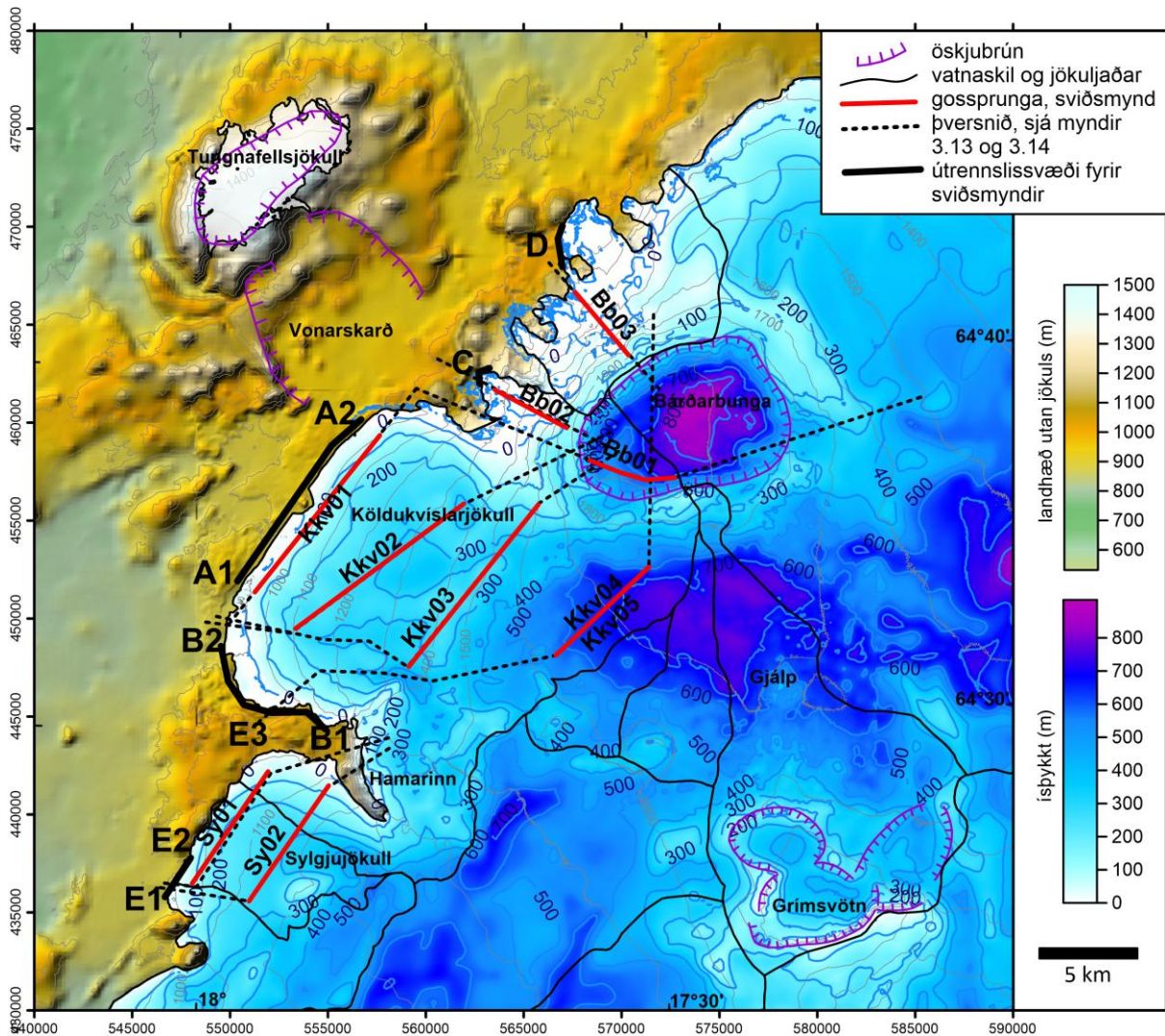
Eins og fram kemur hér að ofan, sýnir reynslan að verulegt magn gosefna (vatnsborin gjóska) getur borist með hlaupvatni í eldgosum. Vatnsborin gjóska getur numið 10–15% af rúmmáli þar sem varmanýtni er góð og gjóskan berst fram með hlaupinu. Þetta á t.d. við um Kötluhlaupin, en Mýrdalssandur er að mestu myndaður sem set flutt fram með hlaupunum sem orðið hafa síðan um landnám (Guðrún Larsen, 2018; Haukur Tómasson, 1996).

Í mörgum hlaupum af völdum eldgosa flytja þau með sér verulegt magn ísjaka, sem brotna úr jökuljaðrinum þegar vatnsflaumurinn brýst fram undan jöklinum. Þetta er einkenni Kötluhlaupa og hefur verið regla í stærri Grímsvatnahlaupum (t.d. Sigurður Þórarinsson, 1974). Slíkur jakaburður sást síðast í Gjalparhlaupinu 1996 og myndaðist þá allstór ísgjá fremst í Skeiðarárjökli.

Þegar þessi áhrif eru tekin saman, framburður íss og vatnsborinnar gjösku, er sennilegt að heildarrensli hlaups, allavega nærri jökuljaðri, geti aukist um 10–15% vegna flutnings vatnsbornu gjöskunnar og að ísinn bæti öðru eins við. Til að taka tillit til þessa í mati á hlaupum er 25% bætt við reiknaðan bráðnunarhraða og sú tala notuð í sviðsmyndum um hlaupin.

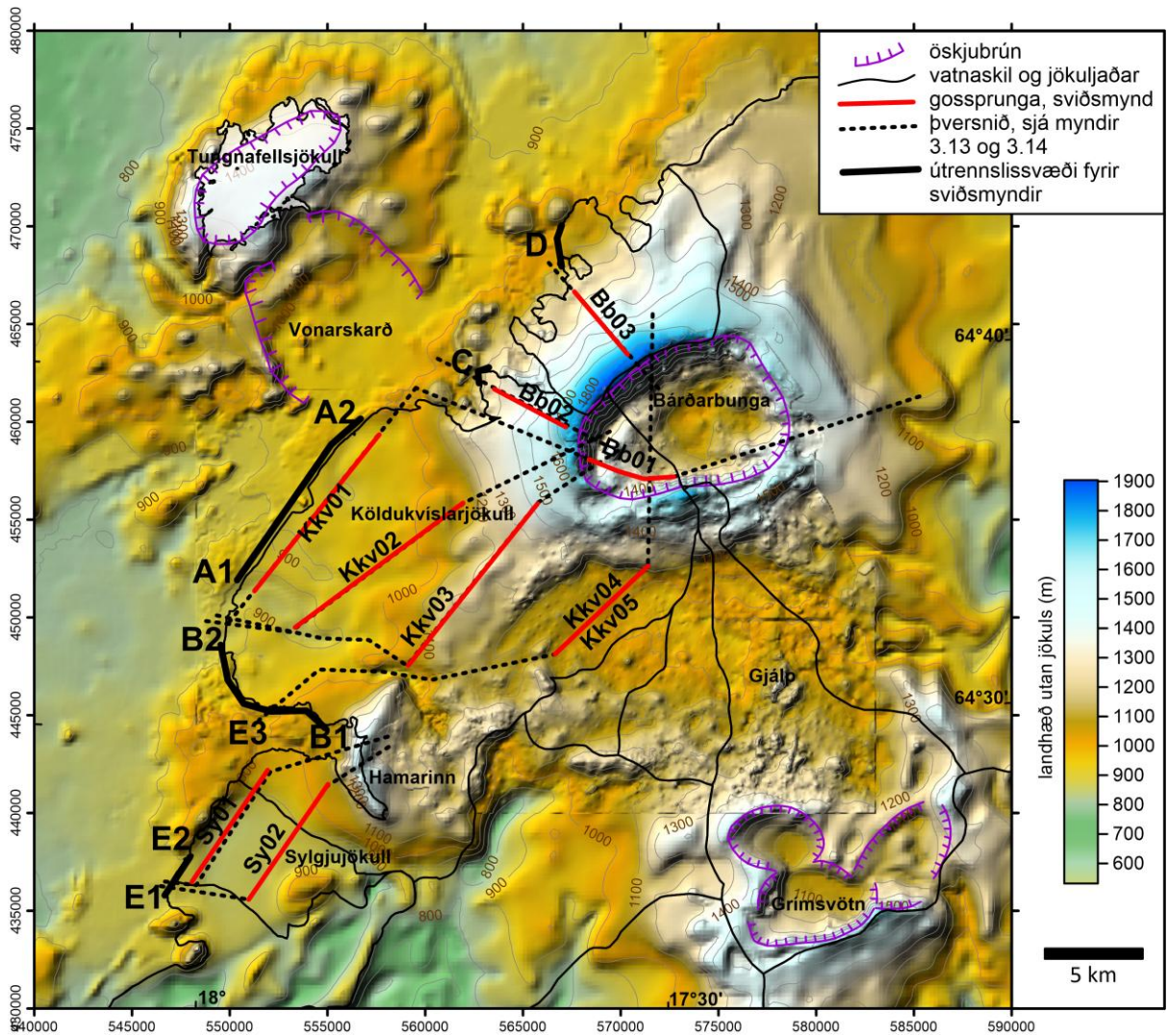
### 3.2.4 Stærðir eldgosa

Pokkalegar upplýsingar liggja fyrir um stærðir eldgosa á Íslandi sem orðið hafa síðan í byrjun 20. aldar. Þegar kemur lengra aftur er minna vitað um smærri gos og gögn um tíðni þeirra borið saman við stærri gosin eru glöppótt. Hér er miðað við eldgos á tímabilinu 1913 til 2014 og þau flokkuð í sex stærðir, út frá kvikuflæði fyrstu sex klukkustundirnar. Í Töflu 3.2 eru teknar saman tölur um mögulega ísbráðnun í gosum þar sem ísþykkt er um eða undir 200–250 m. Í Töflu 3.3 er mat á ísbráðnun í þykkum jökli þar sem kvikuflæðið ræður bráðnun (reiknað með tvístrun), auk mats á líkum á gosum í mismunandi stærðarflokkum. Lega sprungna fyrir mögulegar sviðsmyndir er sýnd á kortunum á Myndum 3.11 og 3.12. Rétt er að taka fram að hið aldarlanga tímabil sem haft er til viðmiðunar er mjög stutt miðað við endurkomutíma stærri gosanna. Þessar tölur eru því fjarri því að vera nákvæmar, en gefa hugmynd um stærðarþrep og líkur.



Mynd 3.11. Ísþykktarkort af norðvesturhluta Vatnajökuls, byggt á íssjármælingum sem unnar hafa verið allt frá 1980, sjá m.a. Helga Björnsson (2009). Þessar mælingar voru unnar við Bárðarbungu og á austanverðu vatnasviði Köldukvíslarjökuls á síðustu árum til að auka nákvæmni kortsins. Sniðin sem tengjast hverri sviðsmynd (slitnar línur út frá gossprungum í báðar áttir) eru á myndum 3.13 og 3.14. Sá hluti hvers sniðs sem liggur frá gossprungu að jökuljaðri markar áætlaða leið bræðsluvatns.

Eins og sjá má falla 5–10% gosanna undir þrjá stærstu flokkana, þar sem hlaup gætu orðið umtalsvert stærri en 10.000 m<sup>3</sup>/s, og stærstu atburðirnir, sem hér eru flokkaðir sem hamfaragos, hafa endurkomutíma sem er af stærðarprepinu 100–300 ár. Þessar tölur eiga við um Ísland í heild sinni. Þær benda til þess að líkur á svo stórum atburðum á eldstöðvakerfi Bárðarbungu séu eins og annarsstaðar tiltölulega litlar, en þó ekki hverfandi. Sennilegt er að t.d. Veiðivatnagosið 1477 (Guðrún Larsen, 1984), sem er eitt af stórgosunum sem orðið hafa á eldstöðvakerfi Bárðarbungu, falli þarna undir. Líkur á hliðstæðu gosi, t.d. undir Köldukvíslarjökli geta því ekki talist hverfandi.



Mynd 3.12. Kort af jökulbotni í norðvestanverðum Vatnajökli byggt á íssjármælingunum (Mynd 3.11). Sniðin sem tengjast hverri sviðsmynd (slitnar línur út frá gossprungum í báðar áttir) eru á myndum 3.13 og 3.14. Sá hluti hvers sniðs sem liggur frá gossprungu að jökuljaðri markar áætlaða leið bræðsluvatns.

Tafla 3.2. Sviðsmyndir, líkön fyrir þunnan jökul – bráðnun yfir gossprungum.

|                    | Lengd<br>gos-<br>sprungu | Ísþykkt     | Bráðnun<br>Q <sub>1</sub><br>(Jafna<br>3.1) | Bráðnun<br>Q <sub>2</sub><br>(Jafna<br>3.2) | Bráðnun<br>Q <sub>H</sub> =<br>0,5(Q <sub>1</sub> +Q <sub>2</sub> ) | Heildar-<br>bráðnun<br>200 m<br>víð gjá<br>GI = | Kvik-<br>flæði<br>Q <sub>m</sub><br>10 <sup>6</sup><br>kg/s | Hlaup<br>nærri<br>jaðri<br>1,25Q <sub>H</sub><br>10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> |
|--------------------|--------------------------|-------------|---|---|---|---|---|---|
|                    | m                        | m           | m <sup>3</sup> /s                           | m <sup>3</sup> /s                           | m <sup>3</sup> /s   | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>                  |   |   |
| Köldukvíslarjökull |                          |             |   |   |   |   |   |   |
| Kkv01*             | 11.000                   | 50          | 6.900                                       | 15.400                                      | 11.200  | 110   | 4,4   | 14.000  |
| Kkv02**            | 11.000                   | 250         | 34.700                                      | 15.400                                      | 25.000  | 550   | 9,9   | 31.000  |
| Kkv03**            | 11.000                   | 250         | 34.700                                      | 15.400                                      | 25.000  | 550   | 9,9   | 31.000  |
| Kvv04/Kkv05        | -                        | 600         | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| Bárðarbunga        |                          |             |   |   |   |   |   |   |
| BB01               | -                        | 500-<br>600 | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| BB02               | 4.000                    | <100        | <5.000                                      | <5.600                                      | <5.300  | 80  | 2,1   | <6.600  |
| BB03               | 4.000                    | <100        | <5.000                                      | <5.600                                      | <5.300  | 80  | 2,1   | <6.600  |
| Sylgjujökull       |                          |             |   |   |   |   |   |   |
| SY01               | 6.000                    | 200         | 15.100                                      | 8.400                                       | 11.800  | 240   | 2.8   | 14.700  |
| SY02               |                          | 300         |   |   |   |   |   |   |

\*Þar sem ís er mjög þunnur er ekki reiknað með að nema ~40% kvikunnar nýtist til að bræða ís – hinn hlutinn fari beint í gegn og myndi gjósku.

\*\*Sviðsmyndir Kkv02 og Kkv03 þar sem ísþykkt er að meðaltali 250 m eru hafðar með í matinu en niðurstaða reikninga fyrir þunnan jökul (Jöfnur 3.1 og 3.2) gefa hliðstæða niðurstöðu og reikningar fyrir þykkum jökul fyrir þetta þykktargildi. Líkönin fyrir þunnan jökul eru ekki notuð þar sem ísþykkt er meiri en 250 m.

Tafla 3.3. Mat á bráðnunartölum undir þykkum jökli (Jafna 3.4) og gróft mat á líkum á hlaupum af mismunandi stærðum.

|               | Kvikflæði<br>10 <sup>6</sup> kg/s | Bráðnun<br>Q<br>(Jafna<br>3.4)*<br>(m <sup>3</sup> /s) | Rennsli<br>frá jökli<br>1.25 x Q<br>(m <sup>3</sup> /s) | Hlutfall<br>gosa<br>jafnstór<br>eða minni | Endur-<br>komu -<br>tími<br>(ár) | Dæmi um gos þar sem<br>upphafsfasir (0.5–3 klst.)<br>var af líkri stærð |
|---------------|-----------------------------------|--|---|---|----------------------------------|---|
| Smágos        | <0.04                             | <460   | 580   | 25–30%                                    | 5–10                             | Krafla 1977,<br>Fimmvörðuháls 2010                                      |
| Lítið         | 2                                 | 4.600  | 5.800   | 45–50%                                    | 5–10                             | Krafla 1980,<br>Grímsvötn 1983  |
| Meðal         | 5                                 | 11.500   | 14.400  | 85–90%                                    | 25                               | Krafla 1984   |
| Stórt         | 10                                | 23.000   | 28.800  | 90–95%                                    | 35                               | Hekla 1970  |
| Mjög<br>stórt | 50                                | 115.000  | 145.000   | 95–97%                                    | 100                              | Hekla 1947  |
| Störgos       | <50                               | >115.000   | >145.000  | 99%                                       | 100–<br>300                      | Katla 1918  |

\*Reiknað er með  $C_g = 1000 \text{ J kg}^{-1} \text{ °C}^{-1}$ ,  $T_i - T_f = 1100 \text{ °C}$  í Jöfnu (3.4)

### 3.2.5 Sviðsmyndir fyrir Bárðarbungukerfið

Mögulegar sviðsmyndir fyrir gos á eldstöðvakerfi Bárðarbungu undir jökli eru fjölmargar þó gossagan gefi til kynna að líkur fyrir tilteknar sviðsmyndir verði að teljast litlar. Eftirtaldar níu sviðsmyndir ná til allra helstu tilfella sem mögulega geta orðið og þar sem gosin gætu orsakað hlaup til suðvesturs, niður til Köldukvíslar og Þjórsár (lega á Myndum 3.11 og 3.12). Þversnið sem sýna yfirborð jökuls og botns ásamt ísþykkt fyrir hverja sviðsmynd eru á Myndum 3.13 og 3.14. Þessi líkön og bráðnunartölur sem notaðar eru, verða að flokkast sem versta tilfelli fyrir hverja sviðsmynd, þ.e. sprungugos af hámarks lengd miðað við stærð svæðisins. Þessar sviðsmyndir eru:

1. Undir Sylgjujökli. Sprungugos þar myndi beina vatni fram í Sylgju og að einhverju leyti til Sveðju. Hér eru tvö tilfelli, SY01 og SY02. Hið fyrra (SY01) yrði gos ekki langt frá jaðri jökulsins (ísþykkt 200 m), og hið seinna heldur innar, þar sem ísþykkt er nokkru meiri (300 m).
2. Undir Köldukvíslarjökli. Hér eru fjórir staðir skoðaðir til að búa til sviðsmyndir. Ísþykkt er mjög misjöfn, ~50 m (Kkv01), 250 m (Kkv02 og Kkv03) og um og yfir 600 m austast (Kkv04), þar sem aðstæður líkjast mjög þeim sem voru þar sem Gjálpargosið varð 1996, 5–10 km austar. Sviðsmynd Kkv05 á við sama stað og Kkv05, en í henni er reiknað með langvinnri bráðnun eins og varð 1996.
3. Í norðvesturhlíðum Bárðarbungu. Hér er ísþykkt lítil, undir 100 m. Ef gysi á sprungu BB02 færi bræðsluvatnið í Köldukvísl, en ef sprunga opnaðist eftir BB03, færi hlaupvatn að mestu í Skjálfandafljót. Augljóslega gætu hlaup vegna gosa á þessum stöðum ekki orðið mjög stór vegna lítillar ísþykktar.
4. Inni í Bárðarbunguöskjunni, í suðvesturhorni hennar, sem er á vatnasvæði Köldukvíslar. Ef þarna yrði stórt gos, hliðstætt og t.d. Kötlugos, yrði bráðnun geysimikil og hlaup af stærðargráðunni 100.000 m<sup>3</sup>/s ekki útilokað. Eins og nefnt er hér að frama virðast gos af þessu tagi ekki hafa orðið á þessu svæði undanfarin nokkur þúsund ár. Líkur teljast því mjög litlar. En ef gos yrði þarna myndi hlaup leita til suðvesturs og fara í Köldukvísl.

Lengd gossprungna í sviðsmyndunum er á bilinu 4 km til 11 km. Ísþykkt er mjög mismunandi milli sviðsmynda. Í Töflu 3.2 er reiknuð ísbráðnun með jöfnunum fyrir þunnan jökuls (1) og (2) og bætt við 25% til að taka með mögulegt tillegg íss og gosefna sem hluti af rúmmáli. Reikna má með að hluti þess efnis setjist til í hlaupfarvegnum og á þeirri löngu leið sem hlaupin færu um á leið til byggða.

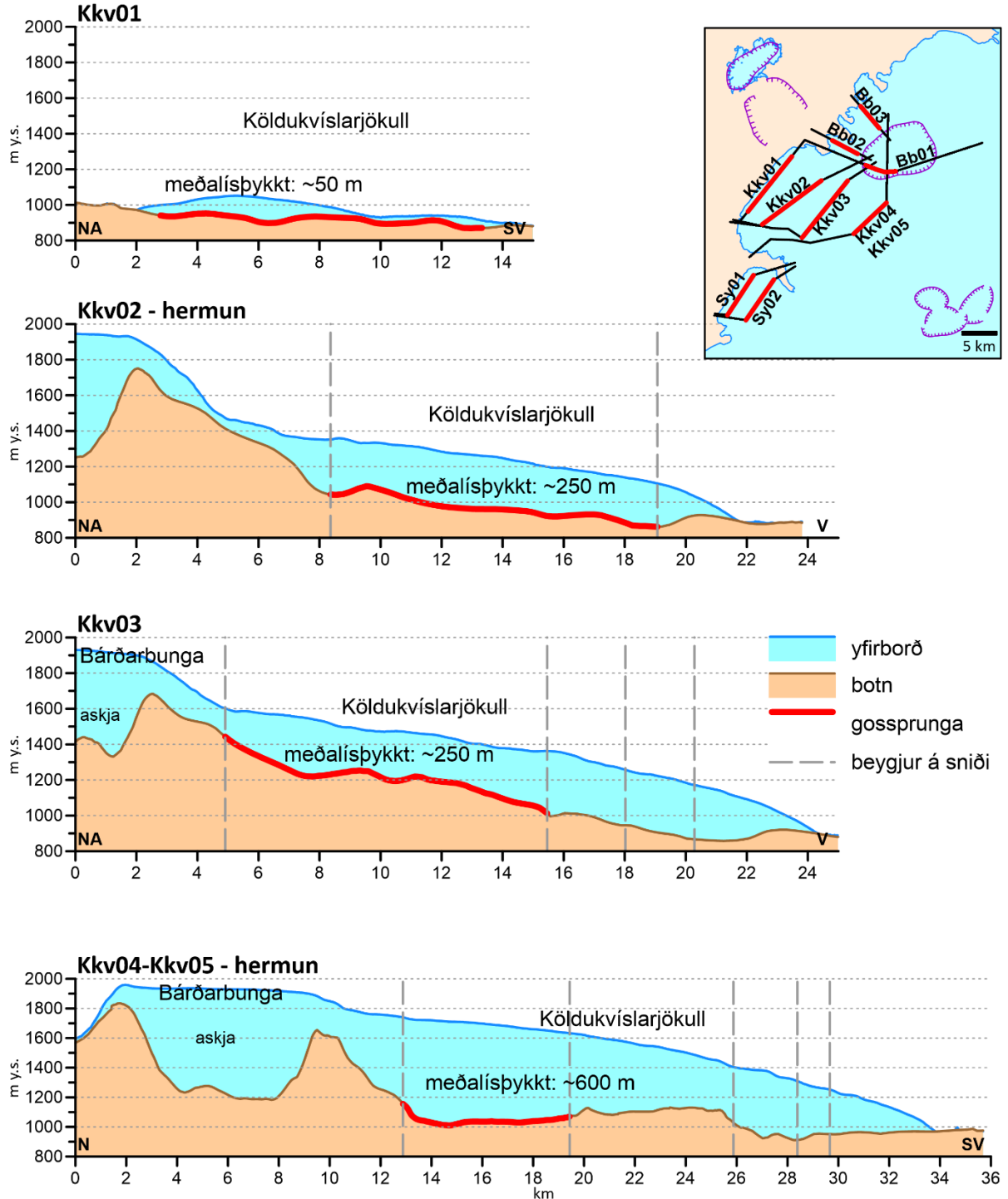
Fyrir þau tilfelli, þar sem ísþykkt er yfir 200 m, gefa tölur úr Töflu 3.3 mat á ísbráðnun. Þar er reiknað með tvístrun kvikunnar og 70% varmanýtni. Til að framkalla hlaup sem væru af stærðarþrepinu tugir þúsunda rúmmetra á sekúndu þarf mjög stór gos og eins og fram kemur í töflunni ná 90–95% gosa á Íslandi ekki þeirri stærð.

Af þessum sviðsmyndum voru fimm tilfelli hermuð með reikningum og næst þannig nokkuð gott yfirlit um mögulega atburði. Flestar sviðsmyndirnar eiga við um gos sem leiða til bráðunar yfir tiltölulega stuttan tíma – einhverjar klukkustundir. Þetta eru:

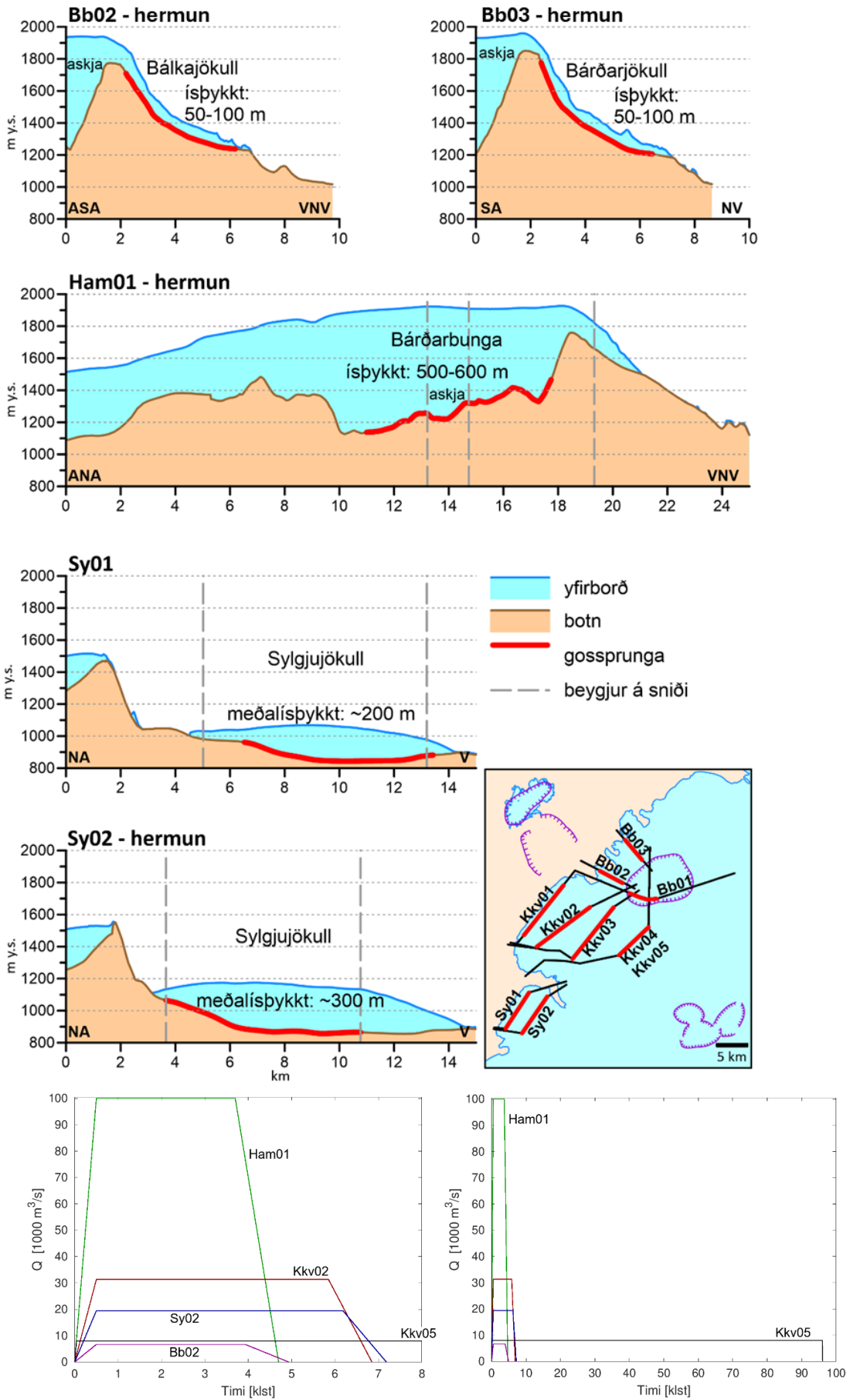
**Sy02:** Sylgjujökull – 6 km gossprunga, ísþykkt um 300 m.

**Kkv02:** Köldukvíslarjökull – 11 km gossprunga, ísþykkt um 250 m.

**Bb02:** Vesturhlíðar Bárðarbungu ofan Bálkár, gossprunga 4 km löng, ísþykkt áætluð 100 m.



Mynd 3.13. Pversnið sem sýna jökulyfirborð og botn fyrir mismunandi sviðsmyndir. Lega sprungna/sniða sést nánar á Myndum 3.11 og 3.12.



Mynd 3.14. Framhald af Mynd 3.13 ásamt rennslisritum sviðsmynda

**Ham01:** Hlaup úr suðvesturhorni Bárðarbungu vegna mikils goss sem bræðir um 100.000 m<sup>3</sup>/s og veldur því hamfarahlaupi til suðvesturs.

**Kkv05:** Köldukvíslarjökull – bráðnun stendur í fjóra sólarhringa og rennsli er svipað og var í Gjálpargosinu. Hlaupið kemur undan Köldukvíslarjökli. Staðsetning gossprungu er ekki sérstaklega tiltekin en eins og áður hefur verið nefnt ætti þetta tilfelli einkum við um það svæði þar sem ísþykkt er um 600 m (sviðsmynd Kv04).

### 3.2.6 Líkur á gosum undir jökli á vatnasvæði Köldukvíslar

Eins og fram kemur í yfirlitinu yfir gossöguna, voru vatnavextir í Þjórsá sumarið 1766, og er talið að ástæðan hafi verið gos í Vatnajökli (Sigurður Þórarinsson, 1974). Væntanlega hefur það gos orðið á vatnasvæði Köldukvíslar. Ummerki um hlaup eru hins vegar fá, ólíkt því sem á t.d. við um Jökulsá á Fjöllum og ár sem renna til suðurs frá Vatnajökli, ekki síst um Skeiðarársand (t.d. Sigurður Þórarinsson, 1974; Haukur Tómasson, 1973; Waitt, 2002).

Eins og gossagan sýnir, eru gos undir jökli sem tengjast Bárðarbungu allmörg. Gosið í Gjálp, milli Bárðarbungu og Grímsvatna haustið 1996, varð vegna umbrota í Bárðarbungu eins og kemur fram í kafla 2.2. Smágos urðu einnig yfir leið stóra berggangsins sem myndaðist til norðausturs frá Bárðarbungu að Holuhrauni á ágúst 2014 (Reynolds o.fl., 2017).

Gosvirkni á sprungusveim Bárðarbungukerfisins til suðvesturs hefur verið mikil frá því í upphafi Nútíma. Gosvirknin hefur verið mest á syðri hluta sprungusveimsins, sunnan Gjálfjalla og suður að Torfajökli. Þessi hraunastafli, Tungnaárhraunin, er talinn vera sá mesti sem myndast hefur hér á landi á Nútíma (Elsa G. Vilmundardóttir, 1977). Stærsta gosið varð þegar Þjórsárhraunið myndaðist fyrir 8600 árum. Rúmmál hraunastaflans nemur tugum rúmkílómetra og basísk sprengigoss, einkum á svæðinu við Veiðivötn hafa framleitt mikla gjósku; þeirra síðast var Veiðivatnagosið 1477, en þar áður gosið í Vatnaöldum á seinni hluta 9. aldar (Guðrún Larsen, 1984). Gosvirkni nær Bárðarbungu hefur verið minni, en reikna má með að kvikan sem komið hefur upp í gosunum á sprungusveimnum hafi átt upptök sín í kvikuhólfi undir megineldstöðinni. Það á einnig við um Tröllahraun 1862–64, en gossprungan í því gosi nær norður á móts við Sylgjúkjökul. Nýjasta gosið vegna kvikuhlaups frá Bárðarbungu var í Holuhrauni (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2015), norðan Dyngjujökuls 2014–15 og orsakaði það öskjusig sem nam um 65 metrum (Magnús T. Guðmundsson o.fl., 2016).

Bárðarbungukerfið er eitt hið virkasta á Íslandi. Í ljósi nýlegra atburða (Gjálp 1996, Holuhraun 2014–15) eru einhverjar líkur á að gos geti orðið undir jökli heldur vestar, á vatnasvæði Köldukvíslar vegna gangainnskota frá Bárðarbungu, þó svo að þær verði að teljast litlar miðað við t.d. svæðið nærri Grímsvötnum eða í Kötlu.

Ekki er hægt að leggja nákvæmt mat á líkur á gosum undir jökli á vatnasvæði Köldukvíslar. Gossagan bendir þó til þess að einhverjir atburðir verði á nokkur hundruð ára fresti, þó engir þeirra teljist stórir. Sé horft lengra aftur, bendir sagan til þess að hlaup til norðurs, í Jökulsá á Fjöllum, séu mun tíðari. Stærðarþrepsmat á líkum á hlaupum til suðvesturs er að endurkomutími geti verið nokkur hundruð til þúsund ár. Mat á kennistærðum fyrstu sex

klukkustundir gosa á 20.–21. öld benda til þess um þriðjungur gosa sem orðið hafa á þessu tímabili hafi nægilegt kvikuf læði til að valda jökulhlaupi með hámarksrennsli um eða yfir 6.000–10.000 m<sup>3</sup>/s. Nýjasta dæmið um slíkt er Gjálpargosið 1996. Í Töflu 3.4 er lagt gróft mat á endurkomutíma atburða sem myndu framkalla mismunandi sviðsmyndir. Óvissa er hér mjög mikil, og verður metinn endurkomutími að flokkast sem stærðarþrepsmat.

Tafla 3.4. Endurkomutími gosa – sviðsmyndir með hermunum.

| Sviðsmynd | Gosstaður                          | Endurkomutími (ár) |
|-----------|------------------------------------|--------------------|
| Sy02      | Sylgjujökull                       | 1.000–10.000       |
| Kkv02     | Köldukvíslarjökull vestanverður    | 500–2.000          |
| Kkv05     | Köldukvíslarjökull austanverður    | 500–2.000          |
| Bb02      | Bárðarbunga, NV-hlíð               | 500–2.000          |
| Ham01     | Bárðabunguaskjan, SV-horn, stórgos | 1.000–10.000       |

### 3.3 Straumfræðilegir reikningar

#### 3.3.1 Yfirlit um GeoClaw

Straumfræðilíkanið *GeoClaw* var notað við jökulhlaupareikningana sem kynntir eru í þessari skýrslu (Berger o.fl., 2011; George, 2008). Líkanið er hluti forritasafnsins *ClawPack*<sup>6</sup>, sem er öllum opið til notkunar (e: open source). Hugbúnaður þessi er hannaður fyrir Linux-vélar og hefur áður verið notaður í hættumatsverkefnum Veðurstofunnar.

*GeoClaw* líkanið leysir tvívíðar dýpiseildaðar jöfnur Navier-Stokes<sup>7</sup> með tölulegum aðferðum fyrir það vökvastreymi, sem líkt er eftir hverju sinni (hér: jökulhlaup). Uppsetningu hlutafleiðujafnanna er lýst af George (2010). Reikninetið er kvíkt í þeim skilningi að fjöldi reiknisella eykst sjálfkrafa við aukna dreifingu hlaupvatns. Allar niðurstöður eru reiknaðar með *GeoClaw*-útgáfu Nr. 5.7.1. Reikningar voru gerðir með ofurtölvunum Elju og Garpi við Háskóla Íslands. Alls voru reiknaðar tíu sviðsmyndir auk ýmissa tilraunareikninga. Reiknitími var allt að 90 dagar fyrir hverja sviðsmynd og var dæmigert gagnamagn úr slíkum reikningi um 5 TB, þ.e. samanlagt umfram 50 TB. Nákvæmari lýsingu á uppsetningu reikninga, reiknivandamálum og lausnum þeirra má finna í greinargerðum Jóns Elvars Wallevik o.fl. (2022; 2023).

#### 3.3.2 Yfirlit um hugtök

- Reiknitími (e. walltime) = Sá tími sem tekur að framkvæma hermun fyrir hverja sviðsmynd (hver sviðsmynd tók allt að 90 daga).

<sup>6</sup> Sjá: [www.clawpack.org/geoclaw.html](http://www.clawpack.org/geoclaw.html) og [www.clawpack.org/release\\_5\\_7\\_1.html#release-5-7-1](http://www.clawpack.org/release_5_7_1.html#release-5-7-1)

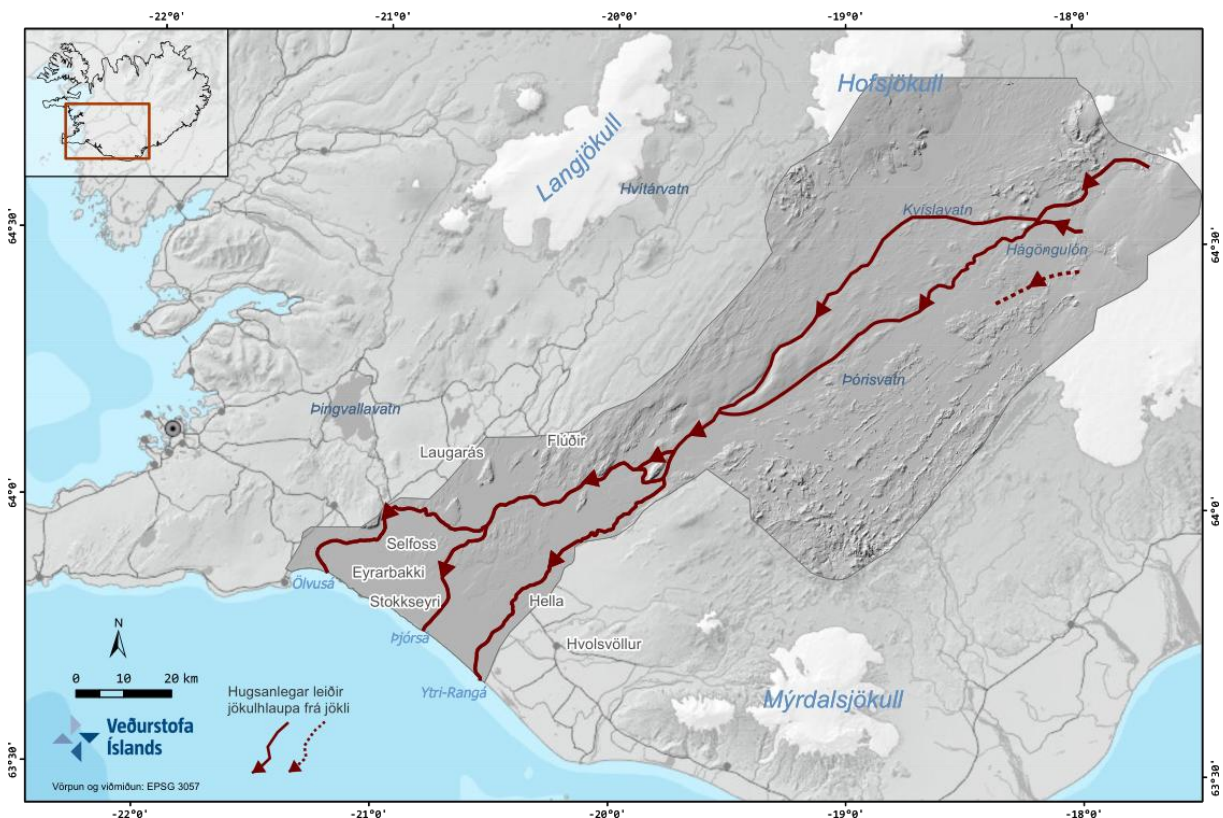
<sup>7</sup> Jöfnur Navier-Stokes lýsa streymishegðun seigra efna (e: viscous flow) og segja fyrir um varðveislu skriðþunga í streyminu. Með seigju er átt við innra viðnám efnisins (vökvans) gagnvart hreyfingu og aflögun og er hún mæld í einingunni Poise = 0,1 Pascalsekúndum = (N/m<sup>2</sup>)\*s. Seigja vatns er lág, 0,01 poise við 20 °C (til samanburðar er seigja hraunkviku 4-5 stærðarþrepum hærrí). Gert er ráð fyrir að hið seiga efni (vökvinn) sé ósamþjappanlegt. Um Navier-Stokes jöfnur sjá t.d. Drazin & Riley (2006).

- Líkantími (e. model time) = Hermdur tími, er alltaf 10 dagar fyrir reikninga á sviðsmyndum (fyrir tilraunareikninga er líkantíminn styttri).
- Skrifbil  $\Delta HD$  (e. write to file interval) = Bil í líkantíma á milli þess að gögn eru skrifuð út úr líkaninu.
- Tímaskref reikninga (e. timestep) = Tímaskref í tölulegri lausn dýpiseilduðu Navier-Stokes jafnanna og samfellujöfnunnar,  $\Delta t$ . Takmarkast við Courant tölu, sjá Jöfnu 3.7.

### 3.3.3 Reiknisvæðið

Í verkefni þessu eru settar fram fimm sviðsmyndir eldsumbrota undir norðvestanverðum Vatnajökli og reiknuð framrás og útbreiðsla jökulhlaupa undan jöklinum. Í reikningunum þarf að taka tillit til uppistöðulóna og stíflna á leið hlaupvatnsins: Við Hágöngulón eru tvær stíflur, við Kvíslavatn eru Svartárstífla og Púfuversstífla og einnig eru stíflur við Sultartangalón, Sauðafellslón og Sporðöldulón. Ekki er farin sú leið að herma sérstaklega áhrif hlaups á eitt tiltekið lón hverju sinni, enda yrðu sviðsmyndir þá 30 talsins (sjá Jón Elvar Wallevik o.fl, 2022). Þess í stað er líkanið sjálfkrafa látið ákvarða alla atburðarásina – rennislíðir, þróun flóðtoppa og aðra þætti – á allri hlaupleiðinni frá jökli niður að sjó. Þrátt fyrir þessa einföldun eru reikningarnir flóknir og umfangsmiklir, enda er reiknisvæðið um 10% af Íslandi og leysa þarf Navier-Stokes streymisjöfnurnar ásamt samfellujöfnu á 10x10m reiknineti.

Mynd 3.15 sýnir vatnasvið Þjórsár og leiðir þeirra jökulhlaupa, sem hermd eru.



Mynd 3.15. Vatnasvið Þjórsár og leiðir þeirra jökulhlaupa, sem hermd eru.

### 3.3.4 Ýmis reiknivandamál og lausnir þeirra

Reiknilegt umfang verkefnisins er umtalsvert. Yfir 10% af Íslandi er hermt á 10x10 metra reiknineti, nokkuð sem getur fræðilega myndað um 100 milljón möskva. Við slíkt umfang koma óhjákvæmilega upp tæknilegar áskoranir og er of langt mál að fara yfir þær hér. Hins vegar er umfjöllun um þetta málefni aðgengileg í minnisblaði Jóns Elvars Wallevik o.fl. (2023).

Í upphafi reiknivinnunnar tók það rúmlega mánuð að finna og leysa ýmis reiknileg vandkvæði vegna stærðar og umfangs verkefnisins. Á þessu stigi voru mismunandi FORTRAN þýðendur prófaðir (ásamt mismunandi uppsetningu þýðendanna) og einnig mismunandi uppsetningar á landlíkani.

Að þessum hluta afloknum var viljandi keyrð ýkt sviðsmynd til að álagsprófa líkanið. Þá var sett stöðugt rennsli, 100.000 m<sup>3</sup>/s, í um tvo og hálfan sólarhring, sem jafngilti því að tæplega 23 km<sup>3</sup> af vatni flæddu frá Bárðarbungu (raunhæft hlauprúmmál væri um 10% af þessari tölu). Niðurstöður tilraunarinnar voru sýndar á fundi með stýrinednd verkefnisins, 1. desember 2021 og gáfu svör við lykilsurningum: Hvort hægt væri að keyra allt reiknisvæðið í einni keyrslu, hversu langan tíma slík keyrsla tæki og hversu mikið gagnamagn yrði til.

Þegar hér var komið sögu var farið að nota útgáfuna GeoClaw 5.7.1 og eru allar niðurstöður sem kynntar eru í þessari skýrslu reiknaðar með henni.

### 3.3.5 Samanburður á eiginleikum GeoClaw og HEC-RAS hermana

Í þessu verkefni reiknar Verkfræðistofan Verkís hlaup skv. þremur þeirra sviðsmynda, sem hér er notast við (Ham01, Kkv02 og Bb02), á svæðinu frá jökli niður fyrir Hágöngulón, til samanburðar og sannreyningar á reikniaðferðum. Í Töflu 3.5 er samanburður á helstu eiginleikum hermana á þessu svæði skv. GeoClaw-reikningum Veðurstofunnar annars vegar og HEC-RAS (SWE-ELM) reikningum Verkís hins vegar.

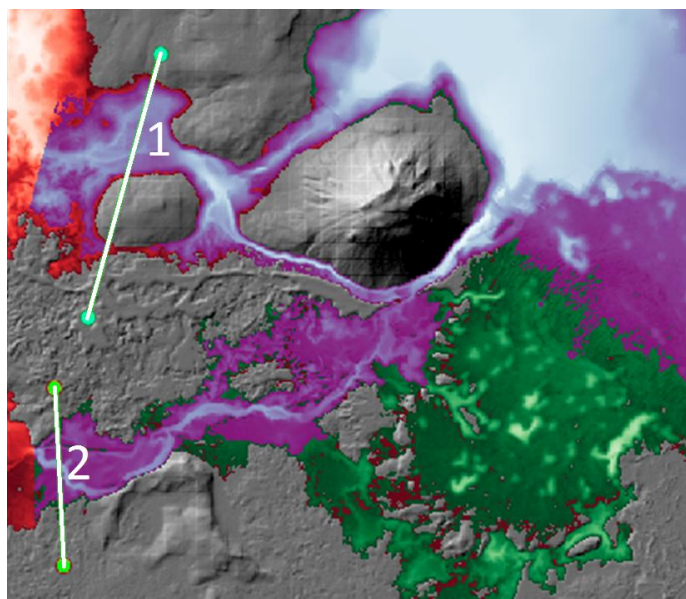
Samanburður á reikningum Veðurstofunnar og Verkís nær til rennslisferla, rennslisraða og rúmmáls hlaupvatns á leið þess um þversniðin tvö, sem sýnd eru á Mynd 3.16. Rúmmál sem farið hefur um tiltekið þversnið á tímabilinu [0,T] er reiknað skv. jöfnunni:

$$V = \int_0^T Q(t) dt \quad (3.5)$$

þar sem  $Q(t)$  er rennslið (í m<sup>3</sup>/s) á tímanum  $t$ . Annað þversniðið er á rennslisleið í átt að Kvíslavatni og hitt nær yfir farveg Köldukvíslar.

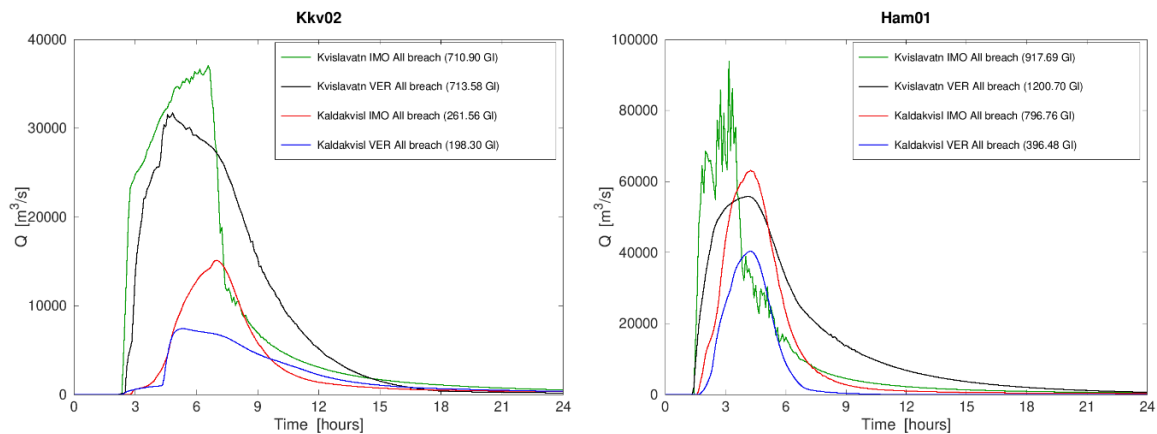
Tafla 3.5 Samanburður hermanna með GeoClaw og HEC-RAS.

| ATRÍÐI                              | GeoClaw<br>(Veðurstofa Íslands)  | HEC-RAS (VERKÍS)   |
|-------------------------------------|--|--|
| Yfirborð Hágöngulóns                | Landlíkan sýnir yfirborð lóns við háa vatnsstöðu (816.9 m y.s.) en ekki lónbotn. Hlaupvatn bætist ofan á yfirborðið.   | Landlíkan sýnir lónbotn og hefur pláss fyrir hlaupvatn. Yfirborðshæð nær mest 816 m þegar vatn bætist í lónið. |
| Rof stíflu                          | Lýst þannig að sett er upptaksvæði rétt fyrir neðan tiltekið flóðvar.  | Eiginlegt rof stíflu er sett af stað og hermt.   |
| Eðli rennslisferils eftir stíflurof | Trapisulaga ferill.  | Eiginlegt rof og rennsli hermt.  |
| Rúmmál hlaupvatns úr Hágöngulóni    | 372 Gl. Lónið tæmist.  | 305 Gl. Um 30 Gl. verða eftir í lóninu.  |
| Stefna rennslis frá lóni            | Upptaksvæði sett neðan flóðvars í hjástíflunni norðan Syðri Hágöngu.   | Upptök við báðar stíflur undir Syðri Hágöngu. Lónvatn brýst fram bæði í átt að Kvíslavatni og í Köldukvísl.    |
| Reiknilegur munur                   | Mismunandi meðhöndlun hreyfijöfnu og samfellujöfnu. Landlíkan á 10x10 m rasta fyrir GeoClaw en 1x1 m rasta á lónsvæðinu og 10x10 m annarstaðar fyrir HEC-RAS. GeoClaw reikninetið er á reglulegum 10x10 m reitum en HEC-RAS notast við reikninet með misstóra óreglulega reiti, með kennividdir á bilinu 5 til 30 m. |  |



Mynd 3.16. Þversnið notuð við samanburð reikninga. Kvíslavatnsþversniðið er norðar (merkt 1) og Köldukvíslarþversniðið sunnar (merkt 2). Syðri Háganga er ofan við miðja mynd og Hágöngulónið austan og norðan hennar.

Mynd 3.17 sýnir samanburð milli reikninga Veðurstofunnar og Verkís fyrir sviðsmyndirnar Kkv02 (vinstri) og Ham01 (hægri). Fyrir báðar sviðsmyndir er tímasetning á byrjun hlaups hin sama. Ferlarnir gefa til kynna þann mun sem fram kemur í lið 3 í Töflu 3.5. Líkt er eftir rennsli eftir stíflurof með trapisulaga hlaupferli í reikningum með GeoClaw (VÍ) en reikningar með Hec-Ras (Verkís) herma raunverulegt stíflurof. Þetta leiðir til hærri rennslistoppa gegnum bæði þversniðin í reikningum Veðurstofu en hlauprennsli um þau stendur lengur yfir í reikningum Verkís.



Mynd 3.17. Rennsli í gegnum þversniðin tvö á Mynd 3.16. Til vinstri: Sviðsmyndin Kkv02 með heildunartíma  $T = 48$  klst í Jöfnu (3.5). Til hægri: Sviðsmyndin Ham01 með heildunartíma  $T = 72$  klst. Skrifbil er hér  $\Delta HD = 5$  mín. Nánar er fjallað um áberandi sveiflur í reikningum Veðurstofunnar á rennsli til Kvislavatns í kafla 3.4.5.

### 3.4 Ákvörðun stuðla og næmnigreining

#### 3.4.1 Hrýfisstuðlar

Við útreikning á flæði vatns í farvegi eða yfir landsvæði þarf að gera ráð fyrir viðnámi landyfirborðsins, sem lýst er með svokölluðum *hrýfisstuðli* (eða í styttri útgáfu: *hrýfi*). Jafna Mannings lýsir rennslis hraða í farvegi þannig:

$$v = n^{-1} R^{2/3} S^{1/2} \tag{3.6}$$

þar sem  $v$  er meðalhraði rennslis (m/s) gegnum þversnið farvegarins,  $n$  er hrýfisstuðull (stuðull Mannings,  $\text{sm}^{-1/3}$ ),  $R=A/P$  er sk. straumgeisli (e. hydraulic radius);  $A$  er þversniðsflatarmál farvegar;  $P$  er vott ummál (e: wetted perimeter, þ.e. samanlögð lengd þeirra hliða þversniðsins, sem vatnið er í snertingu við) og  $S$  er halli farvegarins.

Vatn rennur hraðar og vatnshæð minnkar með lækkandi hrýfi og hefur hrýfisstuðullinn verið metinn fyrir margs konar yfirborð, t.d. eru algeng gildi fyrir árrennsli á bilinu  $0,03\text{--}0,035 \text{ sm}^{-1/3}$  (Chow, 1959). Við hermun jökulhlaupa á Íslandi hefur kvörðun gefið til kynna hrýfi á bilinu  $0,02\text{--}0,05 \text{ sm}^{-1/3}$  (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017; Matthías Ásgeir Jónsson o.fl., 2018) og geta mismunandi straumfræðilíkön (t.d. Hec-Ras og GeoClaw) gefið mismunandi stuðla við kvörðun gagnvart mældu rennsli. Þegar um verulegan setframburð er að ræða, t.d. í Kötluhlaupum, veldur setið auknum núningi í rennslinu en aukning hrýfisstuðuls er þó ekki metin meiri en 4% (Bergur Einarsson o.fl., 2022, s. 85). Á hinn bóginn geta jakahrannir í afmörkuðum farvegi aukið viðnám gegn rennsli verulega og greiningar á Kötluhlaupinu 1918 gefa til kynna hrýfisstuðla á bilinu  $0.05\text{--}0.11 \text{ sm}^{-1/3}$  (Haukur Tómasson, 1996; Jónas Elíasson o.fl., 2007; sjá einnig Bergur Einarsson o.fl., 2022, s. 86).

Til er flokkun landyfirborðs héraendis, útbúin til að skilgreina hrýfi yfirborðs vegna vindútreikninga í veðurlíkönum (Bolli Pálmason o.fl., 2016). Þessi flokkun landyfirborðs hefur einnig verið notuð til að meta hrýfi gagnvart flæði vatns yfir landi (Jón Elvar Wallevik o.fl., 2023). Ekki er hægt að lesa þá flokkun beint inn í GeoClaw, því forritið gerir aðeins

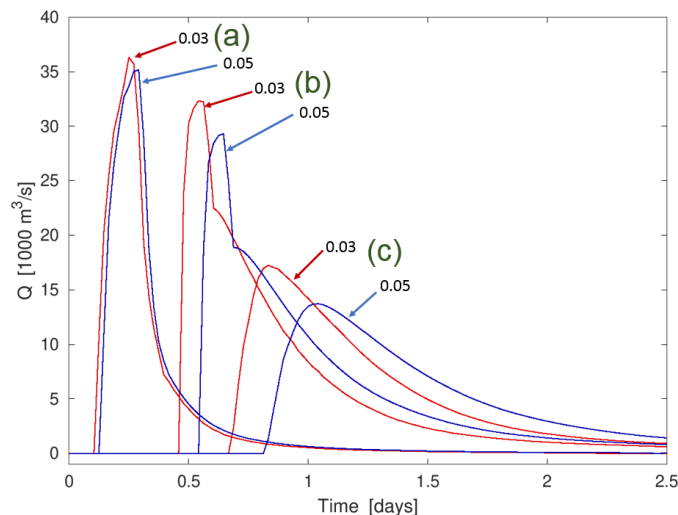
ráð fyrir breytileika í hrýfi eftir landhæð. Í þessu verkefni var ákvarðað meðaltalsgildi á hrýfi fyrir hvert 100 m hæðarbil og ofan við 700 m hæð var sérstaklega tekið tillit til áhrifa íshröngls, lausagrjóts og aurburðar (Jón Elvar Wallevik o.fl., 2023), sem auka viðnám gagnvart flæðinu (Bergur Einarsson o.fl., 2022). Tafla 3.6 sýnir þau hrýfisgildi Mannings sem notuð eru í reikningunum.

Tafla 3.6 Hrófisgildi [ $\text{sm}^{-1/3}$ ] á hverju 100 m hæðarbili, notuð í reikningum (Jón Elvar Wallevik o.fl., 2023).

| Hæðarbil | Hrófi  |
|----------|--------|
| 0.01 <   | 0,0300 |
| 0.01-100 | 0,0417 |
| 100-200  | 0,0418 |
| 200-300  | 0,0366 |
| 300-400  | 0,0422 |
| 400-500  | 0,0408 |
| 500-600  | 0,0361 |
| 600-700  | 0,0363 |
| 700-800  | 0,0400 |
| > 800    | 0,0500 |

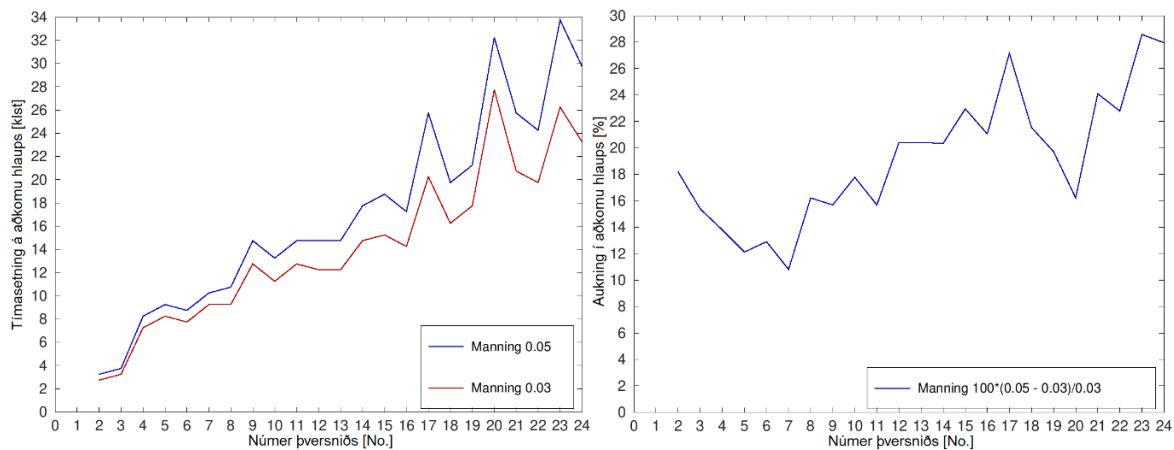
### 3.4.2 Næmnigreining fyrir hrýfisgildi

Allar sviðsmyndir eru keyrðar með breytilegum Manning stuðli (hrýfisstuðli) á bilinu 0,03  $\text{s/m}^{1/3}$  til 0,05  $\text{s/m}^{1/3}$ . Til að átta sig á næmni reiknaðra niðurstaðna gagnvart breytileika stuðulsins var Kkv02 sviðsmyndin keyrð með þessum tveimur útgildum: 0,03 og 0,05  $\text{s/m}^{1/3}$ . Mynd 3.18 sýnir reiknuð rennslisrit í gegnum þrjú þversniðanna á Mynd 4.2, Nr. 2, 10 og 18. Sjá má hvernig rennslishegðun breytist með hækkun hrýfisstuðuls. Hlaup renna hraðar fyrir lægra gildi stuðulsins og hlauptoppar reiknast hærri. Munurinn er minnstur nálægt jökuljaðri en eykst eftir því sem neðar dregur í landinu.



Mynd 3.18. Samanburður á rennslisritum fyrir þversniðin á Mynd 4.2. Rauðlitaðir ferlar eru reiknaðir með hrýfisstuðlinum 0,03  $\text{s/m}^{1/3}$  en bláir með stuðlinum 0,05  $\text{s/m}^{1/3}$ . (a) er þversnið númer 2 á Mynd 4.2, (b) er þversnið 10 og (c) er þversnið 18. Sviðsmyndin er Kkv02 í öllum tilvikum.

Mynd 3.19 sýnir aðkomutíma hlaups fyrir hvert þversnið á Mynd 4.2 fyrir ofangreind hrýfisgildi og hlutfallslega aukningu í aðkomutíma þegar hrýfisgildið er aukið og er meðalgildið um 19%. Tímamunur er <2 klst fyrir þversnið 1–10 en er kominn í 5–8 klst í neðstu þversniðunum. Að meðaltali hægir hlaupið á sér um 19% við aukningu á hrýfisstuðli úr 0,03 í 0,05 s/m<sup>1/3</sup> og óvissa í framrásartímum er metin út frá ofangreindri niðurstöðu, þ.e. sem ±10% af tímagildinu, sjá nánar í Jón Elvar Wallevik o.fl. (2023).



Mynd 3.19. T.v.: Samanburður á aðkomutíma hlaups [klst] sem fall af númeri þversniðs á Mynd 4.2, fyrir hrýfisstuðlana 0,03 s/m<sup>1/3</sup> og 0,05 s/m<sup>1/3</sup>. T.h.: Hlutfallsleg aukning á tímasetningu þegar stuðullinn er aukinn úr 0,03 s/m<sup>1/3</sup> í 0,05 s/m<sup>1/3</sup>.

Helstu niðurstöður þessarar næmnigreiningar með sviðsmyndinni Kkv02 eru eftirfarandi (sjá nánar í Jón Elvar Wallevik o.fl., 2023):

- Hlaupið hægir á sér að meðaltali um 19% við aukningu á hrýfisgildinu frá 0,03 til 0,05 s/m<sup>1/3</sup> (meðaltal yfir öll þversnið á Mynd 4.2).
- Rennslistoppurinn  $Q_{max}$  minnkar um 17% við aukningu á hrýfisgildinu frá 0,03 yfir í 0,05 s/m<sup>1/3</sup> (meðaltal yfir þversnið 2,4, 8, 10, 13, 14, 18 og 22 á Mynd 4.2, þ.e. fyrir aðalfarveg hlaups). Þessi minnkun er 13% fyrir öll þversnið á Mynd 4.2.
- Ekki kemur fram mikill mismunur í útbreiðslu hlaups við mismunandi hrýfisgildi en greinilegur munur reiknast þó á tjónmætti í aðalfarvegi hlaupsins.

### 3.4.3 Næmnigreining með tilliti til ástands farvegjar

Áður hefur verið fjallað um lagfæringar á landlíkönnum innan hlaupfarvega (3. kafli). Sérstök athugun var gerð á næmni niðurstaðna fyrir göllum í farvegum á unna landlíkaninu með samanburði á niðurstöðum keyrslna á svæðinu við Búðafoss í Þjórsá og neðan hans. Gallar í farvegi á unna landlíkaninu voru lagfærðir rétt neðan við Búða, í farveginum um 3 km neðan Búða og einnig á einum stað í þeirri kvísl Þjórsár sem rennur sunnan eyjarinnar Árnass. Sviðsmynd minnsta mögulega hlaups, Bb02, var notuð því ofmat á útbreiðslu hlaups vegna galla í farvegi kæmi skýrast fram í því tilviki.

Niðurstöður þessara samanburðarkeyrslna gáfu til kynna að áhrif lagfæringa á ofangreindum stöðum í farvegum á heildar-útbreiðslu hlaupsins væru mjög lítil í tilvikinu Bb02 (sjá Myndir 12.1 – 12.3 í Jón Elvar Wallevik o.fl. (2023)). Áhrifin yrðu enn minni í

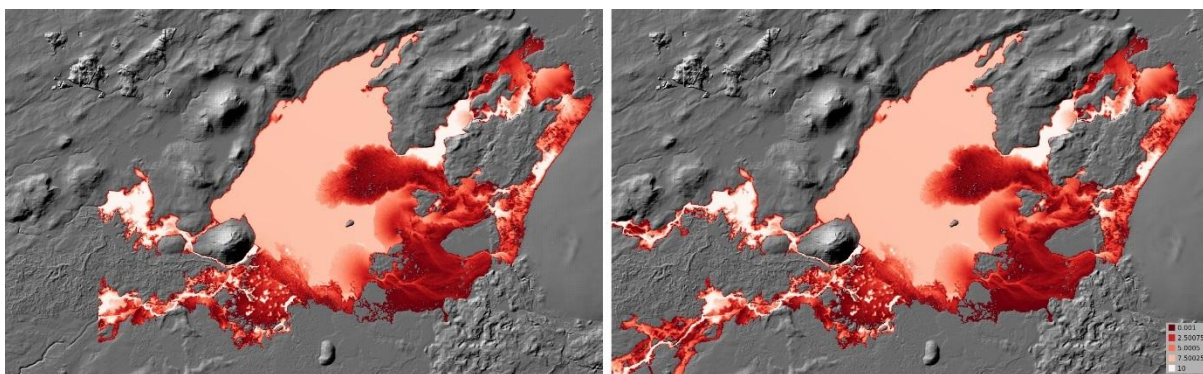
stærri hlaupum því þau mundu kaffæra svæðið og áhrifa smágalla í farvegi mundi ekki gæta að neinu ráði. Sú ályktun er því dregin af þessum athugunum að þeir gallar, sem vera kunna á farvegum í unnu landlíkani hafi mjög lítil áhrif á heildarniðurstöður verkefnisins.

#### 3.4.4 Næmnigreining á upplausn reikninets

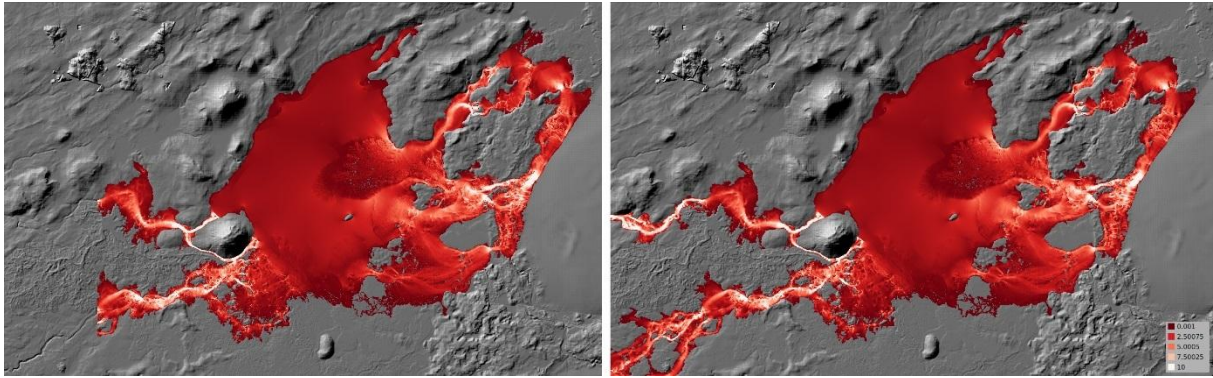
Ekki er sjálfgefið að upplausn reikninets í vatnafræðilegum reikningum sé hin sama og upplausn landlíkans; t.d. getur 10x10 m reikninet notað 2x2 m landlíkan (eða öfugt). Sá möguleiki er einnig fyrir hendi að net landlíkans falli ekki saman við reikninetið og þarf þá að notast við tvíínulega brúun á landlíkani til að fá fram það landyfirborð, sem notað er í reikningunum. Sjá Mynd 6.1 í Jón Elvar Wallevik o.fl. (2023).

Séu möskvar reikninets stærri en möskvar landlíkans getur ofangreind brúun leitt til þess að landslag jafnist út og hlaupvatn dreifist með öðrum hætti en ella væri. Þetta á einkum við fyrir flatlendi samhliða litlu rennsli (t.d. < 50 m<sup>3</sup>/s), því við slíkar aðstæður getur smávægileg breyting á landslagi haft áhrif á útbreiðslu hlaupvatns. Ákveðið var að athuga áhrif mismunandi upplausnar reikninets á reiknað flæði hlaupvatns inn í Hágöngulón og út úr því.

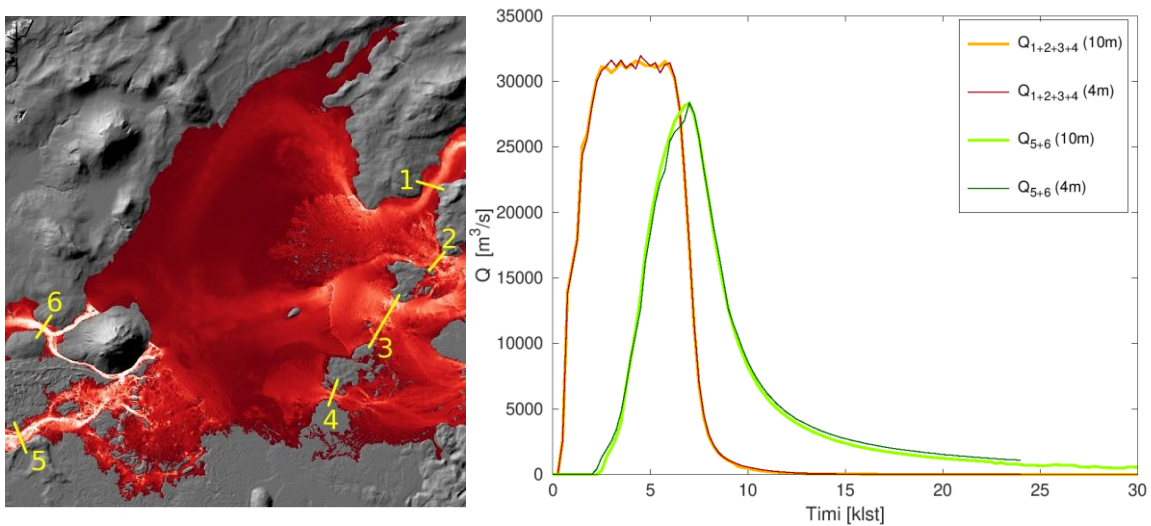
Samanburðurinn var á milli 4x4 m og 10x10 m reikninets fyrir sviðsmyndina Kkv02, án rofs á flóðvari. Fyrir 4 m reikninet var notast við 2x2 m landlíkan, en fyrir 10 m reikninetið var notast við 10x10 m landlíkan umreiknað úr 2x2 m landlíkaninu. Niðurstöður reikninganna má sjá á Myndum 3.20 og 3.21



Mynd 3.20. Útbreiðsla og hámarksdýpi hlaupvatns á 4m reiknineti (mynd t.v., 2x2 m landlíkan) og 10 m reiknineti (mynd t.h., 10x10 m landlíkan). Litur hlaupvatns er dökkrauður þar sem dýpi þess er á bilinu 0–2,5 m og hvítur fyrir dýpi  $\geq 10$  m. Sviðsmyndin er Kkv02 (án rofs á flóðvari) og vatnið kemur fram undan Köldukvíslarjökli t.h. á myndunum.



Mynd 3.21. Hámarks-rennslisraði hlaupvatns á 4m reiknineti (mynd t.v., 2x2 m landlíkan) og 10 m reiknineti (mynd t.h., 10x10 m landlíkan). Litur er dökkrauður fyrir hraðann 0–2,5 m/s og hvítur fyrir  $\geq 10$  m/s. Sviðsmyndin er Kkv02 (án rofs á flóðvari).



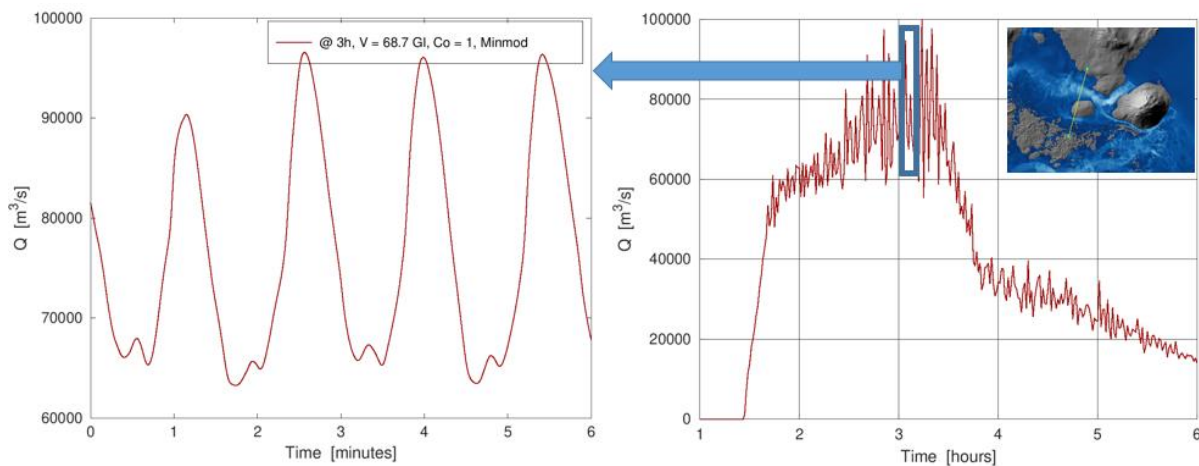
Mynd 3.22. Samanburður á rennsli hlaupvatns inn og út úr Hágöngulóni (mynd t.v.) fyrir 4 m og 10 m reikninet. Myndin t.h. sýnir samanlagt reiknað rennsli inn í lónið um þversniðin 1, 2, 3 og 4 fyrir tilvikin tvö og samanlagt útrennsli um þversnið 5 og 6. Sviðsmyndin er Kkv02 (án rofs á flóðvari).

Mjög lítil munur er á niðurstöðum um útbreiðslu, dýpi og rennslisraða fyrir reikninet með mismunandi upplausn. Athuga ber að líkantími var mismunandi; 24 klst fyrir 4x4 m reikninet en 48 klst fyrir 10 m reikninet en gögn um inn- og útrennsli eru þó einnig mjög sambærileg (Mynd 3.22 t.h.): Á fyrstu 24 klst reiknast innflæði í Hágöngulón (þversnið 1–4) 688,6 Gl á 4 m reiknineti og 685,9 Gl á 10 m reiknineti, mismunur er því 0,4%. Á sama tímabili er útlæði úr Hágöngulóni (þversnið 5–6) 575,4 Gl á 4 m neti og 561,1 Gl á 10 m neti; mismunur er 2,5%.

### 3.4.5 Greining á stöðugleika og skekkju hermana

Í Töflu 3.5 kemur fram munur á því hvernig rof hjástíflu Hágöngulóns er hermt í GeoClaw og Hec-Ras reikningum. Í hinum fyrnefndu er stíflurofið hermt með þeim hætti að upptakasvæði er sett rétt neðan við flóðvar stíflunnar og leggst vatnið úr lóninu við hlaupvatnið frá jaðri Vatnajökuls, sjá einnig Mynd 4.1 til hægri. Hegðun þessa samanlagða,

hermda rennslis er það fer um Kvíslavatns-þversniðið neðan stíflunnar var könnuð sérstaklega í þessu verkefni. Fyrstu 6 klukkustundir reiknaðs hlaupferils gegnum þversniðið eru sýndar til hægri á Mynd 3.23. Við fyrstu sýn virðast óreglulegar sveiflur koma fram á ferlinum og er mögulegt að sveiflur af þessu tagi orsakist af tölulegum óstöðugleika í reikningunum. Þær hafa því verið kannaðar nánar með því að þetta skrifbil í reikningunum.



*Mynd 3.23. Rennslissveiflur í gegnum Kvíslavatns-þversniðið (sjá Mynd 3.16, merkt 1) eru í raun vel skilgreindar bylgjur. Skrifbilið  $\Delta HD$  er 1 sek (til vinstri) og 1 mín (til hægri). Tíminn 0 mínútur á myndinni t.v. samsvarar  $t = 3$  klst á myndinni t.h. T.v. eru sýndar niðurstöður fyrir 6 mínútna tímabil en uppgæfið reiknað rúmmál á myndinni (68.7 GL er reiknað fyrir 15 mínútur (þ.e frá 3:00 til 3:15). Sviðsmyndin er Ham01.*

Í ljós kemur við nánari skoðun (Mynd 3.23 t.v.) að víxlverkun rennslis við landyfirborðið og vatnið sem fyrir er leiðir til myndunar straumstökk<sup>8</sup> og stórra bylgna í hinu reiknaða rennsli.

Í framhaldinu var stöðugleiki þessarar niðurstöðu kannaður sérstaklega. Fyrst voru athuguð áhrif sk. Courant-tölu ( $Co$ ), sem skilgreind er þannig:

$$Co = \frac{U\Delta t}{\Delta x} \quad (3.7)$$

þar sem  $U$  er rennslis hraði,  $\Delta t$  er tímaskref (e. time step) hermunarinnar og  $\Delta x$  er breidd möskva í reikninetinu.

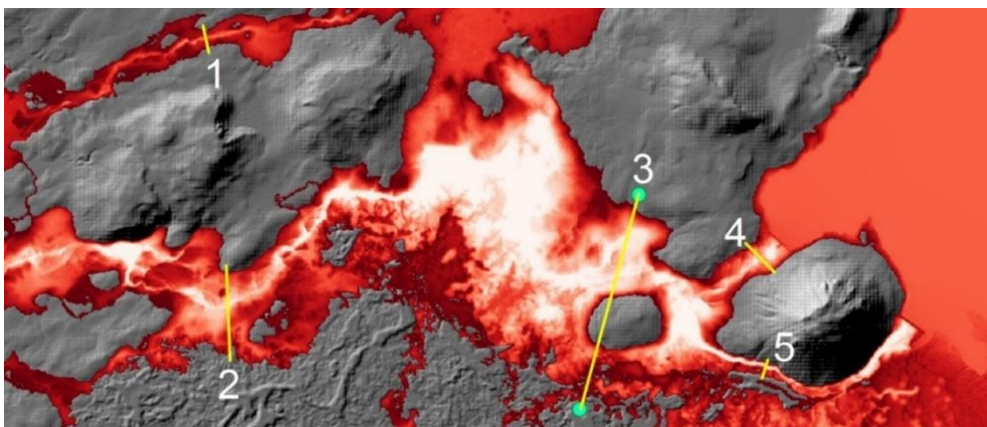
Courant talan segir til um hversu vel upplýsingar um ástand hlaupsins berast yfir einn möskva á einu tímaskrefi, sem valið hefur verið í viðkomandi hermun. Sé  $Co > 1$  berast upplýsingar yfir meira en einn möskva í einu tímaskrefi og reiknilausnir geta orðið

<sup>8</sup> Straumstökk (e: hydraulic jump) í vatnsrennsli er það kallað þegar vatnsflóð streymir á verulegum hraða út í vatn með hægara rennsli í farvegi. Hægir þá snögglega á flóðvatninu og framhluti þess rís og myndar bylgjufald. Mikill hraði hlaupvatnsins m.v. hið hægara rennsli sem fyrir er getur leitt til mikils iðustreymis og reglulegra rennslisbylgna í farveginum.

óstöðugar. Prófuð voru Co-gildin 1, 0,1 og 0,01 og reyndist breyting í Courant-tölu ekki hafa teljandi áhrif á bylgjurnar.

Einnig var prófað að beita mismunandi *takmörkurum* (e. flux limiters/TVD) á sveiflurnar, þ.e. stærðfræðilegum aðferðum til að takmarka óregluleg töluleg útslög sem fram geta komið vegna skyndilegra breytinga í streyminu. Mismunandi reikniaðferðir til að hemja slíkar sveiflur reyndust ekki hafa áhrif á meðalrennsli eða heildarrúmmál um þversniðið og var ákveðið að notast við eina tegund takmarkara, táknaða MC (e. Monotonized Central limiter) í öllum aðalreikningum þessa verkefnis.

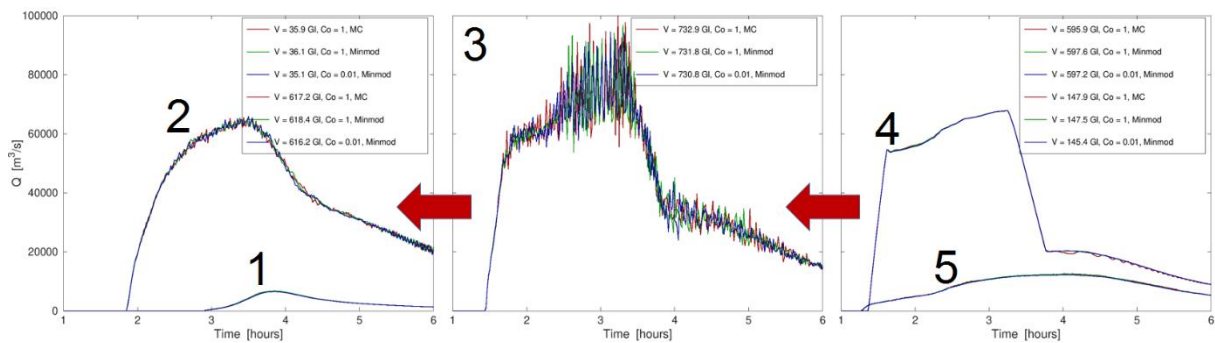
Kannað var sérstaklega hve lengi bylgjuhreyfinga þeirra, sem sjáanlegar eru í þversniðinu á Mynd 3.23 (t.v.), gætir í hermuninni. Mynd 3.24 sýnir legu tveggja þversniða (Nr. 4 og 5) ofan Kvíslavatnssniðsins (Nr. 3) og annarra tveggja þversniða (Nr. 1 og 2) neðan þess og Mynd 3.25 sýnir reiknað rennsli um þau öll í sviðsmyndinni Ham01. Sýnd eru dæmi reiknuð með mismunandi Courant-tölum og breytilegum takmörkurum. Fyrir innrennslið um þversnið 4 og 5 eru svo til engar rennslisbylgjur til staðar. Þar fyrir neðan leiðir mikið og ört rennsli og víxlverkun þess við landyfirborðið ásamt straumstökkum (Froude gildi hér vel yfir 1)<sup>9</sup> til myndunar bylgnanna sem sjást fara um þversnið 3. Bylgjurnar deyfast þar fyrir neðan og eru orðnar mjög litlar í þversniðum 1 og 2.



Mynd 3.24. Þversnið 1 til 5. Fyrrgreint „Kvíslavatns-þversnið“ á Mynd 3.16 er þversnið 3.

---

<sup>9</sup> Táknid  $Fr$  á hér við sk. Froude-tölu, skilgreinda sem  $Fr = U/\sqrt{gL}$ , þar sem  $U$ =hraði rennslis,  $g$ =þyngdarhröðunin og  $L$  er kennilengd (notast er við dýpi sem þessa kennilengd hér). Froude-talan er einingarlaus gefur til kynna hvort straumstökk geti átt sér stað. Skilyrði þess er að  $Fr > 1$ .



Mynd 3.25. Rennslisferlar gegnum þversniðin á Mynd 3.24 (númer ferla samsvara númerum þversniðanna). Reiknitími er 6 klst, með skrifbil  $\Delta HD = 1$  mín. Sviðsmyndin er Ham01 (með rofi á flóðvari). Reiknað heildarrúmmál sem fer um hvert þversniðin á reiknitímanum, fyrir mismunandi Courant tölur og takmarkara, er gefið á myndskýringunum. Munur á hæsta og lægsta rúmmálgildi reyndist  $\leq 0,5\%$ .

Í ofangreindum hermunum með 6 klst reiknitíma reiknaðist heildarrúmmálið, sem fór gegnum þversniðin 4 og 5, samtals um 740 GL, en um þversnið 1 og 2 höfðu um 650 GL farið eftir 6 klst hermun. Mismunurinn,  $740 - 650$  GL = 90 GL, samsvarar því rúmmáli sem er í farveginum milli efri þversniðanna og hinna neðri. Auk hermana með 6 klst reiknitíma fór fram keyrsla með 19 klst reiknitíma og minnkaði mismunurinn þá í 14 GL, enda tæmist hlaupvatn smám saman úr farveginum. Sem fyrr reyndust mismunandi Courant-tölur og takmarkarar hafa sáralítill áhrif á rúmmálið, sem fór um þversniðin í þessum keyrslum. Niðurstaða þessara athugana er því sú að reikningarnir séu almennt stöðugir og ekki hafa fundist tölulegar villur sem hafa áhrif á hermanir.

### 3.5 Reikningar á áhrifum uppistöðulóna og stíflna

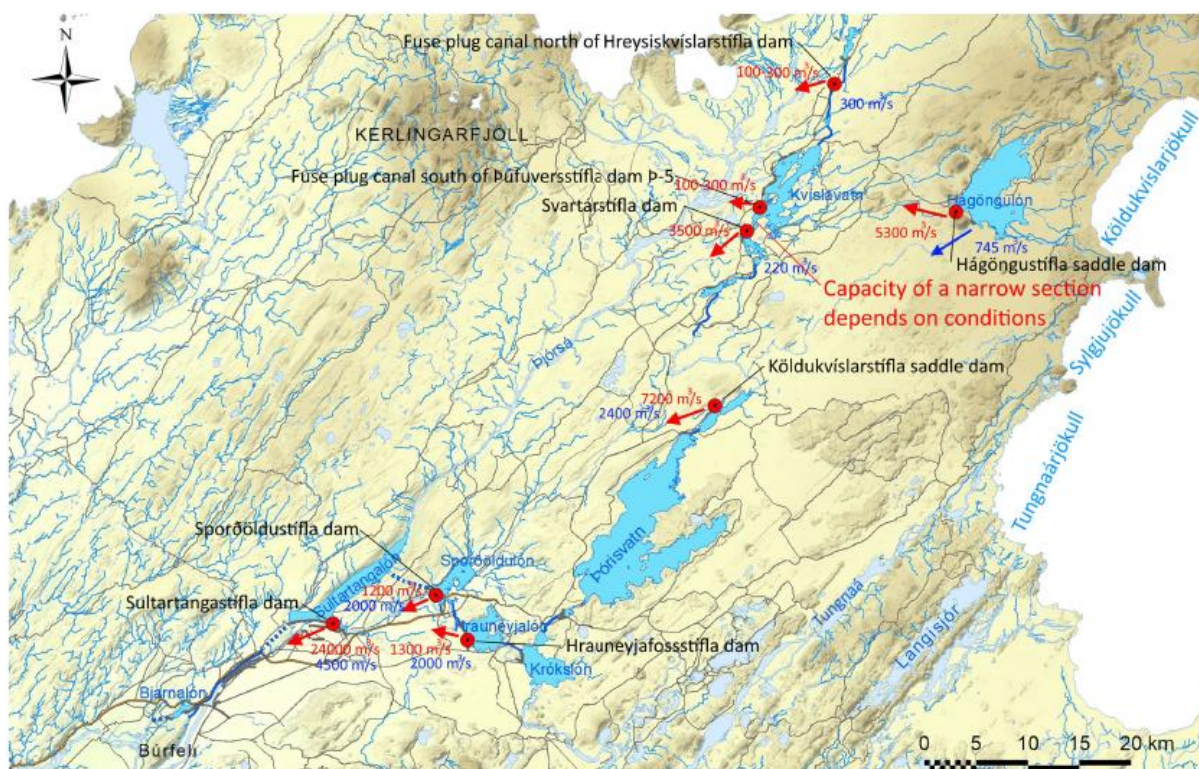
#### 3.5.1 Forsendur varðandi uppistöðulón og stíflur

Á leið jökulhlaupa til suðvesturs frá Bárðarbungu og nálægum svæðum innan Vatnajökuls eru eftirtalin uppistöðulón ofan stíflumannvirkja: Hágöngulón, Kvíslavatn, Sauðafellslón, Krókslón, Hrauneyjalón, Sporðöldulón, Sultartangalón og Bjarnalón. Sjá Töflu 3.7 og Mynd 3.26. Flóðvör eru á stíflum við öll þessi lón (utan Krókslóns). Flóðvar er hluti stíflunnar sem er lægri en megin hluti stíflunnar og veikbyggðari (sjá teikningu af flóðvari við Hágöngulón á Mynd 3.27). Er það með ráðum gert svo stórflóð finni sér þar farveg og valdi aðeins skemmdum á flóðvarinu en rjúfi ekki alla stífluna. Í þessum reikningum hefur þó einnig verið gert ráð fyrir möguleika á stíflurofi í stærstu hlaupum, þ.e. að stíflan rofni mestöll og lónvatn flæði fram.

Tafla 3.7. Manngerð uppistöðulón á Þjórsár-Tungnaáarsvæðinu<sup>10</sup>. Heimild: Hugrún Gunnarsdóttir (2016).

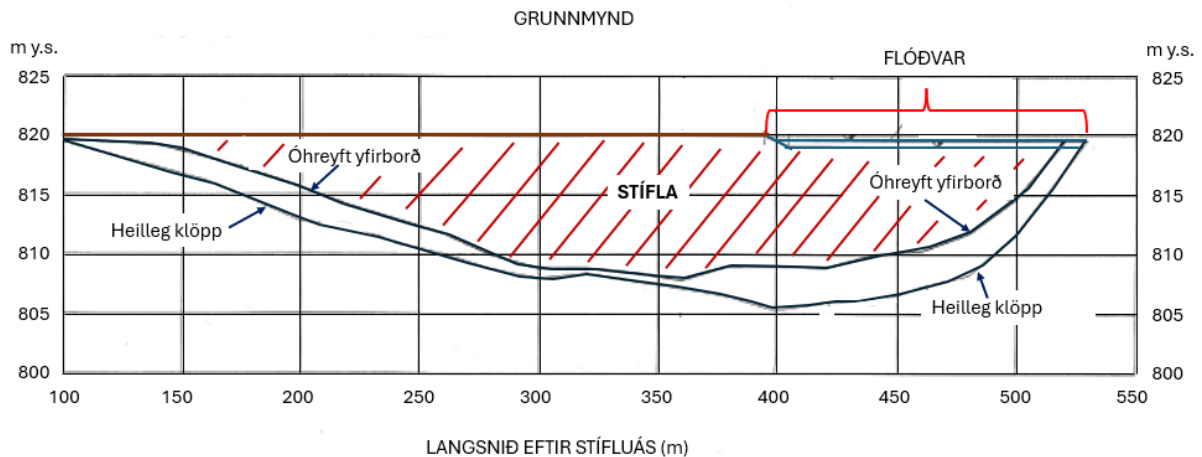
| Heiti lóns      | Flatarmál [km <sup>2</sup> ] |
|-----------------|------------------------------|
| Hágöngulón      | 34                           |
| Kvíslaveitulón* | 32                           |
| Sauðafellslón   | 5.2                          |
| Sultartangalón  | 20                           |
| Krókslón        | 14                           |
| Sporðöldulón    | 7                            |
| Hrauneyjalón    | 9                            |
| Bjarnalón       | 1                            |

\* Stóraverslón, Kvíslavatn, Eyvindarlón, Hreysislón og Þjórsárlón

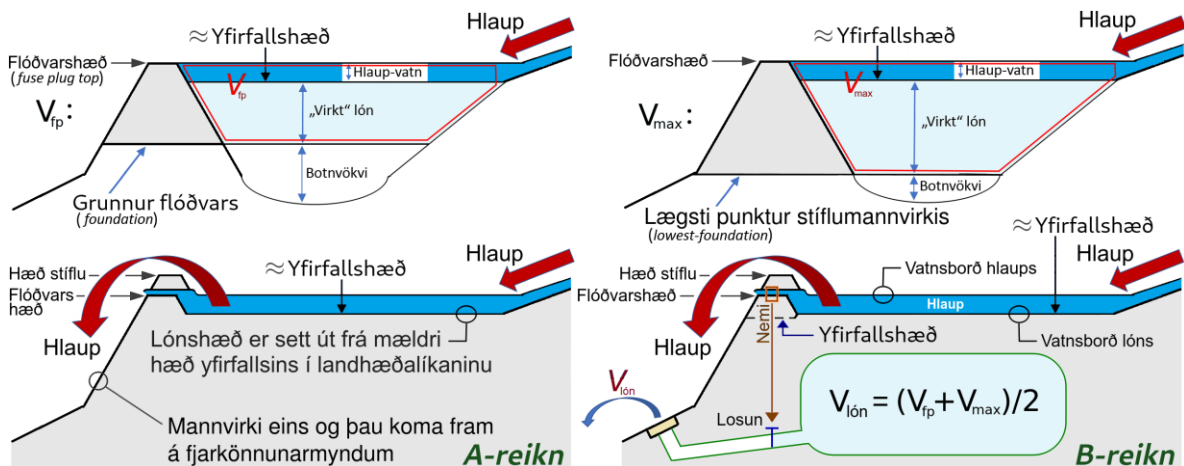


Mynd 3.26. Yfirlitsmynd sem sýnir staðsetningu flóðvara við lónin. Fig. 5.1 í Unnar Númi Almarsson o.fl. (2020).

<sup>10</sup> Þórisvatn er stærsta og þýðingarmesta miðlunarlónið á svæðinu en það er að uppruna náttúrulegt stöðuvatn og því ekki skráð í töfluna. Að auki fer hlaupvatn að mestu framhjá Þórisvatni (um Sauðafellslón) í reikningunum.



Mynd 3.27. Hjástíflan undir norðanverðri Syðri-Hágöngu (horft til norðausturs). Flóðvarið er hægra megin á stíflunni, 130 m langt, 1 m lægra en meginhluti stíflunnar og 2 m lægra en aðalstíflan við austurjaðar Syðri Hágöngu. Ofan á flóðvarinu er 0.5 m þykk brjóstvörn. Teiknað eftir Fig. 4.10 í Unnar Númi Almarsson o.fl. (2020).



Mynd 3.28. Myndirnar sýna í aðaldráttum uppbyggingu stíflu með flóðvari, hvernig hlaupvatn bætist ofan á það vatn, sem fyrir er í uppistöðulóninu og hvernig miðlunar mannvirkin eru höndluð með mismunandi hætti í A- og B-reikningunum. Efsti hluti stíflunnar á efri myndunum gefur til kynna hæð flóðvarsins, sem er oft um 2–3 m hærra en yfirfall stíflumannvirkjanna. Á efri myndinni til vinstri er neðra borð flóðvars gefið til kynna og einnig botn sjálfrar stíflunnar. Svokallað „virt“ lón nær frá yfirfallshæð niður að botni flóðvars. Rúmmálið  $V_{fp}$  á efri myndinni til vinstri er samanlagt rúmmál virks lóns og hlaupvatns þegar vatnið hefur náð upp fyrir topp flóðvarsins.  $V_{max}$  er skilgreint á sambærilegan hátt (m.v. að stíflumannvirkið rofni að lægsta punkti), sjá efri myndina til hægri. Í báðum tilvikum verður eftir einhver botnvökvi í lögsta hluta lónsins, sem ekki hleypur fram. Hér er ekki gert ráð fyrir að set fylli lögsta hluta lónsins og ryðji burt vatni úr botni þess. Í sumum tilvikum leiðir rof niður að neðsta punkti til þess að enginn botnvökvi verði til staðar. Í svokölluðum B reikningum er gert ráð fyrir rofi flóðvars og stíflu að hluta til. Vegna mikillar óvissu um stöðu í lónum og hvað muni í raun gerast er notast við meðaltal þess rúmmáls sem myndi losna við rof flóðvars og þess heildarrúmmáls sem myndi losna við fullt stíflurof, sjá neðri myndina til hægri.

Falli jökulhlaup í lón getur flóðvar rofnað en aðrir hlutar stíflugarðanna haldist nokkurn veginn óskemmdir. Losað rúmmál er í því tilviki gefið sem  $V_{fp}$  skv. Mynd 3.28. Í stórum hlaupum gætu aðal- og hjástíflur einnig gefið sig og fyrir versta mögulega tilfallið, sem er

rof við lægsta punkt stíflumannvirkis, er losað rúmmál gefið sem  $V_{max}$  á Mynd 3.28. Tölur um þetta hámarksrúmmál eru sýndar í Töflu 3.8 (sjá töflu í viðauka A – Rúmmál fyrir rofna aðalstíflu í Jón Elvar Wallevik o.fl. (2023)).

Í svokölluðum A-reikningum er hlaupvatn látið renna út á fast yfirborð lóns og flæða yfir stíflumannvirki eins og þau koma fyrir í landlíkani. Yfirborð lóna í landlíkaninu er vatnshæð nærri yfirfallshæð. Hlaupið hefur engin áhrif á stífluna eða flóðvar hennar. Vatn úr lóninu tekur því engan þátt í hlaupinu í þeirri meðhöndlun. Lónstæðið sjálf hefur heldur ekki áhrif á hlaupið til dempunar eins og raunin gæti orðið ef stíflur halda og vatnsstaða í lónum er lág. Þó halda stíflumannvirki, hærri en yfirfall, litlum hluta hlaupsins eftir, sé hámarksrennsli þess meira en yfirfallið ræður við.

*Tafla 3.8. Rúmmál vatns (Gígalítrar) í lónum á hlaupleiðum.  $V_{fp}$  = virkt lón frá flóðvarshæð niður að flóðvarsbotni ( $fp=fuse\ plug$ ) [Unnar Númi Almarsson o.fl., 2020];  $V_{us}$  = miðlunargeta lóns (e. usable storage) [Unnar Númi Almarsson o.fl., 2020] og  $V_{max}$  = virkt lón frá flóðvarshæð að stíflubotni (Unnar Númi Almarsson, persónuleg samskipti).  $V_{lón}$  er skilgreint með Jöfnu (3.5). Samanlagt rúmmál hveðrar breytu, heildarmagn, er gefið í neðstu línu töflunnar til samanburðar við rúmmál sviðsmynda, sjá kafla 3.2.*

|                    | $V_{fp}$ [GI] | $V_{us}$ [GI] | $V_{max}$ [GI] | $V_{lón}$ [GI] | $\Delta V$ [%] |
|--------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Hágöngulón         | 310,0         | 321,5         | 434,0          | 372,0          | 17,2           |
| Svartárstíflu      | 150,0         | 150,0         | 150,0          | 93,8*          | 0,0            |
| Sultartangalón     | 150,0         | 102,4         | 167,0          | 158,5          | 2,4            |
| Púfuversstíflu     | 30,0          | 150,0         | 150,0          | 56,2*          | 16,6           |
| Sauðafellslón      | 25,0          | 22,4          | 22,4           | 23,7           | 0,4            |
| Sporðöldulón       | 6,0           | 25,0          | 26,0           | 16,0           | 2,8            |
| Hreysisstíflu      | 0,5           | 2,0           | 2,5            | 1,5            | 0,3            |
| <b>Heildarmagn</b> | <b>672</b>    | <b>773</b>    | <b>952</b>     | <b>722</b>     |                |

\*Sjá nánar um rúmmálastölur lóna við Svartárstíflu og Púfuversstíflu 5 í Viðauka A við minnisblað Jóns Elvar Wallevik ofl. (2023).

Í reikningum á vegum þessa verkefnis, svokölluðum B-reikningum, er losað rúmmál úr lónum sett sem  $V_{lón}$  og gefið með eftirfarandi jöfnu:

$$V_{lón} = (V_{fp} + V_{max})/2 \quad (3.8)$$

Losað hlaupvatn reiknast því sem meðaltal af i) því rúmmáli sem losna mundi ef allt flóðvarið gæfi sig, og ii) öllu rúmmáli lónsins frá flóðvarshæð til stíflubotns. Þetta meðaltal er notað í reikningunum því ekki er vitað fyrirfram hvort aðeins verður rof á flóðvari eða hvort einnig kemur til stíflurofs. Með þessu er horft viljandi til frekar slæmrar atburðarásar en þó án þess að draga upp allra versta en mjög ólíklegt tilfelli. Til að þessi atburðarás gangi eftir þurfa öll lón að vera við hæstu vatnsstöðu þegar umtalsvert jökulhlaup, sem nær að rjúfa bæði flóðvör og stíflur að hluta, á sér stað.

Að notast við hæð flóðvars (líkt og  $V_{fp}$  og  $V_{max}$  fela í sér) en ekki hæð yfirfalls, jafngildir í raun að mjög mikið vatn sé í lónunum. Við vatnshæð jafna hæð flóðvars væri yfirfall á fullum afköstum líkt og fyrir 1000 ára veðurflóð þegar jökulhlaupið kemur. Þetta leiðir til ofmats á heildarrúmmáli sem losað er frá lónunum ef litið er yfir allan reikningstímann. Rof

stíflumannvirkja kemur aftur á móti ekki fram í landhæðarlíkaninu í reikningunum. Stíflumannvirki hærrí en yfirfall halda því aftur af hluta hlaupvatns, sem síðan rennur út um yfirfallið dagana á eftir. Þetta ofmat gefur því réttara mat á rúmmáli megintopps hlaupsins fyrstu dagana, þótt það leiði til ofmats á rúmmáli hlaupvatns í hala hlaupsins, jafnvel meira en 10 daga á eftir.

Uppsetningin er sýnd á Mynd 3.28 og meðhöndlun er eftirfarandi:

Hlaupvatnið streymir inn á lónið og gert er ráð fyrir að vatnið safnist ofan á „fast“ yfirborð lónsins.

Reikningsaðferðin er sú að láta það lónvatn sem losnar (sbr. Jöfnu (3.8)) streyma frá upptakastað rétt neðan þess hluta stíflunnar þar sem flóðvarið er staðsett, þegar vatnshæð nær 0.1 m yfir hæð flóðvars.

Lögun rennslisritins er höfð hin sama og lögun rennslisrits sviðsmyndarinnar við jökul (Mynd 3.29). Rishraði og fallhraði rennslisritsins eru því þeir sömu en varandi og hámarksrennsli ræðst af rúmmáli vatns í viðkomandi lóni.

Nánar er farið yfir hvert atriði hér að neðan. Tafla 3.9 sýnir 5 dæmi um hæð flóðvars á stíflum á svæðinu. Einnig er sýnd hæð yfirfalls við hvert lón (þ.e. hæstu stöðu lónvatns við venjulegar aðstæður). Flóðvarshæð er yfirleitt 2–3 m ofan yfirfallshæðar.

*Tafla 3.9. Hæð yfirfalls og flóðvars í metrum, skv. Unnari Núma Almarssyni o.fl. (2020).*

|                               | Hágöngulón | Kvíslavatn | Sultartangelón | Sauðafellslón | Sporðöldulón |
|-------------------------------|------------|------------|----------------|---------------|--------------|
| Yfirfall                      | 816.0      | 604.0*     | 298.2          | 579.0         | 337.3        |
| Flóðvar                       | 819.0      | 606.5**    | 300.0          | 581.0         | 340.2        |
| Mismunur                      | 3.0        | 2.5        | 1.8            | 2.0           | 2.9          |
| $A_{lón}$ [km <sup>2</sup> ]: | 34         | 25         | 20             | 5.2           | 7            |

\* Ekki eru yfirföll á stíflumannvirkjum Kvíslavatns og því var notast við yfirborðshæð lóns, skv. Töflu 10.2 í Jón Elvar Wallevik o.fl. (2023).

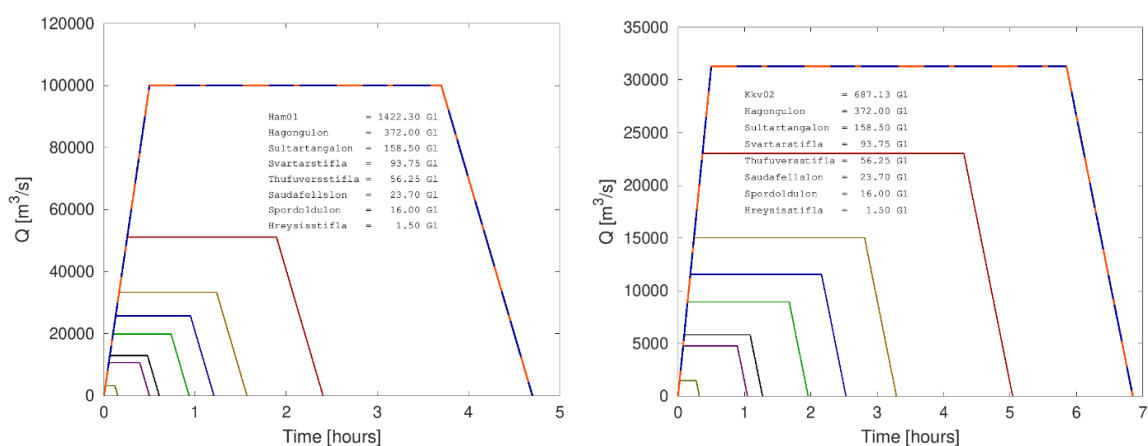
\*\* Meðalgildi af Svartárlóni og Púfuverslóni.

### 3.5.2 Rennslisrit vegna rofs á stíflumannvirkjum

Til einföldunar er rennslisritið vegna rofs á stíflumannvirkjum tiltekins lóns með sömu lögun og rennslisritið við upptök við jaðar Vatnajökuls (þ.e. fyrir hverja aðalsviðsmynd). Þetta má sjá á Mynd 3.29. Líkt og fram hefur komið þá er  $V_{lón} = (V_{fp} + V_{max})/2$  losað rúmmál hvers lóns í reikningunum, sjá Töflu 3.8. Til samanburðar sýnir Tafla 3.10 rúmmál aðalsviðsmyndar við upptök/jaðar Vatnajökuls.

Tafla 3.10. Heildarrúmmál sviðsmynda við upptakasvæði.

| Sviðsmynd | V <sub>svid</sub> [Gl] |
|-----------|------------------------|
| Ham01     | 1.422                  |
| Kkv02     | 687                    |
| Kkv05     | 2765                   |
| Bb02      | 100                    |
| Sy02      | 450                    |

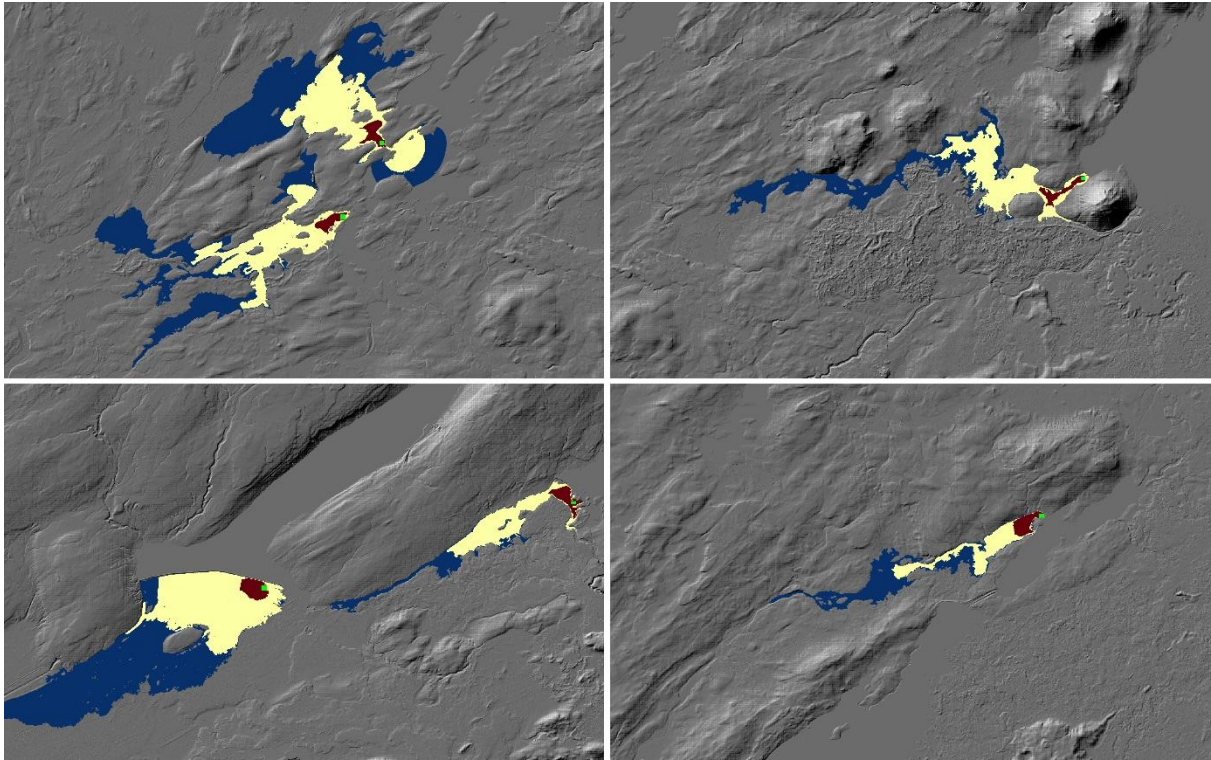


Mynd 3.29. Rennslisrit fyrir sviðsmyndina Ham01 (vinstri) og Kkv02 (hægri) við jaðar Vatnajökuls (rauð-bláar strikálínur, sjá Mynd 3.14) og fyrir rof á stíflumannvirkjum lóna (samfelldar línur). Athuga ber að rennslisritið við upptök Vatnajökuls fyrir sviðsmyndina Ham01 (þ.e. vinstri strikálínan) er jafnskipt á milli tveggja upptakasvæða, nefnd A1 og B2 (sjá kafla 1.2.1 í Jón Elvar Wallevík o.fl., 2022).

### 3.5.3 Rof stíflumannvirkja – uppsetning og staðsetning

Við rof á stíflumannvirki í hermunum er upptakasvæði lónvatns sem losnar (Tafla 3.8) staðsett rétt fyrir neðan tiltekið flóðvar (sjá Unnar Núma Almarsson o.fl. 2020 um staðsetningu flóðvara). Þessi staðsetning er valin þar sem flóðvarið er það fyrsta sem gefur sig í stíflumannvirki. Þetta getur valdið skekkju ef um stíflurof er að ræða og ekki einungis rof á flóðvari því vatn mun þá flæða frá stærra svæði. Þetta á sérstaklega við um Hágöngulón þar sem flóðvatn leitar í mismunandi farvegi eftir því hvort aðeins flóðvar á hjástíflu rofnar eða aðalstífla rofnar líka.

Mynd 3.30 sýnir upptakasvæði neðan flóðvara á 6 stíflumannvirkjum, lituð með ljósgrænum punktum. Sama staðsetning er notuð fyrir allar sviðsmyndirnar: Ham01, Kkv02, Kkv05, Bb02 og Sy02. Athuga ber að myndin sýnir útbreiðslu án aðalsviðsmyndar frá upptökum við jökul, þ.e. aðeins er sýnt rennsli frá flóðvari. Við hlaup frá rofinni Þúfuversstíflu 5 (myndin efst t.v.) fer eitthvað af rennslinu til baka í Kvíslavatn. Þetta bakrennsli er lítið eða um 4,5% af heildarrennslinu og má ætla að það hverfi með því að virkja sviðsmyndina frá upptökum við jökuljaðar (Tafla 3.10), ásamt rofi frá Hágöngulóni (Tafla 3.8).



Mynd 3.30. Við rof á stíflumannvirki er upptakasvæði rennslis staðsett rétt fyrir neðan tiltekið flóðvar, litað ljósgrænt. Upptakasvæðin eru við Púfuversstíflu 5 og Svartárstíflu (efst t.v.), Hágöngulón (efst t.h.), Sultartangalón og Sporðöldulón (neðst t.v.) og Sauðafellslón (neðst t.h.). Hreysisstífla var sett upp í hermunum en rofnaði aldrei og er því ekki sýnd hér. Dökkrautt: 5 mín eftir rof. Gult: 30 mín eftir rof. Blátt: 60 mín eftir rof. Niðurstöður eru sýndar fyrir sviðsmyndina Kkv02, sjá Mynd 3.29.

#### 3.5.4 Athugun á bakvatnsáhrifum og öðrum afleiðingum þess að rennslí í gegnum lónin er ekki að fullu hermt

Við hermanir jökulhlaupa inn í lón má fara tvær leiðir:

- Yfirborð lóns steipt inn í landhæðarlíkanið, þ.e. að gert er ráð fyrir fastri vatnshæð lóns í landlíkaninu og hlaupvatnið komi þar á ofan. Má líta svo á að vatnið í lóninu sé „steipt“ inn í landlíkanið og haggist ekki þegar hlaupvatnið streymi yfir það.
- *Eiginlegt vatnslón* tákna að vatn er látið fylla lægð í landlíkani (skv. dýptartölum eða öðrum upplýsingum um lónbotninn) og hlaupvatnið þröngvar sér síðan út í lónvatnið og lón- og hlaupvatn sameinast í eitt kerfi.

Ekki er fyrirfram víst að þessar tvær mismunandi aðferðir skili sambærilegri heildarmynd hlaups og var munurinn á niðurstöðum þeirra því kannaður sérstaklega fyrir nokkrar sviðsmyndir hlaupa inn í Hágöngulón. Landlíkön voru á 2 m neti og miðað við lónhæð í 816.9 m y.s. fyrir tilfellið þar sem lónið er steipt inn í landlíkanið. Líkantími fyrir hverja hermun var 24 klst og reikninetið 4x4 m.

Notast var við sviðsmyndirnar í Töflu 4.1., sjá Töflu 3.11.

Tafla 3.11 Kennitölur sviðsmynda fyrir athugun á bakvatnsáhrifum

|       | HeildarV* | HámarksQ                  | Líkantími |
|-------|-----------|---------------------------|-----------|
| Kkv02 | 687 GL    | 32.000 m <sup>3</sup> /s  | 24 klst   |
| Kkv05 | 2.765 GL  | 8.000 m <sup>3</sup> /s   | 24 klst   |
| Ham01 | 1.422 GL  | 100.000 m <sup>3</sup> /s | 24 klst   |

Niðurstöður voru þessar helstar:

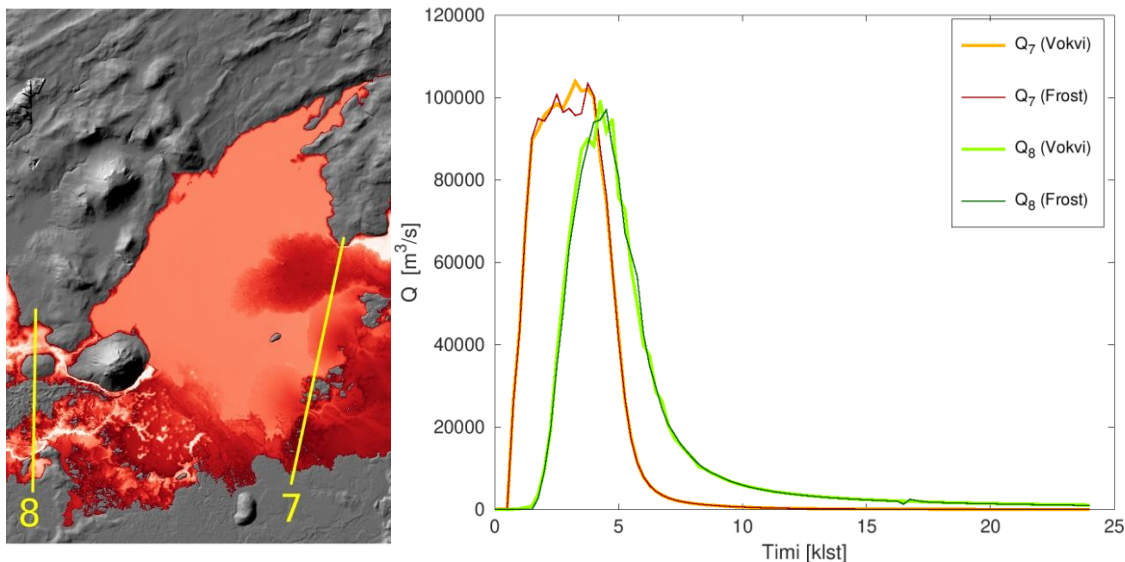
Sviðsmynd Kkv02: Mjög líttill munur reyndist vera á inn- og útrennslisferlum fyrir tilvikin tvö að ofan (eiginlegt vatnslón og yfirborð lóns stept inn í landhæðarlíkanið) og tölur um reiknað rúmmál voru mjög áþekkar. Heildarrúmmál vatns sem flæðir inn yfir „stept“ lón reiknast 688.6 GL á 24 klst en 686.2 GL fyrir vatnslón. Mismunurinn er aðeins 0,4%. Útrennslistölur reiknuðust 575,4 GL á 24 klst úr „steptu“ lóni en 593,9 GL úr vatnslóni og er munurinn 3%, en hann skýrist að miklu leyti af skemmd í landlíkani við aðalstíflu Hágöngulóns.

Sviðsmynd Kkv05: Tímalengd hermunar var 24 klst sem fyrr og er því aðeins hluti af heildarsviðsmyndinni nýttur í þessu tilviki. Hámarksrennslið er hér aðeins fjórðungur hámarksrennslis Kkv02 Tafla 4.1. Í þessu tilviki var einnig mjög líttill munur á inn- og útrennsli fyrir „stept“ lón og vatnslón.

Sviðsmynd Ham01-b: Í tilviki þessa hamfarahlaups hefur verið miðað við tvö upptakasvæði við jökuljaðar, A1 og B2, og að frá hvoru þeirra komi hlaup með hámarksrennsli 50.010 m<sup>3</sup>/s. Í þessari tilraun er allt rennslið látið koma frá upptakasvæði A1, með hámarksrennsli 100.020 m<sup>3</sup>/s og sama rennslisrit og sýnt er á Mynd 3.29. Sviðsmyndin hér er því skilgreind sem Ham01-b í stað Ham01. Líkt og fyrir hinar sviðsmyndirnar kemur líttill munur fram á hvernig skilgreiningu lónanna í landlíkaninu er háttað.

Mynd 3.31 sýnir legu þversniða við Hágöngulón (t.v.) og reiknað rennsli um þau fyrir vatnslón og lón með fast yfirborð. Sárálíttill munur kemur fram á reiknuðu hlauprúmmáli, flóðtoppum og lögun rennslisrita í gegnum þversnið 7 (inn í lónið) og 8 (út úr lóninu).

Niðurstaða þessara prófana er sú að í sviðsmyndum misstórra hlaupa komi ekki fram áhrif að ráði þegar gert er ráð fyrir að hlaupvatn renni út á lón með fast yfirborð. Því má álykta sem svo að lón með föstu yfirborði í landlíkani séu ásættanleg nálgun og skekki ekki heildarmynd hermunar.



Mynd 3.31. T.v.: Staðsetning mæliverisniða við Hágöngulón. T.h.: Niðurstöður fyrir þessu þversnið fyrir vatnslón og lón með fastri yfirborðshæð sem er steipt inn í landlíkanið. Fasta hæðin er kölluð frost í myndskýringum. Sviðsmynd Ham01-b.

### 3.6 Hættumat

Skýrsla þessi birtir hættumat fyrir hluta af vatnasviði Þjórsár. Felst það í greiningu á tjónmætti, sem aftur byggist á stærð og afli náttúruhamfara og líkindum á að hamfarirnar eigi sér stað, óháð því hvort byggð eða mannvirki séu til staðar (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022). Í þessu verkefni er aðeins gert takmarkað áhættumat, þar sem slíkt mat er háð tjónnæmi, þ.e. háð viðkvæmni samfélagsins og innviða þess gagnvart tjóni.

Tjónmætti er gjarnan notað til þess að meta hvort straumhraði og vatnsdýpi verði umfram það sem líklegt er að mannvirki þoli eða hvort fólki stafi hættu af flóðum af ákveðinni stærð (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022). Með stærðarflokkun útreiknaðs tjónmættis má leggja mat á þá hættu sem steðjar að fólki, byggingum og innviðum, t.d. með DEFRA aðferðinni (DEFRA, 2006a,b). Hættu vegna vatnsflóða er lýst með tjónmætti flóða/hlaupa (hér nefnt *hr* sem stytting á Hazard Rating), sem reiknað er skv. Jöfnu (3.9):

$$hr = (v + 0,5) \cdot d + DF \quad (3.9)$$

Stærðirnar  $v$  og  $d$  eru straumhraði og dýpi. Fastanum 0,5 er bætt við í þessari jöfnu svo djúpt vatn með lítinn straumhraða flokkist ekki sem hættulaust.

Stuðullinn  $DF$  (e. debris factor) í Jöfnu (3.9) gefur til kynna hve mikið af lausagrjóti, ísjökum, braki og öðru efni berst með hlaupinu og tekur hann gildi á bilinu 0–1. Gildið 0 á við hægfara hlaup sem ekki ber með sér grjót og jaka, gildið 0,5 á við hlaup sem ber með sér lausagrjót, ísjaka og brak og gildið 1 á við flóð sem ber með sér mikið af slíku. Í þessu verkefni er ávallt notast við töluna  $DF = 0,5$ .

Samkvæmt aðferðum DEFRA er mælt með eftirfarandi flokkun á tjónmættisgildum:

$hr < 0,75$ ;  $0,75 < hr < 1,25$ ;  $1,25 < hr < 2,0$  og  $hr > 2,0$  (Surendran o.fl., 2008), sjá Töflu 3.12. Fyrir sviðsmyndir þær sem hér er fjallað eru niðurstöður úr greiningu tjónmættis sýndar í 4. kafla.

Tafla 3.12. Hætta sem fólki stafar af flóði, samkvæmt flokkun tjónmættisgilda.

| Tjónmættisgildi (HR) | Litaflokkun | Hætta gagnvart fólki                                  |
|----------------------|-------------|---|
| < 0,75               |             | Mjög lítil hætta                                      |
| 0,75–1,25            |             | Hætta fyrir börn, eldra fólk og þá sem fara hægt yfir |
| 1,25–2,0             |             | Hætta fyrir flesta                                    |
| > 2,0                |             | Hætta fyrir alla, þ.m.t. fyrir björgunaraðila         |

### 3.7 Framsetning niðurstaðna og úttaksgögn úr líkanreikningum

Í hermunum þessa verkefnis reiknar GeoClaw-líkanið vatnsdýpi og skriðþunga rennslis sem fall af tíma og staðsetningu. Fyrir tvívíð kerfi og þar sem eðlisþyngd ( $\rho$ ) er fasti er skriðþunginn ( $p$ ) yfirleitt reiknaður sem margfeldi af dýpi ( $d$ ) og hraða ( $v$ ) og ritaður sem  $p = v \cdot d$  (þetta gildir fyrir flest líkön af þessari tegund). En í raun er réttara að rita skriðþungann sem  $p = v \cdot \rho \cdot d$ , því þá er þessi stærð með rétta eðlisfræðilega einingu eða [kg·m/s] m.t.t. einingarflatarmálsins 1 m<sup>2</sup>. Föst eðlisþyngd deilist burt úr hreyfijöfnunni (hér, dýpishildaðri Navier-Stokes jöfnu) og niðurstöður reikninganna verða óháðar eðlisþyngdinni. Með öðrum orðum: framlag eðlisþyngdar  $\rho$  til kraftþáttar hreyfijöfnunnar ( $F$ ) verður jafnt framlaginu til tregðuhluta hennar ( $ma$ ), sbr. annað lögmál Newtons (þ.e. Navier-Stokes). Fyrir flóknari kerfi gildir ofangreind einföldun ekki lengur og verður þá að gera ráð fyrir breytilegri eðlisþyngd í reikningunum.

Úttaksgögn úr hermun má rita þannig:

$$\text{Vatnsdýpi:} \quad d = d(x,y,t) \quad (3.10)$$

$$\text{Skriðþungi:} \quad \mathbf{p} = p_x(x,y,t) \mathbf{i}_x + p_y(x,y,t) \mathbf{i}_y \quad (3.11)$$

Hér eru  $x$  og  $y$  hnit (eða reiknipunktur) í hnitakerfinu ISN93/EPSS:3057 og  $t$  er tími frá upphafi hermunar. Dýpið  $d$  er skalarstærð (þ.e. tala sem ekki er stefnuvirk) en skriðþunginn  $\mathbf{p}$  er vigri sem skiptist í  $x$ -þátt og  $y$ -þátt, ritaða sem  $p_x = v_x d$  og  $p_y = v_y d$ , þar sem  $v_x$  og  $v_y$  eru tilsvarendi hraði í  $x$  og  $y$ -átt. Stærðirnar  $i_x$  og  $i_y$  eru einingavigrar hnitakerfisins. Tölugildi skriðþungavigursins er reiknað skv. Jöfnu (3.12):

$$p(x,y,t) = (p_x^2 + p_y^2)^{1/2} \quad (3.12)$$

og tölugildi straumhraða (e. speed) er reiknað skv. Jöfnu (3.13):

$$v(x,y,t) = p(x,y,t) / d(x,y,t) \quad (3.13)$$

Út frá hraða  $v$  og dýpi  $d$  er hægt að reikna út tjónmætti (e. „Hazard Rating“) skv. Jöfnu (3.14):

$$hr(x,y,t) = (v(x,y,t) + 0,5) \cdot d(x,y,t) + DF \quad (3.14)$$

Ofangreind jafna verður nánar rædd síðar. Samanlagt gagnamagn úr reikningum á ofangreindum stærðum er umfangsmeira en svo að hægt sé að taka það til umfjöllunar í þessari skýrslu; er því sú leið farin að reikna hámarksgildi sem fall af tíma skv. jöfnunni hér að neðan:

$$\beta_{\max} = \beta_{\max}(x,y) = [\text{Hámark m.t.t. tíma } t \text{ af stærðinni } \beta(x,y,t) \text{ fyrir öll } x,y] \quad (3.15)$$

Gildið  $\beta$  getur táknað dýpi  $d$ , hraða  $v$ , skriðþunga  $p = vd$  og tjónmætti  $hr$ . Útkoman úr Jöfnu (3.15) er því

$$d_{\max} = d_{\max}(x,y), v_{\max} = v_{\max}(x,y), vd_{\max} = vd_{\max}(x,y) \text{ og } hr_{\max} = hr_{\max}(x,y) \quad (3.16)$$

sem eru hámarksgildi þessara stuðla á öllum reiknitíma viðkomandi hermunar. Út frá hámarksdýpi  $d_{\max}$  er svo reiknuð hámarksútbreiðsla hvers reiknaðs jökulhlaups og birt á meðfylgjandi kortum.

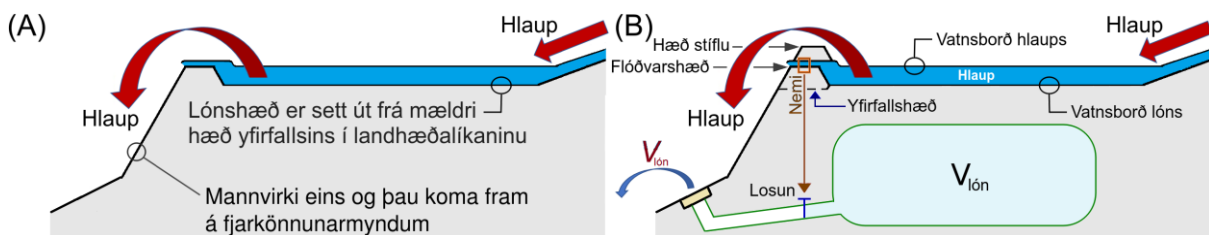
## 4 Niðurstöður straumfræðilegra líkanreikninga

### 4.1 Yfirlit um uppsetningu og framkvæmd hermana

Eins og lýst er í 3. kafla eru framkvæmdar tvönnar konar hermanir fyrir hverja sviðsmynd:

1. A-reikningar: Hlaupvatn streymir yfir lónvatn sem fast yfirborð væri, stíflur standast álagið til fulls og hlaupvatn fer yfir þær.
2. B-reikningar: Flóðvör í stíflum og stíflurnar sjálfar að hluta geta rofnað ef álag af völdum hlaupvatns verður umfram þolmörk og lónvatn bætist við hlauprennslið.

Tilvikin tvö gefa til kynna lágt og hátt mat á hættu, sem stafað getur af jökulhlaupum á þessu svæði og umlykja því líklegustu niðurstöður hverrar sviðsmyndar. Uppsetning A- og B-reikninga er hin sama að undanskildum möguleikanum á stíflurofi í hinum síðarnefndu. Mynd 4.1 skýrir muninn á rennsli inn í lón og frá lóni í þessum tveimur útgáfum reikninganna. Við stíflurof er upptakasvæði rennslis frá mannvirkinu staðsett rétt neðan við flóðvarið, enda er það sá hluti stíflunnar sem fyrst gefur sig í slíkum atburði. Vatnshæð þarf að ná 10 cm upp fyrir hæð flóðvars til að stíflurof<sup>11</sup> eigi sér stað í B-reikningunum (nemi sem mælir vatnshæðina er gefinn til kynna á Mynd 4.1 t.h.).



Mynd 4.1. Uppsetning á hermum án stíflurofs (A-reikningar, t.v.) og með möguleika á stíflurofi (B-reikningar, t.h.). Í A-reikningum er hlaupvatn frá jökuljaðri (dökkblái liturinn) látið berast yfir fast yfirborð lóns en lónvatn bætist ekki í hlaupið. Í B-reikningum bætist lónvatnið (ljósblái liturinn) við hlaupvatn sem berst frá jökuljaðri (dökkblái liturinn). Að öðru leyti eru A- og B-reikningar alveg eins. Með textanum „yfirfalls hæð“ (t.v.) er átt við hæð skv. fjarkönnunarmyndum að hausti, þ.e. hæð yfirfalls ásamt vatnsdýpi (á yfirfallinu). Sjá einnig kafla 3.5.1 (Mynd 3.28) í þessari skýrslu.

Sviðsmyndir jökulhlaupa frá Vatnajökli eru fimm talsins (sjá kafla 3.2) og eru rennslisrit þeirra sýnd á Mynd 3.14. Tafla 4.1 sýnir hversu langur tími líður í hverri sviðsmynd frá upphafi hlaups við jökuljaðar þar til rof verður á sex stíflum á hlaupleiðinni. Tölur um losað rúmmál við jökuljaðar, um hámarksrennsli hlaupanna og losað viðbótarrúmmál úr lónunum eru einnig gefnar upp í töflunni. Tímalengd er gefin í klukkustundum og mínútum (klst:mín)

<sup>11</sup> Í þessu riti, með hugtakinu „stíflurof“, er átt við millibilið á milli rof á flóðvari og eiginlegu stíflurofi. Flóðvarið er það fyrsta sem gefur sig í stíflumannvirki og getur losað að hámarki  $V_{fp}$ . En ef rof heldur áfram eftir það, á sér stað stíflurof sem getur losað að hámarki  $V_{max}$ . Losað vatn í B-reikningum „lónvatnið“  $V_{lón}$  er reiknað sem meðaltalið af  $V_{fp}$  og  $V_{max}$ , sjá Jöfnu (3.8) og Töflu 3.8 kafla 3.5.1. Sjá einnig Mynd 3.28 til frekari útskýringar.

og mínútagildi nálgðu að næsta korteri (tímasetningin 1:18 er t.d. nálgðu með 1:15). Í nokkrum tilvikum kemur ekki til stíflurofs, annað hvort vegna þess að vatnsdýpi nær ekki 10 cm yfir flóðvar eða vegna þess að hlaupvatn berst ekki inn í viðkomandi lón.

Tafla 4.1. Tímasetning á stíflurofi/rofi á flóðvörum fyrir B-reikningana. Tími er gefinn upp í klukkustundum og mínútum frá upphafi hlaups við jökuljaðar. Losað rúmmál við jökuljaðar og hámarksrennsli er sýnt í dálkinum lengst t.v. Gildin í sviga í efstu línu sýna losað rúmmál úr lónum  $V_{lón}$  (sjá Töflu 3.8).

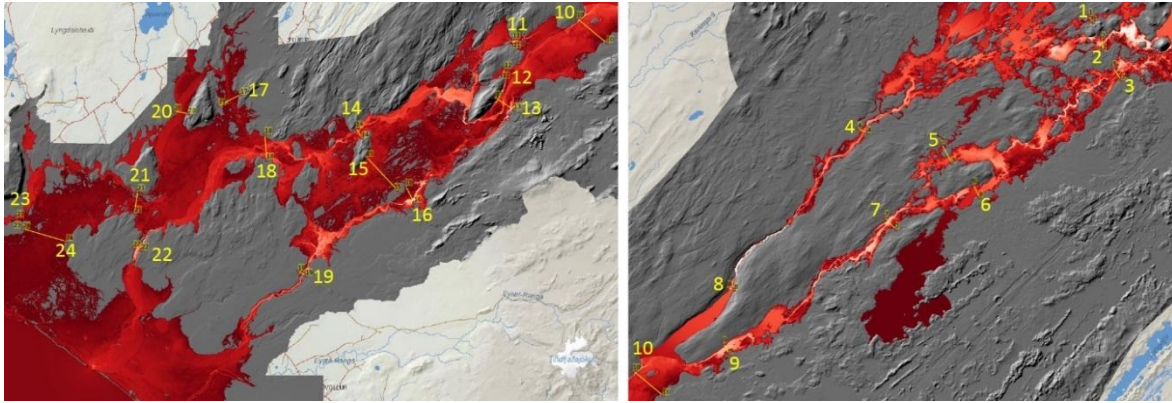
| Lón →<br>Sviðsmynd ↓   | Hágöngulón<br>(372 Gl)          | Púfuvers-<br>stífla (56 gl)     | Svartár-<br>stífla (94 Gl)      | Sauðafells-<br>lón (24 Gl) | Sultartanga-<br>lón (159 Gl) | Sporðöldu-<br>lón (16 Gl) |
|--|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| <b>Ham01</b><br>10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> /s<br>(1422 Gl) | 1:30                            | 3:15                            | 3:30                            | 5:00                       | 8:45                         | 7:45                      |
| <b>Kkv02</b><br>31.300 m <sup>3</sup> /s<br>(687 Gl)           | 2:30                            | 5:00                            | 5:45                            | 8:45                       | 11:45                        | 13:45                     |
| <b>Kkv05</b><br>8.000 m <sup>3</sup> /s<br>(2765 Gl)           | 3:30                            | 9:30                            | 13:15                           | 17:30                      | 23:00                        | 24:30                     |
| <b>Bb02*</b><br>6.650 m <sup>3</sup> /s<br>(100 Gl)            | 6:30                            | 10:15                           | 11:45                           | <i>Ekkert rof!</i>         | 19:00                        | <i>Ekkert rof!</i>        |
| <b>Sy02</b><br>19.450 m <sup>3</sup> /s<br>(450 Gl)            | <i>Lón utan<br/>útbreiðslu!</i> | <i>Lón utan<br/>útbreiðslu!</i> | <i>Lón utan<br/>útbreiðslu!</i> | 4:00                       | 9:15                         | 8:00                      |

\*Athugið að stíflurof eru ólíkleg í sviðsmyndinni Bb02 og almennt unnið með niðurstöður A-reikninganna fyrir þessa sviðsmynd hér í skýrslunni, þó að roftímar úr B-reikningunum séu gefnir hér.

## 4.2 Rennsli um valin þversnið

Mynd 4.2 sýnir staðsetningu 24 þversniða sem notuð eru til að reikna rennsli á mismunandi stöðum í farvegum hlaupanna. Þversniðin eru merkt 1–24 og var lega þeirra var ákveðin í samráði VÍ og Verkís. Valin dæmi eru sýnd að neðan en öll gögn um rennsli gegnum þversniðin eru aðgengileg í þjappaðri skrá (sjá: Bardarbunga\_OPIN\_GOGN.zip). Auk rennslisferla er reiknað út heildarrúmmál hlaupvatns, sem fer um tiltekið þversnið á 10 dögum, skv. Jöfnu 3.5 í kafla 3.3.5.

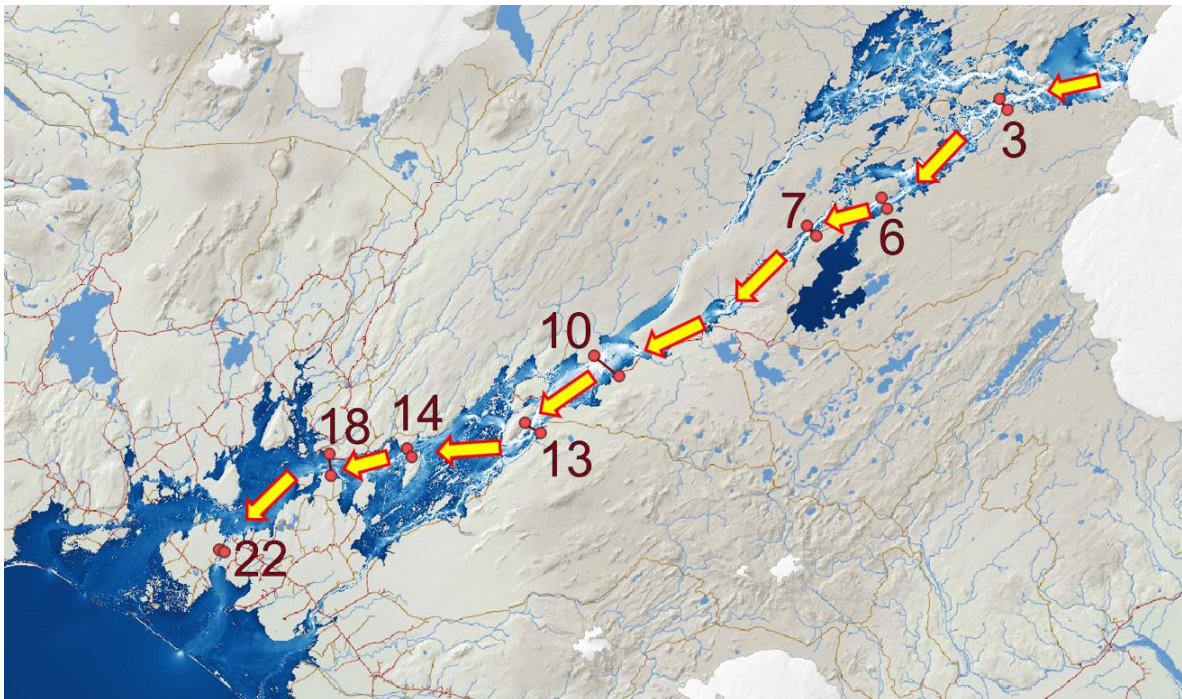
þar sem  $Q(t)$  er tímaháð rennsli og  $V$  er heildarrúmmál á tímanum  $t$ . Valið skrifbil í hermunum er  $\Delta HD = 15, 30$  eða  $60$  mín, háð sviðsmynd og tímasetningu. Það þýðir að heildað (tegrað) er skv. Jöfnu (3.5) í 15, 30 eða 60 mínútna skrefum yfir 240 klst tímabil (þ.e. 10 daga). Úr hverri hermun koma 4 til 6 Tb af gögnum og með þéttara skrifbili  $\Delta HD$  yrði gagnamagnið óþarflega umfangsmikið.



Mynd 4.2. Staðsetning þversniða 1 til 24.

#### 4.2.1 Rennsli um farvegi Köldukvíslar og Þjórsár

Þversniðin sem gefin eru til kynna á Mynd 4.2 dreifast á ýmsa farvegi sem hlaupvatn fer um í reikningunum. Til að fá mynd af því hvernig hlauphámark og rennslismagn þróast frá jökuljaðri niður undir strönd var ákveðið að kanna sérstaklega líkanreiknað rennsli um þversniðin sem sýnd eru á Mynd 4.3. Þau koma í nokkuð beinu framhaldi hvert af öðru á rennslisleið frá Hágöngulóni niður farveg Köldukvíslar, framhjá Þórisvatni og alla leið niður í Sporðöldulón í Tungnaá, þaðan í Sultartangalón í Þjórsá og svo eftir farvegi hennar niður Þjórsárdal og Suðurlandsundirlendið til sjávar.

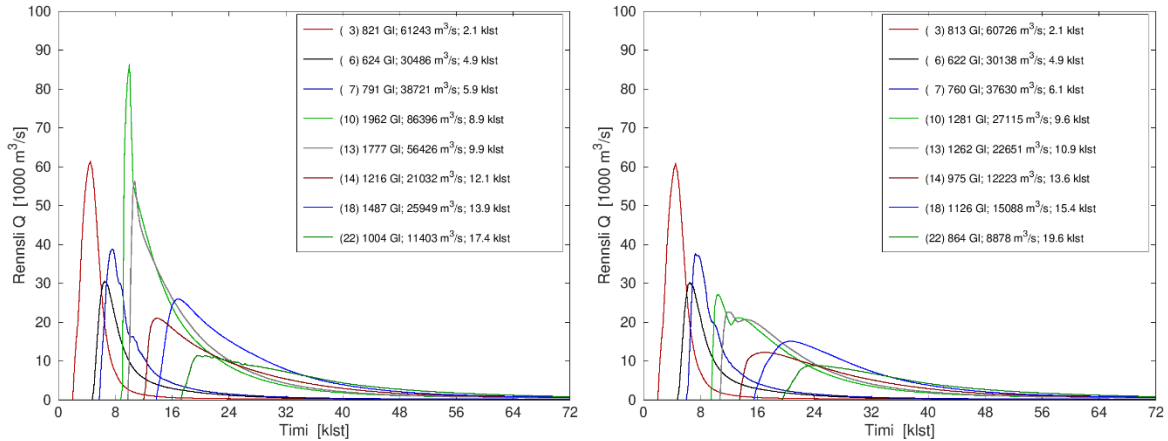


Mynd 4.3. Staðsetning þversniða 3, 6, 7, 10, 13, 14, 18 og 22. Sjá einnig Mynd 4.2.

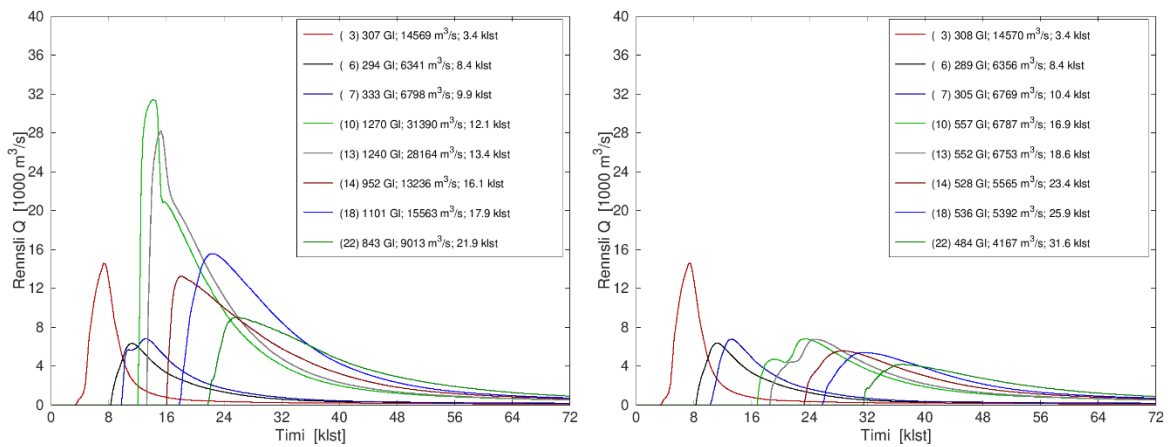
Myndir 4.4 til 4.8 sýna rennsli  $Q(t)$  í gegnum ofangreind þversnið Nr. 3,6,7,10,13,14,18 og 22. Sýnd eru rennslisrit fyrir A- og B-reikninga. Myndskýring í ramma á myndunum gefur eftirfarandi fjórar tölur til kynna:

- Númer þversniðs skv. myndum 4.2 og 4.3

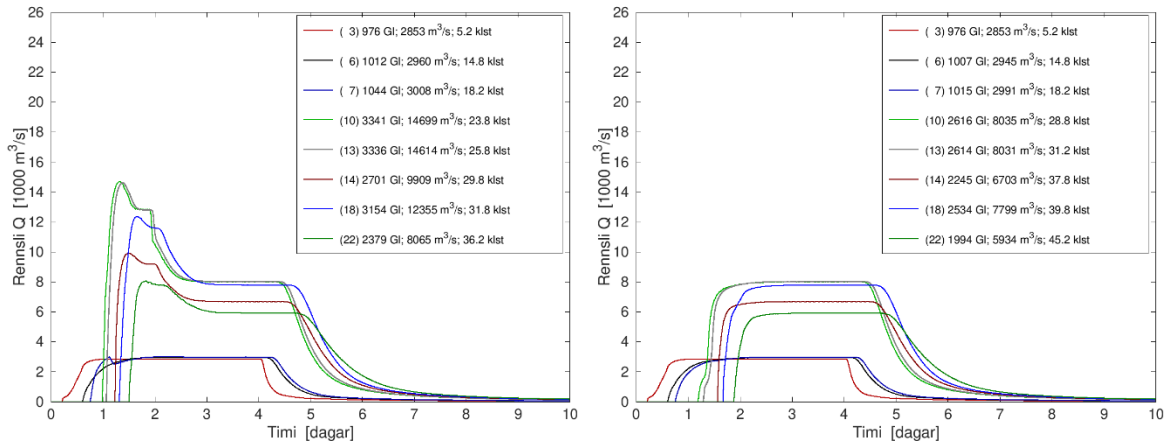
- Samanlagt rennsli um tiltekið þversnið í gígalítrum (GI) skv. Jöfnu (3.5). Í öllum tilvikum er reiknað heildarrúmmál sem fer um þversniðið á 240 klst (10 dögum). Línuritirn sýna þó aðeins fyrstu 72 klst hermunar, nema í tilvikinu Kkv05 (Mynd 4.6), þar er allt tímabilið sýnt.
- Hámarksrennslið  $Q_{max}$
- Tímenn, sem líður þar til fremsti hluti flóðbylgju nær að tilteknu þversniði. Upphaf hermunar er við tímenn 0 klst, þá leggur hlaupið af stað frá jökuljaðri.



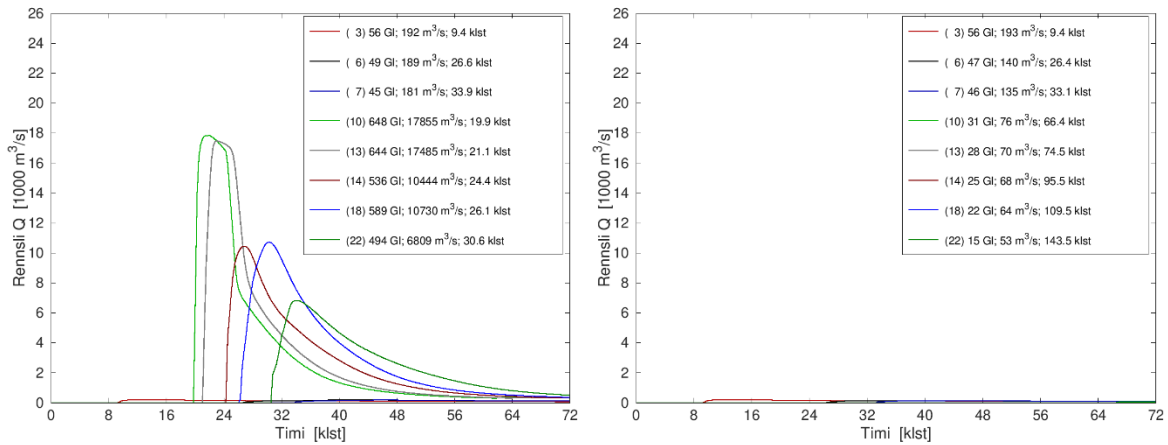
Mynd 4.4. Rennsli í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir B-reikningana (vinstri) og A-reikningana (hægri). Sviðsmyndin er Ham01.



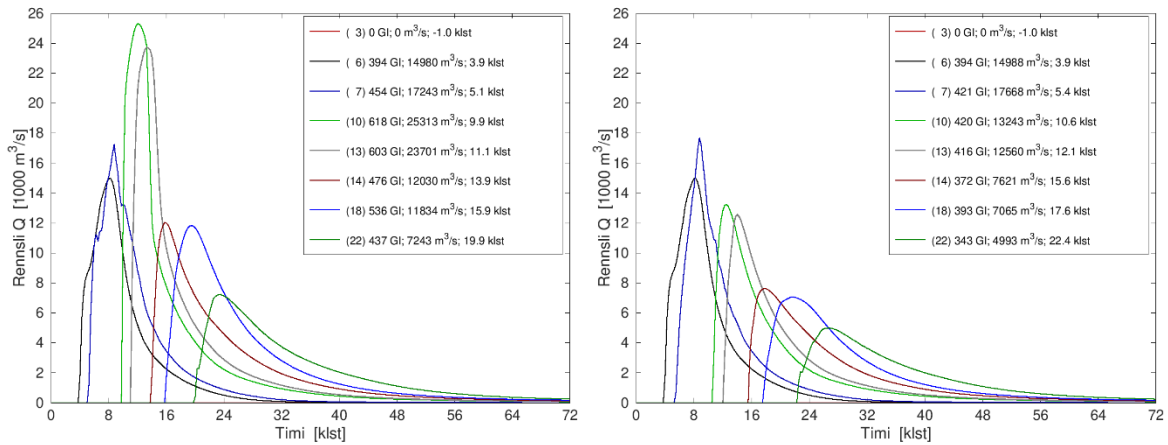
Mynd 4.5. Rennsli í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir B-reikningana (vinstri) og A-reikningana (hægri). Sviðsmyndin er Kkv02.



Mynd 4.6. Rennslí í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir B-reikningana (vinstri) og A-reikningana (hægri). Sviðsmyndin er Kkv05.



Mynd 4.7. Rennslí í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir B-reikningana (vinstri) og A-reikningana (hægri). Sviðsmyndin er Bb02.



Mynd 4.8. Rennslí í gegnum þversniðin á Mynd 4.3 fyrir B-reikningana (vinstri) og A-reikningana (hægri). Sviðsmyndin er Sy02.

Athuga þer að rennslispróunin frá einu þversniði til annars getur verið nokkuð óregluleg því í sumum tilvikum fer nær allt rennslíð um tiltekið þversnið (t.d. nr. 10 og 18 á Mynd 4.2), en aðeins hluti rennslis um önnur (t.d. þversnið nr. 13 og 14 á sömu mynd). Nokkur atriði varðandi niðurstöðurnar á Mynd 4.4 eru rakin hér að neðan:

Rennslistoppar reiknast ávallt minni í A-reikningum (myndir t.h.) því þá standast öll mannvirki álag hlaupanna og ekkert lónvatn bætist í hlaupvatnið. Heildarvatnsmagn er því minna í þessum tilvikum og stafn flóðbylgju kemur því seinna að tilteknu þversniði en í tilsvarendi B-reikningum (myndir t.v.).

Mynd 4.4, Ham01: Hinn stóri toppur í þversniði 10 á myndinni t.v. er vegna viðbótar úr Sultartangalóni af völdum stíflurofs en einnig vegna viðbótar úr farvegi Þjórsár ofan lónsins. Enginn sambærilegur toppur sést á myndinni t.h. Aukning er frá sniði 14 til sniðs 18 og skýrist það af viðbótarvatni sem ekki fer um snið 14 en berst um snið 18. Þetta sést í báðum tilvikum.

Mynd 4.5, Kkv02: Heildarmyndin er hér áþekk og á Mynd 4.4, en rennslistoppar eru lægri enda er hér um minna hlaup að ræða. Í A-reikningum má greina tvö aðskilin hámark á rennsliferli um þversnið 10 og áþekka hegðun í þversniði 13. Er þarna annars vegar um að ræða hámark rennsli um farveg Köldukvíslar, sem er fyrr á ferðinni, og síðan rennslihámark um Þjórsá og Sultartangalón.

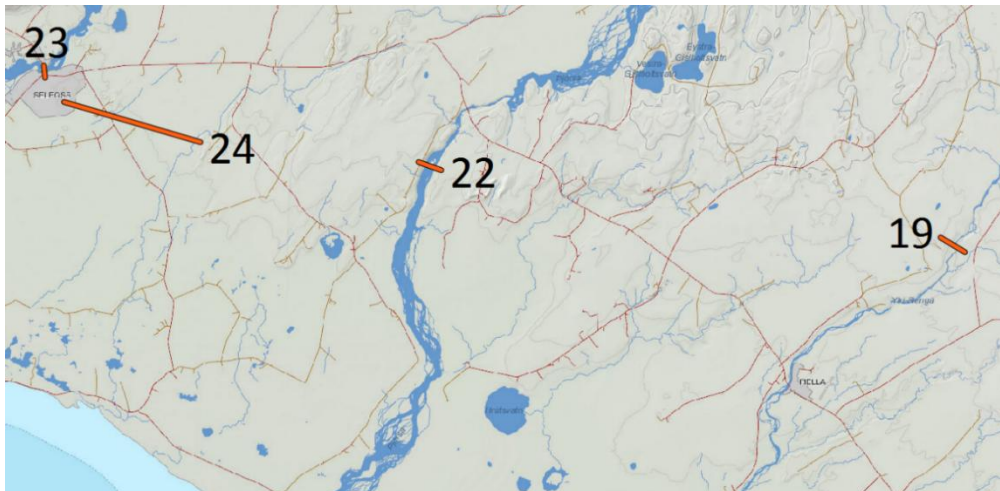
Mynd 4.6, Kkv05: Hér er áberandi að mun meira rennsli fer um þversnið 10–22 en efstu sniðin, Nr. 3, 6 og 7. Í báðum tilvikum (þ.e. A- og B-reikningum) skýrist þetta af viðbótinni úr farvegi Þjórsár ofan til og að auki kemur viðbótarvatn úr lónunum ofar í farveginum í B-reikningunum vegna stíflurofs.

Mynd 4.7, Bb02: Hér fer sáralítið vatn um Köldukvíslarfarveginn (þversnið 3, 6 og 7), en stíflurof leiðir til þess að hlaupvatn fer um þversnið 10–22 í B-reikningum. Athyglisvert er að flóðstafn nær þversniði 10 (neðan Sultartangalóns) áður en rennsli eykst um þversnið 6 og 7 ofan Þórisvatns. Ástæðan er sú að hlaupvatn fer í þessu tilviki að mestu í átt að Kvíslavatni og síðan niður Þjórsá, en mjög lítið vatn berst niður Köldukvísl. Annað er hins vegar uppi á teningnum í A-reikningum varðandi þetta hlaup, þá fer ekkert vatn niður Þjórsárfarveginn og minna rennsli fer um þversnið 10 en um snið 6 og 7. Eftir því sem farið er niður þversnið 3 til 22, minnkar rúmmál flóðtoppsins (sjá gildi í myndskýringu). Þetta skýrist af þeim tíma sem tekur hala hlaupsins að renna niður Köldukvísl og síðan Þjórsá ásamt uppsöfnun hlaupvatns í ýmsum hindrunum á leiðinni. Þ.e., eftir því sem farið er neðar, nær sjó, nær minna vatn að streyma í gegnum tiltekið þversnið yfir 10 daga líkantímann. Ef líkantíminn hefði verið mun lengri, t.d. 100 dagar, hefði hlaupvatn tæmst úr efri hluta reiknisvæðisins og í því tilviki yrði þessi rúmmálsmunur mun minni.

Mynd 4.8, Sy02: Hér fer ekkert vatn um þversnið 3, því hlaupvatn kemur fram undan Sylgjúökli og fellur því ekki um Hágöngulón líkt og hin hlaupin.

#### 4.2.2 Rennsli í neðri hluta farvega

Mynd 4.9 sýnir þau þversnið á hlaupleiðunum sem liggja næst ströndinni. Þversnið Nr. 23 er yfir Ölfusá, Nr. 22 er yfir Þjórsá og Nr. 19 er yfir Ytri-Rangá. Þversnið Nr. 24 er yfir flóðsléttunni austan við Selfoss. Rennsli um þversnið 22 (Þjórsá) er sýnt á Myndum 4.4 til 4.8.



Mynd 4.9. Staðsetning þversniða 23, 24, 22 og 19. Sjá einnig Mynd 4.2.

Tafla 4.2 sýnir samanburð á rúmmáli hlauprennslis um þversniðin fjögur, fyrir A- og B-reikninga í hinum fimm sviðsmyndum. Í töflunni er gefið heildarrúmmálið  $V$  í gígalítrum [Gl] (skv. Jöfnu (3.5)) sem fer um sniðin á tíu dögum. Langmest rennslis fer um Þjórsá (þversnið 22) en athygli vekur að áþekkt rúmmál fer að jafnaði um Ölfusá (þversnið 23) og Ytri-Rangá (þversnið 19), þótt munur sé á milli hlaupa.

Tafla 4.2. Rennslisrúmmál [Gl] í gegnum þversniðin 23, 24, 22 og 19 fyrir 10 daga tímabil. Táknid „-A“ stendur fyrir A-reikninga (þ.e. án stíflurofs) og „-B“ með stíflurofi (sjá Töflu 4.1 og Mynd 4.1).

|           | Ölfusá |     | Þjórsá | Ytri-Rangá |         |          |
|-----------|--------|-----|--------|------------|---------|----------|
| Þversnið: | 23     | 24  | 22     | 19         | Samtals | Mismunur |
| Ham01-A   | 106    | 129 | 864    | 124        | 1223    |          |
| Ham01-B   | 271    | 180 | 1004   | 442        | 1897    | 674      |
| Kkv02-A   | 9      | 25  | 484    | 0          | 518     |          |
| Kkv02-B   | 106    | 126 | 843    | 136        | 1211    | 693      |
| Kkv05-A   | 153    | 362 | 1994   | 47         | 2556    |          |
| Kkv05-B   | 269    | 474 | 2379   | 156        | 3278    | 722      |
| Bb02-A    | 0      | 0   | 15     | 0          | 15      |          |
| Bb02-B    | 23     | 53  | 494    | 35         | 605     | 590      |
| Sy02-A    | 11     | 28  | 343    | 7          | 389     |          |
| Sy02-B    | 28     | 56  | 437    | 57         | 578     | 189      |

Séu tölur um heildarrúmmál sem fer í hverri sviðsmynd um þversnið 23, 24, 22 og 19 samtals á 10 dögum (Tafla 4.2) bornar saman við rúmmálið, sem rennur frá jökuljaðri (Tafla 4.1), eru fyrrnefndu tölurnar ávallt lægri. T.d. fara samtals 1223 Gl um þversniðin fjögur í

Ham01-A en frá jökli renna 1422 Gl. Þetta skýrist af því að talsvert hlaupvatn er enn eftir í farvegum milli jökuljaðars og þversniðanna fjögurra að 10 dögum liðnum.

Í B-reikningum er samanlagt rennslismagn ávallt meira en rúmmálið við jökuljaðar, enda bætist lónvatn við á leiðinni til sjávar vegna stíflurofs. Fyrir sviðsmyndirnar Ham01, Kkv02, Kkv05 og Bb02, er heildarmismunurinn að meðaltali 670 Gl. Til samanburðar er heildarrúmmál vatns í lónum um 720 Gl, sbr. Töflu 3.8.

Í sviðsmyndinni Sy02 fer ekkert vatn um Hágöngulón og Kvíslavatn. Þess vegna er heildarmunurinn á milli Sy02-A og Sy02-B í Töflu 4.2 aðeins 189 Gl.

Tafla 4.3 sýnir tímasetningu á aðkomu reiknaðra hlaupa að þversniðunum 23, 24, 22 og 19. Sem fyrr, er nálgæð að næsta korteri. Í öllum tilfellum er ferðatíminn styttri í B-reikningum og styttest tímamunur milli A- og B-reikninga með aukinni stærð hlaupanna. Mestur er munurinn í sviðsmyndinni Bb02 (6.650 m<sup>3</sup>/s), 34 klst með rofi (B-reikn.), en 144 klst án rofs (A-reikn). Mismunur á ferðátíma fyrir hinar sviðsmyndirnar er mun minni, eða að meðaltali tæplega 10 klst.

Tafla 4.3. Tímasetning á aðkomu hlaups í klst:mín.

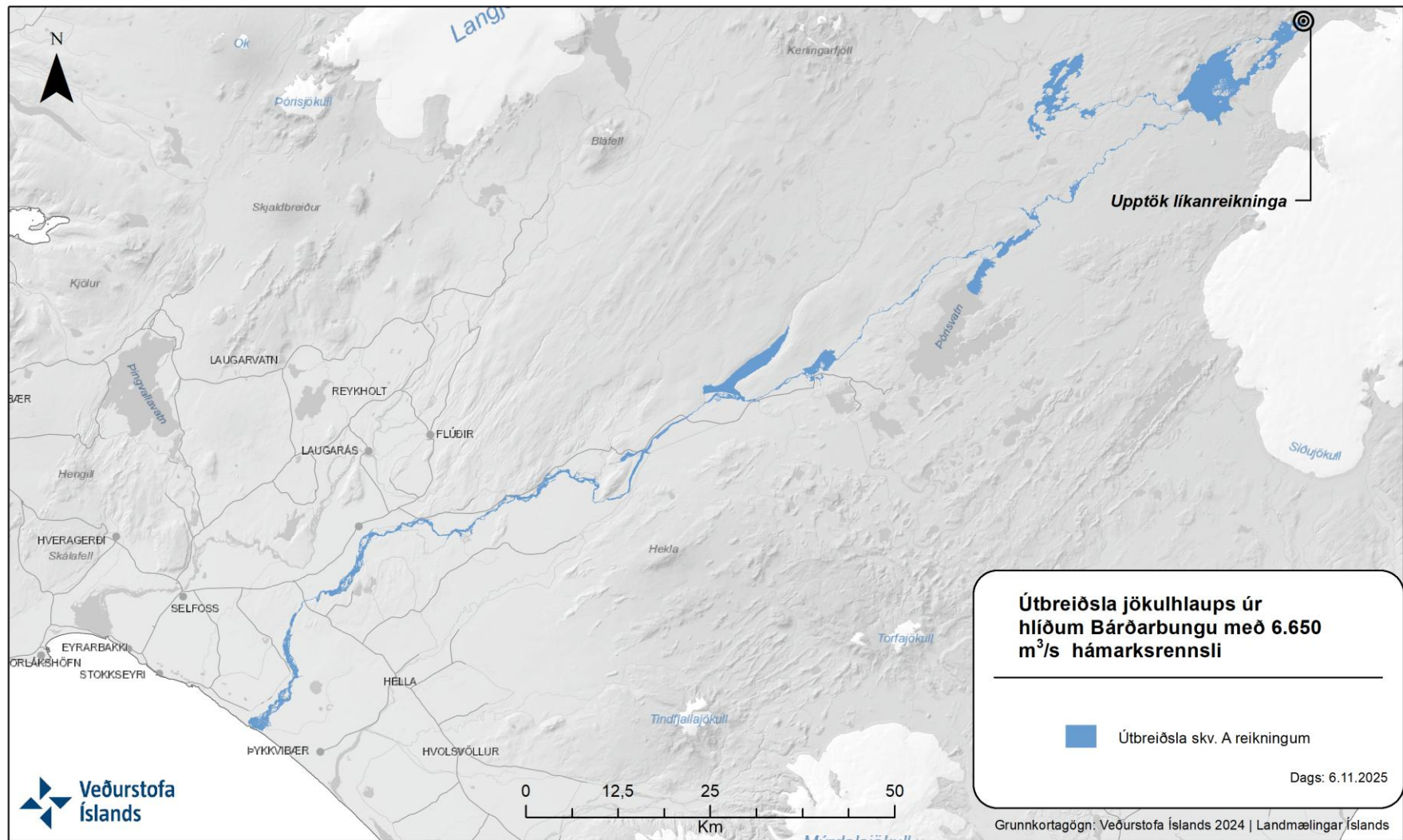
| Þversnið: | Ölfusá |       | Þjórsá |       | Meðaltal | Mismunur |
|-----------|--------|-------|--------|-------|----------|----------|
|           | 23     | 24    | 22     | 19    |          |          |
| Ham01-A   | 27:45  | 24:15 | 19:45  | 17:30 | 22       | 3        |
| Ham01-B   | 23:45  | 21:00 | 17:30  | 13:45 | 19       |          |
| Kkv02-A   | 47:00  | 39:30 | 31:45  | -     | 39       | 15       |
| Kkv02-B   | 30:00  | 26:30 | 22:00  | 19:15 | 24       |          |
| Kkv05-A   | 58:15  | 52:45 | 45:15  | 54:15 | 53       | 13       |
| Kkv05-B   | 45:45  | 41:45 | 36:15  | 37:45 | 40       |          |
| Bb02-A    | -      | -     | 143:30 | -     | 144      | 110      |
| Bb02-B    | 40:30  | 35:45 | 30:45  | 29:45 | 34       |          |
| Sy02-A    | 35:15  | 29:00 | 22:30  | 26:00 | 28       | 5        |
| Sy02-B    | 29:15  | 25:00 | 20:00  | 17:45 | 23       |          |

## 4.3 Yfirlit um niðurstöður

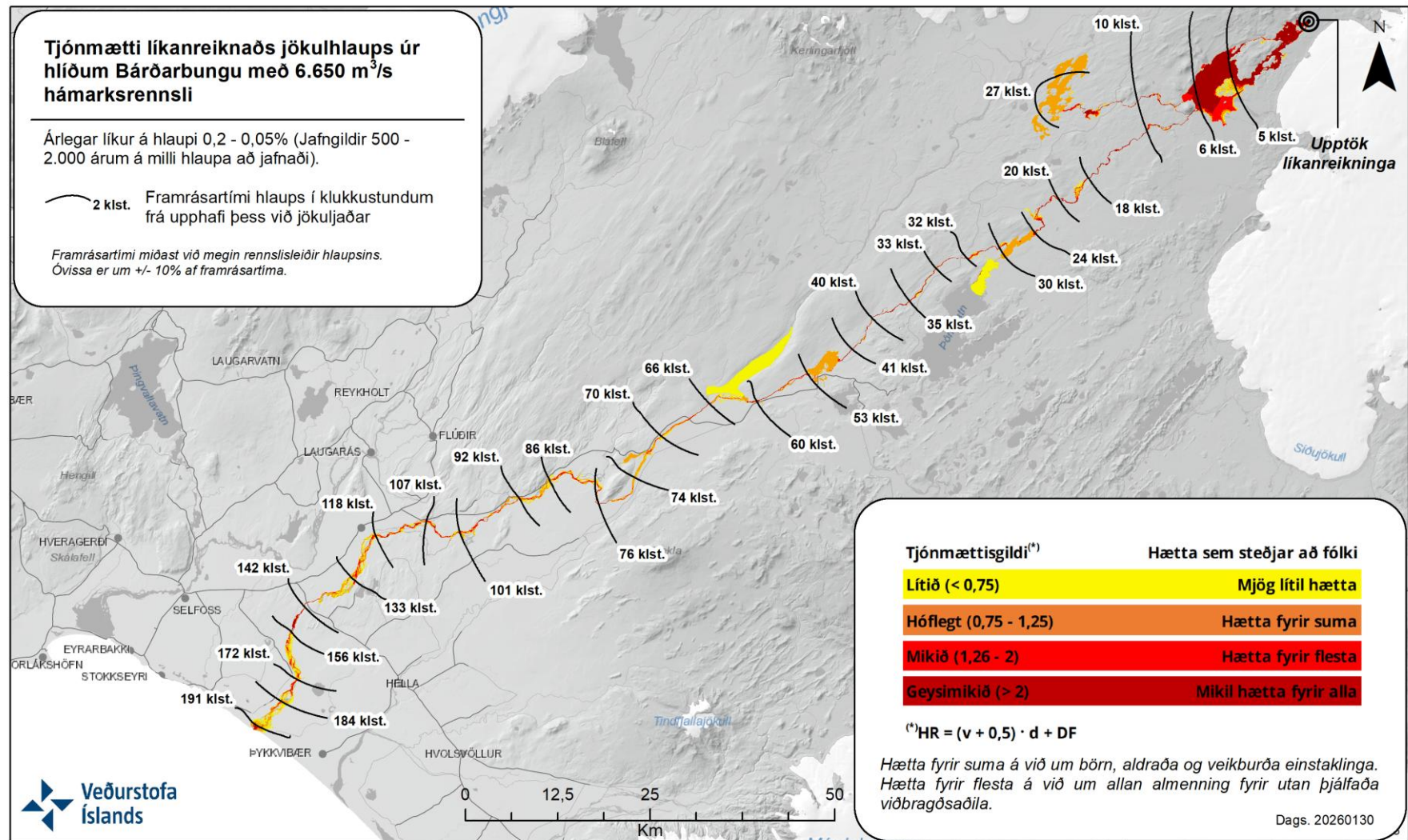
### 4.3.1 Úttaksgögn úr líkanreikningum

Svo sem fram hefur komið eru aðalniðurstöður verkefnisins fengnar úr tveimur mismunandi hermum fyrir hverja hlaupsviðsmynd: A-reikningar (án stíflurofs) sýna minnstu hættu sem skapast getur við hlaupin, B-reikningar (með stíflurofi) gefa til kynna mestu hættu og saman mynda þeir því umlykju um allar niðurstöður verkefnisins. Er þessi umlykja sýnd á

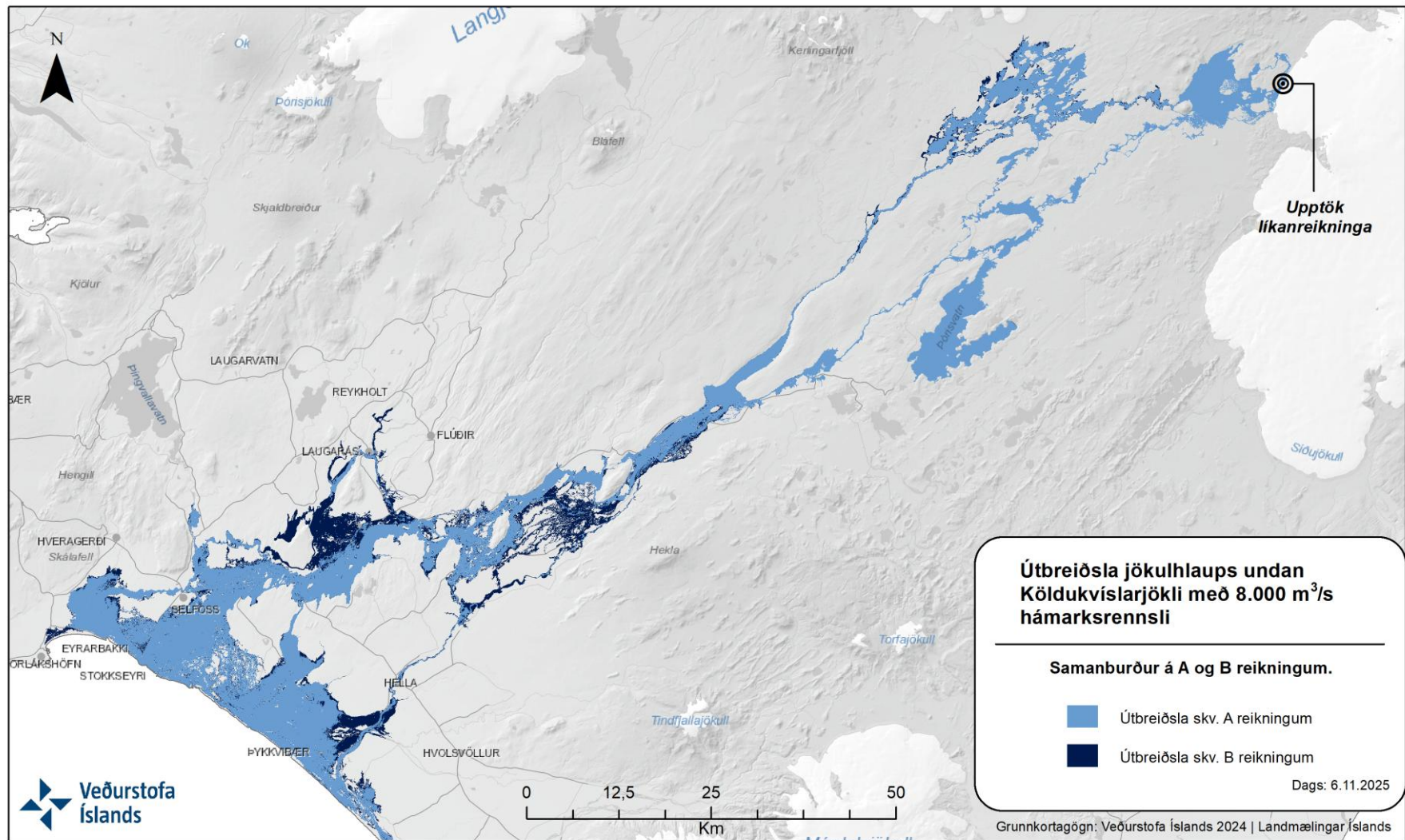
Myndum 4.10, 4.12, 4.14, 4.16 og 4.18 sem birta hámarksútbreiðslu hlaupanna. Tjónmætti miðað við niðurstöður B-reikningana fyrir viðkomandi hlaupsviðsmynd er svo sýnt á Myndum 4.11, 4.13, 4.15, 4.17 og 4.19. Niðurstöðurnar eru einnig aðgengilegar á tölvutæku formi í skránni **Bardarbunga\_OPIN\_GOGN.zip** og eru þau gögn helsta afurð verkefnisins.



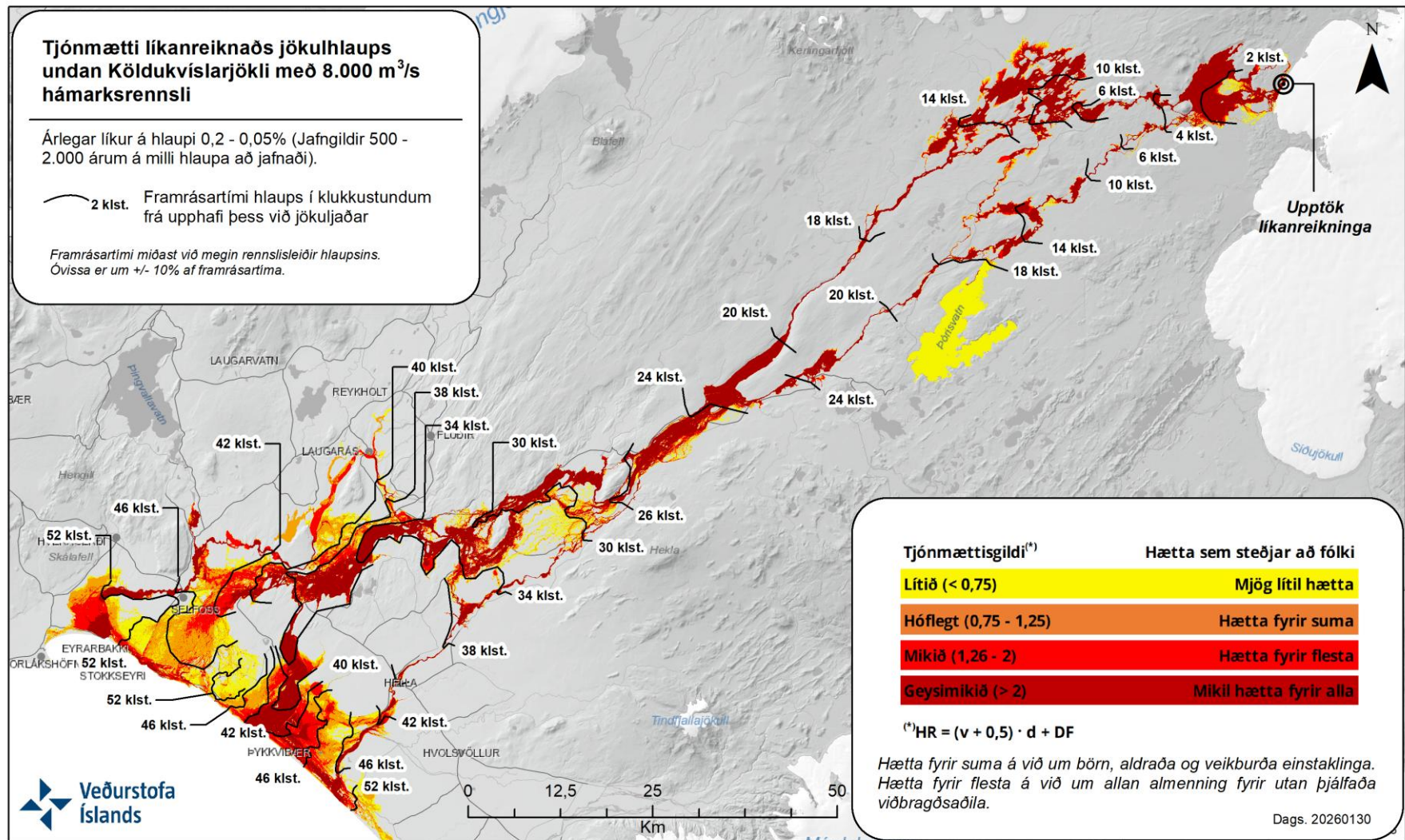
Mynd 4.10 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss í hlíðum Bárðarbungu, sviðsmynd Bb02. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,2–0,05%. Líkur á rofi á flóðvörum virkjanamannvirkja eru litlar í þessari sviðsmynd og niðurstöður A-reikninganna því aðeins birtar.



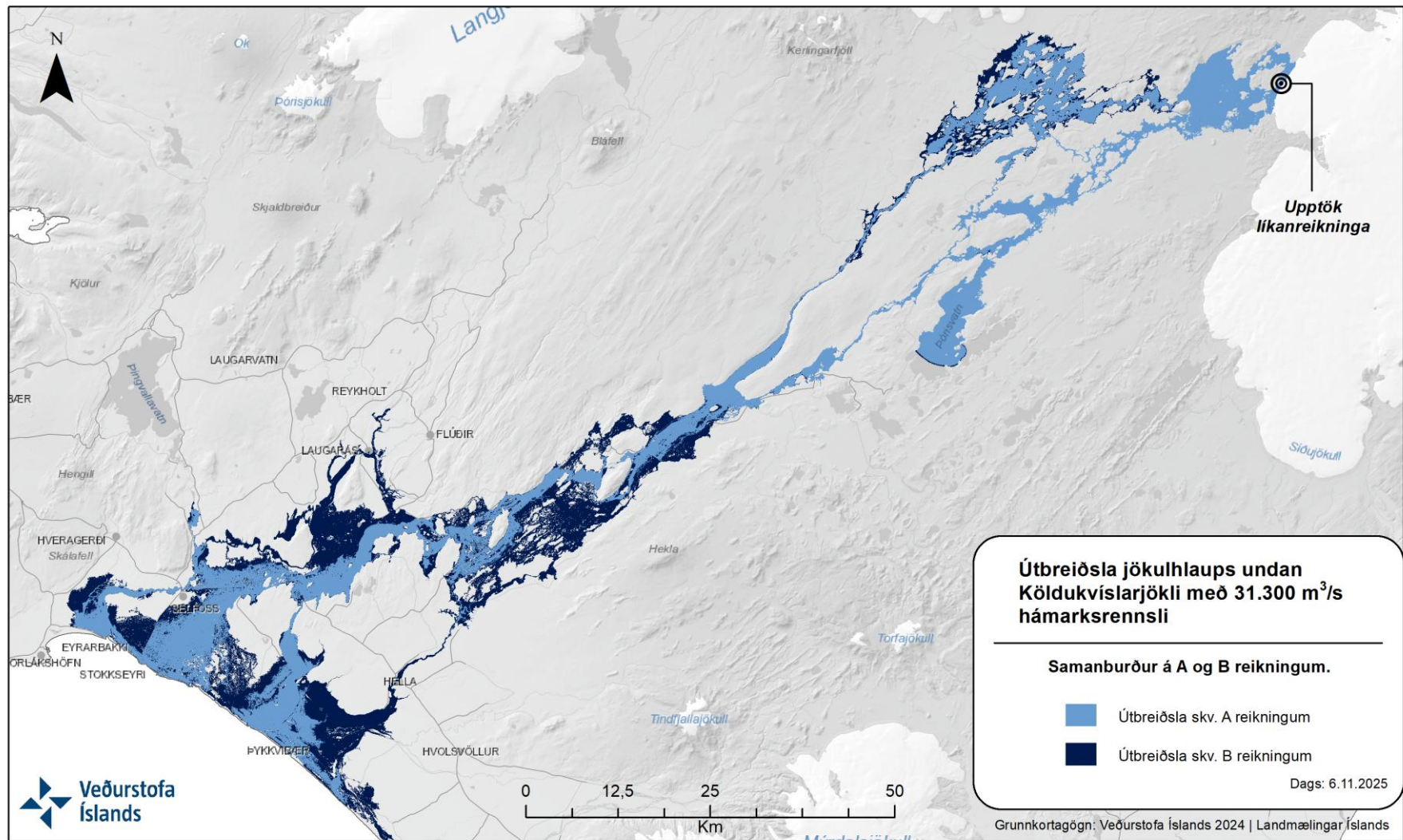
Mynd 4.11 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss í hlíðum Bárðarbungu, sviðsmynd Bb02. Líkur á rofi á flóðvörum virkjanamannvirkja eru litlar í þessari sviðsmynd og tjónmættiskortið byggir því á niðurstöðum A-reikninganna í þessu tilfalli.



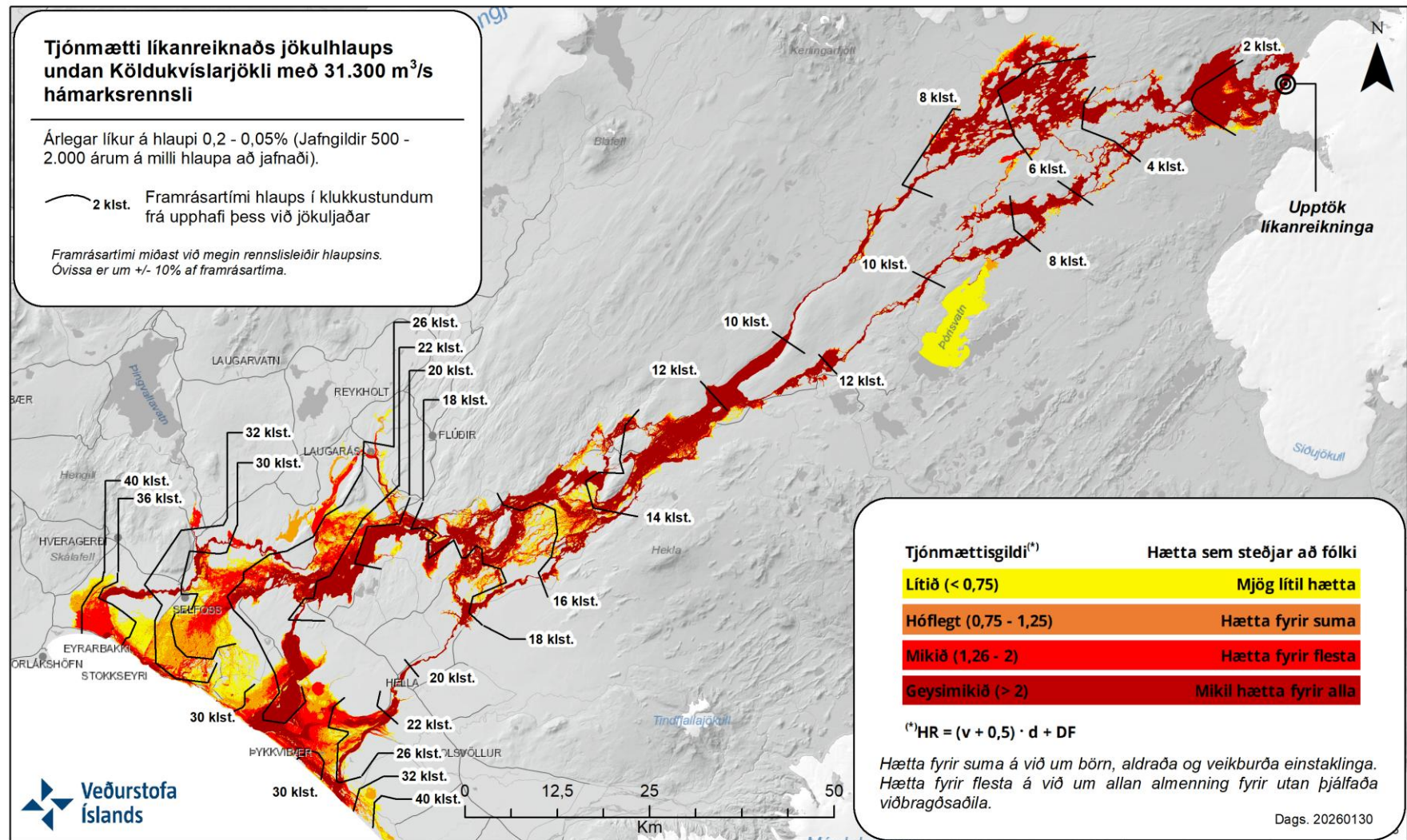
Mynd 4.12 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv05. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,2–0,05%. Varandi hámarks rennslisritsins í þessari sviðsmynd er mun lengri en í öðrum sviðsmyndum, alls 4 dagar, og hlaupið því vatnsmikið.



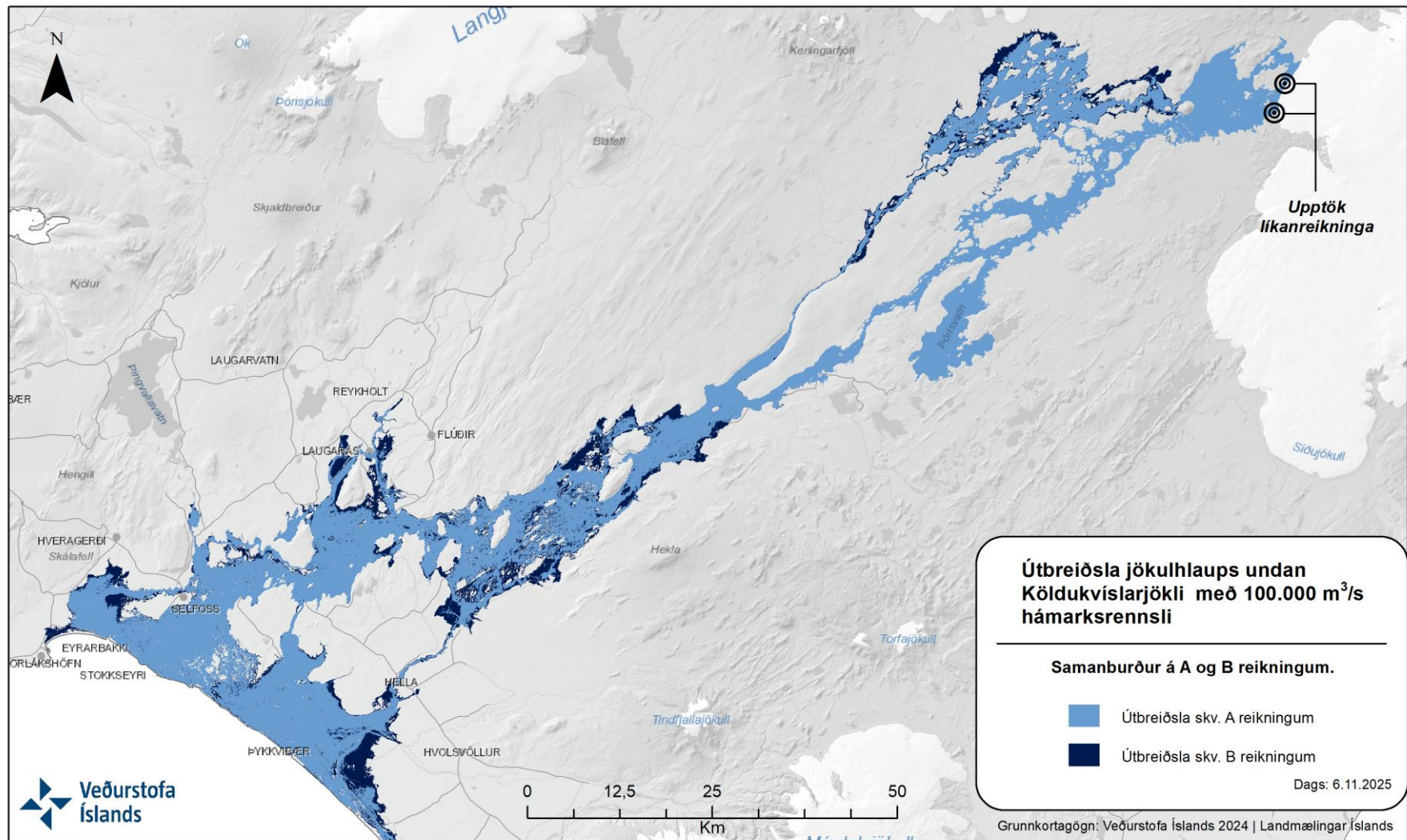
Mynd 4.13 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv05. Varandi hámarks rennslisritsins í þessari sviðsmynd er mun lengri en í öðrum sviðsmyndum, alls 4 dagar, og hlaupið því vatnsmikið.



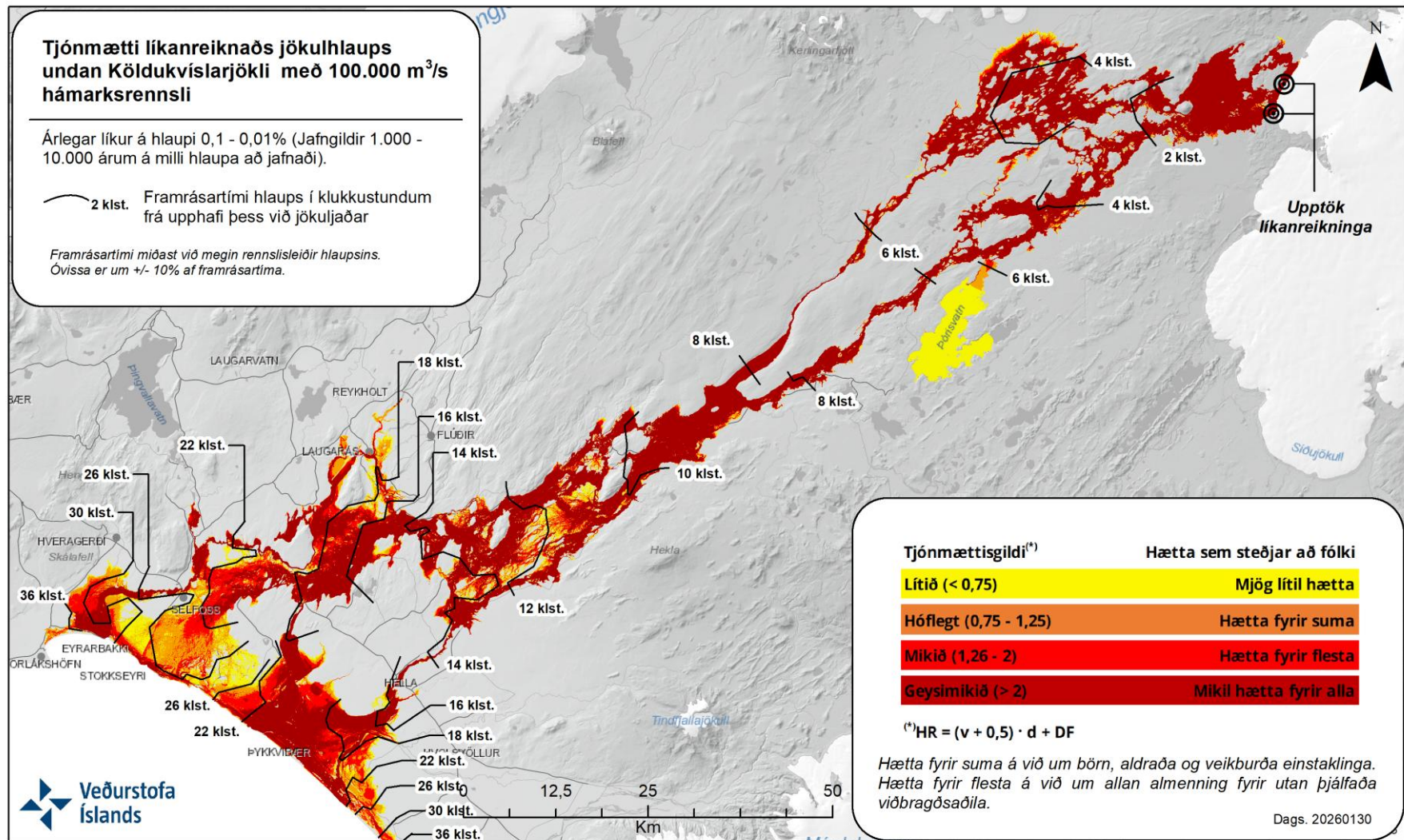
Mynd 4.14 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvislarjökli, sviðsmynd Kkv02. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,2–0,05%.



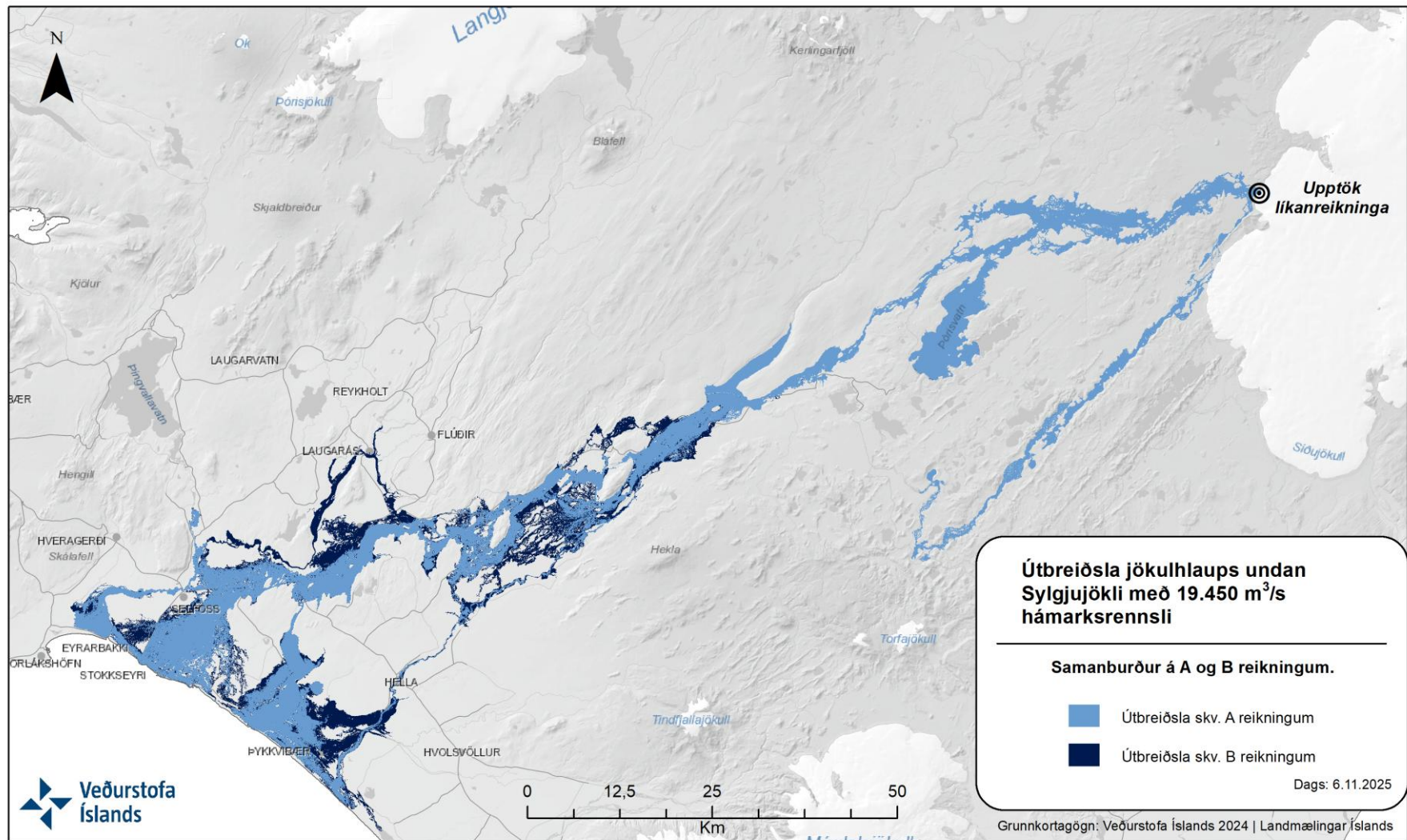
Mynd 4.15 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Köldukvíslarjökli, sviðsmynd Kkv02.



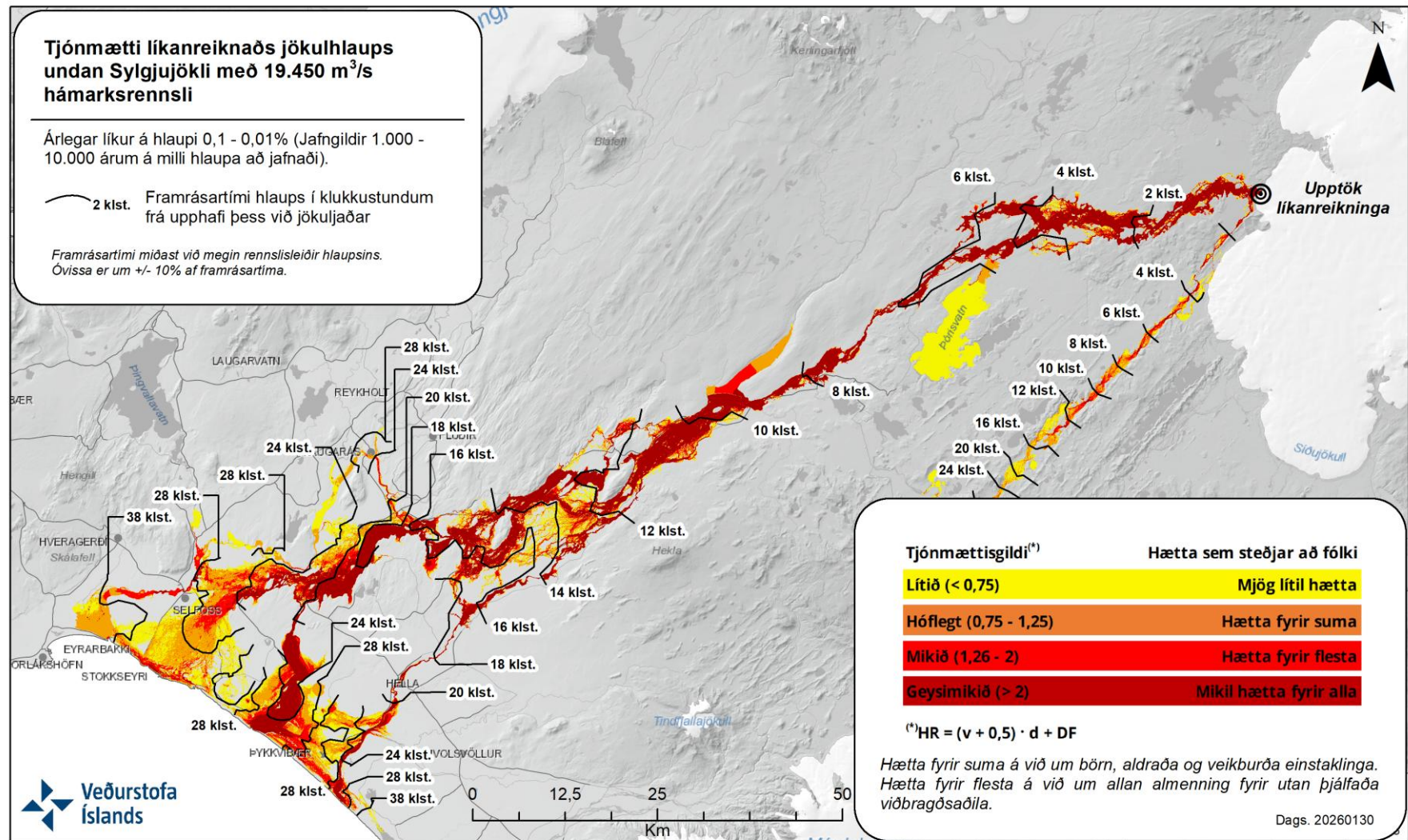
Mynd 4.16 Útbreiðsla hamfarajökulhlaups af völdum mjög öflugs eldgoss undir Köldukvíslarjökli eða í vestanverðri Bárðarbunguöskjuni, sviðsmynd Ham01. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,1–0,01%.



Mynd 4.17 Tjónmætti hamfarajökulhlaups af völdum mjög öflugs eldgoss undir Köldukvíslarjökli eða í vestanverðri Bárðarbunguöskjuni, sviðsmynd Ham01.



Mynd 4.18 Útbreiðsla jökulhlaups af völdum eldgoss undir Sylgjujökli, sviðsmynd Sy02. Árlegar líkur á hlaupi sem þessu eru 0,1–0,01%.



Mynd 4.19 Tjónmætti jökulhlaups af völdum eldgoss undir Sylgjujökli, sviðsmynd Sy02.

Niðurstöðum á Myndum 4.10, 4.12, 4.14, 4.16 og 4.18 verður nú lýst að nokkru.

**Mynd 4.16: Ham01** - Hamfarahlaup undan Köldukvíslarjökli, hámarksrennsli 100.000 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 1422 Gl.

Hlaupvatn fellur beint í Hágöngulón þar sem stíflumannvirki rofna í B-reikningunum fyrir þessa sviðsmynd, sjá Töflu 4.1. Áframhaldandi lýsing miðast hér við B-reikningana. Hluti hlaupvatnsins fer í farveg Köldukvíslar og breiðir allmikið úr sér á leið niður undir Þórisvatn. Hlaupvatn flæðir aðeins að litlum hluta inn í Þórisvatn en vatnið finnur sér leið yfir stíflumannvirkin við Sauðafellslón og helst svo áfram í farvegi Köldukvíslar niður í Sporðöldulón. Önnur grein hlaupvatnsins fer til vesturs frá Hágöngulóni yfir í Kvíslavatn og svæðið þar um kring og þar rofna flóðvör og hlutar Svartárstíflu og Púfuversstíflu 5. Vatnið safnast svo í farveg Þjórsár og fellur í honum til suðurs niður í Sultartangalón. Þar verður stíflurof líkt og í Sporðöldulóni og báðar greinar hlaupsins sameinast ofan Búrfells. Hluti hlaupvatnsins í þessari sviðsmynd nær vestur af Hafinu og niður í Gjána í Þjórsárdal. Sá hluti heldur svo áfram um Rauða yfir í Fossá og niður Hjálparfoss.

Hlaupvatn dreifir úr sér í Þjórsárdalnum og neðan hans. Grein úr hlaupinu berst í Ytri Rangá og fellur í farvegi hennar um Hellu, niður í Landeyjar og síðan til sjávar. Mestur hluti hlaupvatnsins fer um farveg Þjórsár, breiðir úr sér á flatlendi Skeiða og leitar þar til norðurs. Vörðufell verður umflotið og norðan þess leitar hlaupvatn um 10 km til norðurs eftir farvegi Hvítár eystri. Einnig flæðir vatn inn í Hestvatn austan frá. Í Flóanum fer stórt svæði undir vatn og flóðvatn nær að Selfossi austan- og sunnanverðum. Við ströndina verður hlaupvatnið sem hafsjór sem teygir sig um 50 km leið frá vesturjaðri Ölfusár um Eyrarbakka, Stokkseyri og Pykkvabæ austur á Landeyjasand.

Ekki kemur fram mikill munur á útbreiðslu þessa hlaups í A- og B-reikningum. Síðarnefndu reikningarnir sýna þó meiri útbreiðslu norðvestan Kvíslavatns og er norðurjaðar hlaupvatnsins þá aðeins 2 km frá jaðri Múlajökuls, sem gengur suður úr Hofsjökli. Útbreiðsla í B-reikningum er einnig áberandi meiri á landi, kringum Vörðufell og sums staðar á undirlendinu nærri sjó.

**Mynd 4.12: Kkv05** - Meðalstórt en vatnsmikið hlaup undan Köldukvíslarjökli, hámarksrennsli 8.000 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 2765 Gl.

Varandi hámarks rennslisritsins í þessari sviðsmynd er mun lengri en í öðrum sviðsmyndum, alls 4 dagar. Heildar rúmmál hlaupvatnsins er því mikið og meira heldur en í bæði Kkv02 og Ham01, þó hámarksrennsli þeirra sviðsmynda sé meira. Útbreiðsla þessarar sviðsmyndar reiknast þar af leiðandi ekki miklu minni á Kvíslavatnssvæðinu en í Ham01 og Kkv05, en vatnsdýpi minna. Svipað á við á neðri svæðunum og útbreiðsla þar jafnvel meiri heldur en fyrir Kkv02. Munur á útbreiðslu í A- og B-reikningum er einna mestur á svæðinu sunnan Vörðufells og austan Hestvatns.

**Mynd 4.14: Kkv02** - Stórhlaup undan Köldukvíslarjökli, hámarksrennsli 31.300 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 687 Gl.

Ekki er verulegur munur á útbreiðslu þessa hlaups og hamfarahlaupsins Ham01. Munur á Kkv02 í A- og B-reikningum kemur einkum fram í Þjórsárdal og á Suðurlandsundirlendi, þar

fer meira land undir vatn í hinum síðarnefndu. Vatn nær ekki vestur af Hafinu og ofan í Gjána í A-reikningunum.

**Mynd 4.10: Bb02** – Meðalstórt hlaup úr hlíðum Bárðarbungu, hámarksrennsli 6.650 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 100 Gl.

Hér er áberandi munur á útbreiðslu í A- og B-reikningum og skýrist hann af viðbótarvatni úr lónum við stíflurof. Rennsli helst nánast að öllu leyti innan núverandi farvega í A-reikningum.

**Mynd 4.18: Sy02** – Stórhlaup undan Sylgjujökli, hámarksrennsli 19.450 m<sup>3</sup>/s, rúmmál hlaupvatns við jökuljaðar 450 Gl.

Þetta hlaup hefur sérstöðu því vatnið kemur undan jökli sunnar en í hinum tilvikunum og ekkert hlaupvatn berst í Hágöngulón eða Kvíslavatn. Meginrennslið berst eftir farvegi Sylgju og fer síðan eftir farvegi Köldukvíslar til suðvesturs. Útbreiðsla neðan Sultartangalóns er áþekkt og í hinum stórhlaupunum í bæði A- og B-reikningum. Í B-reikningunum nær hluti hlaupvatnsins í þessari sviðsmynd vestur af Hafinu og niður í Gjána í Þjórsárdal. Sá hluti heldur svo áfram um Rauðá yfir í Fossá og niður Hjálparfoss. Grein úr þessu hlaupi fer niður í Tungnaá en ekki gætir mikillar aukningar í rennsli hennar í þessari hermun. Rennsli frá jaðri Sylgjujökuls stendur aðeins yfir í tæplega 7 klukkustundir í þessari sviðsmynd og rennsli niður eftir Tungnaá fer smám saman dvínandi á þeim tíma. Rennslisaukningar vegna hlaupvatns er hætt að gæta þegar komið er nálægt Krókslóni. Ef sviðsmynd hlaups undan Sylgjujökli hefði verið lengri, t.d. fjórir dagar eins og gildir fyrir Kkv05, hefði rennslið eftir farvegi Tungnaár orðið meira og náð lengra en í Sy02. Líklegt er að hlaup skv. Kkv05-sviðsmynd héldi áfram í gegnum Krókslón og þaðan í Hrauneyjalón og mundi svo aftur sameinast meginstraumi hlaupsins í Sporðöldulóni. Rennslið til Tungnaár verður mest 500 m<sup>3</sup>/s en sá toppur stendur aðeins yfir í stutta stund og er því rúmmálslítill. Þetta rennsli yfir í Tungnaá yrði mun minna í sviðsmynd með rennslisrit á við Kkv05. Það má því áætla að rennsli í Tungnaá samfara hlaupum undan Sylgjujökli yrði aldrei meira en í dæmigerðum úrkomu- og leysingaflóðum í ánni, sem bætt geta 500 m<sup>3</sup>/s við grunnrennsli árinna (Vatnamælingar Orkustofnunar, 2003).

Hér er ekki sérstaklega hugað að mögulegum hlaupum frá gosum undir Tungnaárjökli. Slík hlaup eru möguleg og myndu að sjálfsögðu valda mun meiri áhrifum á Tungnaá heldur en hér er lýst. Sjá nánari umræðu í 5. kafla.

#### 4.3.2 Vatnsdýpi og útbreiðsla

Áhugavert er að athuga nánar muninn á vatnsdýpi og útbreiðslu hlaupvatns í A- og B-reikningum í sviðsmyndunum fimm. Eins og fram kemur í Töflu 4.4 reiknast meðaldýpi vatns (yfir 10 daga tímabil) ávallt meira í B-reikningum, enda bætist þá lónvatn við hlaupvatnið. Sviðsmyndin Sy02 er reyndar undantekning; í því tilviki virðist aukin útbreiðsla í B-reikningum ná að vega upp á móti auknu vatnsmagni vegna stíflurofs í Sultartanga- og Sporðöldulónum (hlaupið fer ekki í Hágöngulón), þannig að ekki sést aukning í meðalvatnsdýpi. Flatarmálið sem hlaupvatn nær yfir eykst einnig verulega í B-reikningum; er aukningin á bilinu 20–75% fyrir fjórar sviðsmyndanna en mest um 400% í tilvikinu Bb02. Í því tilviki er vatnsmagn ekki meira en svo í A-reikningum að það helst að mestu í

venjulegum farvegum, en nær að leita verulega út fyrir farvegina þegar viðbót vegna stíflurofs kemur í B-reikningum. Vert er að taka fram að neðri stíflurof í B-reikningunum fyrir Bb02 byggja á að hlaupið nái að rjúfa flóðvarið og stífluna í Hágöngulóni, sem er efsta lón á hlaupleiðinni. Mjög litlu munar að hlaupið nái ekki að valda rofi þar og í samanburðarreikningum Verkís verður ekki rof fyrir þá sviðsmynd, sjá nánar kafla 7. Því er mikil óvissa um hvort að B-reikningarnir séu raunsönn mynd af verstu útgáfu sviðsmyndarinnar Bb02 og A-reikningarnir eru kynntir sem meginniðurstaða þeirrar sviðsmyndar.

Tafla 4.5 sýnir reiknað meðaldýpi vatns og útbreiðslu þess fyrir þau svæði þar sem tjónmætti reiknast umfram 0.75 (Jöfnur 3.9 og 3.16). Tölurnar má túlka með áþekktum hætti og þær, sem birtar eru í Töflu 4.4. Athygli vekur þó að meðaldýpi minnkar í B-reikningi fyrir Kkv02 (m.v. A-reikning) og skýrist það af hinni stóru útbreiðslu í B-reikningunum; þar verður nær tvöföldun m.v. A-reikninga.

*Tafla 4.4. Meðaldýpi hlaupvatns og flatarmál þess svæðis sem hlaup nær yfir í hverri sviðsmynd, reiknað yfir 10 daga tímabil. A og B í 2. dálki f.v. vísa til A-reikninga (án stíflurofs) og B-reikninga (með stíflurofi), sjá Töflu 4.1.*

|                                     |   | Ham01 | Kkv02 | Kkv05 | Bb02 | Sy02 |
|-------------------------------------|---|-------|-------|-------|------|------|
| Meðaldýpi hlaups [m]                | A | 3.1   | 2.5   | 1.9   | 1.4  | 1.8  |
| Flatarmál hlaups [km <sup>2</sup> ] | A | 1453  | 796   | 985   | 182  | 813  |
| Meðaldýpi hlaups [m]                | B | 3.7   | 2.7   | 2.1   | 2.2  | 1.8  |
| Flatarmál hlaups [km <sup>2</sup> ] | B | 1755  | 1391  | 1217  | 925  | 1076 |

*Tafla 4.5. Meðaldýpi hlaupvatns og flatarmál þess svæðis sem hlaup nær yfir í hverri sviðsmynd, reiknað yfir 10 daga tímabil. Hér eru reiknuð meðaltöl fyrir þau svæði þar sem tjónmættið hr ≥ 0.75 (DF = 0.5). A og B í 2. dálki f.v. vísa til A-reikninga (án stíflurofs) og B-reikninga (með stíflurofi).*

|                                     |   | Ham01 | Kkv02 | Kkv05 | Bb02 | Sy02 |
|-------------------------------------|---|-------|-------|-------|------|------|
| Meðaldýpi hlaups [m]                | A | 3.7   | 3.3   | 2.5   | 1.8  | 2.5  |
| Flatarmál hlaups [km <sup>2</sup> ] | A | 1213  | 608   | 728   | 134  | 582  |
| Meðaldýpi hlaups [m]                | B | 4.1   | 3.2   | 2.6   | 2.6  | 2.4  |
| Flatarmál hlaups [km <sup>2</sup> ] | B | 1549  | 1168  | 955   | 746  | 804  |

#### 4.3.2 Samanburður á rennsli um farvegi Þjórsár og Köldukvíslar

Eins og kortin á Myndum 4.10–4.17 sýna fer rennslið í þessum fjórum sviðsmyndum um farvegi Köldukvíslar og Þjórsár. Heita má að þessar tvær greinar hlaupvatns haldist í farvegum þessara vatnsfalla á rennisköflum beint vestan Þórisvatns og ofan Sultartangalóns og renni samsíða með um 10 km millibili. Er áhugavert að skoða hvernig rennismagnið skiptist milli farveganna tveggja í sviðsmyndunum fjórum. Tafla 4.6. sýnir rennslið um snið 4 (Þjórsá) og 7 (Köldukvísl) á Mynd 4.2 t.h. í A- og B-reikningum.

Í hamfarahlaupinu Ham01 er rennslishámark fyrir A-reikninga fjórfalt hærra í farvegi Köldukvíslar en Þjórsár og heildarrúmmál 38% meira. Í B-reikningum er rennslishámark 53% hærra í Köldukvísl en 32% meira heildarrúmmál fer um Þjórsárþversniðið á 10 dögum, enda leiðir stíflurof til aukins rennslis í farvegi Þjórsár. Fyrir Kkv02 eru áhrif stíflurofs

greinileg Þjósármegin og í B-reikningum fer þar meir en tvöfalt meira vatn en um Köldukvísl. Fyrir Kkv05 eru hins vegar rennslis- og rúmmálstölur hærra fyrir Þjósá í öllum tilvikum og skýrist það af miklu rennsli til vesturs úr Hágöngulóni. Fyrir Bb02 fer allt rennslið um Köldukvísl í A-reikningum en mestallt um Þjósá í B-reikningum, koma þar fram veruleg áhrif stíflurofs við Hágöngulón og Kvíslavatn. Í Sy02 fer ekkert rennsli um Þjósá, svo sem áður er um getið.

Tafla 4.6. Hámarksrennsli og rúmmál fyrir þversnið 4 og 7 yfir 10 daga tímabil. Táknið „A“ stendur fyrir A-reikninga (þ.e. án stíflurofs) og „B“ með stíflurofi (sjá Töflu 4.1).

|                                | Þversnið |   | Ham01 | Kkv02 | Kkv05 | Bb02  | Sy02  |
|--------------------------------|----------|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| $Q_{\max}$ [m <sup>3</sup> /s] | 4        | A | 9758  | 4003  | 5044  | 0     | 0     |
| $Q_{\max}$ [m <sup>3</sup> /s] | 7        | A | 37630 | 6769  | 2991  | 135   | 17668 |
| Rúmmál [GI]                    | 4        | A | 550   | 275   | 1637  | 0     | 0     |
| Rúmmál [GI]                    | 7        | A | 760   | 305   | 1015  | 46    | 421   |
| $Q_{\max}$ [m <sup>3</sup> /s] | 4        | B | 25294 | 17107 | 9466  | 10840 | 0     |
| $Q_{\max}$ [m <sup>3</sup> /s] | 7        | B | 38721 | 6798  | 3008  | 181   | 17243 |
| Rúmmál [GI]                    | 4        | B | 1047  | 785   | 2154  | 467   | 0     |
| Rúmmál [GI]                    | 7        | B | 791   | 333   | 1044  | 45    | 454   |

#### 4.3.3 Tjónmætti og framrásartími

Kortin á Myndum 4.11, 4.13, 4.15, 4.17 og 4.19 sýna útreiknað tjónmætti skv. Jöfnu (3.9). Aðeins eru sýndar niðurstöður úr B-reikningum og gefa kortin því til kynna mestu hættu (þ.e. efri mörk hættu).

Mynd 4.17 sýnir tjónmætti stærsta atburðar, sem reiknaður er í þessu verkefni; hamfarahlaupsins Ham01. Stuðullinn H reiknast >2 á stærstum hluta áhrifasvæðis hlaupsins og bendir hermunin því til að stórtjón gæti orðið í slíku hlaupi, á stíflumannvirkjum, vegum, rafmagnslínunum og landbúnaðarsvæðum. Framrásartíma hlaups af þessari stærð má lesa af svörtum ferlum á myndinni: Hlaupið færi úr Hágöngulóni 2 klst eftir útrennsli við jökul og væri í farvegum Köldukvíslar og Þjósár á móts við Þórisvatn eftir 6–7 klst. Eftir 11 klst væri hlaupið komið niður í Þjósárdal og niður að Hellu í austurgrein hlaupvatns (farvegi Ytri Rangár) eftir 14 klst. Þar fyrir neðan næði hlaupið til sjávar um 20 klst eftir upphaf þess við jökuljaðar. Vesturgreinin í farvegi Þjósár mundi að hluta til umlykja Vörðufell eftir um 20 klst og umhverfi Selfoss væri náð eftir 22 klst. Sú grein hlaupvatns, sem bærast í Ölfusá, væri síðust til að ná ströndinni, eftir rúmar 30 klst.

Mynd 4.13 sýnir útreiknað tjónmætti í hlaupsviðsmyndinni Kkv05. Þar er um stórhlaup að ræða og tjónmætti reiknast verulegt, en þó heldur minna en fyrir hlaupið Ham01 neðarlega á hlaupsvæðinu. Framrásartími er nokkru lengri, 15 klst niður í Þjósárdal og 28–36 klst til sjávar.

Fyrir smærri hlaupin Kkv02 og Bb02 (Myndir 4.11 og 4.15) er tjónmætti enn verulegt og framrásartími tvöfaldast. Fyrir stórhlaupið frá Sylgjujökli (Sy02) reiknast tjónmætti einnig verulegt í farvegi Sylgju og Köldukvíslar og neðan Sultartangalóns (Mynd 4.19).

## 5 Hættumat

Það er ljóst af niðurstöðunum í kafla 4 að á því svæði þar sem jökulhlaup geta farið um eru mjög mikilvægir innviðir fyrir íslenskt samfélag. Hlaupin geta ógnað byggð bæði í þéttbýli og dreifbýli. Þau fara einnig um virkjanamannvirki í Þjórsá, flæða yfir fjölda vega og brúa, drekka ræktar- og beitarlandi og ógna dreifikerfi raforku. Áhrif hlaupanna á samfélagið og efnahag geta því verið víðtæk og varað mun lengur en það tekur megin-flóðtoppinn að ganga yfir. Margir dagar líða þar til hlaupvatn hefur sjatnað að fullu auk þess sem skemmdir standa eftir.

Hver hagaðili hefur mesta þekkingu á sínu tjónnæmi. Hér í þessum kafla er því ekki farið djúpt í greiningu á því hvaða hættu jökulhlaupin geta skapað í mismunandi geirum samfélagsins, heldur aðeins tæpt á helstu atriðum. Grunnniðurstöðum loka-líkanreikninga hefur verið dreift til hagaðila til frekari úrvinnslu og samanburðar við innviði viðkomandi aðila.

### 5.1 Raforkukerfið

Stærri jökulhlaupa-sviðsmyndirnar eru langt um stærri en önnur flóð af völdum veðurtengdra þátta svo sem úrkomu og leysingar (Kristín Martha Hákonardóttir, 2019). Þær eru því stærri en hönnunarflóð yfirfalls stíflumannvirkja vatnsaflsvirkjana á leið hlaupanna. Sem dæmi má skoða Hágöngulón. Allar sviðsmyndir sem fara um lónið (Ham01, Kkv02, Kkv05), utan sviðsmyndarinnar Bb02, eru umfram hönnunarflóð stíflumannvirkjana (Unnar Númi Almarsson o.fl., 2020). Það er því líklegt að flóðvarið í hjástíflunni norðan Syðri-Hágöngu rofni í öllum sviðsmyndum utan Bb02. Fyrir stærstu tvær sviðsmyndirnar Ham01 og Kkv02 er rennsli um hjástífluna og aðalstífluna líka meira heldur en flóðvarið ber. Þar gæti því orðið enn meira tjón á mannvirkjum og stíflurof átt sér stað.

Svipað gildir fyrir önnur stíflumannvirki á leið hlaupanna, þ.e. að búast má við a.m.k. rofi á flóðvörum og jafnvel rofi á stíflum fyrir allar sviðsmyndir utan Bb02. Hlaupin geta því haft áhrif á Hágöngulón, Kvíslavatn, Sauðafellslón, Sporðöldulón, Sultartangalón, Bjarnalón og önnur miðlunarmannvirki. Hlaupin ganga ekki nema að litlu leyti inn í Þórisvatn því að vatn leitar frekar út úr Sauðafellslóni til vesturs í fyrrum farveg Köldukvíslar (Myndir 4.10, 4.12, 4.14, 4.16 og 4.18). Vatnsfellsstöð, Sigöldustöð og Hrauneyjafossstöð eru því utan áhrifasvæðis hlaupanna. Miðlun til þeirra um Sauðafellslón og Þórisvatn gæti þó orðið fyrir áhrifum. Hlaupin fara aftur á móti um inntakslón Búðarhálsstöðvar, Sultartangastöðvar og Búrfellsstöðvar. Þau gætu því mögulega valdið skemmdum á vatnsaflstöðvunum sjálfum í þeim tilfellum. Vindorkuverið í Vaðölduveri gæti einnig orðið fyrir skemmdum af völdum hlaupanna. Áætlað uppsett afl versins er 120 MW (Landsvirkjun, 2025). Þar sem samanlagt afl Búrfellstöðvar, Sultartangarstöðvar og Búðarhálsstöðvar er 485 MW og heildar uppsett afl í raforkuframleiðslu á Íslandi um 3003 MW án Vaðölduvers (Raforkueftirlitið, 2025) geta hlaupin því haft bein áhrif á hátt í 20% af framleiðslunni. Þau geta einnig raskað miðlun um 15% af heildar uppsettu afli til viðbótar. Verði mikið tjón á miðlunarmannvirkjum með tapi á miðlunargetu og vatni í uppistöðulónum hefur slíkt einnig mikil áhrif á raforkuframleiðsluna.

Auk þess að hafa áhrif á sjálfa framleiðslu raforkunnar má búast við því að raforkuflutningskerfið geti orðið fyrir miklum áhrifum. Búðarháslína 1, Hrauneyjafosslína 1, Sigöldulína 3 og Sultartangalína 2, Búrfellslínur 1, 2 og 3, Flúðalína 1 og Hvolsvallarlína 1 eru t.d. allar að hluta innan útbreiðslusvæðis flestra sviðsmyndanna (Myndir 4.10, 4.12, 4.14, 4.16 og 4.18). Auk áhrifa á möstur flutningslína má einnig búast við áhrifum á önnur mannvirki svo sem spennustöðvar innan útbreiðslusvæða flóðanna. Það mætti því búast við mikilli röskun á flutningi raforku frá Þjórsár-Tungnaár virkjanasvæðinu, jafnvel þó að hluti virkjana væri starfhæfur. Einnig gætu hlaup valdið frekari truflun á dreifingu raforku með skemmdum á línunum innan útbreiðslusvæða flóðanna á Suðurlandsundirlendinu.

Hlaup undan Tungnaárjökli eru ekki hermd í þessu verkefni en ekki er hægt að útiloka jökulhlaup þaðan (Kristín Martha Hákonardóttir, 2019). Hlaup þaðan eru talin heldur ólíklegri en þær sviðsmyndir sem eru hermdar hér því meginhluti vatnasviðs jökulsins er utan sprungusveima megineldstöðvanna á svæðinu (Guðrún Larsen og Magnús T. Guðmundsson, 2019). Slík hlaup færu talsvert aðra leið í gegnum miðlunar- og veitumannvirki vatnsaflsvirkjana og gætu haft bein áhrif á Sigöldustöð og Hrauneyjafossstöð. Þau gætu svo einnig haft áhrif á virkjanirnar neðan Hrauneyjafoss líkt og sviðsmyndirnar sem hermdar eru. Vatnsfellsstöð væri þá eina vatnsaflsvirkjunin á svæðinu sem ekki yrði fyrir beinum áhrifum af hlaupum.

## 5.2 Samgöngur

Búast má við miklum skemmdum á vegum, brúm og öðrum samgöngumannvirkjum á svæðinu. Stórir hlutar Þjóðvegur 1 í Flóanum og á Skeiðum eru á kafi í vatni í öllum sviðsmyndum utan Bb02 (Myndir 4.10, 4.12, 4.14, 4.16 og 4.18). Sama gildir um hluta Skeiðavegar, Þjórsárdalsvegar, Landvegar og hluta ýmissa annarra minni vega á svæðinu. Samgöngutruflanir yrðu því miklar í hlaupum sem þessum. Búast má við því að brúna á Þjóðvegi 1 yfir Þjórsá taki af í öllum sviðsmyndum í B-reikningunum en óljóst er með afdrif hennar í minni sviðsmyndum í A-reikningunum. Sama á við um eldri brúna við Þjótanda. Búast má við að brúna á Þjórsá á Þjórsárdalsvegi við Sultartanga taki af í öllum sviðsmyndum utan Bb02. Flæði um Ytri-Rangá er umtalsvert í öllum sviðsmyndum utan Bb02 og það mikið að búast má við að það taki brúna við Hellu af. Sama á við um brúna á Þingskálavegi. Flæði um Ölfusá í jafnvel verstu sviðsmyndum (Ham01 í B-reikningunum) verður ekki meira en um 2.300 m<sup>3</sup>/s. Þetta er á við úrkomu- og leysingaflóð með um 100 ára endurkomutíma (Emmanuel Pagneux, 2019). Það má því búast við að brúarmannvirki í Ölfusá standist hlaupin, nema svo ólíklega vilji til að þau falli saman við mikil veðurtengd flóð.

## 5.3 Viðbragðstími og aðrir þættir

Í stærri sviðsmyndum, Ham01 í A-reikningunum og Ham01, Kkv02 og Sy02 í B-reikningunum, nær vatn vestur af Hafinu og niður í Gjána innst Þjórsárdal (Myndir 4.14, 4.16 og 4.18). Þaðan finnur flóðið sér leið um Rauða yfir í Fossá og niður Hjálparfoss. Hjálparfoss og Gjáin eru dæmi um vinsæla ferðamannastaði þar sem gestum getur stafað

hætta af hlaupunum. Þetta eru aðeins tvö dæmi um fjölsóttu staði þar sem hætta getur skapast í hlaupum úr vestanverðum Vatnajökli en staðirnir eru mun fleiri.

Samkvæmt mati á framrásartíma mögulegra jökulhlaupa eru margar klukkustundir, frá því hlaupin koma fram við jökuljaðar, tiltækar til viðbragðs í flestum tilfellum (Myndir 4.11, 4.13, 4.15, 4.17 og 4.19.). Þessu til viðbótar má ætla að einhver tími gefist til viðbótar því hlaup af þessari stærð verða aðeins vegna eldgosa undir jökli og líklegt er að aðdragandi greinist með mælingum á jarðskjálftum og óróa, auk þess sem gosinu sjálfu mundi fylgja gosórói. Einnig er mögulegt að framrás hlaupsins undir jöklinum fylgdi hlaupórói sem mætti greina og jafnvel staðsetja (Eibl o.fl., 2020). Þó verður að hafa í huga að mælist upphaf hlaupsins undir jöklinum ekki á jarðeðlisfræðilegum mælistöðvum í kringum Bárðarbungu verður hlaupanna ekki vart fyrir en i) í Hágöngulóni, komi þau undan Köldukvíslarjökli eða úr hlíðum Bárðarbungu eða ii) í Sauðafellslóni, komi hlaup undan Sylgjujökli. Slíkt myndi stytta viðbragðstíma um allmargar klukkustundir miðað við uppgefna tíma á Myndum 4.11, 4.13, 4.15, 4.17 og 4.19.

Af matinu á framrásartímunum er ljóst að nægur tími ætti að gefast til viðvarana og rýmingar í byggð. Það þarf þó að tryggja að boð um rýmingu og yfirvofandi hlaup berist örugglega til allra sem búsettir eru á svæðinu eða eiga leið þar um. Einnig þarf að tryggja að fólk bregðist við og grípi til viðeigandi aðgerða. Huga þarf vel að ferðamönnum í þessu samhengi en ferðamannastraumur og breytt hegðun varðandi útivist hefur aukið berskjöldun ferðafólks gagnvart jökulhlaupum.

Að mörgum öðrum þáttum er að huga í viðbrögðum við yfirvofandi hlaupi, svo sem björgun verðmæta og húsdýra. Tjónmætti og hættan sem fylgir þessum flóðum er þó svo mikil að gæta þarf þess vel að slíkt tefji ekki rýmingar, svo ekki komi til manntjóns. Tjónmætti flestra sviðsmyndanna er geysimikið á stórum svæðum (Myndir 4.11, 4.13, 4.15, 4.17 og 4.19). Á slíkum svæðum er öllum hætta búin, jafnvel vel búnum viðbragðsaðilum (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2020).

Langur framgangstími hlaupanna (a.m.k. hálfur dagur fyrir jafnvel verstu sviðsmyndirnar (Mynd 4.17)), gefur möguleika á að hugsanlega verði hægt með fjarkönnun eða eftirlitsflugi að kanna og meta umfang goss og hlaups á upphafsstigum atburðanna. Slíkt mat mætti svo nota til að stilla af viðbrögð varðandi verðmætabjörgun og aðra þætti aðgerða sem eru tímafrekari en einföld rýming. Í þessum efnum mætti líka horfa til lykilorða í framgangi flóðanna sem hafa áhrif á stærð og útbreiðslu vissra sviðsmynda, svo sem hvort að rof verði á stíflumannvirkjum eða flóðvörum Hágöngulóns og Kvíslavatns.

## 6 Áhættumat

Hér er staðaráhætta og einstaklingsbundin dánaráhætta af völdum jökulhlaupa reiknuð fyrir nokkra dæmigerða staði innan útbreiðslusvæðis hlaupanna. Búast má við að mesta hættan af völdum hlaupa sem þessara sé ekki manntjón heldur það tjón sem þau geta valdið á byggingum, innviðum gróðri og öðrum náttúrugæðum, auk röskunar á samgöngum, atvinnulífi og annarri starfsemi, líkt og rætt er í 5. kafla. Tölulegar niðurstöður um áhættu hjálpa til við að sannreyna þá fullyrðingu og setja áhættuna í samhengi.

### 6.1 Val á stöðum

Samtals voru 5 staðir valdir til skoðunar. Árnes, Hella og Selfoss voru valin sem þéttbýliskjarnar og bæir. Horft var til þess að vera með staði dreifða um flóðasvæðið og að berskjöldun íbúa gagnvart hlaupunum væri umtalsverð. Því til viðbótar var hugað að dreifbýli á Skeiðunum þar sem hættan á láglandi utan meginfarvega er einna mest og byggð umtalsverð. Að lokum var áhættan svo einnig könnuð á Hafinu, hálendinu norðan við Búrfell. Þar er umtalsverð umferð ferðamanna og talsverð virkjanamannvirki með viðveru vegna viðhalds og eftirlits. Viðvera er því einhver þó að engin búseta sé á því svæði. Líta má á niðurstöður fyrir hálendið ofan Búrfells sem efra mat fyrir ferðafólk á ferðamannastöðum í Þjórsárdal, svo sem Gjánni og við Hjálparfoss. Niðurstöður fyrir starfsmann á hálendinu norðan Búrfells væri þá efra mat fyrir áhættu leiðsögufólks með mikla viðveru á ferðamannastöðum innan útbreiðslusvæðis flóðanna í Þjórsárdal. Í öllum tilfellum er miðað við áhættu innan flóðasvæða á viðkomandi stað og niðurstöðurnar alls ekki þannig að allt land á viðkomandi stöðum fari undir vatn, sjá kafla 4 og 5.

### 6.2 Aðferðafræði

Hér er notast við aðferðafræði sem breska ríkisstofnunin DEFRA hefur lagt fram til þess að meta áhættu fólks vegna vatnsflóða (DEFRA, 2006a,b), líkt og í fyrri útgáfum áhættumats fyrir jökulhlaup (Bergur Einarsson o.fl., 2022). Frekari útlistun á aðferðafræðinni og notkun hennar fyrir áhættu af völdum jökulhlaupa má finna hjá Tinnu Þórarinsdóttur o.fl. (2020). Ekki er farið í sérstaka umfjöllun um aðferðafræðina í kafla 3 því hún er hér notuð óbreytt frá heimildunum að ofan.

Þegar að horft er til árlegrar dánaráhættu dæmigerðra einstaklinga í byggðarlögunum þremur er miðað við viðveru 75% ársins innan mögulegs flóðasvæðis á hverjum stað. Fyrir svæðið á hálendinu norðan Búrfells er miðað við tvo dæmigerða einstaklinga. Annar er ferðamaður sem ver aðeins 4 tímum á mögulegu flóðasvæði og tekur áhættu gagnvart jökulhlaupum svipaða því sem þar gildir á 5 ára fresti eða meira líkt og miðað er við hjá Sigríði Sif Gylfadóttur og fleirum (2016). Hinn er starfsmaður sem ver 8 tímum 235 daga á ári innan flóðasvæðisins. Þetta samsvarar fullri vinnu innan flóðasvæða allt árið og er að öllum líkindum ofmat fyrir alla starfsmenn sem nú sinna vinnu á svæðinu en er möguleg efri mörk.

Við val á stuðlum sem ákvarða þarf fyrir reikniformúlur DEFRA var öllum svæðum á láglandi gefið 1 stig (viðbragðstími talinn í klukkustundum) fyrir mögulegan rishraða flóða, því hlaupin verða komin að ýmsum virkjanamannvirkjum þar sem þeirra yrði örugglega vart, mörgum klukkutímum áður en þau koma að viðkomandi svæðum (MyndirMynd 4.11Mynd 4.13, Mynd 4.15, Mynd 4.17 og Mynd 4.19). Svæðinu ofan Búrfells var gefið 2 stig (viðbragðstími mögulega aðeins um klukkustund) sem neðra mat og 3 sem efra mat (viðbragðstími innan við klukkustund) til að gera ráð fyrir þeim möguleika að fólk ofarlega á virkjanasvæðunum gæti haft lítinn fyrirvara ef hlaup kemur þar fram.

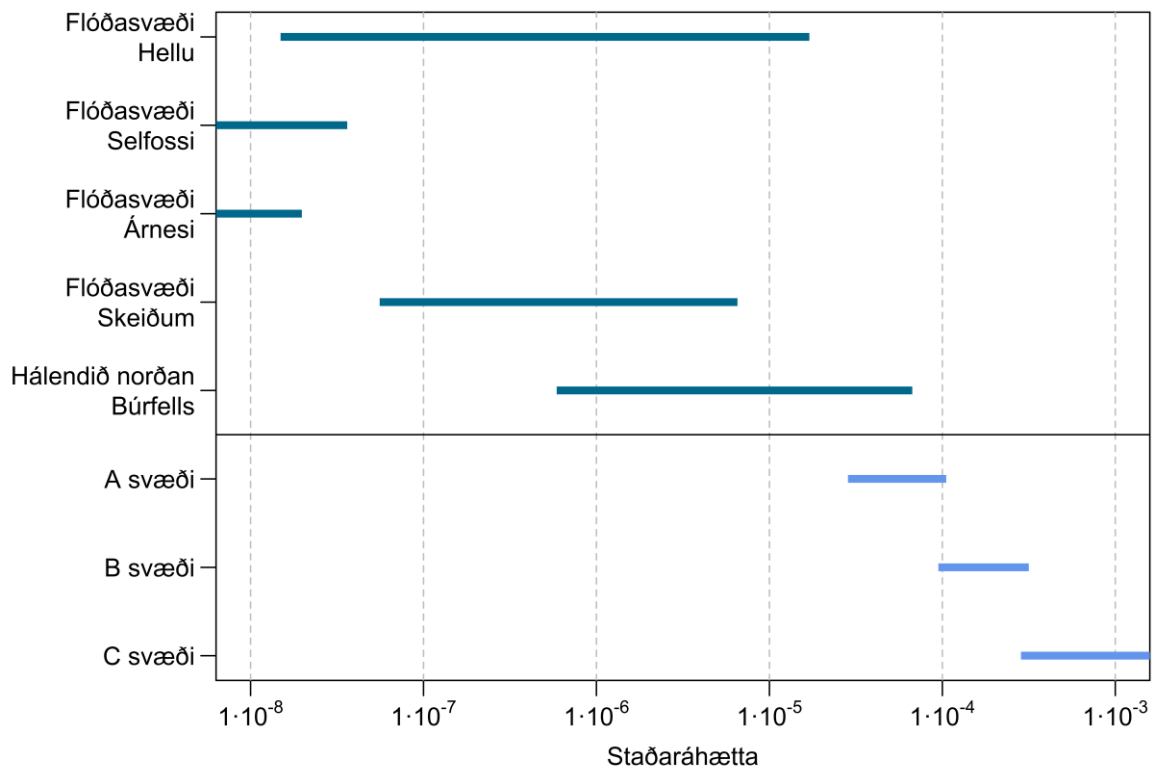
Árnesi, Hellu og Selfossi var gefin einkunnin 1 sem neðra mat og 2 sem efra mat fyrir svæðisbundna eiginleika. Sá stuðull lýsir því hvort að svæðið sé samsett af viðkvæmum svæðum svo sem tjaldsvæðum, sumarbústöðum, fjölförnum vegum (3 stig) eða frekar byggingum, sem þola betur flóð og gefa fólki möguleika á að leita skjóls, svo sem steinsteypt hús á fleiri en einni hæð (1 stig). Skeiðum og hálendinu ofan Búrfells var gefin einkunnin 2 sem neðra mat en þrjú sem efra mat, því fólk á þessum svæðum væri mögulega í sumarhúsum eða jafnvel á ferð lítt varið í bíl.

Þriðji stuðullinn sem þarf að ákvarða lýsir gæðum viðvörunarkerfis. Svæði án viðvörunarkerfis fá 3 stig, svæði með takmörkuðum kerfum fá 2 stig og svo ef áreiðanlegt viðvörunarkerfi ásamt neyðaráætlunum er rekið á svæðinu fær það 1 stig. Öllum svæðum á láglandi er gefið 1 stig sem lægra mat en 2 stig sem efra mat. Svæðinu á hálendinu norðan við Búrfell er svo gefið 2 stig sem lægra mat en 3 stig sem efra mat því þar er lítið um vatnshæðarmælingar fyrr en í efstu virkjanalónum, sem eru aðeins skammt ofan svæðisins komi hlaup fram undan Sylgjujökli og fari því ekki í gegnum Hágöngulón. Einnig er fólki mögulega ekki jafn ljóst hvernig best sé að bregðast við og leita skjóls á því svæði heldur en niðri í byggðinni þar sem oftast þarf aðeins að færa sig skamma vegalengd frá meginfarvegum.

Seinasta breytan sem ákvarða þarf í þessum reikningum er hlutfall fólks sem gæti átt í erfiðleikum með að forða sér undan flóðum og væri því í meiri hættu en aðrir. Oft er miðað við hlutfall 75 ára og eldri auk hreyfihamlaðra en stundum er einnig tekið tillit til ferðamanna sem gætu verið hægfara vegna ókunnugleika, torfarins landslags og annarra slíkra þátta (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2020). Vegna þess hve viðbragðstímar á láglandissvæðunum eru langir (MyndirMynd 4.11Mynd 4.13, Mynd 4.15, Mynd 4.17 og Mynd 4.19) jafnvel í verstu sviðsmyndum auk þess sem sjaldnast þarf að flytja fólk um langan veg við rýmingu ætti að gefast nægur tími til að koma jafnvel þeim allra hægförulustu í öruggt skjól. Því var ákveðið að notast við lægra hlutfall heldur en fjölda hreyfihamlaðra og 75 ára og eldri. Hlutfall 75 ára og eldri af heildaríbúafjölda árið 2025 er tæp 7% skv. talnagrunni Hagstofunnar. Í reikningunum hér er miðað við 1% mannfjöldans sem neðri mörk en 2% sem efri mörk hlutfalls þeirra sem gætu átt í vandræðum með að forða sér undan flóði. Á hálendinu norðan Búrfells má svo búast við að flest séu á atvinnualdri eða vel ferðafærir ferðamenn, auk þess sem flest eru á bílum eða öðrum hraðfara farartækjum. Því var einnig ákveðið að notast við heldur lægra hlutfall þar og miðað við sömu hlutföll og á láglandinu þó að tími til rýmingar geti verið styttri.

## 6.3 Helstu niðurstöður

Umtalsverð munur er þegar á milli A og B reikninganna í niðurstöðum fyrir dýpi og straumhraða flóða. Því til viðbótar er mikil breidd í áætluðum líkum hværrar flóðasviðsmyndar (**Error! Reference source not found.**) og mati á þeim stuðlum sem ákvarða þarf fyrir DEFRA reikningana (sjá ofan). Talsverð óvissa er því í inntaksgögnum áhættureikninganna. Lokaniðurstaða matsins er því í hverju tilfalli sett fram sem bil milli mögulegra efri og neðri marka. Bilið í niðurstöðum fyrir hvern stað spannar stærðarþrep (Myndir 6.1 og 6.2). Samanburður við önnur þekkt áhættugildi er samt gagnlegur, þrátt fyrir þessa umtalsverðu óvissu.

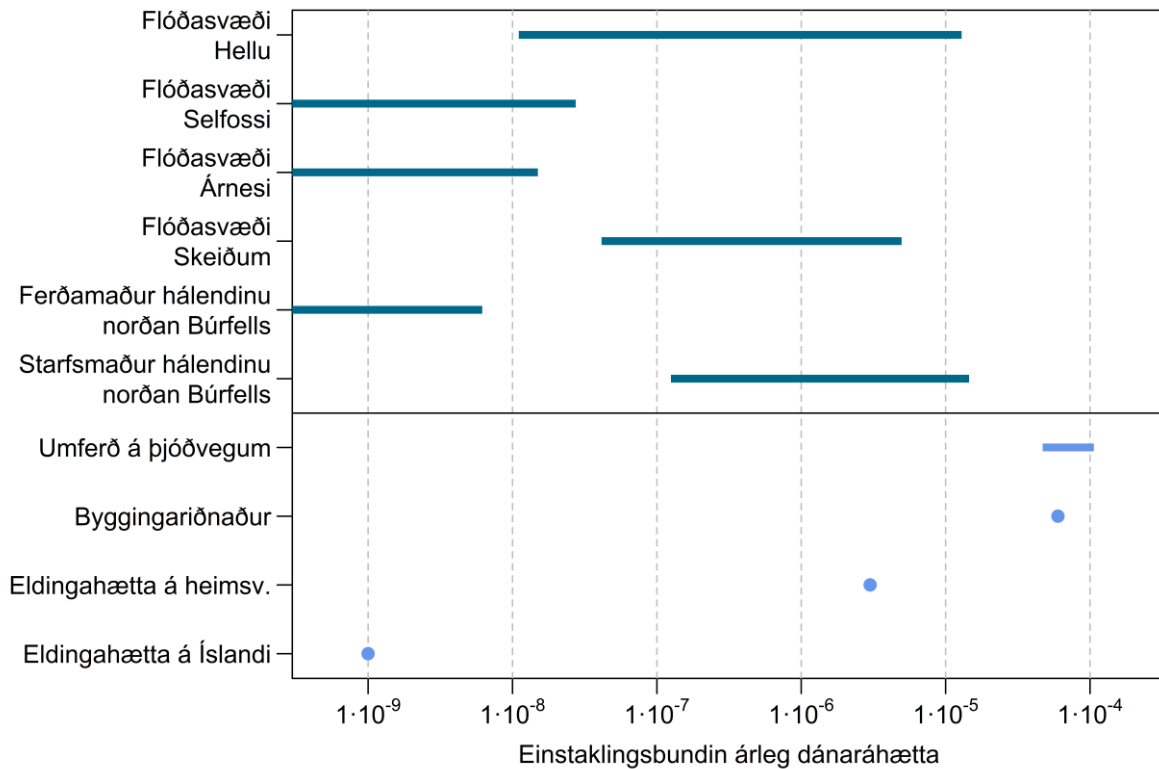


Mynd 6.1. Staðaráhætta á völdum svæðum auk áhættuviðmiða vegna ofanflóðahættu (A, B og C svæði) til samanburðar. Athugið að þessi áhætta gildir alls ekki um allt svæðið á viðmiðunarstöðunum heldur aðeins á þeim hluta sem flóð fer yfir. Til dæmis má nefna að jafnvel í allra verstu sviðsmyndum fer innan við helmingur landsvæðis Hellu undir hlaupvatn. Samkvæmt reglugerð um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða (nr. 505/2000) eru engar kvaðir utan A svæðis. Innan A svæðis má byggja nýbyggingar en kvaðir eru á um sérstyrkingar á skólum, samkomuhúsum, fjölbýlishúsum og öðrum sambærilegum bygggingum. Innan B svæðis er nýbyggging skóla og annarra sambærilegra byggginga ekki heimil. Áhættan er svo mest innan C svæðis og þar er einungis heimilt að reisa ný mannvirki þar sem ekki er búist við stöðugri viðveru fólks til búsetu eða vinnu. X-ás grafsins er lograkvarði.

Niðurstöður eru í samræmi við almennar ályktanir um að árleg dánaráhætta einstaklings af völdum jökulhlaupa sé ekki umtalsverð á þessum stöðum. Staðaráhættan í byggð er mest á Hellu, enda er bæjarfélagið staðsett mjög nærri árfarvegi Ytri-Rangár og flóðin hlaupa yfir í hana í öllum sviðsmyndum utan minnstu sviðsmyndarinnar, Bb02 (Mynd 6.1).

Því næst koma Skeiðin með því sem næst sambærilega áhættu. Áhættan er svo umtalsvert minni á Selfossi og í Árnesi. Jafnvel stærstu hlaupsviðsmyndirnar eru aðeins á við slæm úrkomu- og leysingaflóð á Selfossi með um 100 ára endurkomutíma, sjá kafla 5. Árnes er síðan utan meginfarvega hlaupanna þó að þau nái að einhverju leyti inn í þéttbýlið þar (Myndir 4.10 til 4.19).

Samanborið við viðmið um áhættu vegna ofanflóða er staðaráhættan í byggð allstaðar undir neðri mörkum fyrir svöðum A svæði (Reglugerð um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða nr. 505/2000). Fyrir ofanflóð eru engar kvaðir um byggð utan A svæða. Efri mörk á mati fyrir staðaráhættu á flóðasvæðum á hálendinu norðan við Búrfell skarast við mat fyrir A svæði. Innan A svæða er almennt ekki kveðið á um takmarkanir á nýbyggingum aðrar en þær að hús með mikilli viðveru þar sem fólk safnast saman, svo sem skólar, samkomuhús og fjölbýlishús skuli vera sérstyrkt (Reglugerð um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða nr. 505/2000). Erfitt getur reynst að verjast hamfarajökulhlaupum með verkfræðilegum vörnum og ekki nóg að hús standi að mestu óskemmd eftir flóðin til að fólk sé öruggt í þeim í slíkum hlaupum. Því væri vert að huga vel að staðsetningu byggingareita í skipulagi standi til að byggja upp húsnæði með mikilli viðveru og næturgistingu innan mögulegra flóðasvæða norðan Búrfells. Best fer á að halda áhættu sem lægstri með því að staðsetja slíkar byggingar utan hættusvæða og þar með skipuleggja sig frá hættunni. Eðlilegt er að draga þessa sömu ályktun fyrir öll flóðasvæði ofan hálendisbrúnarinnar.



Mynd 6.2. Einstaklingsbundin árleg dánaráhætta af orsökum jökulhlaupa á völdum svæðum. Athugið að þessi áhætta gildir alls ekki um allt svæðið á viðmiðunarstöðunum heldur aðeins á þeim hluta sem fer undir vatn í flóði. Til dæmis má nefna að jafnvel í allra verstu sviðsmyndum fer innan við helmingur landsvæðis Hellu undir hlaupvatn. Áhætta af völdum nokkurra annarra orsaka er sýnd til samanburðar (Óli H. Þórðarson á.á.; HSE, 2001; Þórður Arason, 2013). X-ás grafsins er lograkvarði.

Líkt og með staðaráhættuna er dánaráhætta fyrir dæmigerðan einstakling innan hvers svæðis ekki mikil. Jökulhlaupahættan er langt frá því að vera ráðandi dánaráhætta, jafnvel í efstu mörkum matsins (Mynd 6.2). Að öllum líkindum stendur fólki á Suðurlandsundirlendinu 10 til 1000 falt meiri áhætta af almennri þátttöku í umferðinni en af jökulhlaupum.

Á svæðum þar sem áhættan af völdum hlaupanna er þó mest nær hún að vera sambærileg dánaráhættu af völdum eldinga á heimsvísu (Þórður Arason, 2013). Slík áhætta er næg til þess að samfélög taka almennt tillit til hennar svo sem með leiðbeiningum um rétt viðbrögð í eldingaveðrum og viðbragðsáætlunum fyrir t.d. sundstaði. Huga mætti að áhættunni af völdum jökulhlaupum með svipuðum hætti þó að viðbúnaður og viðbrögð séu ekki þau sömu.

## 7 Megin óvissuþættir verkefnisins.

Reiknilegir þættir og ákvörðun líkanstuðla skapa óvissu í straumfræðilegu líkanreikningunum, sjá nánar kafla 3.4. Þessir þættir eru þó hverfandi miðað við ýmsa þætti í forsendum og uppsetningu reikninganna; val á sviðsmyndum, rúmmál hlaupvatns í sviðsmyndum og hvernig eða hvort horft sé til samspils hlaupanna við virkjanalón á hlaupleiðinni. Munurinn á milli niðurstaðna svokallaðra A- og B-reikninga, sem lýsir því hvort tekið sé tillit til þess möguleika að vatnsstaða í virkjanalónum sé há og stíflurof verði eða ekki, er til dæmis mun meiri en áhrif ákvörðunar á hryfisstuðli í reikningunum. Áhrif upplausnar reikninetsins, vals á takmörkurum, óvissu í landlíkani og annarra slíkra þátta eru einnig hverfandi miðað við muninn sem kemur fram á milli A og B reikninganna. Hér á eftir er farið yfir megin óvissuþættina sem eru:

- Áhrif lóna; stíflurof getur stækkað hlaupin, en ef ekkert stíflurof verður geta lónin minnkað hámarksrennslið.
- Forsendur og verklag, hvaða munur er á niðurstöðum varðandi rennslisferla og rennslisleiðir hlaupa fyrir mismunandi hermanir?
- Áhrif írennslis. Aðstæður á hlaupaleiðunum eru mismunandi, m.a. eftir árstíma. Búast má við að hlaup, sem dreifast yfir snjólaust nútímahraun/land þar sem grunnvatn er á tuga metra dýpi, minnki töluvert eða hverfi alfarið niður í hraunin.

### 7.1 Áhrif lóna

Flókið samspil jökulhlaupa við miðlunar- og virkjanamannvirki getur leitt til mismunandi niðurstaðna. Til þess að hætta verði ekki vanmetin er venja í hættumati að líta frekar til þátta sem aukið geta hættuna heldur en þeirra sem mögulega geta dregið úr henni. Megin áherslan í þessu verkefni er því lögð á að kanna með B-reikningunum hvernig lón við háa vatnsstöðu og stíflubrot geti magnað jökulhlaup enda getur það leitt til aukinnar hættu.

Það er þó ljóst að áhrifin geta verið öfug og lón geta dregið úr hættu af jafnvel umtalsverðum jökulhlaupum. Ef stíflur halda og næg rýmd er til staðar í lóninu til að grípa hluta eða jafnvel allt rúmmál hlaupvatnsins geta lónin dempað framgang hlaupa eða jafnvel stöðvað hann alveg.

Í júlí árið 2011 kom hlaup undan Köldukvíslarjökli og gekk fram í Hágöngulón (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2016). Áætlað hámarksrennsli hlaupsins var um 2.200 m<sup>3</sup>/s og heildarrúmmál hlaupvatns um 35 Gl (Laufey B. Hannesdóttir, 2011). Þetta var því umtalsvert jökulhlaup en þó ekki nema um 10. partur af heildar miðlunargetu lónsins, sem er yfir 300 Gl (Unnar Númi Almarsson o.fl., 2020). Fyrir hlaupið var lónið á yfirfalli en áhrif hlaupsins urðu þó ekki önnur en tæplega eins metra hækkun í lóninu og aukning í rennsli á yfirfallinu (Laufey B. Hannesdóttir, 2011). Mest varð rennslið á yfirfallinu 242 m<sup>3</sup>/s eða aðeins um 10. partur af hámarksrennsli hlaupsins. Lónið dempaði því hlaupið gríðarlega og dró mikið úr tjónmætti og hættunni af hlaupinu. Við lægri vatnsstöðu hefði lónið getað alveg gleypt og stöðvað jafnvel umtalsvert stærra flóð.

Það getur því verið mjög háð aðstæðum og stærð hlaupa hvort miðlunar- og virkjanamannvirki á jökulhlaupasvæðum leiði til aukinnar hættu eða dragi úr henni. Hér er reynt að magntaka óvissuna sem þetta veldur með því að búa til umlykju utan um líkleg tilfelli með A- og B-reikningunum. Óvissubilið er þó í raun stærra því A-reikningarnir lýsa ekki allra bestu sviðsmynd þar sem hlaup dempast mikið af lónum. Það leiðir þó ekki til vanmats á hættu, því slík atburðarás leiðir til minni áhrifa og minni hættu af hlaupi.

## 7.2 Rýni verkfræðistofunnar Verkís á forsendum og verklagi

Frá upphafi verkefnis var lagt upp með að leita leiða til þess að taka tillit til mögulegra áhrifa miðlunarlóna í líkanreikningunum. Könnuð var aðferðafræði þar sem Veðurstofan myndi fyrst reikna framgang hlaupa að lóni. Við lónið yrðu svo niðurstöðurnar afhentar verkfræðistofunni Verkís sem myndi reikna framgang hlaupsins í gegnum lónið og áhrif hlaupsins á stíflumannvirkin. Niðurstöður um rennsli neðan hvers lóns yrðu svo aftur afhentar Veðurstofunni til að rekja það rennsli áfram að næsta lóni eða til sjávar neðan neðsta miðlunarlóns. Í tilraunum með þetta verkferli við efsta lónið, Hágöngulón, kom fljótlega í ljós að þessi aðferðafræði væri of flókin og utan við kostnaðarramma verkefnisins.

Vegna flækjustigsins á þessari aðferðafræði var einnig hugað að tilraunum með meiri nálgunum og þar með einfaldari reikniaðferðum. Í þeim reikningum ákvarðar líkanið sjálfst við hvert lón hvort að stíflurof verði og hver sviðsmynd er rakin frá jökuljaðri til sjávar í einni keyrslu, sjá nánar kafla 3.5. Þessir reikningar voru upphaflega hugsaðir sem „plan B“ og draga nafn sitt af þeirri áætlun. Þeir urðu svo aðal-líkanreikningarnir þegar fallið var frá upphaflega verklaginu.

Ljóst var að umtalsverðar einfaldanir þyrfti að gera í B-reikningunum á rofi flóðvara og stíflna. Verkís var því falið að rýna aðferðafræðina, nálganirnar og forsendur reikninganna. Verkís framkvæmdi einnig samanburðarreikninga með þremur sviðsmyndum (Ham01, Kkv02 og BB02) fyrir efsta hluta flóðfarvegarins, þ.e. frá jaðri Köldukvíslarjökuls og niður fyrir Hágöngulón (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024).

Þetta svæði var valið því það er efsti hluti flóðfarvegarins en einnig sá erfiðasti reiknilega séð. Lítil dempun er komin fram á rennslisrit jökulhlaupanna og hámarksrennsli innan hverrar sviðsmyndar því ennþá hlutfallslega mikið á þessu svæði. Stíflumannvirki við Hágöngulón eru einnig margbrotin með meginstíflu austan Syðri-Hágöngu en hjástíflu norðan hennar. Yfirfall lónsins er um meginstífluna en flóðvarið er í hjástíflunni.

Þessu til viðbótar leitar rennsli frá yfirflæði eða rofi í meginstíflunni og hjástíflunni ekki til sömu áttar. Rof í hjástíflunni skilar rennsli til Kvíslavatns og þaðan áfram í farveg Þjórsár. Rof í meginstíflunni skilar aftur á móti rennsli í farveg Köldukvíslar. Hágöngulón og stíflur þess er því eins flókið reiknilega séð og miðlunarmannvirki á Þjórsársvæðinu verða. Það má því búast við að séu nálganir B-reikninganna og samanburður við reikninga Verkís ásættanlegur þar, eigi hið sama við um önnur miðlunarlón á útbreiðslusvæði hlaupanna.

### 7.2.1 Samanburður á rennslisferlum og rennslisleiðum

Verkís reiknaði framgang og stíflurof við Hágöngulón í þremur sviðsmyndum, Bb02, Kkv02 og Ham01. Notast var við tvívíða straumfræðireikninga með forritinu HEC-RAS, sjá nánar minnisblað Gísla S. Péturssonar o.fl. (2023). Talsverður munur er á grunnuppsetningu HEC-RAS reikninga Verkís og GeoClaw reikninga Veðurstofunnar (Jón Elvar Wallevik o. fl., 2023).

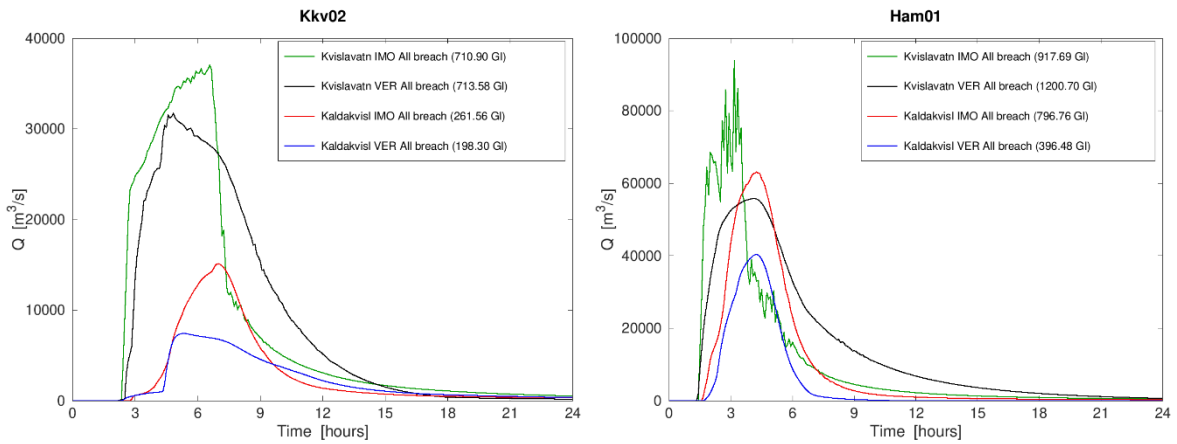
- HEC-RAS reikningarnir notast við landlíkan sem lýsir raunverulegum botni Hágöngulóns en GeoClaw reikningarnir notast við landlíkan sem lýsir yfirborði lónsins við háa vatnsstöðu.
- Rofskað í stíflur er nálgæð í HEC-RAS reikningum með reynsluformúlum en í GeoClaw reikningunum er stíflubrot nálgæð með fyrirfram gefnu rennslisriti frá upptökum neðan flóðvars viðkomandi lóns. Þetta hefur áhrif á heildarrúmmál vatns sem losað er úr miðlunarlóninu, lögum rennslisrits vatnsins úr lóninu og hvar það viðbótarvatn kemur fram.
- Stærðfræðilegur/reiknifræðilegur munur er á líkönunum í ýmsum efnum, svo sem á hverskonar neti reikningarnir eru leystir. Einnig er misjafnt hvernig hreyfi- og samfellujöfnurnar eru brytjaðar (e. discretized), sem hefur áhrif á hvernig töluleg villa í reikningum hegðar sér og er meðhöndluð.

Einnig munar fleiri þáttum, sjá nánar, kafla 3.3.5. Viðbúið er að þessi munur leiði til einhvers mismunar í niðurstöðum en tilgangur samanburðarins var að kanna hvort að sá munur væri innan ásættanlegra marka fyrir markmið verkefnisins, þ.e. að útbúa hættumatskort og vinna áhættumat sem nýtast muni Almannaöryggisráði, sveitarfélögum og öðrum hagaðilum í áætlunargerð, skipulagi og viðbragðsáætlunum. Þessi munur dregur líka fram þá óvissu sem búast má við að sé tilkomin vegna vals á líkani og aðferðafræði.

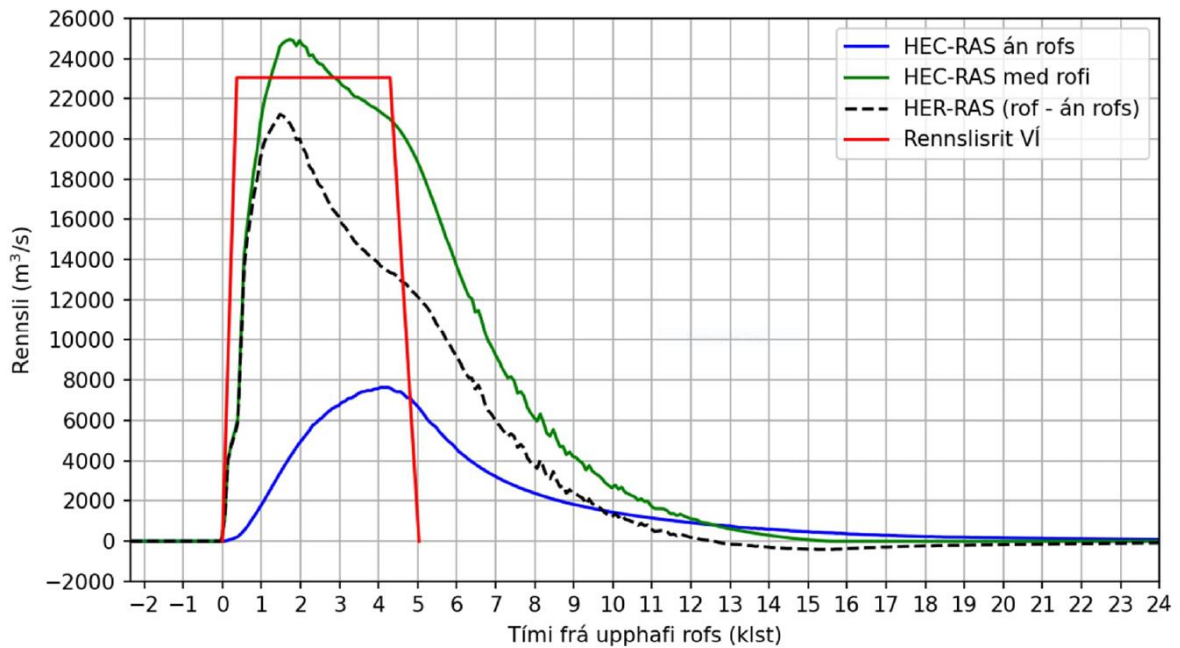
Vert er að hafa í huga í þessum samanburði að rétt lausn vandamálsins er í raun ekki þekkt og mismunandi líkanreikningar gefa aðeins mismunandi nálganir á raunverulegum framgangi tiltekinnar jökulhlaupasviðsmyndar. Stíflurof þar sem jafnvel margfalt rúmmál lónsins streymir inn í það ofan frá með miklum krafti er t.d. mjög sjaldgæfur atburður. Það er því mögulegt að gagnasettin, sem aðhvarfsjöfnur fyrir roftíma og breidd rofskaðs í HEC-RAS eru felldar að, nái ekki utan um slíka atburði. Meirihluti atburðanna í gagnasettinum sem aðhvarfsjöfnurnar byggja á eru líka fyrir minni lón en Hágöngulón og það gæti mögulega líka haft áhrif á gildi jafnanna fyrir flóð eins og þau sem hér eru hermd (Gísli S. Pétursson o. fl., 2024). Einföld trapisulaga rennslisrit úr lónunum, sem notast er við í GeoClaw, gætu því mögulega verið nær raunveruleikanum þó að þau séu mun einfaldari nálgun. Það er þó alls ekki víst.

Fyrir hermanir á Ham01 og Kkv02 kemur greinilegur munur fram á milli reikninga Veðurstofunnar og Verkís í rennsli í gegnum þversnið til Kvíslavatns annars vegar (þversnið 1 á Mynd 3.16) og Köldukvíslar hins vegar (þversnið 2 á Mynd 3.16). Munurinn á hámarksrennsli í gegnum þversniðin er allt að tugir prósentu (Mynd 7.1) og ávallt í þá átt að hámarksrennsli er hærra í B-reikningum Veðurstofunnar (Jón Elvar Wallevik o.fl., 2023). Stór hluti munarins er tilkominn vegna mismunar á lögum rennslisrits flóðvatns sem bætist við úr Hágöngulóni vegna stíflurofs. Rennslisrit Veðurstofunnar rís mun brattar, nær hærra

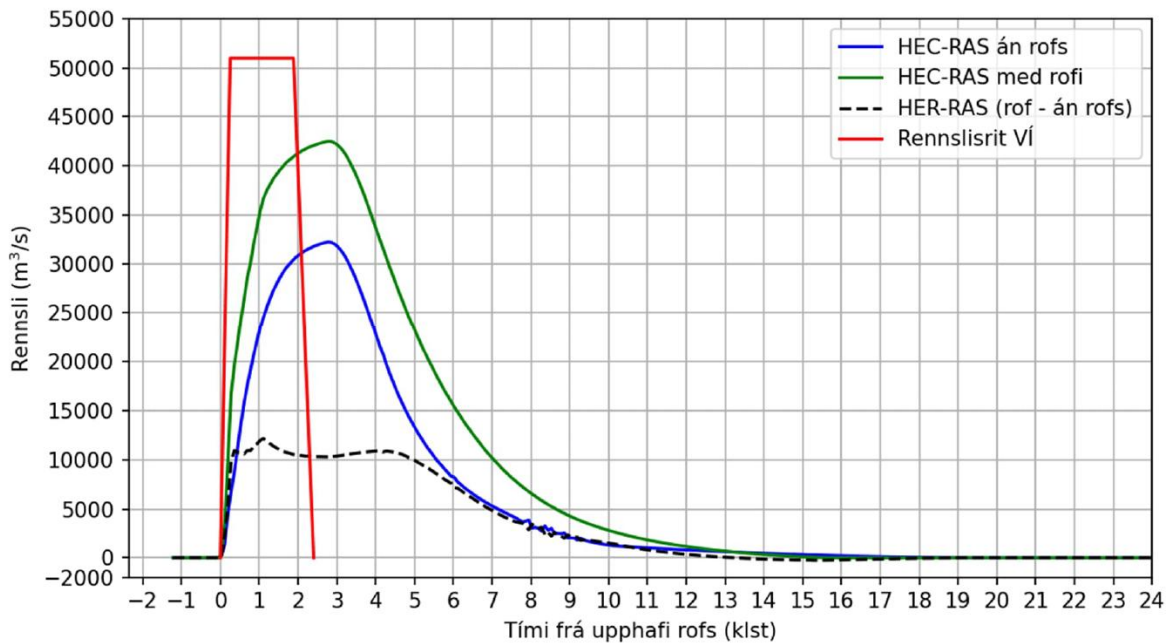
hámarksrennsli en er með styttri varanda heldur en HEC-RAS reikningarnir á stíflurofi gefa til kynna (Myndir 7.2 og 7.3) (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024).



Mynd 7.1. Samanburður á rennsli í reikningum Veðurstofunnar með GeoClaw og Verkís með HEC-RAS á rennsli til Kvislavatns annars vegar og í farveg Köldukvíslar hins vegar. Samanburður fyrir sviðsmyndina Kkv02 til hægri en Ham01 til vinstri. Rennslið er reiknað í gegnum þversnið 1 og 2 á Mynd 3.16. Sjá einnig Mynd 3.17 varðandi skrifbiðlið  $\Delta HD$  og Mynd 3.23 um raunverulegar sveiflur í rennsli og stöðugleika hermanna.



Mynd 7.2. Samanburður á rennsli og varanda rennslisrits neðan flóðvars Hágöngulóns fyrir sviðsmynd Kkv02 í hermunum Verkís (svört lína) og rennslisrits Veðurstofu Íslands (rauð lína). Tími er sýndur í klukkustundum frá upphafi rofs á flóðvari. (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024).



Mynd 7.3. Samanburður á rennsli og varanda rennslisrits neðan flóðvars Hágöngulóns fyrir sviðsmynd Ham01 í hermunum Verkís (svört lína) og rennslisrits Veðurstofu Íslands (rauð lína). Tími er sýndur í klukkustundum frá upphafi rofs á flóðvari. (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024).

Neðan flóðvars og rofs í stíflu Hágöngulóns hefur munur á varanda rennslisrita áhrif á megin hlaupoppna, sem eru samsettir úr rennsli jökulhlaupsins og viðbótar rennslinu úr lóninu. Það verður því munur á lögun rennslisferlanna en lykilstærðir svo sem tímasetning á upphafi megin hlauptoppsins við hvort þversnið eru sambærilegar (Mynd 7.1).

Talsverður munur er á rúmmáli vatns sem kemur frá lóninu í hvoru líkani. Í GeoClaw líkanreikningunum er gert ráð fyrir að 372 Gl komi úr lóninu, sjá kafla 3.5 og Jöfnu 3.8. HEC-RAS reikningarnir skila aftur á móti ekki nema um 275 Gl úr lóninu (Jón Elvar Wallevik o.fl., 2023). Heildarrúmmál lónsins er um 450 Gl (Gísli S. Pétursson o.fl., 2023) en eins og áður hefur komið fram er talverður munur á því hvernig stíflurof eru nálguað í líkönunum og því misjafnt hversu mikið af heildarrúmmáli lónsins kemur fram.

Í sviðsmyndinni Kkv02 kemur meginmunurinn fram í rennsli til Köldukvíslar. Fyrir Ham01 sviðsmyndina er munurinn svipaður á milli rennslis til Kvíslavatns og Köldukvíslar en hann er þó hlutfallslega mun meiri í rennslinu til Köldukvíslar. Þrátt fyrir þennan mun á rúmmáli flóðvatns sem kemur frá lóninu verður munur á heildarrúmmáli samsetta hlauptoppsins í gegnum hvort þversnið (Mynd 7.1) innan við 7% fyrir báðar sviðsmyndirnar (sjá kafla 7.5.1 og 7.5.2 í Jón Elvar Wallevik o.fl., 2023).

Í reikningum Veðurstofunnar með GeoClaw er allt vatnið úr lóninu látið koma fram neðan flóðvarsins í hjástíflu Hágöngulóns, norðan Syðri-Hágöngu. Í reikningum Verkís með HEC-RAS verður aftur á móti rof bæði í flóðvarinu í hjástíflunni og á aðalstíflunni austan Syðri-Hágöngu (Gísli S. Pétursson o.fl., 2023). Vatn úr lóninu rennur því aðeins til Kvíslavatns í GeoClaw reikningunum en bæði til Kvíslavatns og Köldukvíslar í HEC-RAS reikningunum.

Í HEC-RAS reikningum Verkís hægir á hækkun lónhæðar og jafnvel lækkar í lóninu meðan á hlaupinu stendur vegna mikils rennslis um rofskörð á flóðvari og stíflum (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024). Slíkt hið sama gerist ekki í GeoClaw reikningum Veðurstofunnar því að í þeim verður engin breyting á lónhæðinni, sem situr föst í landlíkaninu, þó að flóðvatn sem eigi að nálgá útrennsli vatns úr lóninu sé losað úr uppsprettu neðan flóðvarsins. Hækkun lónyfirborðsins og útbreiðsla hlaupvatns í kringum lónið er því ofmetin í GeoClaw reikningunum (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024). Þetta ofmat útbreiðslu er staðbundið í kringum virkjanalón en getur haft áhrif á rennsli í gegnum og framhjá þeim.

Hlaupvatn gengur í gegnum Hágöngulón og til beggja átta í bæði HEC-RAS og GeoClaw reikningunum fyrir sviðsmyndirnar Kkv02 og Ham01. Í HEC-RAS reikningunum verður umtalsvert rennsli til Köldukvíslar vegna rofs í aðalstíflunni austan Syðri-Hágöngu en það ferli er ekki hermt í GeoClaw reikningunum. Ofmat í GeoClaw reikningunum á vatnshæð í lóninu og útbreiðslu hlaupvatns á hraunin suðaustan við meginstífluna, vegna þess að þeir herma ekki vatnsborðslækkun vegna stíflurofs, leiðir aftur á móti til umtalsverðs rennslis yfir það svæði og til Köldukvíslar. Þetta vegur upp á móti áhrifum þess að rof meginstíflunar er ekki hermt í þeim reikningum. Það er viss heppni að tvær nálganir (þ.e. fast yfirborð lónsins og losun alls lónvatns neðan flóðvars), sem báðar gætu leitt til aukinnar óvissu í GeoClaw reikningunum, vinni hvor gegn annarri og jafnist að einhverju leyti út. Þetta er þó ekki raunsæ hermum á raunverulegum ferlum. Búast má við því að áhrif framhjärennslis vegna ofmats á hækkun í lónum verði minni í öðrum lónum þar sem allt vatn fer í sama farveg neðan lónanna (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024).

### 7.2.2 Athugasemdir varðandi rúmmál vatns í lónum

Í rýni sinni bendir Verkís á mögulegt ofmat á rúmmáli vatns í lónum því að í B-reikningunum er miðað við rúmmál upp að flóðvarshæð (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024). Ef aðeins væri miðað við heildarrúmmál frá botni stíflu og upp í flóðvarshæð væri þetta líkt og að gera ráð fyrir að lónið væri þegar við flóðaaðstæður með fullt flæði á yfirfalli þegar að jökulhlaup skylli á lóninu. Slíkt verður að teljast mjög ólíklegt. Raunin er þó sú að þó að miðað sé við rúmmál upp að flóðvarshæð, er í B-reikningunum gert ráð fyrir að úr hverju lóni losni meðaltal heildarrúmmáls lónsins og rúmmáls á bak við flóðvar, sjá Töflu 3.8, Jöfnu 3.8 og Mynd 3.28. Þetta var gert til að taka tillit til þeirrar óvissu sem hlýst af því að ekki er víst hve stór hluti hvernar stíflu rofni. Því er miðað við meðaltalið milli þess að aðeins flóðvar stíflunnar rofni og þess að stíflan rofni með öllu. Lónrúmmálið sem miðað er við er því í öllum tilfellum umtalsvert minna en heildarrúmmál lónsins, hvort sem miðað er við flóðvarshæð eða yfirfallshæð. Sauðafellslón er hér undantekning, því þar reynist munurinn lítill (Jón Elvar Wallevik o.fl., 2023).

Sú aðferð að miða við flóðvarshæð fremur en yfirfallshæð í reikningum Veðurstofunnar lýsir frekar því að stíflur rofni með öllu heldur en að aðeins flóðvör þeirra rofni. Þetta gæti þýtt um 10–20% viðbótar-vatnsmagn í hermum B-reikninganna á sviðsmyndunum Ham01 og Kkv02 (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024), að því gefnu að allar stíflur myndu ekki rofna að öllu leyti í viðkomandi sviðsmynd. Þessi nálgun hefur aftur á móti einn ótvíræðan kost. Í B-reikningunum standa í raun öll stíflumannvirki órofin í landlíkaninu og halda eftir vatni á

milli yfirfallshæðar og flóðvars/stífluhæðar. Þetta vatn skilar sér svo í gegnum yfirföllin eftir því sem líður á reikningana. Væri ekki miðað við flóðvarshæð, heldur yfirfallshæð, myndu reikningarnir því vanmeta rúmmál megin hlauptoppsins sem þessum mun nemur. Þessi uppsetning reikninganna skilar því betra mati á rúmmáli meginhlauptoppsins sem skapar mestu hættuna en getur mögulega skilað ofmati á rúmmáli vatns dagana eftir meginhlaupið. Í B-reikningunum halda stíflumannvirki samanlagt um 180 GI eftir þegar megin hlauptoppurinn er gengin hjá (að tveimur sólarhringum liðnum frá upphafi hlaups), sjá Mynd 10.4 og Töflu 10.3 í Jón Elvar Wallevik o.fl. (2023).

### 7.2.3 Athugasemdir varðandi vatnshæð lóna í landlíkani

Verkís bendir á að vatnshæð Hágöngulóns sé 816,9 m y.s. í landhæðarlíkaninu sem notast er við í B-reikningunum en hæð yfirfallsins s.k.v. teikningum sé aðeins 816,0 m y.s. (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024). Þetta getur valdið bæði því að rennsli um yfirfall lónsins sé skert og að hlaup nái frekar hæð flóðvarsins í GeoClaw reikningunum. Það flækir aðeins þennan samanburð að milli byggingartíma mannvirkjana 1997 og myndatökunnar sem landlíkanið byggir á líða 12–17 ár. Á þeim tíma hafa jöklar hörfað umtalsvert, sem leiðir til fargléttingar og landriss, sem er einna mest nærri Vatnajökli. Samkvæmt samfelldum GPS mælingum á Skrokköldu (tæpa 10 km frá Hágöngulóni og lengra frá jöklinum) hefur land risið þar um ~0,5 m á þessu tímabili. Þar sem Hágöngulón er nær jöklinum má áætla að landris undir því sé engu minna. Nokkur óvissa er því um nákvæma hæð yfirfallsins um þessar mundir. Verkís miðar við vatnshæð í Hágöngulóni sem 816,0 m y.s. í sínum reikningum en í þeim nær flóðhæðin í sviðsmyndinni Bb02 ekki rofmrökum fyrir flóðvar og stíflu. Í B-reikningum Veðurstofunnar verður aftur á móti stíflurof fyrir sömu sviðsmynd.

Sé vatnshæð lónsins 0,4–0,9 m yfir yfirfallshæðinni jafngildir það um 50–150 m<sup>3</sup>/s rennsli um yfirfallið (sjá samband rennslis og lónhæðar fyrir yfirfall Hágöngulóns í Gísli S. Pétursson o.fl., 2023). Skert burðargeta yfirfallsins gæti því verið um 10–40% af rennsli sviðsmyndarinnar Bb02 um Hágöngulón, sem er um 350–500 m<sup>3</sup>/s í hámarki. Skerta burðargetan er aftur á móti innan við 1% fyrir aðrar stærri sviðsmyndir.

Í B-reikningunum er gert ráð fyrir að flóðvars- og stíflurof verði, nái vatnshæð 0,1 m yfir flóðvarshæðina. Há vatnsstaða í lóninu í reikningunum getur því valdið að þeirri hæð sé náð þó að sambærilegir reikningar með vatnsstöðu í yfirfallshæð myndu ekki leiða til þess og þar með ekki herma flóðvarsrof. Að viðbættu skertu rennsli um yfirfall leggur þetta til stíflurofs fyrir sviðsmyndina Bb02 í GeoClaw reikningum Veðurstofunnar meðan slíkt kemur ekki fram í HEC-RAS reikningum Verkís. Í reikningum Veðurstofunnar nær vatnshæð í lóninu hæst 0,7 m upp fyrir flóðvarið í þeirri sviðsmynd. Það getur því munað umtalsvert um allt að 0,9 m hliðrun og ekki víst að vatnshæðin myndi ná 0,1 m yfir flóðvarið án hennar. Fyrir aðrar sviðsmyndir er vatnshæðin á bilinu 2,5 til 8,4 m yfir yfirfallinu og 0,9 m hliðrun myndi því ekki breyta því að 0,1 vatnshæð yfir flóðvarinu myndi nást í öllum tilfellum. Til samanburðar verður flóðvarsrof og stíflurof í bæði Ham01 og Kkv02 sviðsmyndunum í HEC-RAS reikningum Verkís (Gísli S. Pétursson o.fl., 2023).

Hér er því miðað við að ekki verði stíflurof í Hágöngulóni í sviðsmyndinni Bb02, þó að það hafi komið fram í B-reikningunum, því það er mjög ólíklegt að teknu tilliti til skerts flæðis

um yfirfallið og óþarflega hárrar vatnsstöðu í lóninu. Það er þó ekki hægt að útiloka að stíflurof verði við verstu aðstæður þegar mjög hátt er í lóninu og mikið rennsli þá þegar um yfirfallið áður en hlaup skellur á. Útbreiðsla slíks flóðs er vel innan útbreiðslu stærri sviðsmynda í B-reikningunum. Fyrir aðrar sviðsmyndir er skert flæði um yfirfall svo hlutfallslega lítið (minna en 1%) og vatnshæð í hlaupunum ávallt það langt ofan við rofmörk flóðvarsins að þessi óþarflega háa vatnsstaða í lóninu hefur engin áhrif á hvort stíflurof verði eða ekki.

#### **7.2.4 Samantekt á rýni Verkís á aðferðafræði, nálgunum og forsendum B-reikninganna**

Það er ljóst af þessum samanburði að talsverð áhrif geta komið fram af því hvernig tekið er tillit til miðlunarlóna í líkanreikningunum. Reikningar Verkís taka mun betur tillit til þess sem búast má við að gerist í raun við lónið og einfaldari nálgun Veðurstofunnar leiðir heldur til ofmats á áhrifum lónanna heldur en vanmats. Niðurstaða B-reikninganna er þó í aðalatriðum í samræmi við niðurstöður HEC-RAS reikninga Verkís og þó að munur í vissum breytum sé tugir prósentu er ekki um stærðarþrepsmun að ræða. Ekki er ástæða til að búast við betra samræmi miðað við hversu ólík nálgunin í meðhöndlun lónsins er. Það er kostur að B-reikningar Veðurstofunnar ofmeti frekar hættuna heldur en vanmeti og niðurstöður Verkís eru innan umlykjunnar sem A- og B-reikningar Veðurstofunnar mynda. Óvissan af völdum aðferðafræðinnar og nálgana er því talsverð en ætti ekki að leiða til vanmats.

### **7.3 Áhrif írennslis**

Írennsli ofan í gropin nútímahraun á útbreiðslusvæði hlaupanna er þáttur sem getur haft umtalsverð áhrif á niðurstöður hættumatsins. Töluverð óvissa er um áhrif þessa ferlis á Þjórsár-Tungnaárvæðinu. Að vetri eru hraunin hulin lítt gegndræpu hjarni og áhrifin eru þá hverfandi, en á öðrum árstíðum geta þau verið gríðarleg. Grunnvatnsstaða á útbreiðslusvæði hlaupanna getur einnig haft áhrif á hversu miklu írennsli hraunin geta tekið á móti. Ákveðið var að horfa ekki til þessa ferlis í reikningunum, líkt og að hlaup yrði á versta tíma vetrar, enda er almennt stillt upp verri sviðsmynd í hættumati.

#### **7.3.1 Möguleg mestu áhrif írennslis**

Einfalt mat var framkvæmt á mögulegum áhrifum írennslis á óvissu í lokaniðurstöðum, þótt ekki sé horft til ferlisins í reikningunum. Búast má við því að írennsli hafi áhrif á öllum hlaupleiðum en þau verði samt mögulega sýnu mest á sviðsmyndina sem kemur fram undan Sylgjujökli. Á þeirri leið eru gróf nútímahraun líkt og Veiðivatnahraunið, Tröllahraun og Heljargjá, sjá nánar kafla 2. Augljóst dæmi um mikil áhrif írennslis á svæðinu er að áin Sylgja, sem er umtalsverð jökulá, hverfur ofan í Tröllahraun nærri Heljargjá.

Horfa þarf til tveggja þátta í þessu mati. Fyrst þarf að huga að magni írennslisins sjálfs ofan í hraunin, þ.e. hversu hratt getur vatn hripað ofan í hraunin. Síðan þarf einnig að huga að því hversu miklu rúmmáli af hlaupvatni hraunin geta tekið á móti án þess að öll holrými séu orðin full af vatni.

Mesta útbreiðsla sviðsmyndarinnar hylur tæplega 100 km<sup>2</sup> af nútímahraunum. Sé horft til hás mats á lekt hraunanna er hún yfir 0,1 m/s og jafnvel allt að 1 m/s (Davíð Egilson o.fl., 2019; Árni Hjartarson, persónuleg samskipti 2023). Vatnsdýpi á stærstum hluta útbreiðslusvæðis hlaupsins er yfir 1 m og því verður írennslisraðinn yfir 0,1 m/s eða jafnvel allt að 1 m/s. Jafnvel lægra matið nægir til að gleypa allt að 100.000 m<sup>3</sup>/s ofan í hraunin en hámarksrennsli hlaupsins er ekki nema 19.450 m<sup>3</sup>/s. Hér er ekki horft til þess að írennsli myndi minnka útbreiðslu hlaupsins og því um ofmat að ræða en ætlunin er ekki að fara í nákvæmt mat, heldur aðeins fá tilfinningu fyrir stærðarþepum.

Næsta spurning er hvort að nægt rúmmál sé í holrýmum í hraunum ofan grunnvatnsborðs til að rúma allt hlaupvatnið. Ekki er mikið um borholur með reglulegum mælingum á hæð grunnvatnsborðs á svæðinu en þó er ein norðan Gjáfjalla, JV-3 (Davíð Egilson, 2016). Borholan stendur í um 648 m y.s. og vatnsborð mældist 605–617 m y.s. á árunum 1982 til 2015 (Davíð Egilson, 2016). Því má ætla að tugir metra geti verið niður á grunnvatnsborð á svæðinu miðað við að á þessum eina stað eru 21–43 m frá yfirborði niður á vatnsborð. Sé virkur poruhluti hraunanna 0,1 til 0,2 (sjá kafla 2) má koma 200 til 400 Gl af vatni fyrir í hrauninum undir útbreiðslusvæði hlaupsins á nútímahraunum. Hér er aftur um ofmat að ræða, líkt og að ofan, því útbreiðslusvæði hlaupsins yrði mun minna sé írennsli mikið. Það má þó vera ljóst að hraunin gætu rúmað a.m.k. stóran hluta ef ekki næstum allt hlaupvatnið sem er um 450 Gl.

Þessir reikningar eru ekki nákvæmt mat á óvissu vegna mögulegra áhrifa írennslis. Það er þó ljóst að áhrif írennslis geta verið allt frá því að vera lítil sem engin, líkt og miðað er við í niðurstöðum þessa verkefnis, yfir í að heilu stórhlaupin hverfi ofan í lek og gropin nútímahraun á hálendinu vestan við Vatnajökul. Slíkt myndi skila auknu grunnvatnsrennsli í Veiðivötnum og öðrum lindasvæðum þar í kring en væri mun hættuminni og dempaðri atburðarás en stórhlaup niður eftir árfarvegum.

## 7.4 Samantekt

Ýmsar nálganir og einfaldanir eru gerðar í þessu verkefni og þeim fylgir talsverð óvissa. Þessar nálganir eru nauðsynlegar til að verkefnið verði yfir höfuð fýsilegt og framkvæmanlegt innan eðlilegs fjárhagsramma. Þrátt fyrir óvissuna eru niðurstöðurnar þó vel nýtilegar fyrir hættumat og helsta óvissan felst ávallt í vali á gossviðsmyndum. Raunveruleg atburðarás mun aldrei fylgja neinni þeirra algerlega. Líkt og segir í rýni Verkís um reikningana „Heildarniðurstaða rýninnar er að forsendur B-reikninganna teljist ásættanlegar fyrir vinnu við hættumat og vinnu við grunnviðbragðsáætlanir viðeigandi aðila.“ en „Ef þörf er á síðar að skoða sérstaklega áhrif flóðanna í næsta nágrenni við stíflur þarf að skoða sérstaklega flóðaútbreiðslu í nágrenni þeirra.“ (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024). Verkið skilar því tilgangi sínum þrátt fyrir umtalsverða óvissu. Sé hins vegar ætlunin að skoða smærri atriði í framgangi hlaupanna eða á ákveðnum svæðum er nauðsynlegt að vinna frekari reikninga. Þetta á sérstaklega við smærri hlaupsviðsmyndir á i) svæðum nærri virkjanamannvirkjum og ii) samspil þeirra við uppistöðulón og mögulega stýringu þeirra í aðdraganda hlaupa, svo sem með stýringum á yfirföllum, botnlökum og öðrum lokumannvirkjum (Gísli S. Pétursson o.fl., 2024).

## Heimildir

*Annálar 1400-1800, I-V.* Hið Íslenska Bókmenntafélag, Reykjavík, 1922-1988.

Árni Hjartarson (1978) *Íslenskt vatnafarskort og vatnajarðfræði*. 4. árs verkefni, Háskóli Íslands, 78 bls.

Árni Hjartarson, Ingibjörg Kaldal, Kristján Sæmundsson, Magnús Á. Sigurgeirsson og Skúli Víkingsson (2019) *Jarðfræðikort af Mið-Íslandi*. 1:100 000. Íslenskar Orkurannsóknir, Landsvirkjun og umhverfis- og auðlindaráðuneytið, Reykjavík.

Berger, M.J., D.L. George, R.J. LeVeque, K.T. Mandli (2011) The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement, *Advances in Water Resources*, **34**(9) 2011, 1195-1206.

Bergrún A. Óladóttir, Guðrún Larsen og Olgeir Sigmarsson (2011) Holocene volcanic activity at Grímsvötn, Bárðarbunga and Kverkfjöll subglacial centres beneath Vatnajökull, Iceland. *Bulletin of Volcanology* **73**, 1187-1208.

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

Birgir Jónsson (1983) *Lektunaryfirlit*. Kver með fróðleiksmolum um vatnajarðfræði, dæluþrófanir og lektun. Reykjavík: Orkustofnun OS-VOD83022/VOD-12 B.

Björn Oddsson, Gudmundsson, M.T., Larsen, G., Karlsdóttir, S. (2012) Monitoring the plume from the basaltic phreatomagmatic 2004 Grímsvötn eruption – application of weather radar and comparison with plume models. *Bull. Volc.* **74**, 1395-1407.

Björn Oddsson, Gudmundsson, M.T., Edwards, B.R., Thordarson, T., Magnússon, E., Sigurdsson, G. (2016) Subglacial lava propagation, ice melting and heat transfer during emplacement of an intermediate lava flow in the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Bulletin of Volcanology*. **78**: 48, doi:10.1007/s00445-016-1041-4.

Bogi Brynjar Björnsson og Esther Hlíðar Jensen (2021) *Vatnagrunnur Veðurstofu Íslands*. Veðurstofa Íslands, greinargerð, BBB/ofl/2021-01.

Bolli Pálmason, S. Thorsteinsson, N. Nawri, G.N. Petersen, H. Björnsson (2016) HARMONIE activities at IMO in 2015, *ALADIN-HIRLAM Newsletter*, No **6**, February, 2016.

Chow, V.T. (1959) *Open – channel hydraulics*, McGill Hill.

Davíð Egilson (2016) *Greining á grunnvatnsmælingum á Þjórsár- og Tungnaársvæði 2015*. Landsvirkjun, skýrsla, LV-2016-038

Davíð Egilson, Jón Guðmundsson, Tinna Þórarinsdóttir og Gerður Stefánsdóttir (2019) *Magnstaða grunnvatns – Tillaga um aðferðagræðilega nálgun*. Veðurstofa Íslands, skýrsla, 2019-012.

Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) (2006a). *Flood Risks to People. Phase 2* (Skýrsla FD2321/TR2).

Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) (2006b). *R&D OUTPUTS: Flood Risks to People. Phase 2* (Skýrsla FD2321/TR1).

- Eibl, E.P.S., Bean, C.J., Einarsson, B., Pálsson, F. and Vogfjörð, K.S. (2020) Seismic ground vibrations give advanced early-warning of subglacial floods. *Nat Commun* **11**, 2504. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15744-5>
- Elsa G. Vilmundardóttir (1977) *Tungnaárhraun*. Orkustofnun, OS ROD 7702. 156 bls.
- Elsa G. Vilmundardóttir, Svanur Pálsson og Ásgrímur Guðmundsson (1979) *Búðarhálsvirkjun. Borhola ST-15: Setgreining*. OS79025/ROD08, Orkustofnun, Reykjavík.
- Elsa G. Vilmundardóttir, Snorri P. Snorrason, Guðrún Larsen og Bessi Aðalsteinsson (1999a) *Berggrunnskort Tungnaárjökull 1913 I-B, 1: 50 000*. Landmælingar Íslands, Orkustofnun og Landsvirkjun, Reykjavík. Unnið í Landfræðilegu upplýsingakerfi (ArclInfo).
- Elsa G. Vilmundardóttir, Ágúst Guðmundsson, Snorri P. Snorrason og Guðrún Larsen, (1999b) *Berggrunnskort Nyrðri Háganga 1914 II-B, 1:50.000*. Landmælingar Íslands, Orkustofnun og Landsvirkjun, Reykjavík. Unnið í Landfræðilegu upplýsingakerfi (ArclInfo).
- Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson og Davíð Egilson (2018) *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá - Útbreiðsla og flóðhæð Skaftárhlaupsins haustið 2015*. Veðurstofa Íslands, skýrsla VÍ 2018-004.
- Emmanuel Pagneux, Matthías Á. Jónsson, Bogi B. Björnsson, Sif Pétursdóttir, Njáll F. Reynisson, Hilmar B. Hróðmarsson, Bergur Einarsson og Matthew J. Roberts (2019) *Hættumat vegna vatnsflóða í Ölfusá*. Veðurstofa Íslands, skýrsla, VÍ 2019-013.
- Esther R. Gudmundsdóttir, Guðrún Larsen og Jón Eiríksson, J. (2012) Tephra stratigraphy on the North Icelandic shelf: extending tephrochronology into marine sediments off North Iceland. *Boreas* **41**, 718–734. 10.1111/j.1502-3885.2012.00258.x. ISSN 0300-9483.
- Esther R. Gudmundsdóttir, Guðrún Larsen, Svante Björck, Ólafur Ingólfsson og Johan Striberger (2016) A new high-resolution Holocene tephra stratigraphy in eastern Iceland: Improving the Icelandic and North Atlantic tephrochronology. *Quaternary Science Reviews* **150**, 234–249
- Eyjólfur Magnússon, E., Guðmundsson, M.T., Sigurdsson, G., Roberts, M.J., Höskuldsson, F., Oddsson, B. (2012) Ice-volcano interactions during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, as revealed by airborne radar. *J. Geophys. Res.* **117**, B07405, doi:10.1029/2012JB009250.
- Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir (2016) *Jökulhlaup í Sveðju í júlí 2011: Íssjármælingar við Hamarsketil vorin 2013, 2014 og 2015 og yfirborðshæðarbreytingar í katlinum og nágrenni hans 1998-2015*. Landsvirkjun LV-2026-030.
- Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Eyjólfur Magnússon, Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Sveinbjörn Steinþórsson, Karl Eiríksson og Andri Björnsson (2022) Vatnajökull. Mass balance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2021–22. Reykjavík, Landsvirkjun, Institute of Earth Sciences University of Iceland, Rep. LV-2022-054. [gogn.lv.is/files/2022/2022-054.pdf](http://gogn.lv.is/files/2022/2022-054.pdf)
- Freysteinn Sigmundsson, og 36 aðrir. (2015) Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Bárðarbunga volcanic system, Iceland. *Nature*, **517**, 191–195.

- Freysteinn Sigurðsson og Jón Ingimarsson (1987) *Lekt íslenskra jarðefna. Vatnið og landið, vatnafræðiráðstefna, október 1987* (bls. 121–126). Reykjavík: Orkustofnun.
- Freysteinn Sigurðsson og Guttormur Sigbjarnarson (1985) *Groundwater in Iceland – Paper presented at the Nordic Hydrological Conference, Nyborg, 6.-8. August 1984*. Reykjavík, Orkustofnun, Vatnsorkudeild, skýrsla OS-85038/VOD-02.
- George, D.L. (2008) Augmented Riemann solvers for the shallow water equations over variable topography with steady states and inundation, *Journal of Computational Physics*, **227**(6) 2008, 3089–3113
- George, D.L. (2010) Adaptive finite volume methods with well-balanced Riemann solvers for modeling floods in rugged terrain: application to the Malpasset dam-break flood (France, 1959). *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **66**(8): 1000–1018.
- Gísli S. Pétursson, Hörn Hrafnadóttir og Emilía Sól Guðgeirsdóttir (2023) *Jökulhlaup í eldstöðvakerfi Bárðarbungu: Líkangerð vegna stíflubrots við Hágöngulón, útgáfa A*. Verkfræðistofan Verkís, Minnisblað nr: ID 338944.
- Gísli S. Pétursson, Hörn Hrafnadóttir og Emilía Sól Guðgeirsdóttir (2024) *Jökulhlaup í eldstöðvakerfi Bárðarbungu: Rýni á B-reikningum Veðurstofu Íslands, útgáfa B*. Verkfræðistofan Verkís, Minnisblað nr: ID 337068.
- Guðrún Larsen (1982) Gjóskutímatal Jökuldals og nágrennis. Í: Helga Þórarinsdóttir o.fl.(ritstj.): *Eldur er í Norðri*. Sögufélag Reykjavík, 51–65.
- Guðrún Larsen (1984) Recent volcanic history of the Veidivötn fissure swarm, Southern Iceland. An approach to volcanic risk assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **22**, 33-58.
- Guðrún Larsen (2018) *Kötluhlaup eftir 1600: Umfang, hlaupleiðir, tjón og umhverfisbreytingar, ásamt viðaukum*. Reykjavík, Jarðvísindastofnun Háskólans, rannsóknaskýrsla RH-13\_2018. 66 bls.
- Guðrún Larsen, Magnús T. Guðmundsson og Helgi Björnsson (1996) Tephrostratigraphy of Ablation Areas of Vatnajökull Ice Cap, Iceland. In: S.C. Colbeck (Ed.) *Glaciers, Ice Sheets and Volcanoes: A tribute to Mark Meier*. CRREL special Report 96-27: 75-80
- Guðrún Larsen, Magnús T. Guðmundsson og Helgi Björnsson (1998) Eight centuries of periodic volcanism at the center of the Icelandic hotspot revealed by glacier tephrostratigraphy. *Geology* **26**, 943–946.
- Guðrún Larsen, Magnús T. Guðmundsson, Páll Einarsson og Þorvaldur Þórðarson (2013) Bárðarbunga. Í: Júlíus Sólmes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.): *Náttúruvá á Íslandi - Eldgos og jarðskjálftar*, 253–261. Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan, Reykjavík.
- Guðrún Larsen, Jón Eiríksson og Esther R. Guðmundsdóttir (2014) Last Millennium Dispersal of Airfall Tephra and Ocean-rafted Pumice towards the North Icelandic Shelf and the Nordic Seas. In: Austin WEN, Abbott PM, Davies SM, Pearce NJG, and Wastegård S, (eds.): *Marine Tephrochronology*, Geological Society London, Special Publications 398, 113-140. <http://dx.doi.org/10.1144/sp394.4>

- Guðrún Larsen og Magnús T. Guðmundsson (2019) Bárðarbunga. Í: Bergrún A. Óladóttir, Guðrún Larsen og Magnús T. Guðmundsson. *Íslensk eldfjallavefsja*. VÍ, HÍ og Avd-RLS. Sótt af <http://icelandicvolcanoes.is/?volcano=KAT>
- Guðrún Larsen, Bergrún A. Óladóttir og Magnús T. Guðmundsson (2025) *Gjóskustabbar og gjallbingir norðvestan í Bárðarbungu og gjóskulög frá jökulpakta hluta eldstöðvakerfisins*. Skýrsla RH-03-2025, 43 bls. Raunvísindstofnun Háskólans.
- Haflíði Haflíðason, Guðrún Larsen og Gunnar Ólafsson (1992) The recent sedimentation history of Thingvallavatn, Iceland. *Oikos* **64**:. 80–95.
- Hannah I. Reynolds, Gudmundsson, M.T., Högnadóttir, Th., Magnússon, E., Pálsson, F. (2017) Subglacial volcanic activity above a lateral dyke path during the 2014-15 Bárðarbunga-Holuhraun rifting episode, Iceland. *Bulletin of Volcanology*, **79**, 38. DOI 10.1007/s00445-017-1122-z
- Haukur Jóhannesson (2014) *Jarðfræðikort af Íslandi 1:600.000. Berggrunnskort*. Náttúrufræðistofnun Íslands, Reykjavík.
- Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson (1998) *Jarðfræðikort af Íslandi. 1:500 000. Höggun*. Náttúrufræðistofnun Íslands, Reykjavík.
- Haukur Tómasson (1973) Hamfarahlaup í Jökulsá á Fjöllum. *Náttúrufræðingurinn* **43**, 12–34.
- Haukur Tómasson (1996) The jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology*, **22**, 249–254.
- Helgi Björnsson (1988) *Hydrology of ice caps in volcanic regions*. Vísindafélag Íslendinga, **45**, Reykjavík, 139 bls.
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson (1992) *Vatnajökull, norðvesturhluti. Ísþykkt*. Landsvirkjun og Raunvísindastofnun Háskólans, Reykjavík.
- Helgi Björnsson (2009) *Jöklar á Íslandi*. Bókaútgáfan Opna, Reykjavík, 479 bls.
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús T. Guðmundsson (1992) *Vatnajökull, norðvesturhluti. Ísþykkt*. Landsvirkjun og Raunvísindastofnun Háskólans, Reykjavík.
- HSE (2001) *Reducing Risks, Protecting People - HSE's Decision Making Process*, HSE Books, 74 bls. Sótt á: <https://www.hse.gov.uk/risk/theory/r2p2.pdf>
- Hugrún Gunnarsdóttir (2016) *Virkjanir og veitur á Þjórsár- og Tungnaárvæði. Framkvæmdasaga 1965 til 2015*. Landsvirkjun, skýrsla LV-2016-003.
- Ingibjörg Kaldal, Árni Hjartarson, Kristján Sæmundsson, Magnús Á. Sigurgeirsson og Skúli Víkingsson (2018) *Jarðfræðikort af Austurgosbelti - Tungnaáröræfi. 1:100 000*. Íslenskar Orkurannsóknir, Landsvirkjun og umhverfis-og auðlindaráðuneytið, Reykjavík.
- Irma Gná Jóngeirsdóttir (2022) *The tephra layer formed in the 1996 eruption of Gjalp. Dispersal and volume*. MS-ritgerð, Háskóli Íslands, 101 bls.
- Jenks, G.F. (1967) The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography*, **7**(1), 186–190.

- Jónas Elíasson, Snorri Páll Kjaran, Sigurður Lárus Hólm, Magnús Tumi Guðmundsson og Guðrún Larsen (2007) Large hazardous floods as translatory waves. *Environmental Modelling & Software*, **22**, 1392–1399.
- Jón Elvar Wallevik, Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson og Matthew J. Roberts (2022) *Forsendur B-reikninga fyrir verkefnið áhættumat vegna jökulhlaupa til suðurs og vesturs vegna eldgosa í eldstöðvakerfi Bárðarbungu*. Minnisblað Veðurstofu Íslands, dagsett 2022-11-16.
- Jón Elvar Wallevik, Esther Hlíðar Jensen, Bergur Einarsson, Tinna Þórarinsdóttir og Matthew J. Roberts (2023) *Helstu þættir varðandi hermanir fyrir áhættumatsverkefnið jökulhlaupa til suðurs og vesturs vegna eldgosa í eldstöðvakerfi Bárðarbungu*. Minnisblað Veðurstofu Íslands, dagsett 2023-12-19.
- Jón Elvar Wallevik, Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson, Bogi Brynjar Björnsson og Matthew J. Roberts (2024a) *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum: Tæknilegar niðurstöður hættumats*. Skýrsla VÍ 2024-007. Reykjavík, Veðurstofa Íslands.
- Jón Elvar Wallevik, Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson, Bogi Brynjar Björnsson og Matthew J. Roberts (2024b) *Hermun jökulhlaupa í Skjálfandafliót: Tæknilegar niðurstöður hættumats*. Skýrsla VÍ 2024-008. Reykjavík, Veðurstofa Íslands.
- Kristín Martha Hákonardóttir (2019) *Jökulhlaup og gjóskubrotsflóð. Náttúruvá á Þjórsár-Tungnaárvæði*. LV-2018-097, Landsvirkjun, Reykjavík.
- Landmælingar Íslands (LMÍ) (2020). *ÍslandsDEM útgáfa 0*. Lýsigagnagátt, <https://gatt.lmi.is/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/e6712430-a63c-4ae5-9158-c89d16da6361>
- Landsvirkjun (2025) *Um Vaðölduver*. Sótt 15.11.2025 á: <https://www.landsvirkjun.is/vadolduver/um-vadolduver>
- Laufey B. Hannesdóttir (2011) *Minnisblað: Flóð í Hágöngulón 13. júlí 2011: Samantekt um vatnmagn í flóði inn í Hágöngulón 13. júlí 2011*. Landsvirkjun.
- Magnús Á. Sigurgeirsson, Orri Vésteinsson og Hafliði Hafliðason (2002) Gjóskulagarrannsóknir við Mývatn - aldurgreining elstu byggðar. *Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands 2002, Ágrip*, 36–37.
- Magnús Á. Sigurgeirsson, Ulf Hauptfleisch, Anthony Newton og Árni Einarsson (2013) Dating of the Viking Age Landnám Tephra Sequence in Lake Mývatn. *Journal of the North Atlantic* **21**, 1–11.
- Magnús Á. Sigurgeirsson, Árni Hjartarson, Ingibjörg Kaldal, Kristján Sæmundsson, Sigurður G. Kristinsson og Skúli Víkingsson (2015) *Jarðfræðikort af Norðurgosbelti. Syðri hluti – Ódáðahraun, 1:100 000*. Íslenskar Orkurannsóknir, Reykjavík.
- Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir, Finnur Pálsson og Helgi Björnsson (2000) *Grímsvötn: Eldgosið 1998 og breytingar á botni, rúmmáli og jarðhita 1996-1999*. Raunvísindastofnun Háskólans RH-03-2000. 32 bls.
- Magnús T. Guðmundsson, Freysteinn Sigmundsson, Helgi Björnsson og Þórdís Högnadóttir (2004) The 1996 eruption at Gjalp, Vatnajökull ice cap, Iceland: Efficiency of heat transfer, ice deformation and subglacial water pressure. *Bulletin of Volcanology*. **66**, 46–65.

- Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir (2005) Ísbráðnun og upptakarennslí jökulhlaupa vegna eldgosa í Eyjafjallajökli og vestanverðum Mýrdalsjökli. Í: Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.): *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*. Ríkislögreglustjórn og Háskólaútgáfan. 159–180.
- Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir (2006) *Ísbráðnun og upptakarennslí jökulhlaupa vegna eldgosa í Kötluöskju og austanverðum Mýrdalsjökli*. Jarðvísindastofnun Háskólans, RH-02-2006. 33 bls.
- Magnús T. Guðmundsson, Thordarson, T., Höskuldsson, Á., Larsen G., Björnsson, H., Prata, A.J., Oddsson, B., Magnússon, E., Högnadóttir, T., Pedersen, G.N., Hayward, C.L., Stevenson, J.A., Jónsdóttir, I. (2012) Ash generation and distribution from the April–May 2010 eruption of Eyjafjallajökull, Iceland. *Scientific Reports*. **2**, 572; DOI:10.1038/srep00572
- Magnús T. Guðmundsson, Guðrún Larsen og Þorvaldur Þórðarson (2013) Grímsvötn. Í: Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.): *Náttúruvá á Íslandi - Eldgos og jarðskjálftar*. Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan, 235–251.
- Magnús T. Guðmundsson og Guðrún Larsen (2013) GRÍMSVÖTN. Í: Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.): *Náttúruvá á Íslandi - Eldgos og jarðskjálftar*. Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan, 235–261.
- Magnús T. Guðmundsson og Guðrún Larsen (2013) JÖKULHLAUP. Í: Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.): *Náttúruvá á Íslandi - Eldgos og jarðskjálftar*. Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan, 156–170.
- Magnús T. Guðmundsson, Þorvaldur Þórðarson, Guðrún Larsen, Páll Einarsson, Ármann Höskuldsson og Páll Imsland (2013) UNDIR VATNAJÖKLI. Í: Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.): *Náttúruvá á Íslandi - Eldgos og jarðskjálftar*. Viðlagatrygging Íslands/Háskólaútgáfan, 263–277.
- Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og Matthew Roberts (2015) III. Örfajökull volcano: Eruption melting scenarios. Í: Pagnaux, E., Guðmundsson, M.T., Karlsdóttir, S., Roberts, M.J. (ritstj.). *Volcanogenic floods in Iceland. An assessment of hazards and risks at Örfajökull and the Markarfljót outwash plain* (bls. 45–72). Reykjavík: Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans, Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.
- Magnús T. Guðmundsson, og 47 aðrir (2016) Gradual caldera collapse at Bárðarbunga volcano, Iceland regulated by lateral magma outflow. *Science* **353**, aaf8988. DOI: 10.1126/science.aaf8988.
- Matthías Ásgeir Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilson, Tómas Jóhannesson og Matthew J. Roberts (2018) *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá - Kvörðun straumfræðilíkans*. Veðurstofa Íslands, skýrsla VÍ 2018-007.
- Mennta- og menningarmálaráðuneytið (2021) *Vegvísir um rannsóknarinnviði 2021*. Stjórnarráð Íslands. [https://www.stjornarradid.is/library/01--Frettatengt---myndir-og-skrar/MRN/vegvisir%20um%20rannsoknarinnvidi\\_juni%202021.pdf](https://www.stjornarradid.is/library/01--Frettatengt---myndir-og-skrar/MRN/vegvisir%20um%20rannsoknarinnvidi_juni%202021.pdf)
- Ólafur Jónsson (1945) *Ódáðahraun, 2. bindi*. Bókaútgáfan Norðri, Akureyri, 460 bls.

- Óli H. Þórðarson (á.á.) *Banaslys í umferðinni frá upphafi bílaaldar á Íslandi, 1915–2014*. Sótt 6. apríl 2020 á vef Samgöngustofu: [https://www.samgongustofa.is/media/umferd/Banaslys-i-umferdinni-1915-2014-Oli-Hloka-\(1\).pdf](https://www.samgongustofa.is/media/umferd/Banaslys-i-umferdinni-1915-2014-Oli-Hloka-(1).pdf)
- Porter C. og 28 önnur (2018) *ArcticDEM 2018*, sótt á <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, 413
- Raforkueftirlitið (2025) OS-2025-2: *Uppsett rafafli og raforkuframleiðsla í virkjunum á Íslandi 2024*.
- Reglugerð um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða nr. 505/2000*.
- Sigmundur Freysteinsson (1972) Jökulhlaup í Köldukvísl. *Jökull* **22**, 83–88.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason og Tómas Jóhannesson (2016) *Hættumat vegna berghlaupa í Öskju*. Veðurstofa Íslands, skýrsla 2016-007.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux og Bogi Brynjar Björnsson (2017) *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum með GeoClaw*. Veðurstofa Íslands, skýrsla VÍ 2017-004, ISSN 1670-8261.
- Sigurjón P. Ísaksson (1985) Stórhlaup í Jökulsá á Fjöllum á fyrri hluta 18. aldar. *Náttúrufræðingurinn*, **54** 165–191.
- Sigurður Þórarinsson (1950) Jökulhlaup og eldgos á jökulvatnasvæði Jökulsár á Fjöllum. *Náttúrufræðingurinn*, **20**, 113–133
- Sigurður Þórarinsson (1968) *Heklueldar*. Reykjavík, Sögufélagið, 185 bls.
- Sigurður Þórarinsson og Guðmundur E. Sigvaldason (1972) Tröllagígar og Tröllahraun. *Jökull*, **22**, 11–26.
- Sigurður Þórarinsson (1974) *Vötnin stríð. Saga Grímsvatnagosa og Skeiðarárhlaupa*. Bókaútgáfa Menningarsjóðs, Reykjavík, 258 bls.
- Sigurður Steinþórsson (1978) Tephra layers in a drill core from the Vatnajökull Ice Cap. *Jökull*, **27**, 2–27.
- Sigurjón Rist (1956) *Íslensk vötn, Icelandic fresh waters 1*. Reykjavík, Raforkumálastjóri, Vatnamælingar, 127 bls.
- Surendran, Gibbs, Wade og Udale-Clarke (2008) *Supplementary note on flood hazard ratings and thresholds for development planning and control purpose – Clarification of the Table 13.1 of FD2320/TR2 and Figure 3.2 of FD2321/TR1*. [http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=FD2321\\_7400\\_PR.pdf](http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=FD2321_7400_PR.pdf)
- Sveinn P. Jakobsson (1979) Petrology of recent basalts of the Eastern Volcanic Zone, Iceland. *Acta Naturalia Islandia*, **26**: 1–103.
- Sveinn P. Jakobsson og Magnús Tumi Guðmundsson (2012) Móbergsmýndunin og gos undir jöklum. *Náttúrufræðingurinn*, **82** (1-4), 113–125.
- Sæmundur A. Halldórsson, Niels Óskarsson, Karl Grönvold, Gylfi Sigurðsson, Guðrún Sverrisdóttir og Sigurður Steinþórsson (2008) Isotopic-heterogeneity of the Thjorsa lava – Implications for Mantle Sources and Crustal Processes within the Eastern Rift Zone, Iceland. *Chemical Geology* **255**: 305–316.

- Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson, Matthew J. Roberts og Einar Hjörleifsson (2020) *Áhættureikningar vatnsflóða og jökulhlaupa: Notkun aðferðafræði frá DEFRA við áhættumat á Íslandi*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, greinargerð TTh/ofl/2020-01.
- Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson og Matthew J. Roberts (2022) Tillögur að áhættuviðmiðum fyrir vatnsflóð. Veðurstofa Íslands, skýrsla VÍ 2022-005.
- Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson og Etienne Berthier (2013) Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Ann. Glaciol.* **54**(63), 63–74. <https://doi.org/10.3189/2013AoG63A422>
- Unnar Númi Almarsson, Pálmi Ragnar Pálmason og Helgi Jóhannesson (2020) *Fuse Plug Design in Iceland – Overview*, Verkís hf./Landsvirkjun, LV-2020-025.
- Vatnamælingar Orkustofnunar (2003) *Rennslisskýrsla vatnsárið 2001/2002, vhm 98 Tungnaá; ofan Halds*.
- Þorsteinn Þorsteinsson, Tómas Jóhannesson, Bergur Einarsson og Vilhjálmur S. Kjartansson (2017) Afkomumælingar á Hofsjökli 1988–2017. Reykjavík, Veðurstofa Íslands, skýrsla 2017-016. 84 bls. [https://www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2017/2017\\_016\\_hofsjokull30\\_rs.pdf](https://www.vedur.is/media/vedurstofan-utgafa-2017/2017_016_hofsjokull30_rs.pdf)
- Þorvaldur Thoroddsen (1924) *Fjórar ritgjörðir. Safn Fræðafélagsins um Ísland og Íslendinga*. Copenhagen.
- Þórður Arason (2013) *Manntjón í eldingum á Íslandi*. Sótt af: [http://hergilsey.is/arason/rit/2013/arason\\_2013\\_vff\\_e.pdf](http://hergilsey.is/arason/rit/2013/arason_2013_vff_e.pdf)
- Waitt R.B. (2002) Great Holocene floods along Jökulsá á Fjöllum, north Iceland. In: Martini PI, Baker WR, Garzon G (eds), *Flood and megaflood processes and deposits: recent and ancient examples*. Special publications of International Association of Sedimentologists **32**, 37–51.