Jökulhlaup í Öræfum og Markarfljóti vegna eldgosa undir jökli

Forgreining áhættumats

Jökulhlaup í Öræfum og Markarfljóti vegna eldgosa undir jökli

Forgreining áhættumats

Magnús Tumi Guðmundsson[1], Emmanuel Pagneux[2], Matthew J. Roberts[2], Ásdís Helgadóttir[2,3], Sigrún Karlsdóttir[2], Eyjólfur Magnússon[1], Þórdís Högnadóttir[1], Ágúst Gunnar Gylfason[4]

1) Nordvulk, Jarðvísindastofnun Háskólans; 2) Veðurstofa Íslands;
3) Iðnaðarverkfræði-, vélaverkfræði- og tölvunarfræðideild HÍ;
4) Ríkislögreglustjóri, almannavarnadeild

Öll réttindi áskilin
Skýrsluna má eigi afrita með neinum hætti eða dreifa, svo sem í rafrænu formi s.s. geisladiski, á netinu o.fl., eða með fjölföldun, svo sem ljósritun eða skráningu í hvers konar upplýsingakerfi, án skriflegs leyfis útgefanda.

© Jarðvísindastofnun Háskólans, Veðurstofa Íslands, Ríkislögreglustjóri, 2016

Jarðvísindastofnun Háskólans
Sturlugata 7, 101 Reykjavik
Vefur: www.jardvis.hi.is
Sími: 525 4800

Veðurstofa Íslands
Bústaðavegur 7–9, 108 Reykjavik
Vefur: www.vedur.is
Sími: 522 6000

Ríkislögreglustjóri
Skúlagata 21, 101 Reykjavik
Vefur: www.almannavarnir.is
Sími: 444 2500

Jökulhlaup í Öræfum og Markarfljóti vegna eldgosa undir jökli. Forgreining áhættumats
ISBN 978-9979-9975-8-0

Verkefnið var styrkt af Ofanflóðasjóði, Landsvirkjun og Vegagerðinni.
Höfundar þakka Oddi Sigurðssyni og Trausta Jónssyni fyrir yfirlestur og góðar ábendingar.

Prentun: Svansprent
Hönnun og umbrot: Veðurstofa Íslands
Forsíðumynd: Svínafellsjökull og Öræfajökull 5. nóvember 1996 © Oddur Sigurðsson

Efnisyfirlit

Ágrip 5
1 Inngangur 7
1.1 Um hættumat og áhættumat 8
1.2 Afmörkun verkefnis 11
1.3 Þættir verkefnisins 11
2 Öræfajökull, mat á hlaupum vegna eldgosa undir jökli 13
2.1 Jarð- og landfræði Öræfajökuls og hlaup á sögulegum tíma 13
2.1.1 Jarðfræðilegt yfirlit 13
2.1.2 Jöklar, ísa- og vatnasvið 17
2.1.3 Saga eldgosa, eldvirkni á nútíma og sögulegum tíma 17
2.1.4 Landmótun í Öræfum 18
2.1.5 Jökulhlaupin 1362 og 1727 19
2.2 Gerðir og stærðir eldgosa og jökulhlaupa 22
2.2.1 Jökulhlaup vegna eldgosa, bráðnun íss og myndun jökulhlaupa 22
2.2.2 Niðurstöður: Reiknaðar stærðir hlaupa 27
2.3 Hermun jökulhlaupa 29
2.3.1 Aðferðir, flóðahermunarlíkanið Samos 30
2.3.2 Útbreiðsla og dýpi jökulhlaupa 31
2.3.3 Straumhraði og ferðatími jökulhlaupa 38
3 Mat á tjónmætti jökulhlaupa og berskjöldun íbúa við Öræfajökul og Markarfljót 43
3.1 Aðferðir við mat á hættu og tjónmætti 44
3.2 Hætta vegna hlaupa frá Öræfajökli 46
3.3 Hætta vegna hamfarahlaupa frá Kötlu niður Markarfljót 46
3.4 Berskjöldun byggðar og ferðamanna við jökulhlaup úr Öræfajökli 48
3.5 Berskjöldun byggðar og ferðamanna við hamfarahlaup niður Markarfljót 53
4 Mat á rýmingartíma fyrir Öræfasveit 55
4.1 Ferðatími jökulhlaupa 55
4.2 Rýmingartími 55
5 Helstu niðurstöður 57
5.1 Öræfajökull 57
5.2 Markarfljót 58
6 Ábendingar 59
6.1 Áhættustjórnun vegna jökulhlaupa 59
6.1.1 Vöktun og viðvörunarkerfi 59
6.1.2 Landnotkun og skipulag 59
6.1.3 Upplýsingagjöf og uppbygging þekkingar meðal almennings 59
6.2 Frekari rannsóknir 59
7 Heimildir 61

Ágrip

Jökulhlaup vegna eldgosa og jarðhita eru algengasta gerð náttúruvár vegna eldvirkni hér á landi. Hér er fjallað um hlaup sem orðið geta vegna eldgosa í Öræfajökli og hvaða áhrif geta orðið af slíkum hlaupum. Jafnframt er tjónmætti vegna stórhlaupa niður Markarfljót metið.

Öræfajökull er eitt stærsta eldfjall landsins og jafnframt hæsta fjall Íslands. Þar gýs að meðaltali á 500–1000 ára fresti og gosefnaframleiðslan er lítil í samanburði við mikilvirkustu eldstöðvakerfi landsins. Þó hafa tvö gos orðið á sögulegum tíma, 1362 og 1727. Gosið 1362 er talið öflugasta sprengigos sem orðið hefur hér á landi á sögulegum tíma. Mat hefur verið lagt á stærðir og gerðir eldgosa sem orðið geta í Öræfajökli, stærðir jökulhlaupa vegna eldgosa auk þess sem útbreiðsla, framrásartími og vatnsdýpi á áhrifasvæði hlaupa hefur verið metið með hermunarlíkaninu SAMOS. Þá hefur verið lagt mat á líkleg áhrif á byggðir og mannvirki nærri fjallinu auk þess tíma sem það tæki að rýma byggðina á áhrifasvæðum jökulhlaupa.

Skipta má gerðum hlaupa vegna eldgosa í Öræfajökli í þrennt. Í fyrsta lagi eru hlaup vegna sprungugosa undir tiltölulega þunnum jökli í hlíðum fjallsins, í öðru lagi hlaup vegna gosa undir þykkum jökli í öskjunni og í þriðja lagi hlaup vegna bráðnunar á yfirborði jökulsins í heitum gjóskuflóðum. Metið er versta tilfelli sem einhverjar líkur eru á að geti átt sér stað. Niðurstöðurnar benda til þess að sprungugos í hlíðum geti valdið hlaupum af stærðargráðunni 3.000–6.000 m^3/s. Stórgos í öskjunni geta orsakað hamfarahlaup, stærri en 100.000 m^3/s. Stærðargráða hlaupa vegna gjóskuflóða í stórgosum er metin 10.000–20.000 m^3/s. Framrásartími hlaupa yrði í öllum tilvikum stuttur, eða að lágmarki 20–30 mínútur frá upphafi goss þar til hlaup næði að þjóðvegi 1.

Hætta vegna jökulhlaupa við eldgos í Öræfajökli er metin mikil eða geysimikil á um 340 km^2 svæði sem nær yfir svo til allt láglendi austan Skaftafells austur fyrir Kvíárjökul. Bæirnir í Svínafelli, Hofi og Hnappavöllum liggja þó rétt utan þess. Fjöldi þeirra sem gista yfir nótt á svæðinu austan Skaftafells að Kvískerjum fer vaxandi með auknum ferðamannastraumi og um há-ferðamannatímann er hann langt umfram fjölda þeirra sem búa á svæðinu að staðaldri. Full rýming Öræfasveitar milli Skaftafellsár og Fjallsár við bestu aðstæður tekur að lágmarki 35–40 mínútur. Þessi tími er lengri en stysti mögulegi framrásartími hlaupa sem undirstrikar nauðsyn þess að forboðar séu greindir rétt. Ef forða á heimafólki og ferðamönnum áður en hlaup næði niður á láglendi þarf að hefja rýmingu áður en gos hefst.

Áhrif vegna hugsanlegra hamfarahlaupa niður Markarfljót vegna Kötlugosa í vestanverðri Kötluöskjunni eru metin, en þar er byggt á eldri niðurstöðum hermunar á hlaupum á því svæði. Greiningin sýnir að ef stórhlaup kæmi niður Markarfljót vegna goss í Kötlu væri hætta mikil eða geysimikil á um 800 km^2 lands. Á þessu svæði býr mun stærri hópur fólks en í Öræfasveit og fjölsóttir ferðamannastaðir myndu einangrast í slíku hlaupi.

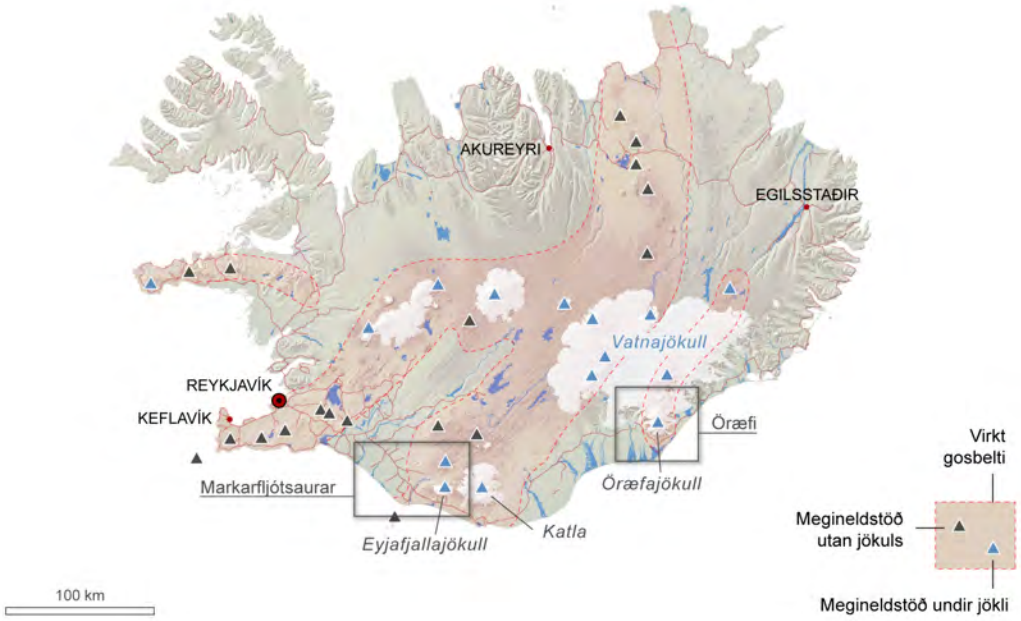
1 Inngangur

Í þessu riti er gerð grein fyrir niðurstöðum verkefnis um eðli, umfang og hættu af jökulhlaupum sem orðið geta vegna eldgosa í Öræfajökli (mynd 1). Jafnframt eru metin áhrif vegna hamfarahlaups sem farið getur fram Markarfljótsaura og Landeyjar ef stórt eldgos í Kötlu veitir vatni til vesturs niður Markarfljót. Þessi samantekt er mjög stytt útgáfa af ítarlegu riti sem út kom í lok árs 2015: *Volcanogenic floods in Iceland*[1] og gefið er út af Veðurstofu Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra. Er áhugasömum vísað á það rit ef fólk vill kynna sér fræðilegar forsendur og aðferðir verkefnisins. Hér er hins vegar gerð grein fyrir öllum niðurstöðum sem snúa að náttúruvánni og mati á hættu, útbreiðslu flóða sem talið er að eldgos geti orsakað, ferðatíma þeirra, áhættu fyrir fólk og hve berskjaldað fólk og byggðir eru gangvart vánni.

Jökulhlaup eru algengasta gerð náttúruvár hér á landi sem rekja má beint til eldvirkni[2]. Rúmlega helmingur allra eldgosa á Íslandi verður í jöklum og bæði undir Vatnajökli og Mýrdalsjökli eru háhitasvæði þar sem vatn safnast fyrir undir sigkötlum. Í Grímsvötnum hefur löngum verið stórt lón undir 200–300 metra þykkri ísheilu þó svo aðstæður valdi því að lónið hafi verið tiltölulega lítið frá því um síðustu aldamót. Mikið jökulhlaup þar sem hámarksrennsli náði 40–50 þúsund rúmmetrum á sekúndu varð í kjölfar Gjálpargossins norðan Grímsvatna haustið 1996. Á fyrri hluta 20. aldar og um aldir þar á undan urðu jökulhlaup af svipaðri stærðargráðu hvað eftir annað á Skeiðarársandi[3]. Mestu jökulhlaup sem orðið hafa hér á landi á sögulegum tíma eru Kötluhlaup. Í þeim stærstu er rennslið talið hafa verið 100–300 þúsund rúmmetrar á sekúndu[4], allt að því sexfalt rennsli stóra hlaupsins sem varð á Skeiðarársandi 1996 og hundraðfalt rennsli stórra Skaftárhlaupa.

Hætta vegna jökulhlaupa er mest þar sem byggð er annað hvort í hlíðum virkra megineldstöðva með jökulhettu á kolli eða við rætur þeirra. Á Íslandi er þessar aðstæður að finna á þremur stöðum: Við Eyjafjallajökul, Snæfellsjökul og Öræfajökul. Á þeim tíma sem liðinn er frá því land byggðist hafa stærstu hlaupin við þessar aðstæður orðið við Öræfajökul, bæði í gosinu 1362 og í gosinu 1727[5]. Í báðum tilfellum varð manntjón og miklar skemmdir á landi. Nokkur jökulhlaup urðu fyrstu daga gossins í Eyjafjallajökli í apríl 2010. Nokkrar skemmdir urðu en sem betur fer voru hlaupin ekki það mikil að stórtjón hlytist af. Þessi hlaup voru hins vegar mjög lærdómsrík og nýtist þekkingin sem af hlaust til að meta hættu annars staðar þar sem aðstæður eru svipaðar, eins og í Öræfasveit. Loftslagsbreytingar valda nú hraðri rýrnum jökla og spár gera ráð fyrir að jöklar minnki verulega og hverfi jafnvel alveg. Jöklar munu þó þrauka lengi á hæstu fjöllum og því ljóst að hætta er á jökulhlaupum vegna eldgosa næstu 100–200 árin.

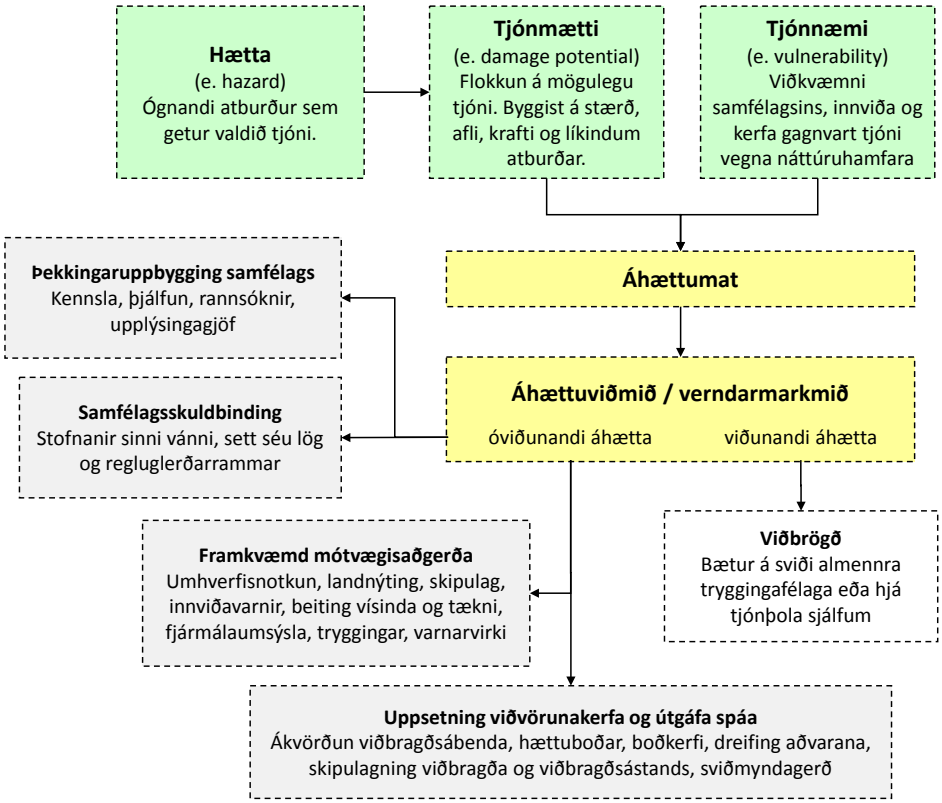
[1] Emmanuel Pagneux og fleiri (ritstj.), 2015; Emmanuel Pagneux og fleiri, 2015.
[2] Magnús T. Guðmundsson og fleiri, 2008.
[3] Sigurður Þórarinsson, 1974.
[4] Haukur Tómasson, 1996; Guðrún Larsen, 2000.
[5] Sigurður Þórarinsson, 1958.



Mynd 1. Yfirlitskort: Rammarnir sýna svæðin við Öræfajökul og Markarfljót sem matið nær til.

1.1 Um hættumat og áhættumat

Verkefnið er áfangi í heildaráhættumati vegna eldgosa á Íslandi, sem hlotið hefur yfirheitið GOSVÁ. Að GOSVÁ koma margir aðilar en afmörkun og áfangaskipting er unnin í samvinnu Veðurstofu Íslands, Ríkislögreglustjóra, Jarðvísindastofnunar Háskólans, Landgræðslu Ríkisins og Vegagerðarinnar en umsjón þess er í höndum Veðurstofunnar. Viðfangsefnið er víðfeðmt og kemur inn á marga þætti, allt frá rannsóknum á eðli og hegðun eldvirkra svæða til fyrirbyggjandi aðgerða og viðbragðsáætlana um hvernig skuli bregðast við náttúruvá af völdum eldgosa. Í samræmi við þá staðla sem Veðurstofan hefur innleitt í áhættumats-verkefnum er verkefnið unnið skv. áhættumatsramma Sameinuðu þjóðanna og Alþjóða-veðurfræðistofnunarinnar (http://www.unisdr.org/). Á mynd 2 má sjá flæðirit yfir áhættumatsrammann. Mikilvægt er í vinnu sem þessari að skilgreiningar hugtaka liggi fyrir. Vinnan sem birt er hér var unnin á árunum 2012–2015 og var að mestu stuðst við þýðingu Trausta Jónssonar á orðasafni Sameinuðu þjóðanna um áhættumat (http://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf). Í töflu 1 er listi yfir hugtök á íslensku og ensku auk dæma um hvernig hugtökin eru notuð. Staðlaráð gaf út íslenska þýðingu á ISO-73 staðlinum, Áhættustjórnun – Orðalisti, í lok apríl 2016.



Mynd 2. Heildaráhættumat skv. áhættumatsramma Sameinuðu þjóðanna og Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar.

Við gerð hættumats er hætta af náttúruvá (eða annars konar vá, t.d. tæknivá) metin, þ.e. atburðir sem leitt geta til manntjóns, eignatjóns og skaða fyrir samfélagið. Við gerð áhættumats er tekið tillit til hversu líklegt er að atburður eigi sér stað og afleiðinga hans, þ.e. áhætta er samspil tjónmættis og tjónnæmis. Í þessari vinnu er hættumat unnið, en þó er farið lengra í átt til áhættumats því til viðbótar við að fara yfir sögulegar upplýsingar og meta stærðir og áhrifasvæði eldgosa og hlaupa, þá er fjallað um tjónmætti jökulhlaupa og berskjöldun fólks vegna þeirra. Enn á eftir að fjalla um tjónnæmi og að setja ásættanleg viðmið. Gerð áhættuviðmiða krefst aðkomu mun stærri og fjölbreyttari hóps en þess sem unnið hefur að þessu hættumati. Umhverfis- og auðlindaráðuneytið hóf formlega vinnu við að skilgreina áhættuviðmið vegna eldgosa í ársbyrjun 2016. Þegar niðurstöður þeirrar vinnu liggja fyrir eru komnar forsendur til að ljúka áhættumati.

Tafla 1. Hugtök um áhættumat og notkun þeirra í þessari skýrslu. Þýðingar og skýringar eru byggðar á vinnu Trausta Jónssonar[6].

Hætta (e. hazard)
Ógnandi atburður; Líkur á því að náttúruhamfarir eða atburður sem getur valdið tjóni eigi sér stað innan tiltekins tíma og á tilteknu svæði.
Hættumat (e. hazard assessment)
Mat á náttúruhamförum og umfangi þeirra, en getur átt við aðrar hættur t.d. tæknivá, stríðsástand o.s.frv.. Hugtakið er mikið notað hér á landi, en er ekki skilgreint sérstaklega í orðalista Sameinuðu þjóðanna og Alþjóða veðurfræðistofnunarinnar (www.unisdr.org)
Áhætta (e. risk)
Það tjón sem ákveðin ógn veldur á ákveðnu svæði yfir ákveðið viðmiðunartímabil vegna samspils tjónmættis og tjónnæmis. Einnig er tekið tillit til viðveru.
Áhættumat (e. risk assessment)
Ferli til að meta eðli og umfang áhættu með greiningu á tjónmætti og mati á tjónnæmi sem kann að valda einstaklingi skaða eða dauða, tjóni á eignum, atvinnu eða umhverfi því sem hann er háður.
Áhættuviðmið (e. acceptable risk)
Það tjón sem samfélag telur viðunandi miðað við félags-, efnahags-, stjórnmála-, menningar-, tækni- og umhverfislegar aðstæður á hverjum stað. Áhættuviðmið eru notuð til ákvörðunar og skilgreiningar aðgerða til að koma tjóni niður á viðunandi stig og geta tekið til m.a. bygginga- og landnýtingarreglna, varnarvirkja og varanlegra eða tímabundinna rýminga eftir aðstæðum hverju sinni.
Berstaða/berskjöldun/viðvera (e. exposure)
Berstaða/berskjöldun einnig nefnt viðvera eða nánd, á hættusvæði. Nær til manna, eigna, kerfa eða hvers þess sem getur orðið fyrir tjóni.
Tjónmætti (e. damage potential)
Flokkun á hversu miklar skemmdir/tjón getur orðið vegna náttúruváratburðar. Byggist á stærð, afli og krafti náttúruváratburðar og hversu mikil líkindi eru á því að hann eigi sér stað, óháð því hvort byggð eða mannvirki séu til staðar. Tjónmætti getur verið háð tilvist varnarvirkja, t.d. varnargarða sem bægja flóðum frá byggð.
Tjónnæmi (e. vulnerability)
Viðkvæmni samfélagsins, innviða og kerfa gagnvart tjóni sem hlýst af náttúruhamförum, mæld í prósentum (0-100%). Tjónið getur verið m.a. manntjón, slys, eignatjón og samfélagslegs eðlis. Tjónnæmið er á sama hátt og tjónmættið háð mótvægisaðgerðum, t.d. varnargörðum. Breytingar á skipulagi byggðar og byggingarlagi, viðbragðsáætlanir, viðbúnaður og fræðsla geta líka lækkað tjónnæmi.
Aðlögunarhæfni/þol/seigla (e. resilience)
Aðlögunarhæfni eða þol, stundum nefnt seigla, segir til um möguleika samfélags til þess að takast á við, jafna sig á og komast yfir náttúruhamfarir með viðbúnaði, t.d. spám um náttúruhamfarir, innviðum almannavarna, tryggingum, og varnaraðgerðum, t.d. varðargörðum.

[6] Trausti Jónsson, 2002; UNISDR, 2009.

1.2 Afmörkun verkefnis

Margvíslegar hættur fylgja eldgosum. Ef gýs í jökli verða oft jökulhlaup. Aðrir atburðir í eldgosum sem ógnað geta lífi fólks og valdið tjóni á eignum og innviðum eru gjóskufall, gjóskuflóð, hraunrennsli, gasmengun og eldingar. Þá geta jarðskjálftar og misgengishreyfingar einnig valdið tjóni. Í viðbrögðum yfirvalda við eldgosum þarf jafnan að horfa til allra þessara þátta, meta líkur á hvort þeir verði sem og hvert sé líklegt umfang þeirra. Jökulhlaupin eru tekin fyrir nú þar sem eldgosasagan sýnir að rík þörf er á að þekkja þessa vá eins vel og kostur er. Því veldur tíðni, stærð og hætta sem af jökulhlaupum getur skapast í byggðum nærri eldfjöllum eins og Öræfajökli. Líta ber á þessa vinnu sem tilraunaverkefni, þar sem vinnulag og aðferðir eru skilgreind með það að leiðarljósi að þær nýtist í verkefnum annars staðar.

Við mat á hegðun eldgosa, magni bræðsluvatns, rennsli í hlaupum, útbreiðslu þeirra og útbreiðslutíma er notuð sama aðferðafræði og gert var í hættumati fyrir vestanverðan Mýrdalsjökul og Eyjafjallajökul[7] sem út kom 2005 og lagt var til grundvallar við gerð rýmingar- og viðbragðsáætlana vegna gosa í þessum eldstöðvum. Þær áætlanir voru síðan notaðar í viðbrögðum almannavarnayfirvalda við gosinu í Eyjafjallajökli 2010. Vonast er til að sú vinna sem hér er gerð grein fyrir nýtist á sama hátt fyrir Öræfin ef til eldgoss kæmi.

Auk mats á vánni og eðli hennar, eru hér settar fram niðurstöður um tjónmætti og hversu berskjaldað fólk er vegna hlaupa frá Öræfajökli og hlaupa til vesturs frá Kötlu. Aðferðir við matið eru settar fram og meðal annars tekið tillit til mjög aukins fjölda ferðamanna á þessum svæðum, ekki bara að sumarlagi heldur allan ársins hring.

Matið fyrir Öræfajökul nær til þess hluta jökulsins sem verið hefur virkur á nútíma (undanfarin 10 þúsund ár), en það þýðir að hlaup eru talin geta komið á svæði sem nær frá Svínafellsjökli í vestri að Kvíárjökli í austri. Hlaup gætu komið fram austan Kvíárjökuls ef gysi í austurhlíðum jökulsins, en í ljósi þess að þar er nú engin föst byggð lengur var ákveðið að láta austurmörk verkefnisins vera við Kvíárjökul.

Við afmörkun stærðar og umfangs atburða í Öræfajökli, er stuðst við mat á mestu gosum og hlaupum sem orðið hafa síðustu 10 þúsund ár í fjallinu. Gjarnan er talað um að meta sennilegt versta tilfelli en ekki versta hugsanlegt tilfelli. Um þetta er þó það að segja að ekki er víst að nokkurn tíma hafi orðið í Öræfajökli stærri atburðir en gosið 1362.

1.3 Þættir verkefnisins

Verkefnið skiptist í þrjá þætti. Sá fyrsti er matið á stærð og umfangi hlaupa vegna eldgosa í Öræfajökli. Gerð er grein fyrir niðurstöðum í 2. kafla. Annar þáttur er mat á tjónmætti hlaupa

[7] Magnús Tumi Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), 2005.

og berstöðu fólks í Öræfum og samskonar mat fyrir Markarfljótsaura (3. kafli). Þriðji þátturinn er svo greining á rýmingu byggðar við Öræfajökul þar sem rýmingartími er borinn saman við ferðatíma jökulhlaupa (4. kafli).

2 Öræfajökull, mat á hlaupum vegna eldgosa undir jökli

Í þessum kafla verður gerð grein fyrir sjálfri náttúruvánni, þ.e. eldgosum í Öræfajökli, bráðnun íss samfara eldgosum, flæði bræðsluvatns og framrás jökulhlaupa niður hlíðar og fram á láglendið. Fyrst (2.1) er fjallað um landslag og jarðsögu svæðisins, eldvirk svæði afmörkuð og líklegar leiðir jökulhlaupa niður fjallið[8]. Einnig er rætt um gosin 1362 og 1727, hlaupin sem urðu samfara þeim og tæpt á landmótun þeirra. Síðan (2.2) eru metnar stærðir jökulhlaupa sem orðið geta við eldgos í jöklinum við núverandi aðstæður[9]. Að lokum (2.3) eru settar fram niðurstöður um hermun jökulhlaupa þar sem metin er útbreiðsla og framrásarhraði við núverandi aðstæður[10].

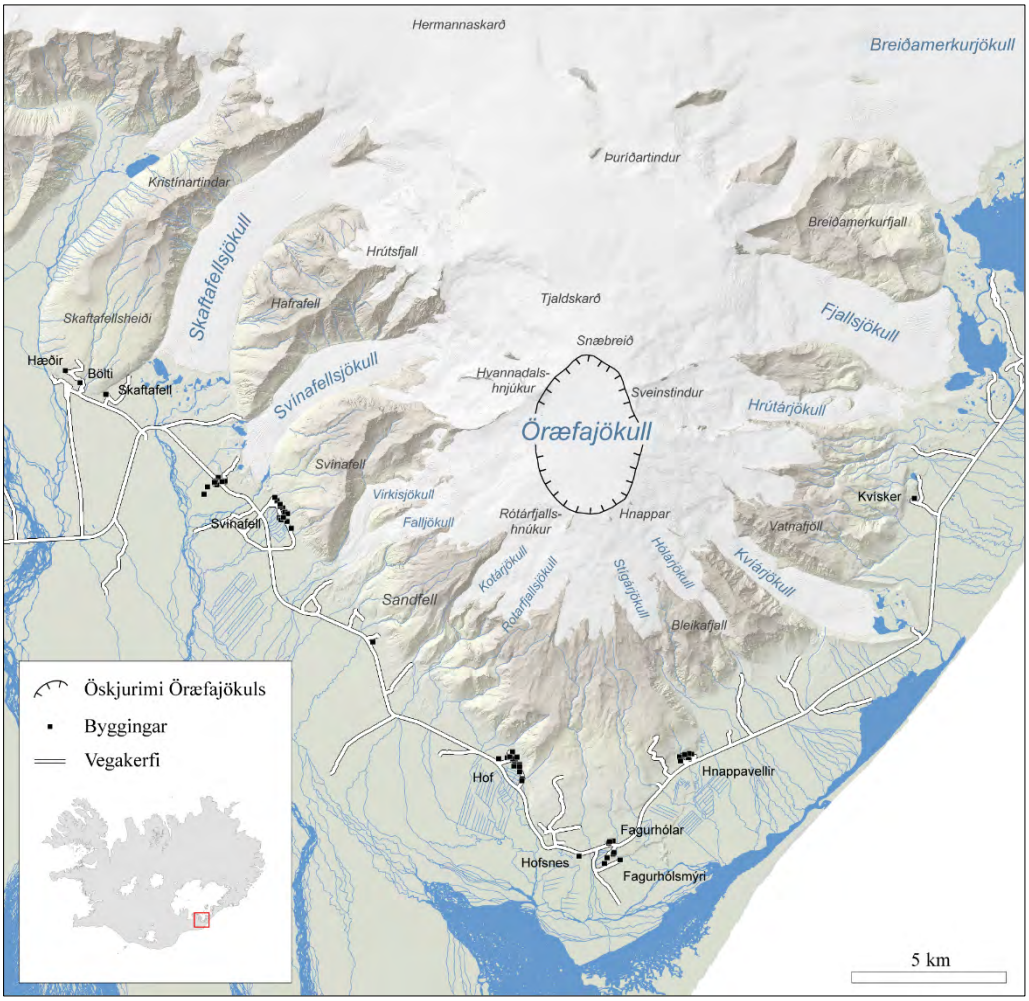
2.1 Jarð- og landfræði Öræfajökuls og hlaup á sögulegum tíma

Öræfajökull rís í upp í 2110 metra hæð yfir sjó í Hvannadalshnjúk og er hæsta fjall landsins (mynd 3). Efri hluti fjallsins er þakinn jökli og skriðjöklar sem falla úr 1800–2000 metra hæð niður á láglendi eru (talið frá vestri til austurs) Skaftafellsjökull, Svínafellsjökull, Virkisjökull, Falljökull, Kvíárjökull, Hrútárjökull og Fjallsjökull. Minni jöklar milli Falljökuls og Kvíárjökuls ná mislangt niður hlíðarnar: Kotárjökull, Rótarfjallsjökull, Gljúfursárjökull, Stórhöfðajökull, Stigárjökull og Hólárjökull[11].

2.1.1 Jarðfræðilegt yfirlit

Rúmmál bergs ofan sjávarmáls í Öræfajökli sunnan Hermannaskarðs er um 370 rúmkílómetrar. Hann telst því annað stærsta eldfjall á Íslandi, aðeins megineldstöðin sem liggur undir Hofsjökli er stærri. Öræfajökull hefur nokkra sérstöðu meðal íslenskra eldfjalla. Hann liggur um 50 km austan við megingosbeltið sem teygir sig frá Vestmannaeyjum, Kötlu og Eyjafjallajökli í suðri til Bárðarbungu og Grímsvatna í miðju landsins. Engin gliðnun, svo vitað sé, verður um Öræfajökul en hann er talinn standa syðst á hliðargosbelti sem teygir sig frá Öræfajökli til norðausturs um Esjufjöll til Snæfells. Eina gosvirknin sem þekkt er með vissu á þessu belti undanfarin 10 þúsund ár hefur orðið í Öræfajökli. Jafnframt virðist gosvirknin vera einskorðuð við fjallið sjálft þar sem engin merki er um reinar með gossprungum eða öðrum merkjum um eldvirkni utan fjallsins.

[8] Matthew J. Roberts og Magnús Tumi Guðmundsson, 2015.
[9] Magnús Tumi Gudmundsson og fleiri, 2015.
[10] Ásdís Helgadóttir og fleiri, 2015.
[11] Oddur Sigurðsson og Richard S. Williams Jr., 2008.

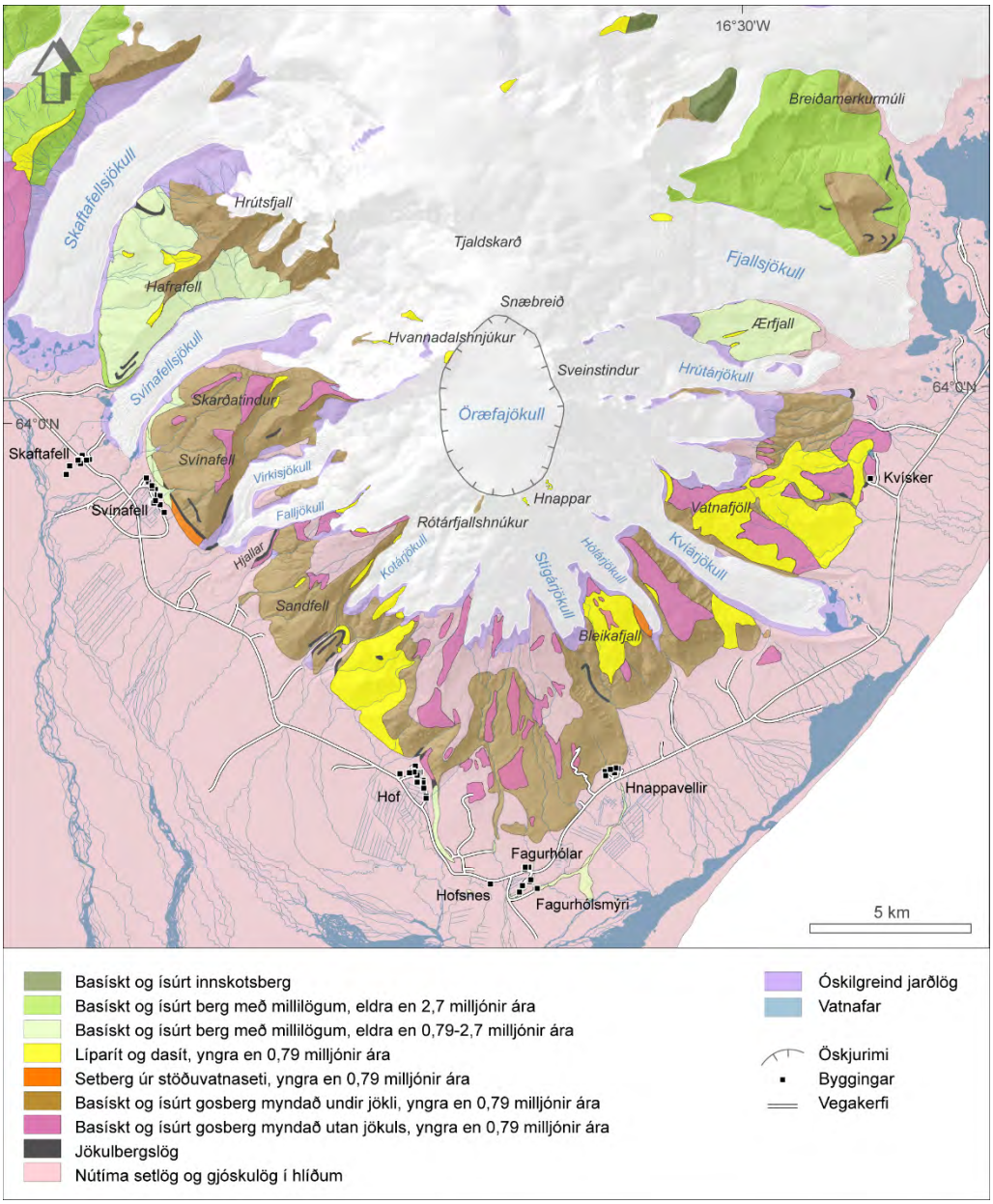


Mynd 3. Öræfajökull, yfirlitskort.

Öræfajökull er um 20 km á breidd frá vestri til austurs og lengd þessa mikla fjalls er 25 km frá Hermannaskarði í Vatnajökli í norðri til Fagurhólsmýrar í suðri (mynd 3). Nyrðri hluti fjallsins, norðan línu sem liggur um Svínafellsjökul, Tjaldskarð og Fjallsjökul, er mun eldri en syðri hlutinn sem er að mestu hlaðinn upp í eldgosum á síðustu 800 þúsund árum (mynd 4). Nyrðri hlutinn er að mestu myndaður á tímabilinu fyrir 0,8 til 2,6 milljón árum[12] og ekki er vitað um nýlega eldvirkni þar. Umfjöllunin hér eftir snýst því um yngri hlutann, sunnan Tjaldskarðs.

Efsti hluti Öræfajökuls er röð tinda sem rísa upp af jöðrum ísi fylltrar öskju (myndir 3 og 4). Tindarnir norðan megin eru hærri og þeirra hæstur er Hvannadalshnjúkur, þá Snæbreið og síðan Sveinstindar. Sunnan megin eru lægri tindar: Rótarfjallshnjúkur og Hnappar. Askjan er um 14 ferkílómetrar að stærð og þar er ísinn yfir 500 metra þykkur (mynd 5) þar sem mesum 14 ferkílómetrar að stærð og þar er ísinn yfir 500 metra þykkur (mynd 5) þar sem mest er[13].

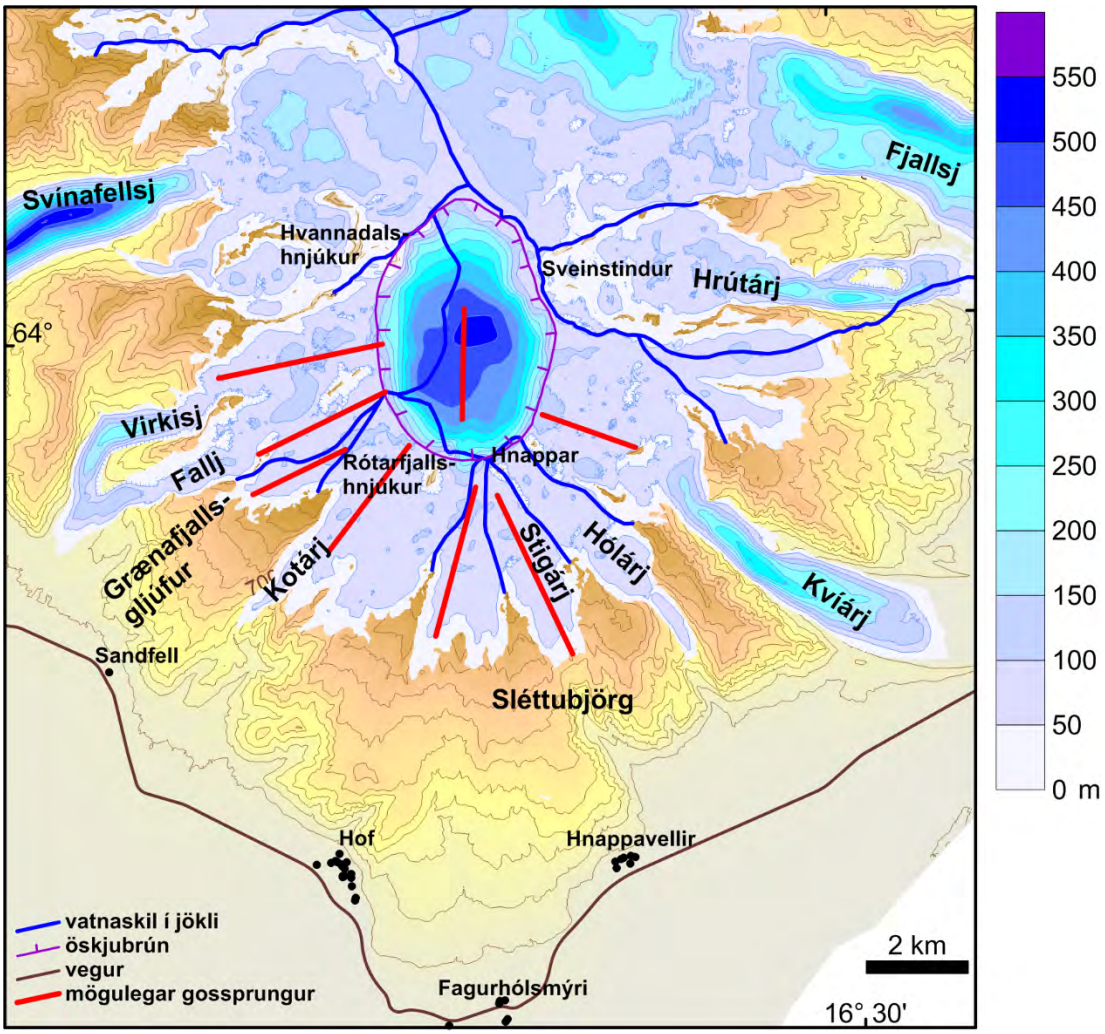
[12] Jóhann Helgason, 2007.
[13] Eyjólfur Magnússon og fleiri, 2012a.



Mynd 4. Öræfajökull, jarðfræðikort, byggt á jarðfræðikortum Tore Prestvik[14], Hauks Jóhannessonar og Kristjáns Sæmundssonar[15] og Jóhanns Helgasonar[16].

Ríólít er víða að finna í efstu tindum, t.d. í Hvannadalshnjúk og Hnöppum. Ríólít er einnig neðar í fjallinu, einkum milli Hofs og Sandfells og að austanverðu í Bleikafjalli og Vatnafjöllum. Niðurstöður nýrra rannsókna benda til þess að hraun við neðanverðan Kotárjökul kunni að hafa myndast árið 1727 í seinna gosi Öræfajökuls á sögulegum tíma[17].

[14] Prestvik, 1982.
[15] Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998.
[16] Jóhann Helgason, 2007.
[17] Forbes og fleiri, 2014.



Mynd 5. Ísþykkt í Öræfajökli og skipting hans í vatnasvið.

Í Öræfajökli eru móbergsmyndanir, bólstraberg og túff af ýmsu tagi úr basalti og ísúru bergi fyrirferðarmest. Neðan til eru fjallshlíðarnar yfirleitt brattari en ofar sem bendir til aðhalds jökla og sjávar meðan fjallið var að hlaðast upp. Öræfajökull virðist því einkum hafa byggst upp á jökulskeiðum ísaldar.

Hægt er að meta stærðargráðu kvikuframleiðslu Öræfajökuls út frá rúmmáli fjallsins. Sá hluti þess sem er yngri en 800 þúsund ára er um helmingur heildarrúmmálsins, eða tæplega 200 rúmkílómetrar. Sé því rúmmáli deilt jafnt yfir tímabilið, hefur upphleðslan numið um fjórðungi úr rúmkílómetra á hverju árþúsundi. Þetta er þó lágmarkstala og gæti rétta talan verið umtalsvert hærri, sé tekið tillit til jökulrofs og efnisflutnings með jökulhlaupum og gjóskufalli utan fjallsins. Til samanburðar má nefna að Hekla hefur á um einu árþúsundi framleitt jafngildi 13 rúmkílómetra af föstu bergi[18] og eldstöðvakerfi Kötlu nærri 25 rúmkílómetrum á sama tíma[19]. Öræfajökull er því ekki sérlega mikilvirk eldstöð miðað við stærstu

[18] Guðrún Larsen og fleiri, 2013a.
[19] Guðrún Larsen og fleiri, 2013b.

eldstöðvakerfin í austur-gosbeltinu. Hins vegar virðist hærra hlutfall gosa í Öræfajökli vera ísúr eða súr miðað við eldstöðvar í megin-gosbeltunum (vestur-, norður- og austur-gosbelti), og sver fjallið sig að því leyti meira í ætt við eldkeilur á samreksbeltum og eyjabogum en aðrar íslenskar megineldstöðvar.

2.1.2 Jöklar, ísa- og vatnasvið

Mikil úrkoma fellur á Öræfajökull þar sem hann stendur á suðausturströnd landsins. Í öskjunni í 1800 metra hæð er ársúrkoman talin vera að vatnsjafngildi 8000 millímetrar og er hvergi hærri hér á landi. Þessi úrkoma fellur sem snjór. Skriðjöklar þurfa því að flytja mikinn ís ofan af háfjallinu sem skýrir af hverju sumir þeirra ná niður á láglendi.

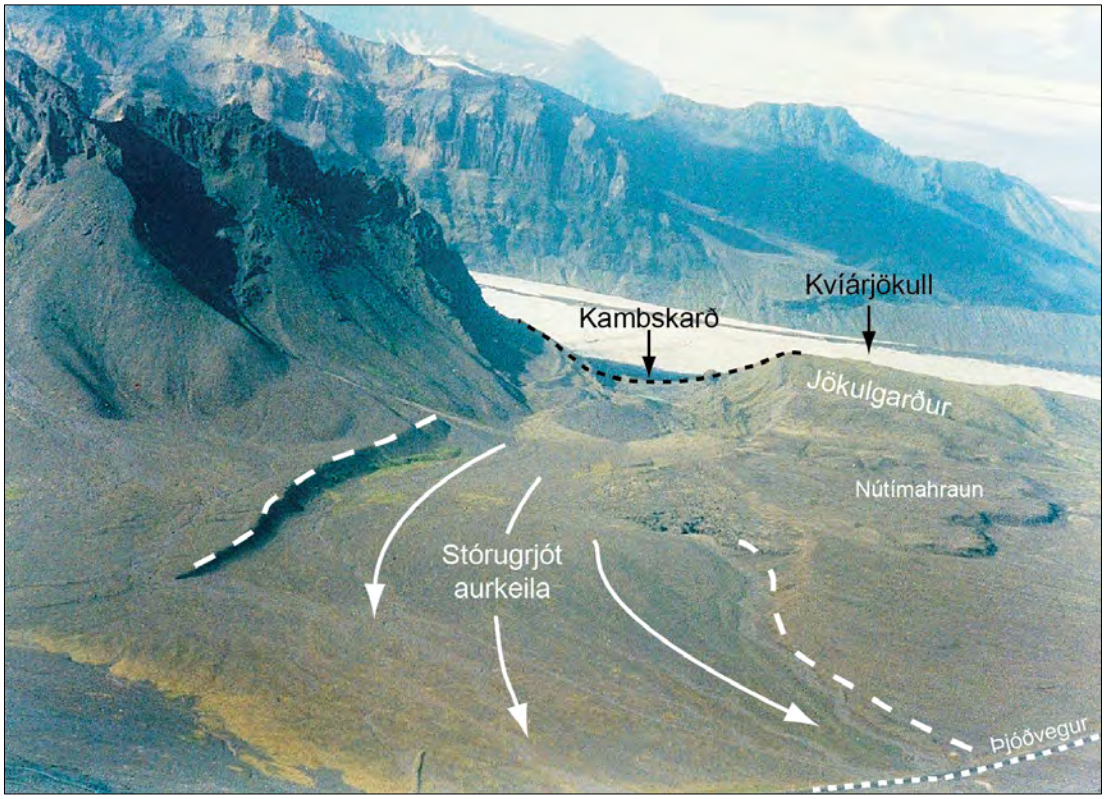
Í öskju Öræfajökuls er jökullinn allt að 540 m þykkur og innan hennar eru 3,9 rúmkílómetrar af ís (mynd 5). Í hlíðunum er jökullinn mun þynnri víðast hvar, eða 60–80 metrar. Aðeins þrír af skriðjöklum Öræfajökuls sækja ís að einhverju marki inn í öskjuna þ.e. Virkisjökull, Falljökul og Kvíárjökul. Að auki flæðir dálítið af ís úr suðvesturhorni öskjunnar niður Kotárjökul. Vatnasvið innan öskjunnar (mynd 5) liggja í stórum dráttum eins og ísasviðin, austur- og suðurhluti öskjunnar veitir vatni niður Kvíárjökul.

2.1.3 Saga eldgosa, eldvirkni á nútíma og sögulegum tíma

Gjóskulagarannsóknir hafa leitt í ljós að gosvirkni Öræfajökuls á nútíma (síðustu 10 þúsund árin) hefur ekki verið mikil. Allt að 11 tiltölulega lítil forsöguleg súr sprengigos hafa orðið og myndað þunn ljós gjóskulög[20]. Auk hraunsins við Kotárjökul sem talið er myndað 1727 hafa tvö lítil hraun runnið eftir að ísa leysti. Annað er niðri á láglendi við Kvíárjökul og hitt uppi á Vatnafjöllum austan Kvíárjökuls.

Öræfajökull hefur gosið tvisvar á sögulegum tíma. Fyrra gosið varð 1362 og er það talið öflugasta sprengigos á Íslandi síðan land byggðist. Þá lagðist ríólít gjóska yfir Suðausturland og hafið suðaustur af landinu. Fíngerða gjósku (ösku) úr þessu gosi má finna sumstaðar í Norður-Evrópu. Sigurður Þórarinsson mat rúmmál gjóskunnar nýfallinnar sem 10 rúmkíló-metra[21]. Seinni tíma rannsóknir hafa leitt í ljós að gjóskuflóð fóru einnig niður hlíðar fjallsins og náðu út á láglendi sunnan og suðvestan fjallsins og út í a.m.k. 10 km fjarlægð frá miðju öskju Öræfajökuls[22]. Þessu gosi fylgdu mikil jökulhlaup, en um þau er fjallað í kafla 2.1.5. Þetta gos eyddi Litlahéraði, en svo nefndist sveitin sem þá náði yfir láglendið vestan og suðvestan Öræfajökuls með a.m.k. 40 bæjum. Talið er að 250–400 manns kunni að hafa farist í þessu gosi, þ.e. flestir eða allir íbúar Litlahéraðs. Ekkert er vitað með vissu, sennilegast er að jökulhlaup, firnamikið og öflugt gjóskufall og heit gjóskuflóð hafi í sameiningu orðið fólki að fjörtjóni í gosinu 1362[23].

[20] Hjalti Guðmundsson, 1998; Ármann Höskuldsson og fleiri, 2016.
[21] Sigurður Þórarinsson, 1958.
[22] Ármann Höskuldsson og Þorvaldur Þórðarson, 2006.
[23] Ármann Höskuldsson og Páll Imsland, 2013.



Mynd 6. Brattar undirhlíðar og jökulsandar einkenna Öræfin. Á myndinni sést farvegur forsögulegs jökulhlaups við vesturjaðar Kvíarjökuls (ljósm. Matthew J. Roberts, júlí 2000).

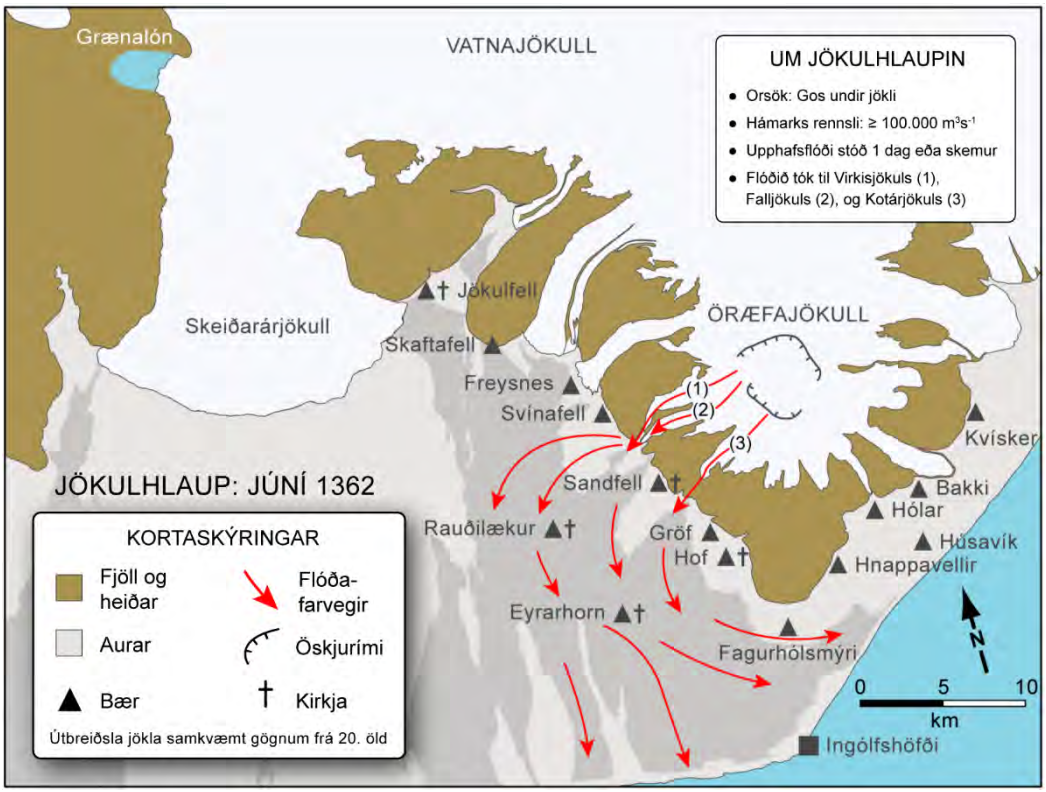
Seinna gosið varð í ágúst 1727. Miðað við stærð og útbreiðslu gjóskulagsins var þetta meðalstórt gos og því miklu minna en stórgosið 1362. Ísúr gjóska féll víða um land og mikil jökulhlaup komu undan Virkisjökli-Falljökli og Kotárjökli. Til er greinargóð lýsing á hlaupunum 1727, eftir Jón Þorláksson, prest í Sandfelli (sjá 2.1.5).

Ef það sem vitað er um gossögu Öræfajökuls er dregið saman, virðist meðaltími milli gosa vera nálægt 500–600 ár. Flest eru gosin lítil. Gosið 1362 er þó með mestu sprengigosum sem orðið hafa á Íslandi á nútíma. Flest ef ekki öll hafa þessi gos valdið jökulhlaupum.

2.1.4 Landmótun í Öræfum

Byggðin í Öræfum eftir gosið 1362 hefur að mestu leyti verið á stöðum sem njóta skjóls af undirfjöllum Öræfajökuls og því ekki alveg berskjölduð fyrir hugsanlegum jökulhlaupum. Láglendið er að mestu orðið til við upphleðslu framburðar jökuláa á undanförnum 10 þúsund árum (myndir 4 og 6). Víða eru aurkeilur fyrir framan skriðjökla og gil sem ná upp í jökul.

Þessar aurkeilur eru að verulegu leyti myndaðar í jökulhlaupum. Að vestanverðu hallar landinu niður að aurum Skeiðarár. Hún hefur um aldir flutt með sér mikið set, ekki síst í Skeiðar-



Mynd 7. Útbreiðsla og helstu farvegir jökulhlaupsins 1362 samkvæmt niðurstöðum Sigurðar Þórarinssonar[24].

árhlaupum og byggt upp sandinn sem heldur á móti aurkeilum hinna smærri jökuláa sem falla frá Öræfajökli. Austan Fagurhólsmýrar mynda sandarnir 2–3 km breiða, tiltölulega hallalitla landræmu. Nær fjallshlíðum eru aurkeilur, t.d. frá Hólár- og Stigárjöklum. Jökulár hafa um aldir flæmst fram og til baka um aurana bæði að austan og vestanverðu. Aurarnir hafa því lengst af verið fremur gróðurlitlir. Með hörfun jökla og stöðugri árfarvegum í kjölfar hennar hafa aurarnir farið að gróa upp.

2.1.5 Jökulhlaupin 1362 og 1727

Nærri engar samtímaheimildir eru um gosið 1362 (mynd 7). Sigurður Þórarinsson fjallar um þennan atburð í grein[25] þar sem hann fer yfir þær fáu heimildir sem fyrir liggja og dregur af þeim þá ályktun að gosið hafi verið 1362 og einnig um hvaða afleiðingar það hafði. Í greininni er vitnað í annála og þar er þess er m.a. getið að mikið gos hafi orðið í Knappafellsjökli (eldra nafn Öræfajökuls), Litlahérað hafi eyðst svo og stór hluti Hornafjarðar og Lónshverfis. Þá segir: „Hér með hljóp Knappafellsjökull fram í sjó þar sem áður var þrítugt djúp, með grjótfalli, aur og saur að þar urðu síðan sléttir sandar. Tók og af tvær kirkjusóknir með öllu, að Hofi og Rauðalæk.“ (annálsbrot frá Skálholti). Það þýðir að jökulhlaupið hafi borið fram svo mikinn aur að þurrt land hafi myndast þar sem áður var talið vera nálægt 50 metra (30

[24] Sigurður Þórarinsson, 1958.
[25] Sigurður Þórarinsson, 1957.

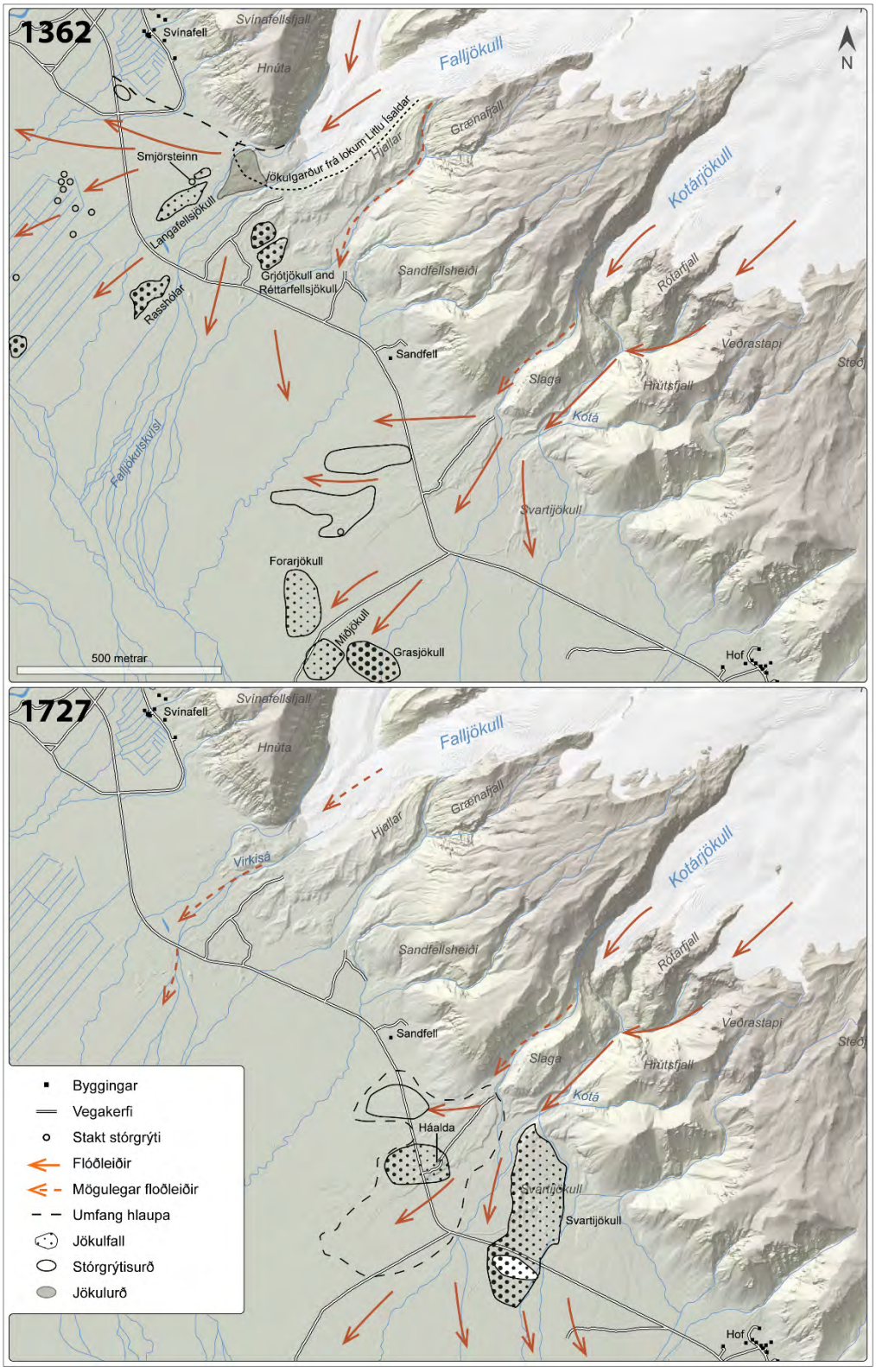
faðma) dýpi. Í Gottskálksannál er frá því sagt að Knappafellsjökull hafi sprungið og hlaupið ofan í Lómagnúpssand svo að af tók vegu alla. Enn fremur að Úlfarsá hafi hlaupið á stað þann, er heitir að Rauðalæk, og braut niður allan staðinn, svo að ekki hús stóð eftir nema kirkjan. Í Flateyjarannáll segir að aleyðst hafi Litlahérað. Um manntjón eru heimildir fáorðar en annálar sem skráðir eru allnokkru seinna greina frá því að svo til allir hafi farist. Talið er fullvíst að gosið hafi verið inni í öskjunni nærri vesturjaðri hennar og skýri það að hlaupin hafi fyrst og fremst komið niður Virkisjökul-Falljökul og Kotárjökul.

Hlaupið 1362 hefur verið mest niður Falljökul og ætla má af ummerkjum að það hafi verið allmiklu stærra en hlaupið sem kom í gosinu 1727 (mynd 8), en hægt er að aðgreina gjóskuna sem barst fram í þessum gosum. Gjóskan frá 1362 er ljósleit en vatnsborna gjóskan sem hlaupið 1727 bar fram er dökkleitt basalt-andesít. Jafnframt er ljóst að mikill ís barst fram í hlaupinu auk þess sem stór björg fluttust með vatninu og ísnum út á sléttlendið norðvestan og vestan Falljökuls. Hlaupaset frá 1362 er ekki eins áberandi í farvegum frá Kotárjökli. Talið er að hlaupið 1727 hafi annaðhvort hrifið með sér setið frá 1362 eða hulið það með því að leggja af sér efni. Sigurður Þórarinsson taldi að í hámarki hafi rennsli hlaupsins 1362 verið af stærðargráðunni 100.000 rúmmetrar á sekúndu. Seinni tíma athuganir benda til að þetta mat sé nærri lagi. Lýsing Jóns Þorlákssonar prests í Sandfelli er aðalheimildin um hlaupin 1727 en réttar dagsetningar eru fengnar úr lýsingu Einars Hálfdanarsonar[26]. Gosið hófst að morgni 4. ágúst en verulegir jarðskjálftar voru daginn áður, 3. ágúst, sem var sunnudagur. Við messu á Sandfelli skalf kirkjan og hræðsla greip um sig meðal hluta kirkjugesta. Vatnið kom fram sem nokkur hlaup, það fyrsta skömmu eftir kl. 9 um morguninn. Mikill hávaði, engu minni en þrumur, var áður en hlaupið kom fram. Sennilega stafaði þessi hávaði af boðaföllum vatnsins og uppbroti íssins þar sem hlaupið æddi niður jökulinn. Hliðstæðar lýsingar eru til af hlaupinu sem kom niður Gígjökul 15. apríl 2010 í gosinu í Eyjafjallajökli. Í gosinu 1727 var hlaupvatnið volgt og stundum snarpheitt. Búfénaður sem var á beit niðri á sléttlendinu lenti í hlaupinu og drukknaði. Þá drukknuðu þrjár manneskjur frá Sandfelli þegar hlaupið hreif með sér fjárhús sem fólkið hafði flúið til. Jakar sem hlaupið braut úr jöklinum bárust allt til sjávar. Hár hiti hlaupvatnsins gæti bent til þess að það hafi að hluta flætt niður hlíðina ofan á nýrunnu hrauni, eins og gerðist í Gígjökli í gosinu í Eyjafjallajökli 2010[27].

Set úr hlaupinu 1727 nær í heildina yfir svipað svæði og hlaupið 1362. Stærðargráðan var því hin sama í báðum tilfellum, þó að hlaupið sem kom undan Falljökli 1362 hafi verið stærra eins og fram kom hér að ofan. Mikill ís barst fram og samkvæmt heimildum tók það áratugi fyrir hrönnina að bráðna alla, þar sem hún lá í farvegi hlaupsins framan við Falljökul og Kotárjökul. Þetta má m.a. lesa úr lýsingum Eggerts og Bjarna sem fóru um Öræfi 1756.

Í farvegi hlaupsins 1727 við fjallið Slögu og Svartajökul er hægt að meta bæði þversnið farvegarins og halla hans. Því er hægt að meta rennslið með jöfnu Mannings, sem tengir saman

[26] Einar Hálfdanarson og Jón Þorkelsson, 1918–1920.
[27] Björn Oddsson og fleiri, 2016.



Mynd 8. Menjar um hlaupin 1362 og 1727. Örvarnar sýna áætlaða stefnu hlaupanna og gefa vísbendingar um stærð útbreiðslusvæðisins.

halla landsins, dýpi og breidd farvegar og hversu ósléttur eða hrjúfur farvegurinn er. Niðurstaðan er að rennslið um þennan farveg hafi verið nærri 40.000 rúmmetrum á sekúndu. Jafnframt bendir gerð setsins sem hlaupið bar fram til þess að rennsli hafi aukist hratt og að hlaupið flutt með sér mikið af seti. Því er líklegt að hlaupið 1727 og sennilega 1362 líka, hafi verið aurflóð, sem þýðir að fast efni hafi numið á bilinu 40 og 80% af heildarmassanum. Hlaupin frá Eyjafjallajökli 14. og 15. apríl 2010 voru þessarar gerðar þegar þau komu niður jökulinn[28]. Hliðstæðum flóðum hefur verið lýst í gosum Redoubt eldfjallsins í Alaska (1989 og 2009) en efsti hluti þess er þakinn jökli[29].

Ef vitneskjan um þessi tvö jökulhlaup er dregin saman virðast hlaupin sem fylgdu gosunum 1362 og 1727 hafa mörg sameiginleg einkenni. Rennsli þeirra var mjög mikið, þau fóru hratt niður hlíðarnar og virðast hafa fylgt í megindráttum svipuðum rennslisleiðum niður Falljökul og Kotárjökul. Bæði hlaupin brutu jökulinn upp neðantil og fluttu ísinn með sér. Sennilega var hlaupið 1362 sem kom niður Falljökul verulega stærra en 1727 og af annálum má ráða að flutningur á gosefnum með vatninu hafi verið mjög mikill. Við Kotárjökul er svo að sjá að hlaupin hafi verið svipuð að stærð. Sennilegt er að hlaupið 1362 hafi náð hámarksrennsli nærri 100 þúsund rúmmetrum á sekúndu, en hlaupið 1727 sennilega verið í heildina nokkru minna. Mesta rennsli þess var sennilega ekki minna en 40 þúsund rúmmetrar á sekúndu.

2.2 Gerðir og stærðir eldgosa og jökulhlaupa

Eldgosin 1362 og 1727 urðu bæði vestan til í fjallinu en gosstaðirnir virðast í báðum tilfellum hafa verið innan öskjunnar eða í vesturjaðri hennar. Þó kann að vera að gossprungan sem opnaðist 1727 hafi að einhverju leyti náð niður í jökli þaktar hlíðarnar að vestanverðu. Við mat á stærð gosa og getu þeirra til að bræða ís verður að taka með í reikninginn mögulega gosstaði allstaðar innan öskjunnar og í hlíðum fjallsins. Notaðar eru aðferðir sem þróaðar voru vegna hættumats fyrir Mýrdalsjökul og Eyjafjallajökul[30]. Þrjár gerðir atburða eru kannaðar: (1) Gos innan öskjunnar, en þar getur gos hafist undir mjög þykkum ís, (2) sprungugos í hlíðum fjallsins þar sem ís er þunnur, og (3) bráðnun vegna gjóskuflóða í stórgosi, svipuðu og varð 1362.

2.2.1 Jökulhlaup vegna eldgosa, bráðnun íss og myndun jökulhlaupa

Eins og fram kemur í inngangi eru tekin fyrir þau svæði frá vestri til austurs þar sem gosið hefur á nútíma og austur fyrir Kvíárjökul. Þetta eru eftirtalin vatnasvið (mynd 4):

i) *Syðri hluti vatnasviðs Svínafellsjökuls:* Einungis eru skoðuð áhrif gjóskuflóða á þetta vatnasvið.
ii) *Virkisjökull-Falljökull:* Svæðið nær yfir hluta öskjunnar. Þarna geta því orðið gos innan öskju, í hlíðum og bráðnun vegna gjóskuflóða.

[28] Eyjólfur Magnússon og fleiri, 2012b.
[29] Waythomas og fleiri, 2014.
[30] Magnús Tumi Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005.

iii) *Kotárjökull:* Svæðið nær til lítils hluta öskjunnar og hlíðanna upp af Sandfelli. Allar þrjár gerðir gosa geta haft áhrif á þetta vatnasvið.

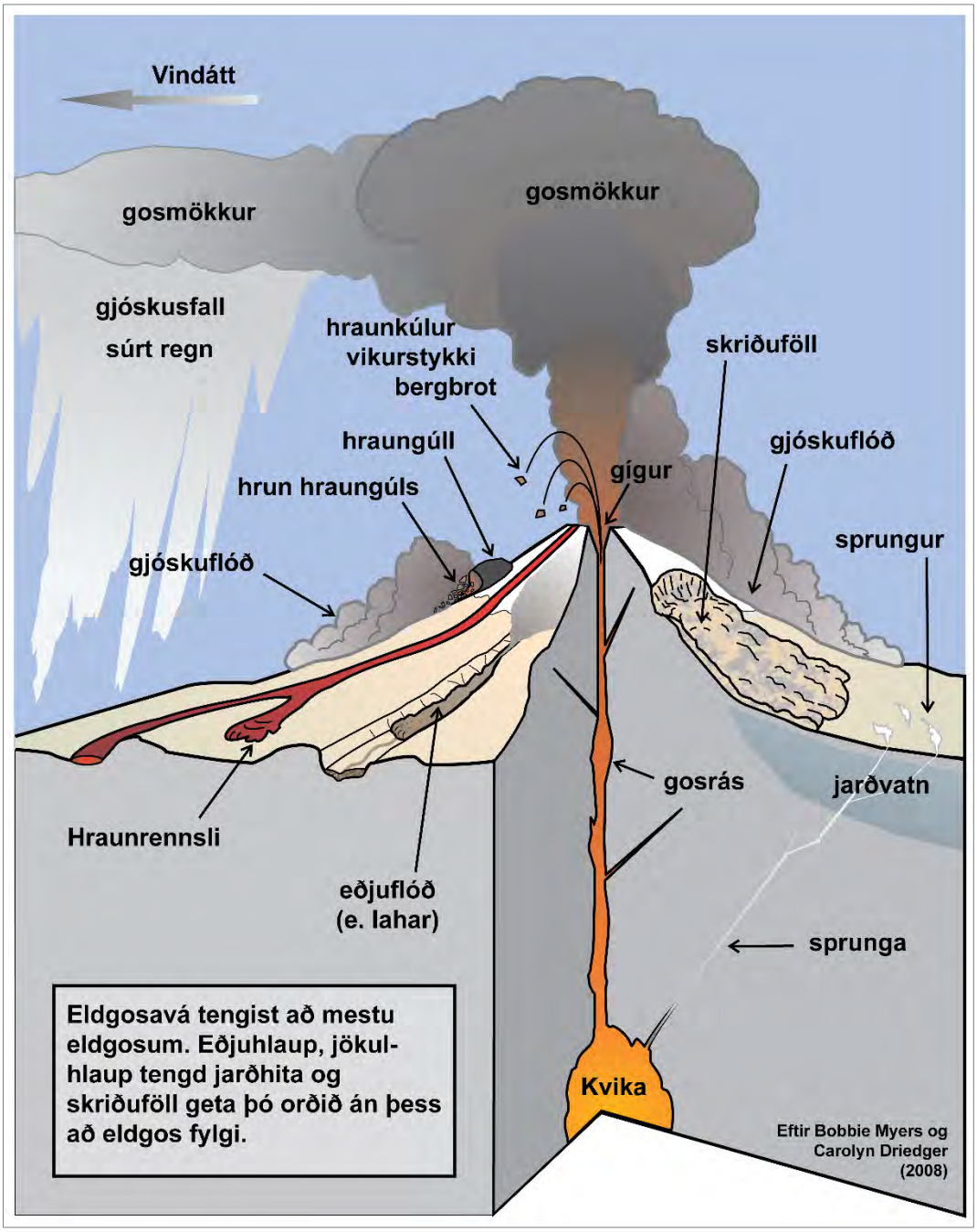
iv) *Rótarfjallshnjúkur-Vestari Hnappur og jöklar sunnan þessara jökulskerja*: Vatnasviðið nær ekki til öskjunnar. Reiknuð eru áhrif sprungugosa í hlíðum og gjóskuflóða.

v) *Kvíárjökull:* Þetta vatnasvið tekur til stórs hluta öskjunnar auk Kvíárjökuls sjálfs. Allar þrjár gerðir gosa geta orðið á þessu vatnasviði.

vi) *Hlíðar Öræfajökuls norðan Kvíárjökuls:* Vatnasviðið liggur utan öskjunnar en hlíðarnar eru svipaðar og í vesturhluta fjallsins. Þarna geta orðið sprungugos og hugsanlegt er að gjóskuflóð fari niður hlíðarnar. Engin byggð er hins vegar á rennslisleiðum jökulhlaupa og var þetta svæði því ekki kannað frekar nú. Ef vilji er fyrir því að kanna áhrif hugsanlegra hlaupa austan Kvíarjökuls má nota sömu aðferðir og hér er beitt á svæði i)-v).

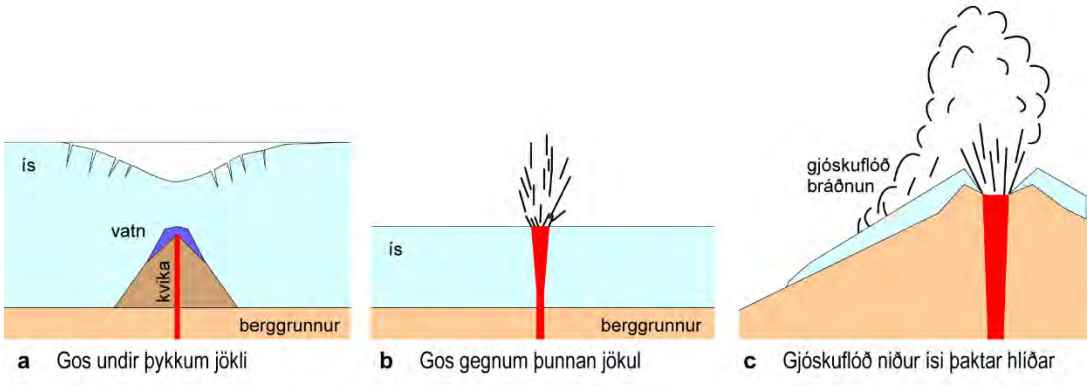
Eldgos eru af ýmsum gerðum og stærðum og hættur sem af þeim stafa eru margskonar (mynd 9). Geta þeirra til að bræða ís fer annars vegar eftir kvikuflæðinu, þ.e. hve mikið magn kemur upp af kviku á hverjum tíma, og hins vegar eftir gerð gossins. Gerðirnar eru:

- *Tvístrun kviku undir þykkum jökli (þykkt > 200 m)* (mynd 10a). Þessi gerð gosvirkni var ráðandi í Gjálpargosinu 1996 og er talin vera ríkjandi í Kötlugosum. Bráðnun er mjög hröð þar sem sprengingar í lóni sem myndast undir jöklinum valda því að kvikan tvístrast í korn sem eru 0,01–1 millímetri í þvermál. Þessi korn kólna leifturhratt í bræðsluvatninu sem við það hitnar mjög og berst með mjög öflugri hræringu upp að ísþakinu yfir lóninu. Bráðnun getur numið yfir 100 þykktarmetrum á klukkustund. Á yfirborði jökulsins myndast sigketill og bræðsluvatnið leitar með botni í átt að jaðri jökulsins. Aðstæður geta verið mismunandi, en þar sem leiðir hlaupa liggja niður brattar hlíðar þaktar jökli, leitar vatnið upp á yfirborð jökulsins þar sem það fossar niður með miklum hraða og boðaföllum, brýtur upp jökulinn og flytur jakana með sér. Nokkur hlaup af þessu tagi komu niður Gígjökul í gosinu í Eyjafjallajökli 2010.
- *Myndun bólstrabergs undir þykkum jökli*. Gos af þessari gerð mynduðu bólstrabergshryggi og breiður undir jökli á jökulskeiðum ísaldar. Slíka hryggi er víða að finna í gosbeltum Íslands. Bráðnun íss er mikil en þó mun hægari en við tvístrun kvikunnar. Ekki er fjallað sérstaklega um þessa gerð hér, enda afleiðingar vægari en þegar tvístrun verður. Ekki er hægt að segja fyrir um hvort bólstraberg myndast eða hvort kvikan tvístrast. Það virðist ráðast af samspili ísþykktar, ákafa gossins og gerðar gosefna. Hvort tveggja getur átt sér stað í sama gosi, t.d. á mismunandi stöðum á sömu gossprungu.
- *Tvístrun kviku í sprungugosi þar sem jökull er fremur þunnur (<200 m)* (mynd 10b). Gosið nær hratt upp í gegnum jökulinn og sprengigos hefst með tilheyrandi gjóskufalli. Sprungan í jöklinum víkkar ört til að byrja með en síðan hægir á henni eftir því sem fjarlægð frá gíg að ísveggjum vex. Þessa mynd ísbráðnunar höfum við séð í Grímsvatnagosum og á fyrstu dögum gossins í Eyjafjallajökli. Ísbráðnun getur verið mjög hröð fyrst í stað en síðan dregur úr henni. Heildarbráðnun er mun minni en við tvístrun kviku undir þykkum jökli.

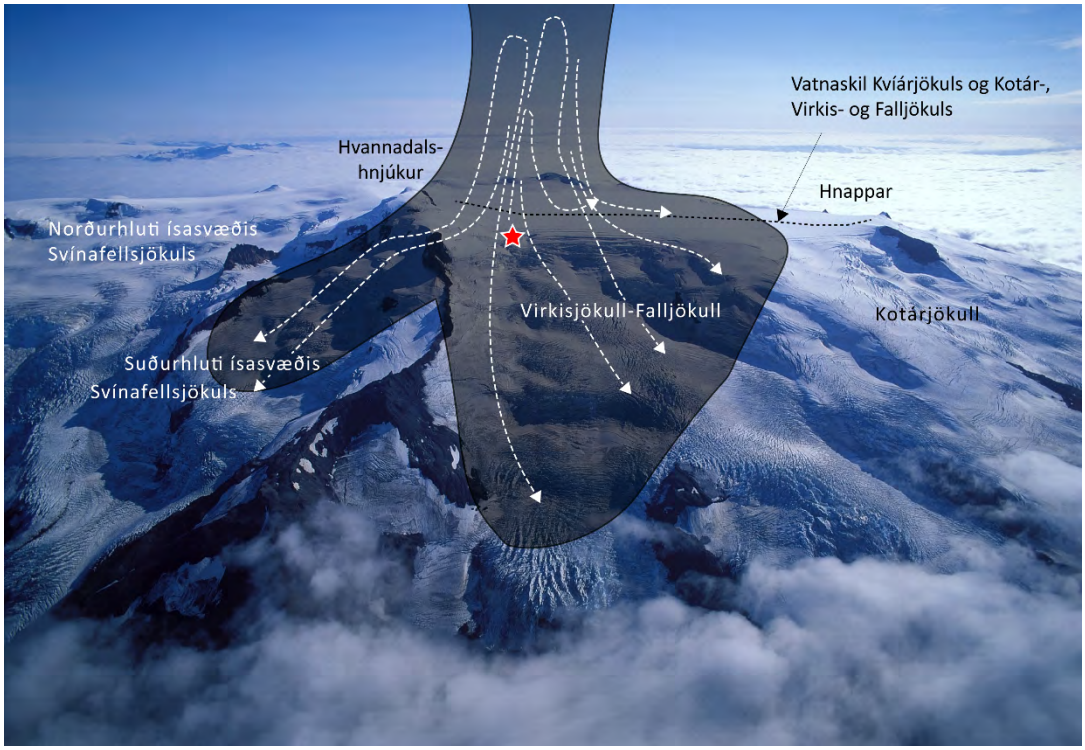


Mynd 9. Helstu hættur sem stafa af eldgosum[31].

[31] Myers og Driedger, 2008.



Mynd 10. Helstu aðstæður sem upp koma í eldgosum í jökli og bráðnun jökulíss[32].



Mynd 11. Hugsanlegt gjóskuflóð ef stórgos yrði nyrst í öskju Öræfajökuls.

[32] Eyjólfur Magnússon og fleiri, 2012b.

Bræðsla snævar og íss á yfirborði jökuls í heitum gjóskuflóðum (mynd 10c). Þessi gerð bráðnunar er ekki eins algeng hér á landi og þær sem nefndar eru að ofan. Gjóskuflóð verða í mjög stórum sprengigosum þegar gosmökkurinn verður það efnismikill og þungur að uppdrif nær ekki að lyfta honum þegar hreyfiorkan sem þeytti gosefnunum upp úr gígnum er uppurin. Við þessar aðstæður flæða heit gosefnin niður hlíðarnar og tapa hluta orku sinnar í bræðslu. Hlaup af þessu tagi hafa orðið í ýmsum eldkeilum, t.d. í Nevado del Ruiz í Kólombíu 1985 og í Redoubt eldfjallinu 1989–1990 og 2009. Þessi hlaup geta verið mjög snögg. Í Nevado del Ruiz varð meðalstórt gos og nokkur gjóskuflóð flæddu yfir jökulhettuna á kolli fjallsins sem er yfir 5000 m hátt. Vatnið sem gjóskuflóðin bræddu á nokkrum mínútum, flæddi niður hlíðarnar og síðan fram eftir giljum í undirhlíðum, allt að 40–50 km langan veg. Á leiðinni tóku hlaupin með sér laus gosefni og jarðveg. Þannig varð hlaupmassinn efnismeiri og þyngri í sér eftir því sem lengra dró frá eldfjallinu. Þessi aurhlaup komu svo fram úr gilkjöftum allt að 60 km frá gosstaðnum. Flóðin voru þá mjög aurborin og þung í sér. Eitt þeirra kaffærði bæinn Armero þar sem 23 þúsund manns drukknuðu á nokkrum mínútum[33]. Ástæðan fyrir því að svo illa fór var skortur á viðbragðsáætlunum og tengslum milli yfirvalda og sérfræðinga. Íbúar voru því ekki varaðir við en nægur tími hefði gefist til að rýma farveg hlaupsins ef yfirvöld hefðu þekkt hættuna. Í ljósi þess að vitað er nú að gjóskuflóð urðu í gosinu 1362, er hér (kafli 2.2.2) lagt mat á sennilega stærð slíkra hlaupa frá Öræfajökli. Á mynd 11 er sýnt hvernig gjóskuflóð gæti átt sér stað við stórgos nyrst í öskju Öræfajökuls.

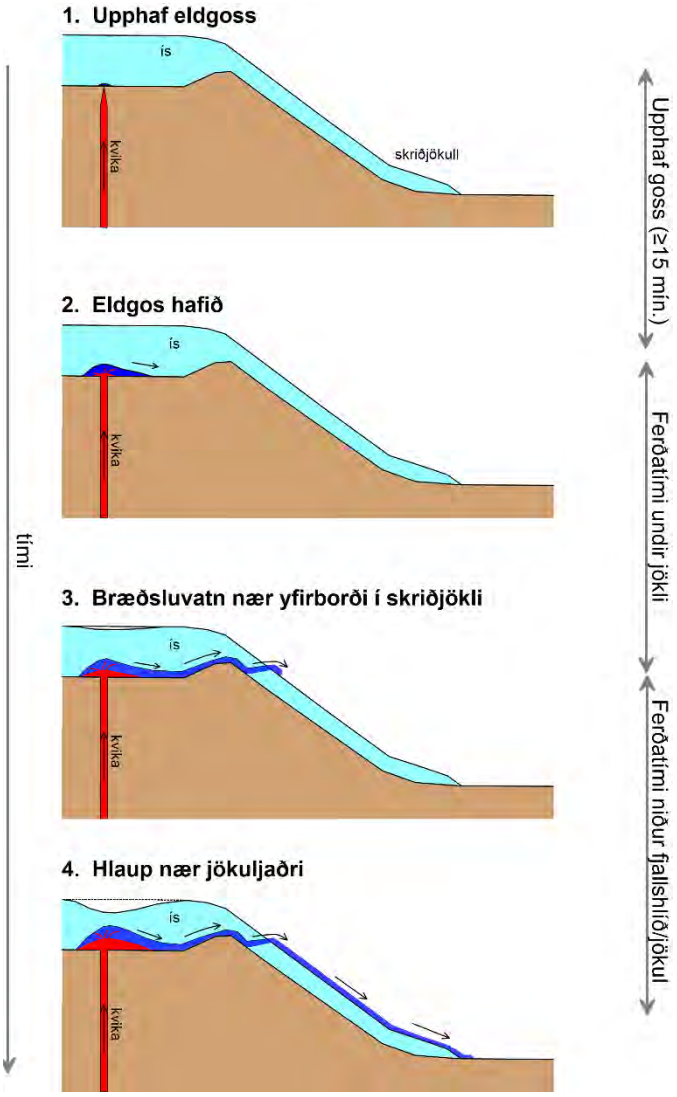
Hámarksrennsli hlaupa ræður mestu um hve stórt svæði þau flæða yfir og þar með hvaða svæði eru í hættu. Sá tími sem líður frá því gos hefst þar til hlaup nær niður á láglendi og þar með að byggð, vegum og öðrum mannvirkjum, er þó jafn mikilvægur þegar kemur að hættumati. Því er reynt að leggja mat á framrásartíma hlaupa í Öræfajökli. Honum má skipta í nokkra hluta:

Upphaf goss: Hér er átt við þann tíma sem líður frá því kvika nær upp að jökulbotni þar til gos er komið í fullan gang, annaðhvort á hringmynduðum gíg eða gossprungu (mynd 12). Þessi tími er breytilegur frá einu gosi til annars, allt frá 15 mínútum til sólarhringa. Í mati á hættu er eðlilegast að nota stysta tímann, eða **15 mínútur**.

Ferðatími undir jökli: Sá tími sem það tekur bræðsluvatn að flæða frá gosstað að þeim stað, ofarlega í skriðjökli, þar sem vatn nær upp á yfirborð (mynd 12). Þessi tími er augljóslega mun lengri fyrir gos innan öskjunnar en fyrir gos í hlíðum fjallsins. Fyrir sprungugos í hlíðum má reikna með að vatn fari strax að renna frá gosstað á yfirborðið og því er hann settur sem núll í því tilfelli. Fyrir gos í öskjunni gæti þessi tími verið um 30 mínútur í meðalstóru gosi en e.t.v. aðeins 5 mínútur í stóru gosi. Samalagður tími gosupphafs og ferðatíma undir jökli er því **20–45 mínútur** fyrir gos í öskjunni en **15 mínútur** fyrir gos í hlíðum fjallsins.

Ferðatími niður fjallhlíð/jökul: Þetta er ferðatími frá þeim stað þar sem hlaup nær upp á yfirborð jökulsins (mynd 12). Þessi tími er metinn í kafla 2.3 þar sem tölvulíkan reiknar framrás hlaups á yfirborði.

[33] Witham, 2005.



Mynd 12. Þróun eldgoss í öskju Öræfajökuls. Myndin sýnir upphaf; þegar vatn fer að leita frá gosstað undir jökli; þegar vatn brýst upp úr jöklinum ofarlega í skriðjökli; og þegar vatnið nær jökuljaðri.

2.2.2 Niðurstöður: Reiknaðar stærðir hlaupa

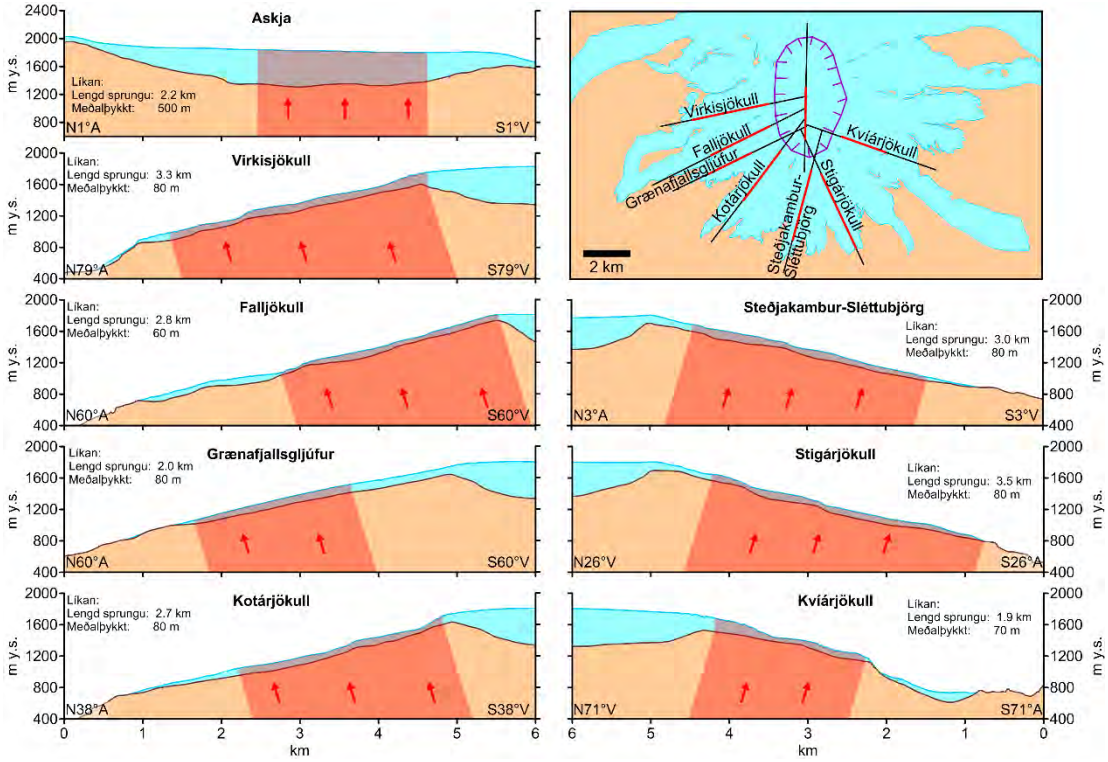
Niðurstöður útreikninga á stærðum hlaupa eru settar fram í töflu 2. Efst í töflunni eru tölur fyrir sprungugos í hlíðum (myndir 5 og 13). Síðan koma tölur um bráðnun sem gæti orðið í meðalstórum og stórum gosum í öskjunni. Þar er forsendan sú að 70% þeirrar orku sem kemur upp í gosinu (varmaorka gosefnanna) nýtist nánast samstundis til bráðnunar samfara tvístrun kvikunnar. Að lokum koma reiknaðar tölur fyrir gjóskuflóð á mismunandi vatnasviðum í Öræfajökli. Í öllum tilfellum er bætt 25% við reiknað vatnsrennsli, til að taka tillit til íss sem hlaupin flytja með sér og framburðar gosefna í formi vatnsborinnar gjósku.

Tafla 2. Mat á stærðum hlaupa vegna eldgosa í Öræfajökli.

Gerð goss kvikuflæði í gosum í öskju	**Lengd gossprungu (m)**	**Ísþykkt (m)**	**Stærð hlaups (m^3/s)**
Sprungugos í hlíðum			
Svínafellsjökull	-	-	0
Virkisjökull	3300	80	5.800
Falljökull	2800	60	4.900
Grænafjallsgljúfur	2000	80	3.500
Kotárjökull	2700	80	4.700
Stigárjökull	3500	80	6.100
Kvíárjökull	1900	70	3.300
Steðjakambur-Sléttubjörg	3000	80	5.200
Hrútárjökull	-	-	0
Gos í öskjunni			
Lítið-meðal - 1000 tonn/s	1-5 km	~500	2.300
Stórt - 10.000 tonn/s	1-5 km	~500	23.000
Mjög stórt - 100.000 tonn/s	1-5 km	~500	230.000
Gjóskuflóð			
Svínafellsjökull			600-4.000
Virkisjökull			2.500-16.700
Falljökull			2.500-16.700
Kotárjökull			1.200-8.300
Steðjakambur-Sléttubjörg			1.200-8.300
Stigárjökull			1.200-8.300
Kvíárjökull			2.500-16.700
Hrútárjökull			600-4.000

Tölurnar bera með sér að raunhæft sé að gera ráð fyrir að sprungugos valdi hlaupum á bilinu 3.000–6.000 rúmmetrum á sekúndu. Þau væru því álíka eða heldur stærri en stærstu hlaupin sem komu niður Gígjökul fyrstu tvo dagana í gosinu í Eyjafjallajökli 2010. Eins og tafla 2 ber með sér geta stórgos valdið mjög mikilli bráðnun og að fyllilega raunhæft sé að rennsli nái eða fari yfir 100.000 rúmmetra á sekúndu.

Gjóskuflóð valda aðeins alvarlegri hættu í stærstu gosum. Í litlum og meðalstórum gosum eru gjóskuflóð yfirleitt svo smá í sniðum að líkur á hlaupum vegna þeirra eru litlar. Mat á stærð jökulhlaupa sem orsakast geta af gjóskuflóðum er mun óvissara en fyrir hin tilfellin. Þó er hægt að meta stærðargráðu slíkra flóða. Hér er reiknað með falli gosmakkar þegar flæði fastra gosefna er 10^8 kg/s (100.000 tonn á sekúndu) og að í gjóskuflóðinu séu gosefni sem komu upp úr gígnum á tveimur mínútum áður en mökkur hrynur. Svona mikið kvikuflæði verður aðeins í stærstu gosum, eins og Öskjugosinu 1875, sennilega í upphafi stærstu Heklugosa og Öræfajökulsgosinu 1362. Reikningarnir benda til þess að gera verði ráð fyrir hlaupum sem



Mynd 13. Þversnið eftir mögulegum gossprungum í hlíðum Öræfajökuls og í öskjunni. Myndirnar sýna að ísþykkt er víðast hvar lítil nema innan öskjunnar.

nái 10.000–20.000 rúmmetrum á sekúndu. Jafnframt er rétt að taka fram að gjóskuflóð sem ætti upptök í gíg nærri norðvesturbrún öskjunnar gæti flætt niður á syðri hluta hjarnsvæðis Svínafellsjökuls og valdið hlaupi undan honum. Stærð slíks hlaups gæti verið allt að 4.000 rúmmetrar á sekúndu.

2.3 Hermun jökulhlaupa

Hermun á framrás, útbreiðslu, rennslishraða og dýpi er sú aðferð sem algengast er að nota til að meta tjónmætti flóða. Tjónmættið (á skalanum lítið til geysimikið) er síðan skilgreint á grundvelli hermunarinnar í kafla 3. Hermun gagnast einnig til að meta hraða framrásar hlaupanna. Hermunin fellst í því að nákvæmt starfrænt hæðarlíkan (kort) og jöfnur sem lýsa flæði vatns eru leystar með tölulegum reikningum í stafrænu hæðarlíkani (korti) í tölvu. Tölvan er látin reikna framrás vatns um líkanið. Nokkrar aðferðir er hægt að nota og fer eftir aðstæðum hver hentar best[34]. Fyrir hlaup úr Öræfajökli vegna eldgosa þarf að meta nægilega mörg tilvik eða sviðsmyndir af sprungugosum í hlíðum, gosum inni í öskjunni og vegna gjóskuflóða til að fá heildstætt mat á umfangi og áhrifasvæðum. Í þessum tilgangi voru tíu sviðsmyndir skoðaðar með mismunandi upptakastaði, stærðir og gerðir hlaupa. Sviðsmyndunum er lýst í töflu 3.

[34] Kristín Martha Hákonardóttir og fleiri, 2005; Sigurður Lárus Hólm og Snorri Páll Kjaran, 2005.

Tafla 3. Sviðsmyndir skoðaðar í hermunum jökulhlaupa úr Öræfajökli.

Bráðnunar sviðsmynd	Jöklasvæði	Orsök	Upptakasvæði	Hámarks-rennsli (m^3/s)
S01c	Virkisjökull – Falljökull	Gos í öskju	Falljökull – Virkisjökull	**100.000**
S01f		Gos í hlíðum jökuls	Falljökull – Virkisjökull	**10.000**
S02c	Suðurhlíðar	Gos í öskju	Kotárjökull	**100.000**
S02f		Gos í hlíðum jökuls	Kotárjökull	**10.000**
S03f		Gos í hlíðum jökuls	Stigárjökull	**10.000**
S03p		Gjóskuflóð	Austan við Rótarfjallshnúk*	**30.000**
S04c	Kvíarjökull	Gos í öskju	Kvíárjökull	**100.000**
S04f		Gos í hlíðum jökuls	Kvíárjökull	**10.000**
S05p	Svínafellsjökull	Gjóskuflóð	Sunnan við Svínafellshrygg	**10.000**
S06p		Gjóskuflóð	Norðan við Svínafellshrygg	**10.000**

*Kotárjökull ekki með

Hér er eingöngu reynt að meta stærð og umfang hlaupa sem fylgja upphafi eldgosa. Hlaup sem kunna að verða síðar í gosum, vegna stíflu og uppsöfnunar vatns á gosstað eða af öðrum orsökum eru ekki könnuð hér. Algengast er að hlaup sem fylgja upphafi eldgosa hafi mesta rennslið og útbreiðsluna, t.d. á það við um Kötluhlaup[35]. Þá má reikna með að umferð og vist fólks á svæðum sem rýmd hafa verið vegna flóðahættu í upphafi gosa verði mjög takmörkuð, ef nokkur, meðan á eldgosi stendur og hlaupahætta er viðvarandi.

2.3.1 Aðferðir, flóðahermunarlíkanið Samos

Ákveðið var að nota forritið SAMOS við hermun hlaupa í Öræfajökli.[36] SAMOS var smíðað til að reikna framrás þurra snjóflóða. Það gefur kost á að breyta eiginleikum vökvans sem látinn er flæða yfir stafrænt landslag. Forritið var notað hér á landi 2005 til að herma jökulhlaup niður brattar suðurhlíðar Eyjafjallajökuls[37] og þótti gefast vel. Mikið magn gosefna (gjósku) í hlaupum eykur eðlismassa vökvans og breytir flæðieiginleikum hans. Sama gildir um ís sem hlaupin flytja með sér. Eigi að taka tillit til þessara þátta í hermun án þess að gera reikninga svo flókna að þeir verði óframkvæmanlegir, verður að gera miklar einfaldanir. Hér er tilvist íss og vatnsborinnar gjósku tekin með í reikninginn með svokölluðum hrýfisstuðli. Með honum er reynt að taka saman í eina tölu samanlögð áhrif farvegar (því færri sem fyrirstöður eru því lægri er hrýfisstuðullinn) og vökvans (því meira sem er af gjósku og ís, því

[35] Guðrún Larsen og fleiri, 2013b.
[36] Ásdís Helgadóttir og fleiri, 2015.
[37] Kristín Martha Hákonardóttir og fleiri, 2005.

hærri hrýfisstuðull). Prófaðar voru þrír mismunandi hrýfisstuðlar (Manning stuðlar) með gildi 0,05, 0,10 og 0,15 og niðurstöður um útbreiðslu hlaupa frá Virkis- og Falljöklum og Kotárjökli bornar saman við útbreiðslu hlaupanna 1362 og 1727. Í ljós kom að fyrir hæsta stuðulinn (0,15) varð útbreiðslan of lítil miðað við sennileg gildi á rennsli í þessum hlaupum. Því var ákveðið að nota 0,05 og 0,10 og kort af útbreiðslu, dýpi og straumhraða byggðust á niðurstöðum fyrir bæði tilfellin.

Þar sem jökulhlaup sem orsakast af eldgosum í jöklum flytja oft með sér ógrynni af gjósku og öðrum lausu seti geta orðið miklar breytingar á farvegum og aurkeilum. Hlaupin geta eftir atvikum grafið niður farvegi eða hlaðið undir sig aurkeilum og fyllt í eldri farvegi eftir því hve farvegurinn er brattur. Ekki er hægt að herma þessa hegðun með SAMOS, þ.e. þróun farveganna meðan á hlaupinu stendur. Því verður að hafa vissan vara á varðandi aðstæður eftir hlaup. Fyrsta hlaup getur því breytt landinu og þau sem koma í kjölfarið t.d. runnið á aurkeilu sem gæti verið mörgum metrum hærri en landið var áður. Þetta getur breytt rennslisleiðum og haft áhrif á hvar hlaupin renna fram á láglendinu.

Við hermunina voru notuð nákvæm stafræn hæðarlíkön sem mæld hafa verið úr flugvél með Lidar-tækni á árunum 2011 og 2012. Möskvastærð í þessum stafrænu kortum er 5 metrar og óvissa hæðar í hverjum punkti er talin undir hálfum metra.[38]

Reikningar fara þannig fram að komið er fyrir áætluðum skammti af vatni í þeirri hæð í jöklinum sem talin er líkleg, yfirleitt ofarlega í brattri hlíð. SAMOS reiknar síðan framrás niður hlíðina og út á láglendið. Eftir að hlaup er komið fram á láglendi og rennsli fer aftur að minnka, er hermun hætt. Flóði er ekki fylgt eftir til sjávar og engin tilraun gerð til að skoða útbreiðslu á söndunum sunnan og vestan við byggðina enda eru þar engin mannvirki. Niðurstöðum um útbreiðslu, framrásartíma, dýpi og straumhraða var skipulega safnað í gagnagrunn og þær settar fram sem röð af kortum.

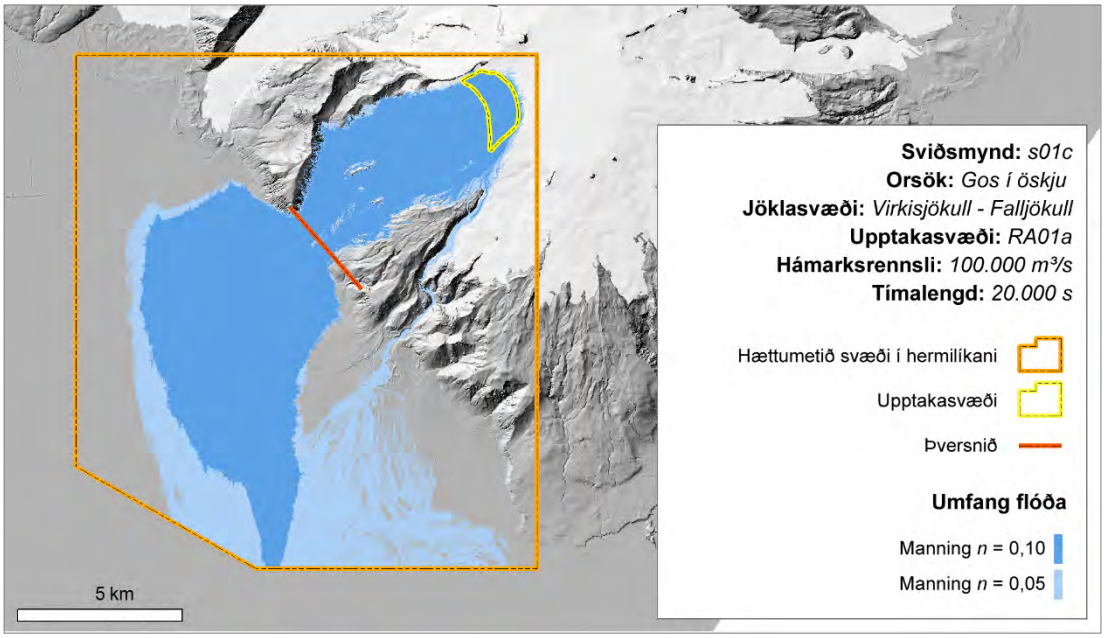
2.3.2 Útbreiðsla og dýpi jökulhlaupa

Niðurstöður um útbreiðslu fyrir hverja sviðsmynd eru settar fram á korti (myndir 14–23). Niðurstöður um stórhlaup vegna stórgoss í öskju Öræfajökuls á vatnasviðum Virkisjökuls-Falljökuls, Kotárjökuls og Kvíárjökuls þar sem hámarksrennsli er 100.000 rúmmetrar á sekúndu eru á myndum 14–16. Sviðsmyndir fyrir hlaup af stærðinni 10.000 rúmmetra á sekúndu vegna gosa í hlíðum eru á myndum 17–20. Sviðsmyndir fyrir hlaup vegna gjóskuflóðs eru á myndum 21–23. Kortin bera með sér að landslag er það afgerandi víðast hvar að ekki er stór munur á útbreiðslusvæðum hlaupa þó svo rennsli sé tífalt fyrir öskjugosin, a.m.k. ekki fyrstu kílómetrana á leið hlaupanna frá jökuljaðri. Stóru hlaupin renna þó mun hraðar og eru dýpri.

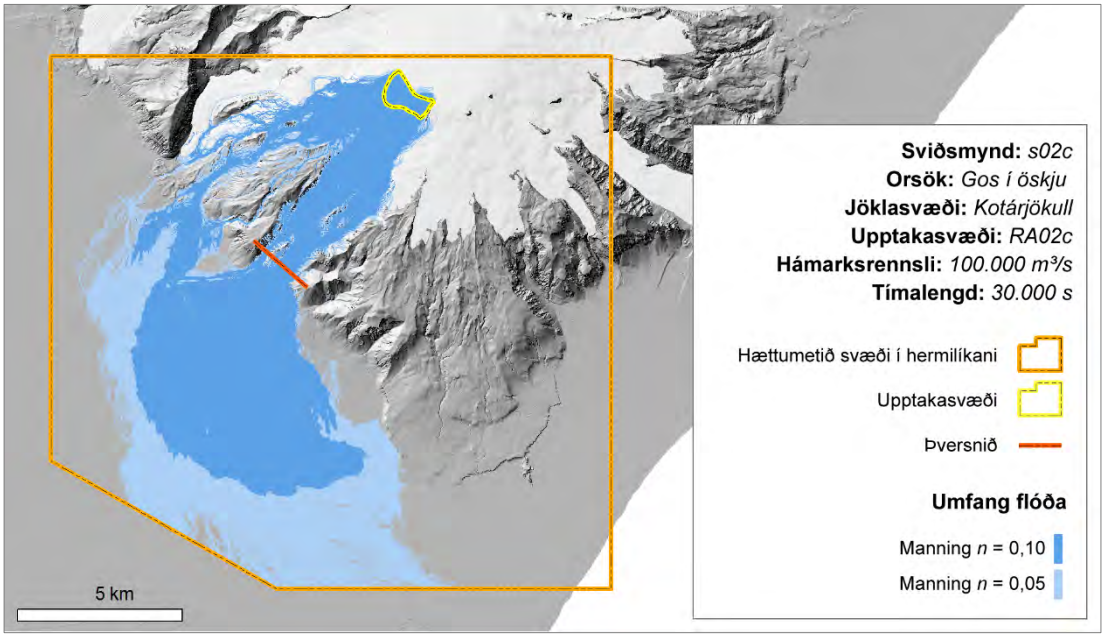
[38] Tómas Jóhannesson og fleiri, 2013.

Þegar horft er á útbreiðslu hlaupa við einstakar sviðsmyndir, má draga eftirfarandi ályktanir:

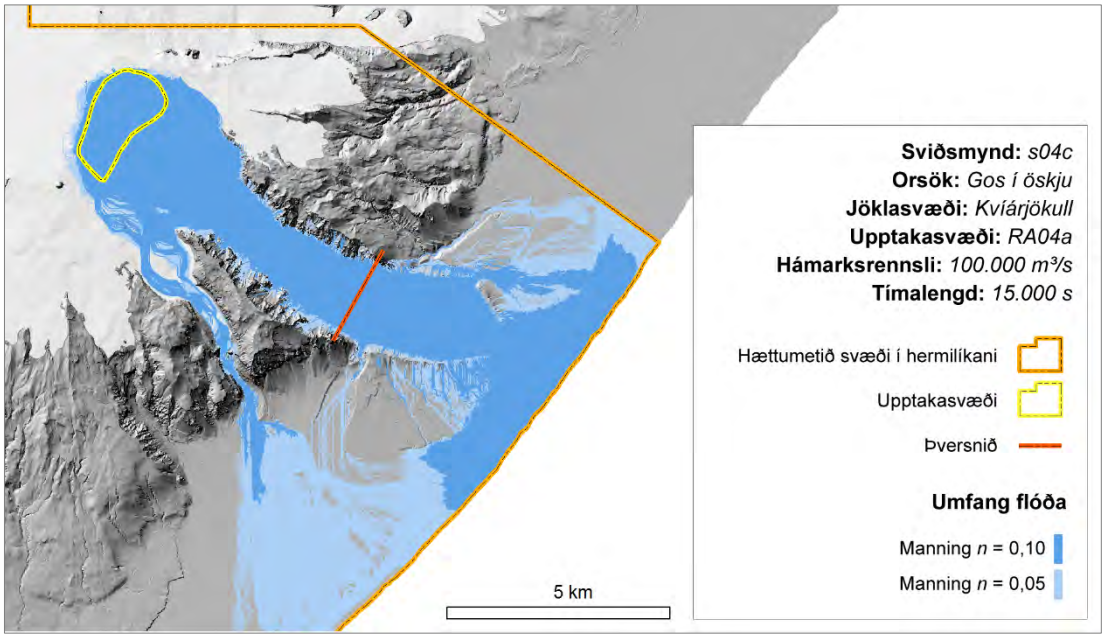
- Í tilfellum stóru hlaupanna (100.000 m^3/s) fer lítill hluti vatnsins yfir í aðra farvegi, t.d. fer dálítið af vatni niður Kotá í stórhlaupi niður Virkisjökul-Falljökul. Þá fer verulegt vatn niður Hólárjökul við stórhlaup frá Kvíárjökli. Að hluta til stafar þetta flæði á milli svæða af reikniaðferðinni og takmörkunum hennar. Hins vegar verður að gera ráð fyrir því að í stóratburðum af þessu tagi, ef til þeirra kæmi, myndu hlaup koma niður á fleiri en einum stað. Það er í samræmi við það sem gerðist 1362 og 1727.
- Í stórgosum geta hlaup vegna einstakra gjóskuflóða komið niður alla jökla og öll gil í einu (19. mynd). Þetta undirstrikar að enginn staður í Öræfasveit getur talist öruggur í slíkum hamförum.
- Hlaup vegna gjóskuflóðs sem færi yfir syðri hluta vatnasviðs Svínafellsjökuls gæti flætt fram jökulinn, fram af honum og yfir meirihluta svæðisins framan við jökulinn. Reiknaðar voru sviðsmyndir fyrir gjóskuflóð sem færi fram annars vegar yfir Hvannadalshrygg vestan Hvannadalshnjúks og hins vegar austan hans, gegnum skarðið milli Hvannadalshnjúks og Snæbreiðar. Útbreiðslusvæðin eru svipuð, en yrði þó heldur stærra ef hlaupið ætti upptök norðan Hvannadalshnjúks.
- Vatnsdýpi í hlaupum er sýnt á mynd 24. Samkvæmt hermuninni yrði dýpi yfir 50 sentímetrum á langstærstum hluta þess svæðis sem hlaup ná til, og reyndar yfir 2 metrum á meirihluta þess. Niðurstöður allra sviðsmynda eru hér teknar saman á þrjú kort, fyrir vesturhlutann frá Skaftafellsá að Hofi, frá Hofi og austur fyrir Hnappavelli og lokum fyrir svæðið austur fyrir Kvíárjökul. Að sjálfsögðu eru sviðsmyndirnar fyrir stærstu hlaupin ráðandi þar sem þeirra myndi gæta. Rétt er að taka fram að mjög litlar líkur eru á að í einu gosi yrði útbreiðslan og vatnsdýpi eins og kortin sýna um allt svæðið. En í ljósi þess að ekki er hægt með vissu að segja fyrir um hvar hlaup kæmi fram ef til goss kæmi, markar kortið þau svæði sem gætu orðið fyrir áhrifum.
- Samanburður á mögulegum áhrifasvæðum sýnir einnig að áhrif stórgosa í öskjunni yrðu margföld á við sprungugos í hlíðum. Af 347 km^2 svæði sem skilgreint hefur verið sem hugsanlegt hættusvæði, reiknast 284 km^2 inni á útbreiðslusvæði mögulegra hlaupa af öllum gerðum. Ef stórgosum í öskjunni er sleppt, minnkar útbreiðslusvæðið (vegna sprungugosa í hlíðum og gjóskuflóða) í 42 km^2.



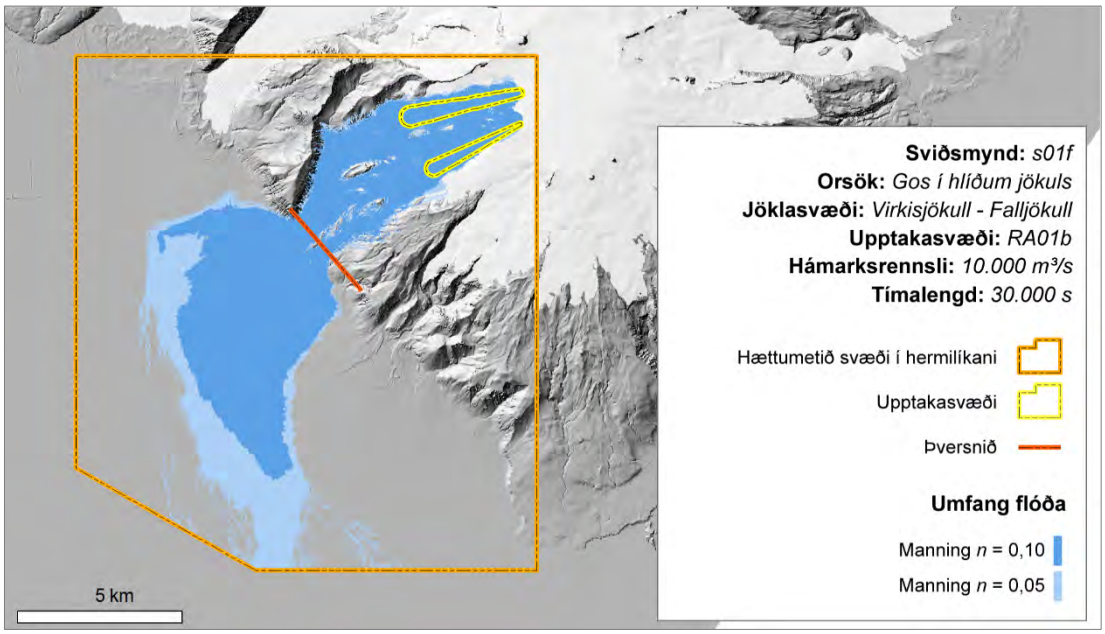
Mynd 14. Útbreiðsla reiknaðs hlaups vegna goss í öskju og hlaupi niður Virkis- og Falljökla með hámarksrennsli 100.000 m^3/s.



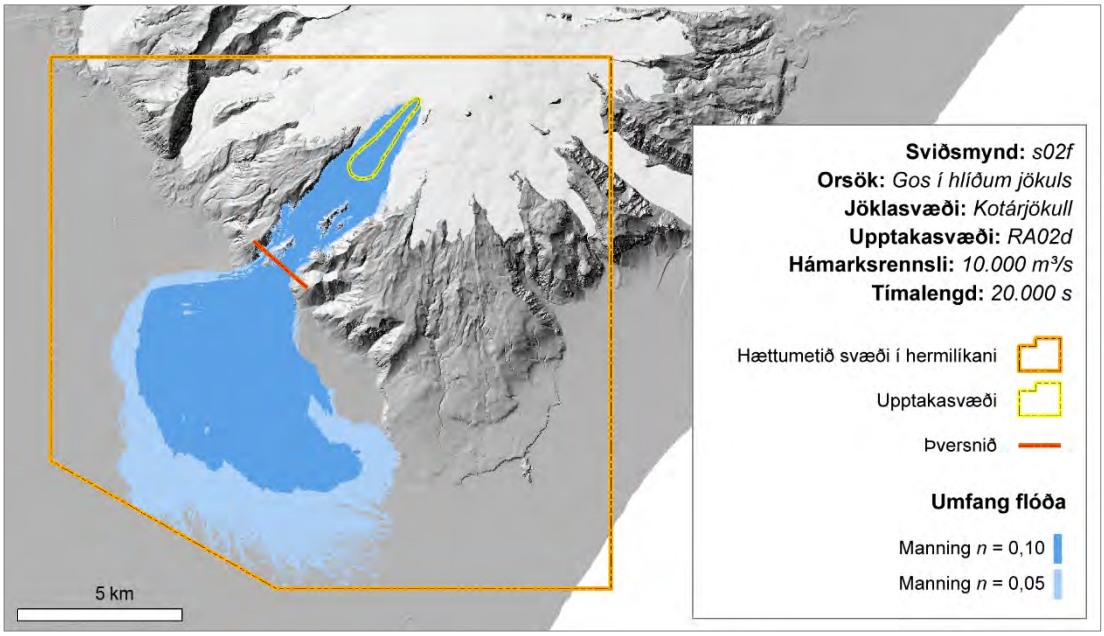
Mynd 15. Útbreiðsla reiknaðs hlaups vegna goss í öskju og hlaupi niður Kotárjökul með hámarksrennsli 100.000 m^3/s.



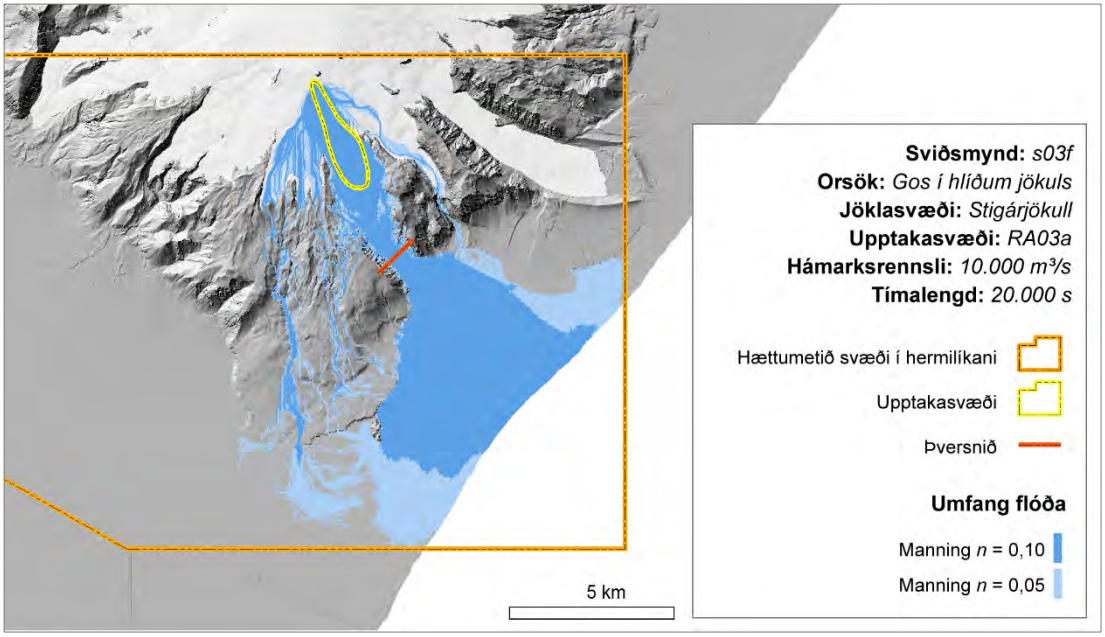
Mynd 16. Útbreiðsla reiknaðs hlaups vegna goss í öskju og hlaupi niður Kvíárjökul með hámarksrennsli 100.000 m^3/s.



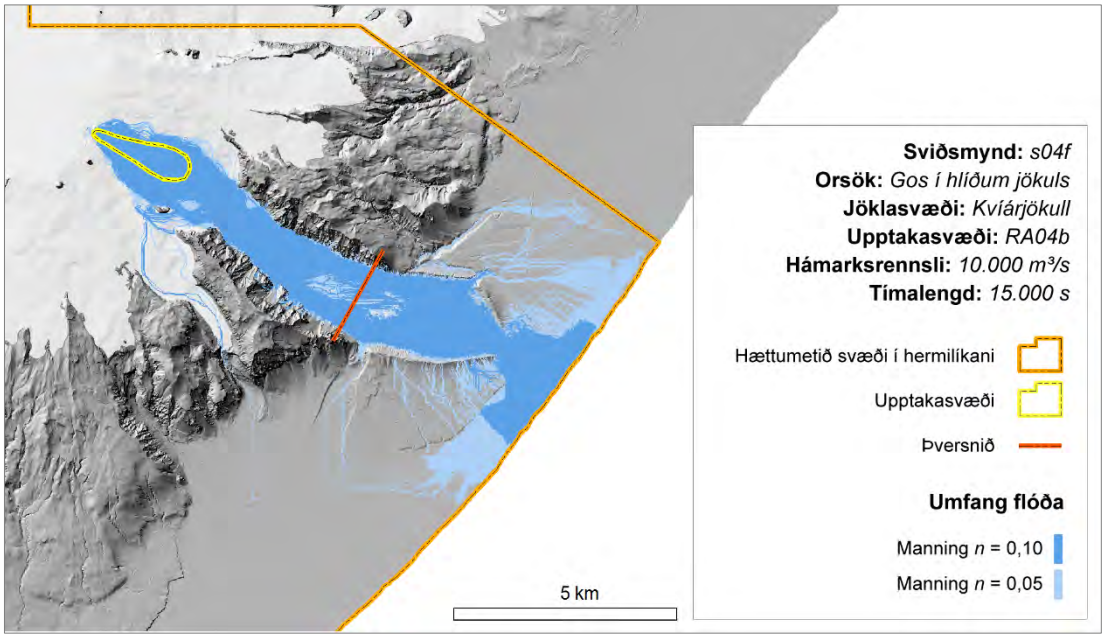
Mynd 17. Útbreiðsla reiknaðs hlaups vegna goss í hlíðum og hlaupi niður Virkis- og Falljökla með hámarksrennsli 10.000 m^3/s.



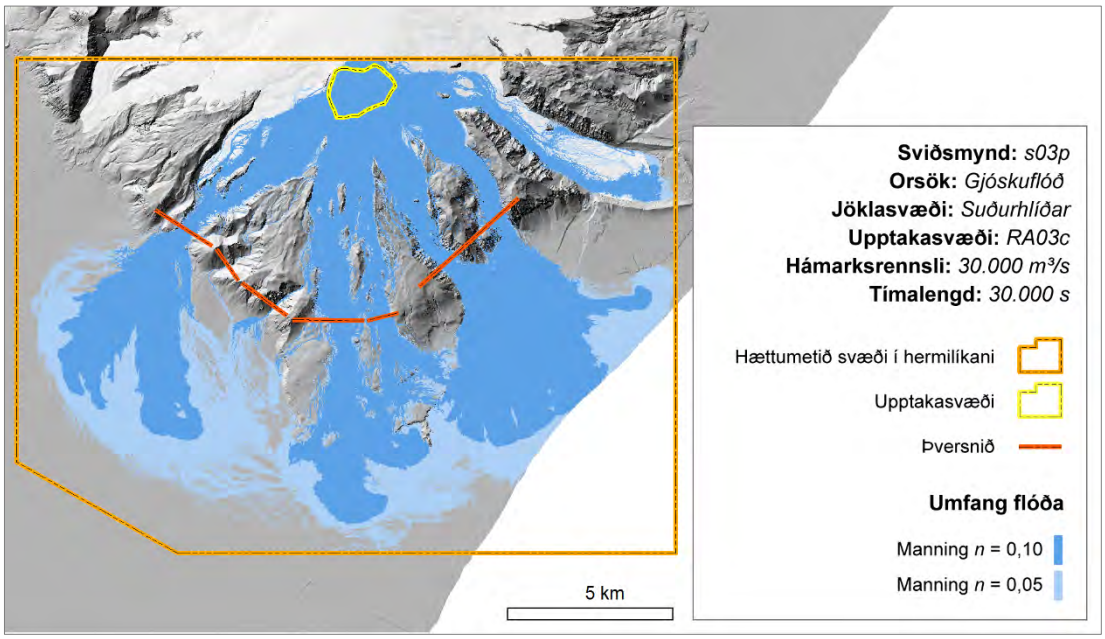
Mynd 18. Útbreiðsla reiknaðs hlaups vegna goss í hlíðum og hlaupi niður Kotárjökul með hámarksrennsli 10.000 m^3/s.



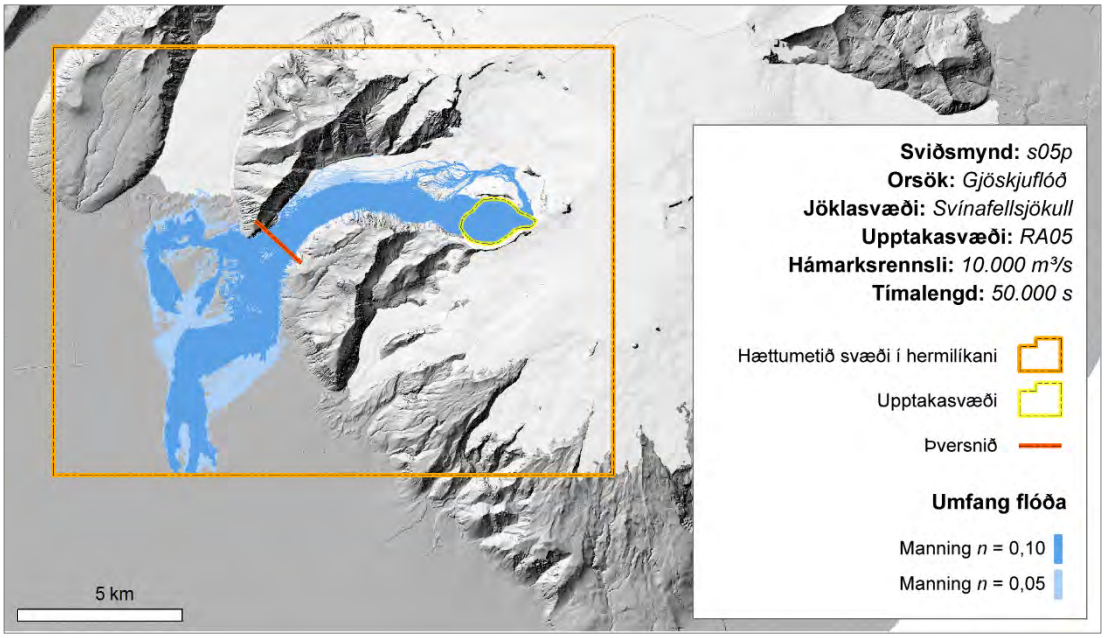
Mynd 19. Útbreiðsla reiknaðs hlaups vegna goss í hlíðum og hlaupi niður Stigárjökul með hámarksrennsli 10.000 m^3/s.



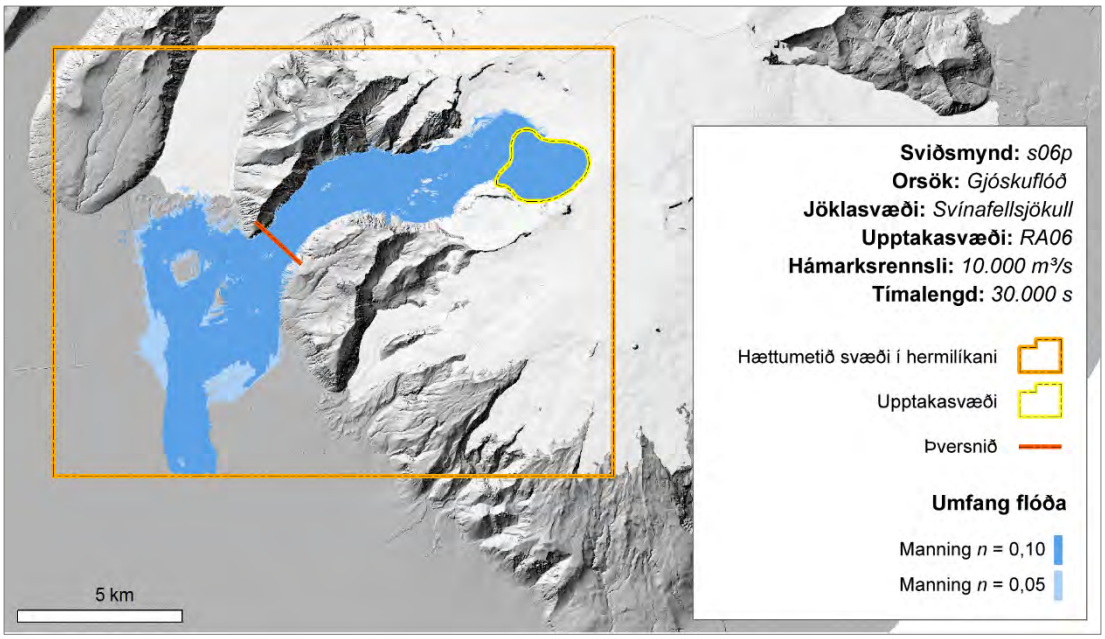
Mynd 20. Útbreiðsla reiknaðs hlaups vegna goss í hlíðum og hlaupi niður Kvíárjökul með hámarksrennsli 10.000 m^3/s.



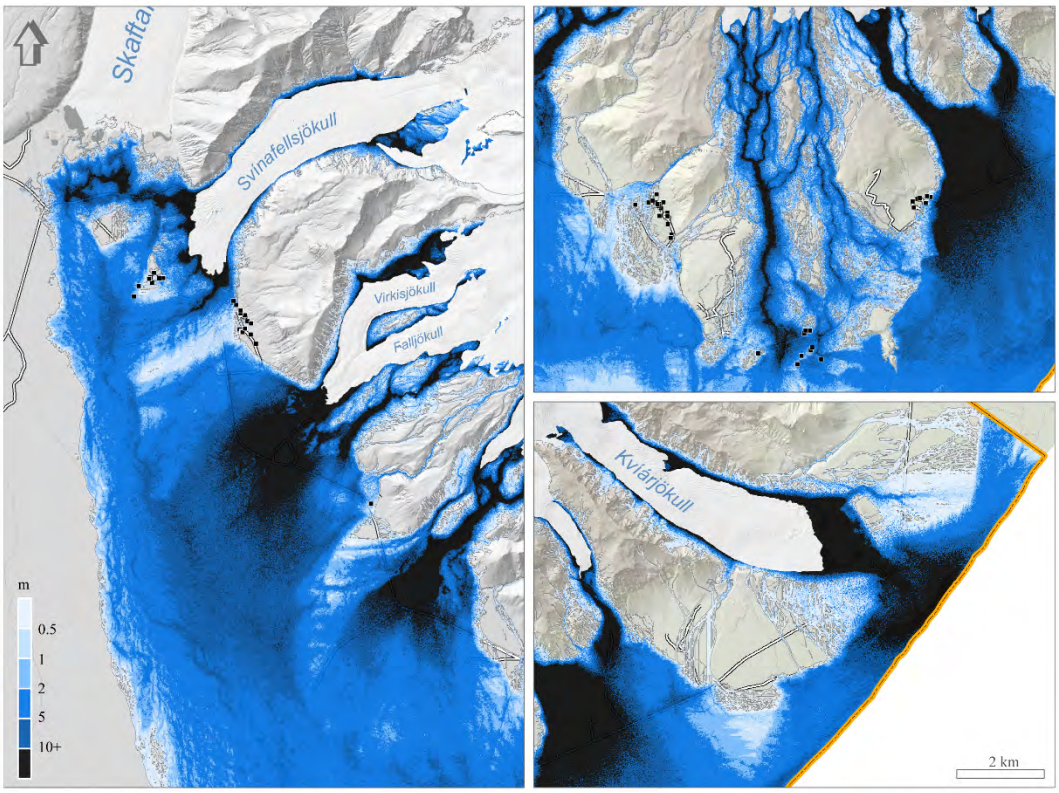
Mynd 21. Útbreiðsla reiknaðs hlaups vegna gjóskuflóðs syðst í öskjunni og samanlögðu hámarksrennsli niður alla farvegi 30.000 m^3/s.



Mynd 22. Útbreiðsla reiknaðs hlaups með rennsli 10.000 m^3/s við sprengigos nyrst í öskjunni og gjóskuflóð yfir syðri hluta ísasvæðis Svínafellsjökuls.



Mynd 23. Útbreiðsla reiknaðs hlaups með rennsli 10.000 m^3/s við sprengigos nyrst í öskjunni og gjóskuflóð yfir nyrðri hluta ísasvæðis Svínafellsjökuls.

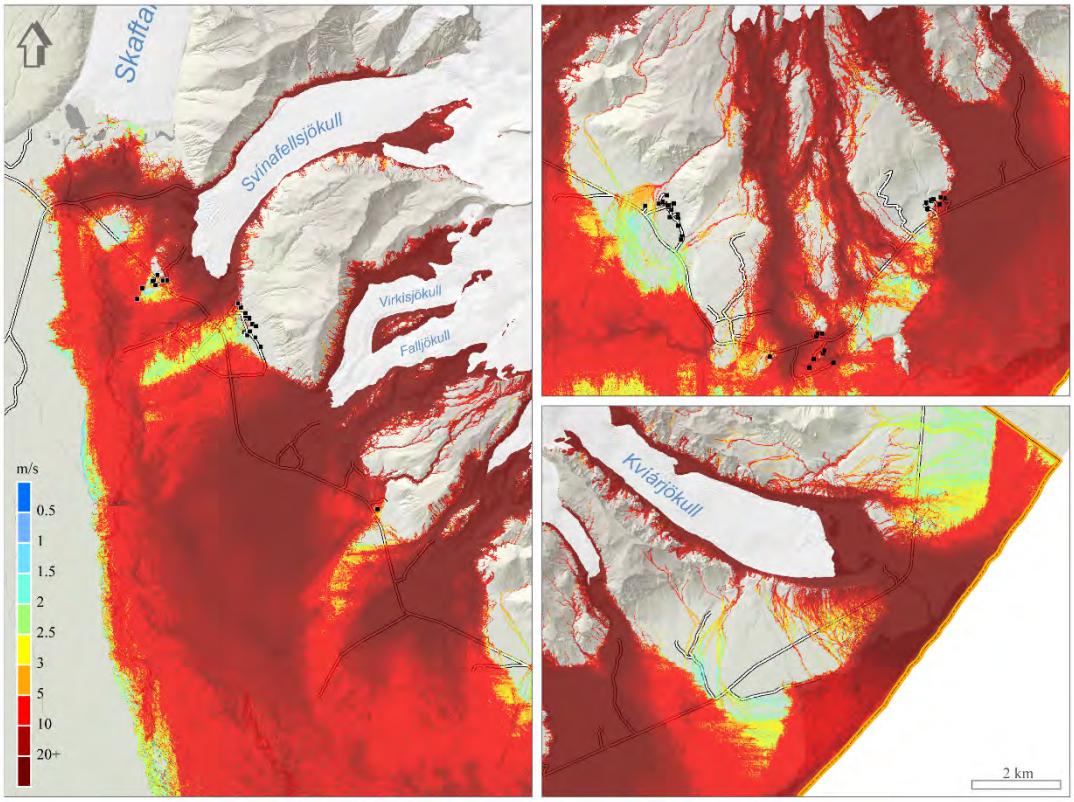


Mynd 24. Reiknað dýpi jökulhlaupa. Samantekt allra sviðsmynda og tekið mesta flóð í hverju tilfelli. Ekki eru líkur á að allt þetta svæði verði fyrir hlaupi í sama gosi.

2.3.3 Straumhraði og ferðatími jökulhlaupa

Reiknaður straumhraði á svæðum utan jökuls er víða yfir þremur metrum á sekúndu (mynd 25). Hlaupin eru því mjög straumhörð og töluvert hraðari en straumharðar ár eru allajafna. Straumhraði í hlaupunum niður skriðjökla eða gil reiknast 12–28 metrar á sekúndu (43–100 km/klst.) og mesti hraði í hlíðunum er jafnvel ennþá hærri (22–42 m/s). Þetta er í góðu samræmi við það sem vitað er um hlaup í bröttum hlíðum í eldfjöllum, bæði hér á landi og annars staðar í heiminum.

Þegar meta á þann tíma sem til reiðu er frá því gos hefst þar til hlaup nær að þjóðvegi eða byggð, þarf að leggja saman tímann sem fer í upphaf goss, ferðatíma undir jökli og ferðatímann niður fjallshlíð og að vegi. Lengd fyrstu tveggja tímabilanna er metin í kafla 2.2.1 og sá þriðji er reiknaður með SAMOS. Niðurstöður þessa mats eru settar fram fyrir gos í öskjunni á myndum 26 og 27. Í ljós kemur að þessi tími reiknast aðeins 26–27 mínútur. Niðurstöður fyrir sprungugos í hlíðum er á myndum 28 og 29. Tilsvarandi tölur eru 21–23 mínútur. Þessir



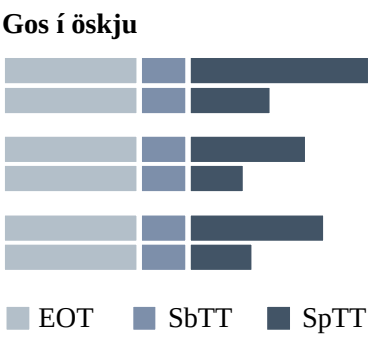
Mynd 25. Reiknaður straumhraði jökulhlaupa. Samantekt allra sviðsmynda og tekið mesta flóð í hverju tilfelli. Ekki eru líkur á að allt þetta svæði verði fyrir hlaupi í sama gosi.

stuttu tímar endurspegla hraðann niður brattar hlíðarnar og hve stutt er frá jökli að þjóðvegi. Hliðstæðir tímar fengust fyrir hermun á hlaupum niður sunnanverðan Eyjafjallajökul[39].

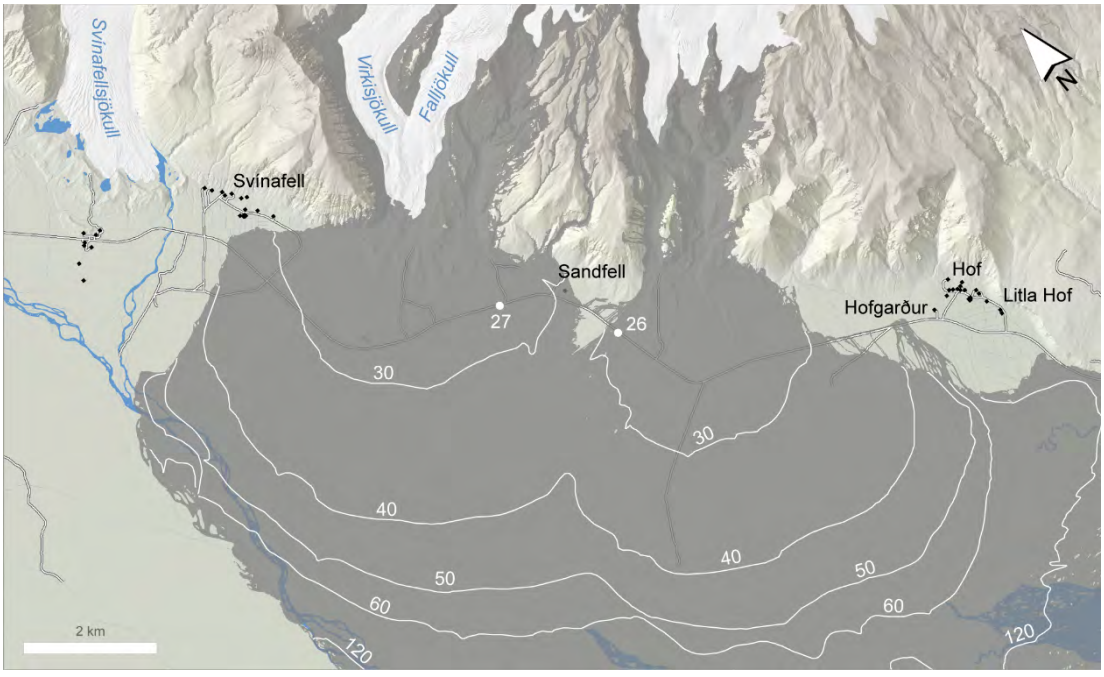
Fyrir hlaup sem orsakast af gjóskuflóðum reiknast tími frá því gjóskuflóð myndast þar til jökulhlaup nær að þjóðvegi 23 mínútur fyrir Svínafellsjökul (mynd 30) og 13 mínútur fyrir veginn 1 kílómetra austan Hnappavalla (mynd 31). Þetta er mjög stuttur tími, en rétt er að taka fram að svo til útilokað er að gos geti hafist með þessum hætti, þar sem gosið þarf fyrst að bræða eða brjóta sér leið til yfirborðs gegnum jökulinn.

[39] Kristín Martha Hákonardóttir og fleiri, 2005.

	Manning n	EOT	SbTT	SpTT	AT
Kvíárjökull	0.10	15	5	20	**40**
	0.05	15	5	9	**29**
Kotárjökull	0.10	15	5	13	**33**
	0.05	15	5	6	**26**
Falljökull - Virkisjökull	0.10	15	5	15	**35**
	0.05	15	5	7	**27**

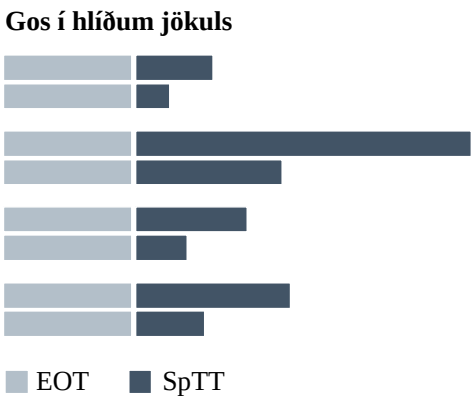


Mynd 26. Reiknaður lágmarkstími (í mínútum) frá upphafi goss í öskju þar til hlaup nær að þjóðvegi (EOT: Upphaf goss; SbTT: Ferðatími vatns undir jökli; SpTT: Ferðatími niður fjallshlíð þar til hlaup nær að þjóðvegi; AT: Tími frá upphafi þar til hlaup nær að þjóðvegi).

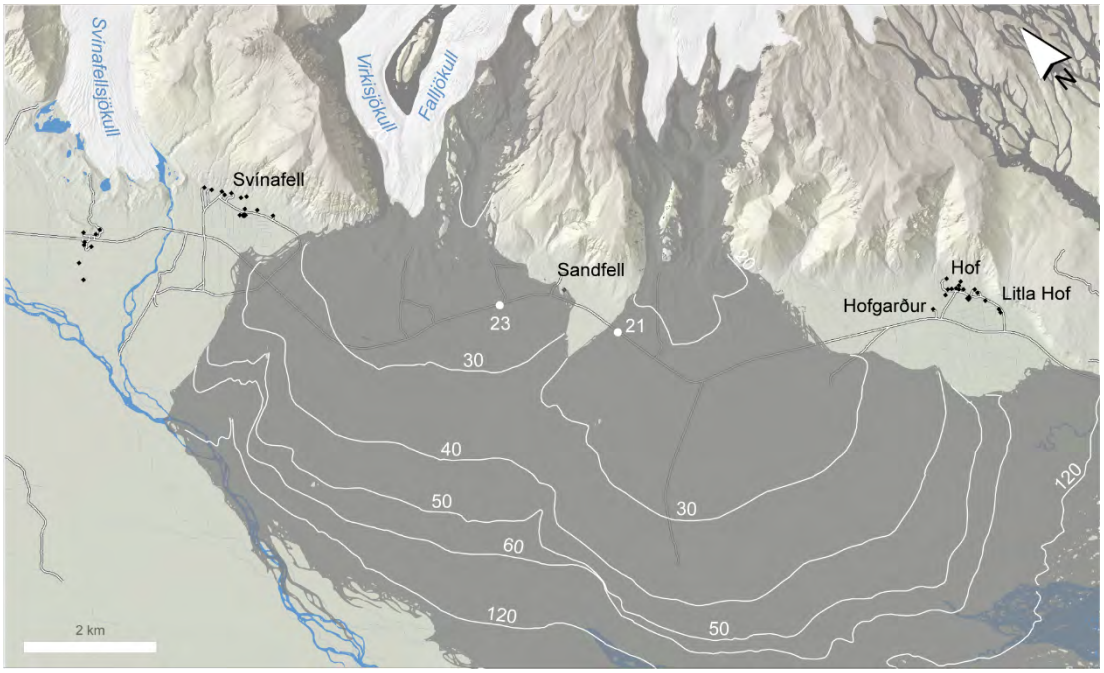


Mynd 27. Reiknaður lágmarkstími (í mínútum) frá upphafi goss í öskju þar til hlaup úr Fall- og Virkisjökli og Kotárjökli nær að þjóðvegi og áfram niður eftir (tímar eru sýndir sem hvítar jafntímalínur en við þjóðveginn sem hvítir punktar).

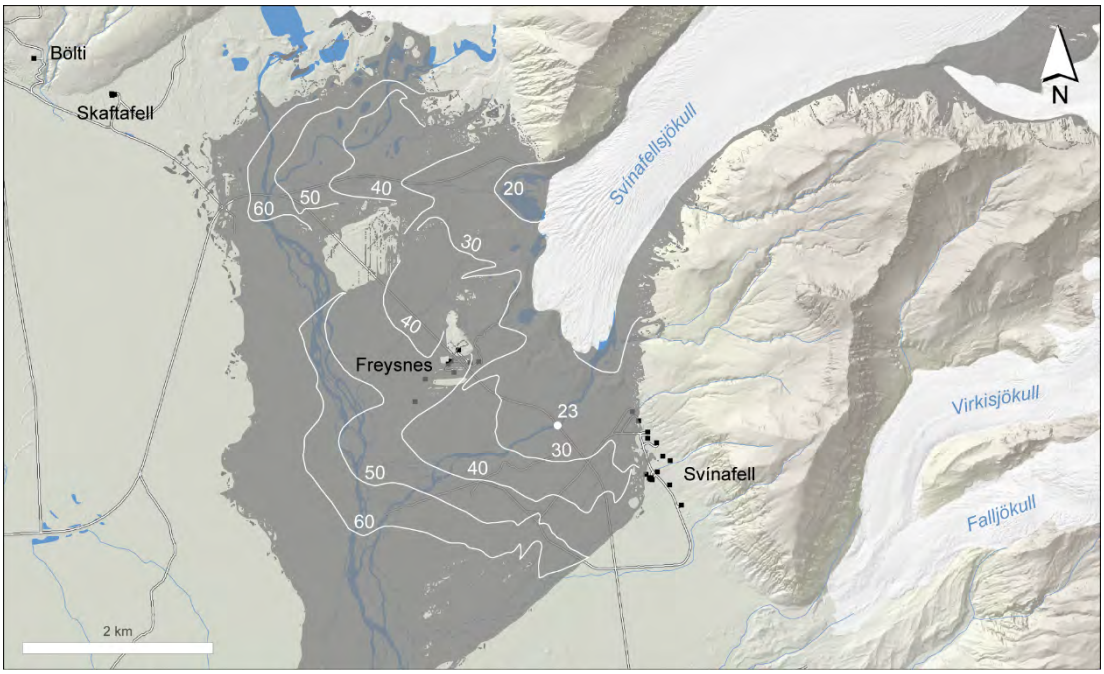
	Manning n	EOT	SpTT	AT
Stígárjökull	0.10	15	9	**24**
	0.05	15	4	**19**
Kvíárjökull	0.10	15	39	**54**
	0.05	15	17	**32**
Kotárjökull	0.10	15	13	**28**
	0.05	15	6	**21**
Falljökull - Virkisjökull	0.10	15	18	**33**
	0.05	15	8	**23**



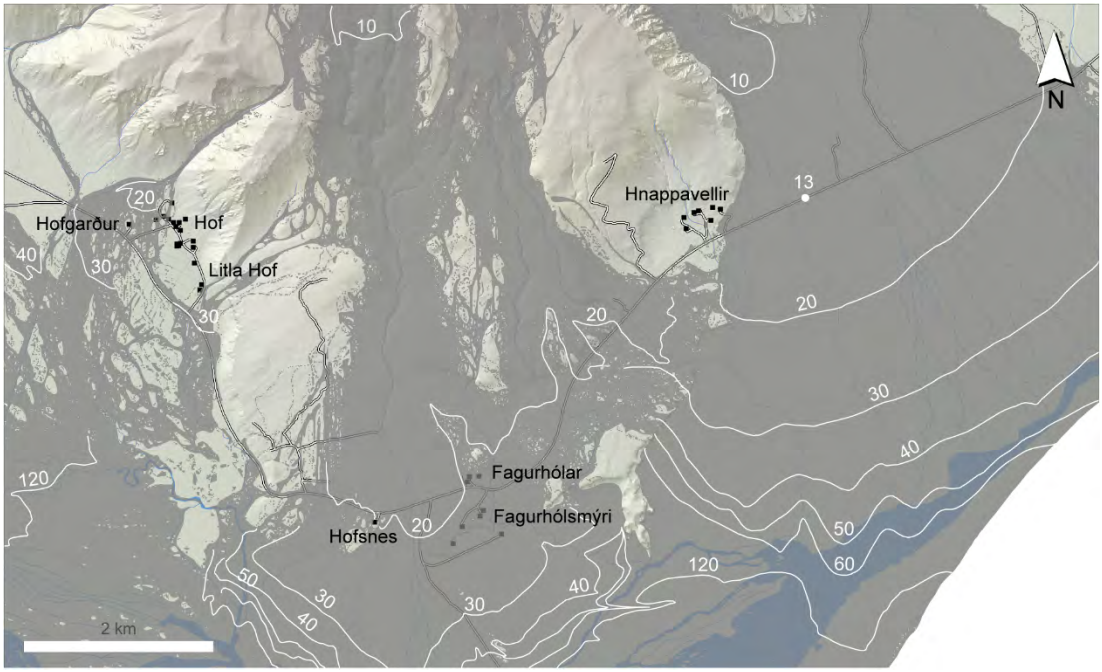
Mynd 28. Reiknaður lágmarkstími (í mínútum) frá upphafi goss í hlíðum jökuls þar til hlaup nær að þjóðvegi (EOT: Upphafstími goss; SbTT: Ferðatími vatns undir jökli; SpTT: Ferðatími niður fjallshlíð þar til hlaup nær að þjóðvegi; AT: Tími frá upphafi þar til hlaup nær að þjóðvegi).



Mynd 29. Reiknaður lágmarkstími (í mínútum) frá upphafi goss í hlíðum jökuls þar til hlaup úr Fall- og Virkisjökli og Kotárjökli nær að þjóðvegi og áfram niður eftir (tímar eru sýndir sem hvítar jafntímalínur en við þjóðveginn sem hvítir punktar).



Mynd 30. Reiknaður lágmarkstími (í mínútum) þar til hlaup vegna gjóskuflóðs í Svínafellsjökli nær að þjóðvegi og áfram niður eftir (tímar eru sýndir sem hvítar jafntímalínur en við þjóðveginn sem hvítur punktur).



Mynd 31. Reiknaður lágmarkstími (í mínútum) þar til hlaup vegna gjóskuflóðs í Suðurhliðum nær að þjóðvegi og áfram niður eftir (tímar eru sýndir sem hvítar jafntímalínur en við þjóðveginn sem hvítur punktur).

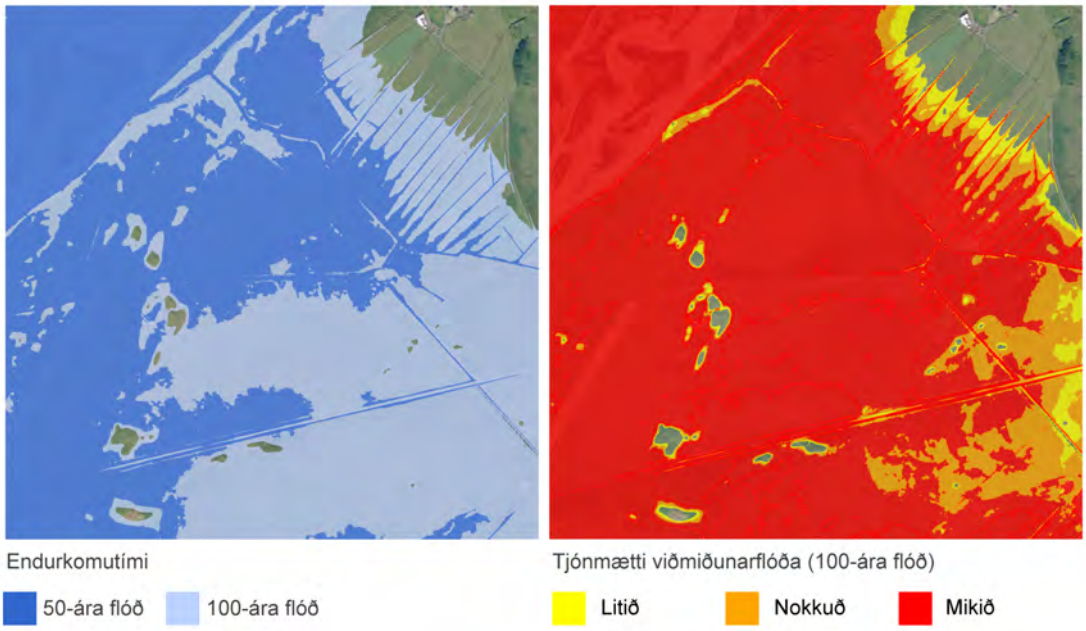
3 Mat á tjónmætti jökulhlaupa og berskjöldun íbúa við Öræfajökul og Markarfljót

Í 2. kafla hér að framan hefur náttúruvá vegna jökulhlaupa í eldgosum í Öræfajökli verið metin. Gostíðnin þar er ekki mikil í samanburði við virkustu eldstöðvar Íslands en vegna byggðarinnar við rætur fjallsins er nauðsynlegt að þekkja þessa vá eins vel og kostur er. Það er forsenda þess að skipulagsyfirvöld, almannavarnayfirvöld og vöktunaraðilar geti brugðist rétt við. Ljóst er að sá tími sem líður frá því gos hefst þar til jökulhlaup gæti náð að þjóðvegi 1 er mjög stuttur. Því veltur öryggi byggðarinnar og fólks á svæðinu á því að forboðar séu þekktir, vöktunarkerfi sé til staðar auk viðbragðsáætlana um rýmingu hættusvæða og aðrar nauðsynlegar aðgerðir. Slíkar áætlanir eru ekki lagðar fram hér. En til að hægt sé að gera traustar áætlanir þarf að stíga skrefi lengra en að skilgreina náttúruvána. Í þessum kafla er áhrifasvæði jökulhlaupa reiknað og tjónmættið metið[40]. Jafnframt er lagt mat á fjölda þess fólks sem væri í beinni hættu, þ.e. er staðsett á svæðum sem reiknuð jökulhlaup gætu farið yfir[41]. Í kafla 3.1 er sett fram aðferðafræði til að meta beina hættu af jökulhlaupum. Þeirri aðferðafræði er síðan beitt á Öræfasveitina í kafla 3.2.

Annað svæði hér á landi þar sem nú er umtalsverð byggð og hætta er á mjög stórum jökulhlaupum með mörg hundruð ára endurkomutíma eru Markafljótsaurar og Landeyjar. Mat var lagt á útbreiðslusvæði, dýpi og útbreiðsluhraða hamfarahlaupa fram Markarfljót vegna eldgosa í norðvesturhluta Kötluöskjunnar fyrir rúmum áratug[42]. Hættusvæðið er þar töluvert öðruvísi, víðfeðm og sléttlend héruð þar sem nú eru frjósöm landbúnaðarsvæði með fjölda íbúa enda 1200 ár síðan stórhlaup fór þar síðast yfir. Þar þurfti því að rekja sem nákvæmast framrás og dýpi flóðanna á tiltölulega sléttu landi. Þessi munur á landslagi kallaði á notkun umfangsmeiri og tímafrekari aðferða til að reikna með nægilegri nákvæmni hlaup við Markarfljót en hægt er að komast af með í bröttum hlíðum eins við Öræfajökul[43]. Tjónmætti var hinsvegar ekki metið á þeim tíma fyrir Markarfljót og Landeyjar. Hér er það gert í kafla 3.3.

Í kafla 3.4 er berskjöldun (berstaða) fólks í Öræfum metin. Þar er metið hversu margir íbúar og ferðamenn gætu verið í hættu vegna jökulhlaups sem orsakaðist af eldgosi í Öræfajökli. Að lokum er sömu aðferðum beitt í kafla 3.5 til að meta berskjöldun fólks gagnvart hamfarahlaupi niður Markarfljót.

[40] Emmanuel Pagneux og Matthew J. Roberts, 2015.
[41] Emmanuel Pagneux, 2015a.
[42] Magnús Tumi Guðmundsson og fleiri, 2005; Sigurður Lárus Hólm og Snorri Páll Snorrason, 2005.
[43] Sigurður Lárus Hólm og Snorri Páll Snorrason, 2005.



Mynd 32. Tilbúið dæmi um flóð og hvernig tjónmættið skiptist í mismunandi stig eftir svæðum. Til vinstri er útbreiðslukort, annars vegar fyrir flóð með 50 ára og hins vegar 100 ára endurkomutíma. Hægra megin er kort sem sýnir tjónmætti fyrir 100 ára flóðið, hér flokkað sem lítið, nokkuð eða mikið. Þar sem tjónmætti er metið sem mikið má búast við miklu eignatjóni og að fólk sem væri inni á svæði væri í mikilli lífshættu.

3.1 Aðferðir við mat á hættu og tjónmætti

Tjónmætti vegna jökulhlaupa hefur ekki verið skipulega metið áður hér á landi. Gera þarf greinarmun á skiptingu byggða og landsvæða í hættusvæði á grundvelli endurkomutíma atburða og mati á tjónmætti. Skilgreining svæða þar sem líkur á tilteknum atburði ráða skiptingu er algeng aðferð, t.d. við mat á jarðskjálfta- eða snjóflóðahættu.

Við mat á tjónmætti flóða er oft valið flóð af ákveðnum líkindum til viðmiðunar og útbreiðslusvæði þess viðmiðunarflóðs skipt upp í afmörkuð svæði eftir farveginum. Skiptingin byggir á að nota hættuviðmið og ræðst af því hversu alvarleg áhrifin eru talin verða. Einkum er horft til þess hvort straumhraði, dýpi og aðrir þættir verði umfram það sem líklegt er að mannvirki þoli eða hvort að lífi sé ógnað. Dæmi um slíka reitaskiptingu má sjá vinstra megin á mynd 32. Þar er sýnt útbreiðslusvæði flóða á ótilteknu svæði, annars vegar fyrir flóð sem verða á 50 ára fresti og hins vegar á 100 ára fresti. Mat á tjónmætti 100-ára flóðsins er sýnt á kortinu hægra megin. Þar er hætta á hverjum stað innan svæðisins metin út frá líklegum áhrifum flóðsins. En áður en slík hætta er metin, þarf að setja upp kvarða sem skilgreinir hættuna. Í tilfelli jökulhlaupa vegna eldgosa eða af öðrum orsökum eru áhrif eða hættan af hlaupum háð vatnsdýpi, straumhraða, hitastigi vatnsins og hvort hlaupið flytur með sér mikið af föstu efni. Þessi föstu efni geta verið vatnsborin gosefni, jarðvegur sem hlaupið hefur skolað með sér eða ísjakar.

Tafla 4. Kvarði yfir tjónmætti jökulhlaupa. Kvarðanum er skipt upp í fjögur stig: lítil hætta, hófleg hætta, mikil hætta og geysimikil hætta.

Hætta	**Margfeldi dýpis og straum-hraða (m^2/s)**	**dýpi flóðs (m)**	***l****	***t****	**Tjón á byggingum**	**Manntjón**
Lítil	<0,25	<0,5	-	-	Að mestu bundið við tjón á innbúi og húsgögnum	Slys eða dauðsföll ólíkleg
Hófleg	0,25–1,3	0,5–1	-	-	Byggingar standast flóð en reikna má með nokkrum skemmdum	Hætta fyrir börn og eldra fólk, bæði inni í byggingum og utan þeirra
Mikil	>1,3	>1	1	1	Eyðilegging léttbyggðra bygginga	Allir sem verða fyrir flóðinu eru í lífshættu, bæði inni í húsum eða utandyra
Geysimikil	≥7	>6	-	-	Alger eyðilegging allra húsa nema þeirra sem eru sérstaklega styrkt. Steinsteypt, járnbent hús skemmast að því marki að þau eru ónýt eftir.	Allir sem verða fyrir flóðinu eru í lífshættu, bæði inni í húsum eða utandyra

* Stuðull sem lýsir magni sets og annars efnis sem berst með flóði (ef mikið set eða brak sem berst með flóði, er $l = 1$, annars $l = 0$).

** Stuðull sem tengist vatnshita (ef hiti það hár að valdi bruna er $t = 1$, annars $t = 0$)

Settur hefur verið fram fjögurra stiga kvarði[44] og er hann notaður hér á eftir fyrir hlaup vegna eldgosa í Öræfajökli og jökulhlaup í Markarfljóti (tafla 4). Stig hans eru lítil hætta, hófleg hætta, mikil hætta, geysimikil hætta (Enska: low, moderate, high, extreme). Að auki er stigið óskilgreind hætta, þar sem upplýsingar eru af það skornum skammti að ekki er hægt að meta hættustig. Hverju stigi tilheyrir litur og er þá hægt á einfaldan hátt að setja fram hættuna á korti. Þær stærðir sem notaðar eru til að ákvarða stig hættu eru 1) Margfeldi dýpis og straumhraða; 2) dýpi hlaups; 3) stuðull sem hefur ýmist gildið 0 eða 1 og lýsir því hvort umtalsverður hættuauki stafar af seti (gjósku eða efni sem hlaupið hefur rofið úr farvegi sínum) eða ísjökum; 4) Stuðli sem tengdur er vatnshita. Nánari skilgreiningar hættustiga eru í töflu 4 ásamt lýsingum á tjóni á mannvirkjum og líkum á manntjóni ef ekki tekst að forða fólki af svæðum sem hlaup flæðir yfir.

[44] Emmanuel Pagneux og Matthew J. Roberts, 2015.

3.2 Hætta vegna hlaupa frá Öræfajökli

Við mat á hættu og tjónmætti við Öræfajökul er byggt á niðurstöðum SAMOS líkansins sem greint var frá í 2. kafla. Niðurstöðurnar eru settar fram á mynd 33. Eins og áður hefur verið tekið fram eru ákaflega litlar líkur á að hlaup komi fram á öllu svæðinu í sama gosinu. Því ber að skilja myndirnar þannig að þær sýni allt það svæði þar sem hlaup gætu valdið hættu og hvert hættustigið geti orðið í versta tilfelli á hverjum stað. Svo til alls staðar á láglendinu nema á einstaka stað upp við fjallshlíðarnar er hættan mikil eða geysimikil. Það þýðir að í miklum hlaupum myndu flest mannvirki skemmast mjög mikið eða eyðileggjast þar sem hlaup færi yfir. Ef rýmingu yrði ekki komið við fyrirfram væru miklar líkur á manntjóni.

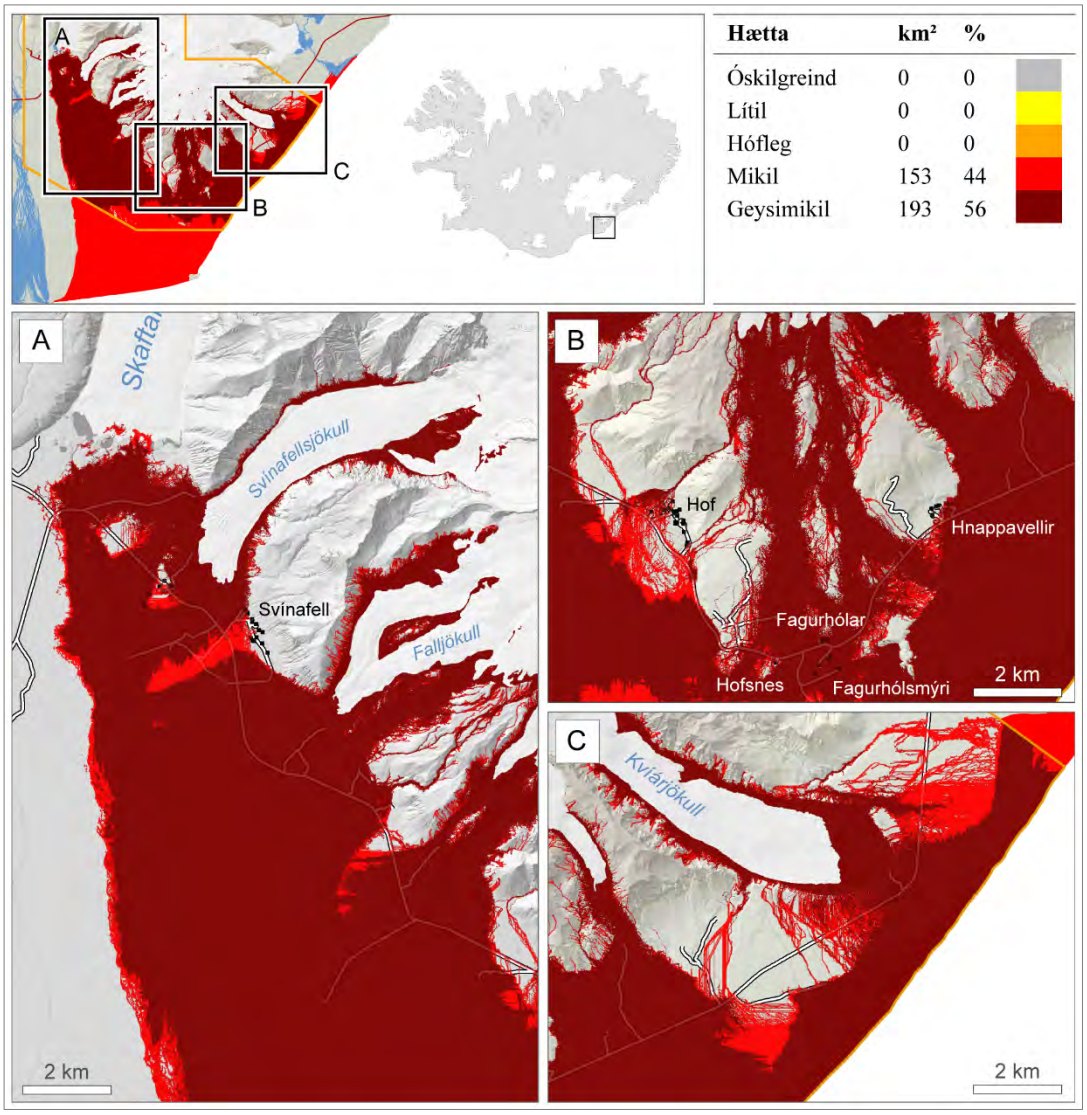
Athyglisvert er að sjá að svo til einu staðirnir neðan fjallshlíða sem slyppu í hlaupum af þeirri stærðargráðu sem matið er byggt á eru Svínafell, Hof og Hnappavellir, þar sem byggð hefur verið um aldir. Hofsnes, Freysnes og Fagurhólsmýrartorfan væru hinsvegar ótryggir staðir.

3.3 Hætta vegna hamfarahlaupa frá Kötlu niður Markarfljót

Rannsóknir sem unnar voru í kringum árið 1980 leiddu í ljós að það svæði þar sem nú eru Landeyjar var á forsögulegum tíma gróðurlitlir jökuláraurar sem jökulhlaup höfðu farið um[45]. Við rannsóknir á gjóskulögum við ofanvert Markarfljót kringum aldamótin 2000 kom í ljós að fyrir landnám fóru mjög stór jökulhlaup hvað eftir annað niður Markarfljót og að upptök þeirra voru að öllum líkindum í norðvesturhluta Kötluöskjunnar[46]. Vegna þessara upplýsinga og ókyrrð sem þá var í vesturhluta Kötlu var ráðist í umfangsmikið hættumat[47]. Ein af niðurstöðum þess var að örugg ummerki fundust um 11 forsöguleg jökulhlaup niður Markarfljót og óviss ummerki um fjögur til viðbótar[48]. Stærstu hlaupin voru hamfarahlaup með hámarksrennsli nærri 150–250.000 rúmmetrum á sekúndu[49] og áttu stóran þátt í greftri Markarfljótsgljúfra. Verkfræðistofan Vatnaskil vann þá umfangsmiklu hermun á framrás og útbreiðslu hamfarahlaups niður Markarfljót sem getið er hér að framan[50]. Notað var reiknilíkanið AQUARIVER sem Vatnaskil hafa þróað og samsett hæðarlíkan með nákvæmni í hæð sem var nærri hálfum metra niðri á láglendinu. Reiknuð voru tvö tilfelli, með hámarksrennsli sem var annars vegar 100.000 og hins vegar 300.000 rúmmetrar á sekúndu.

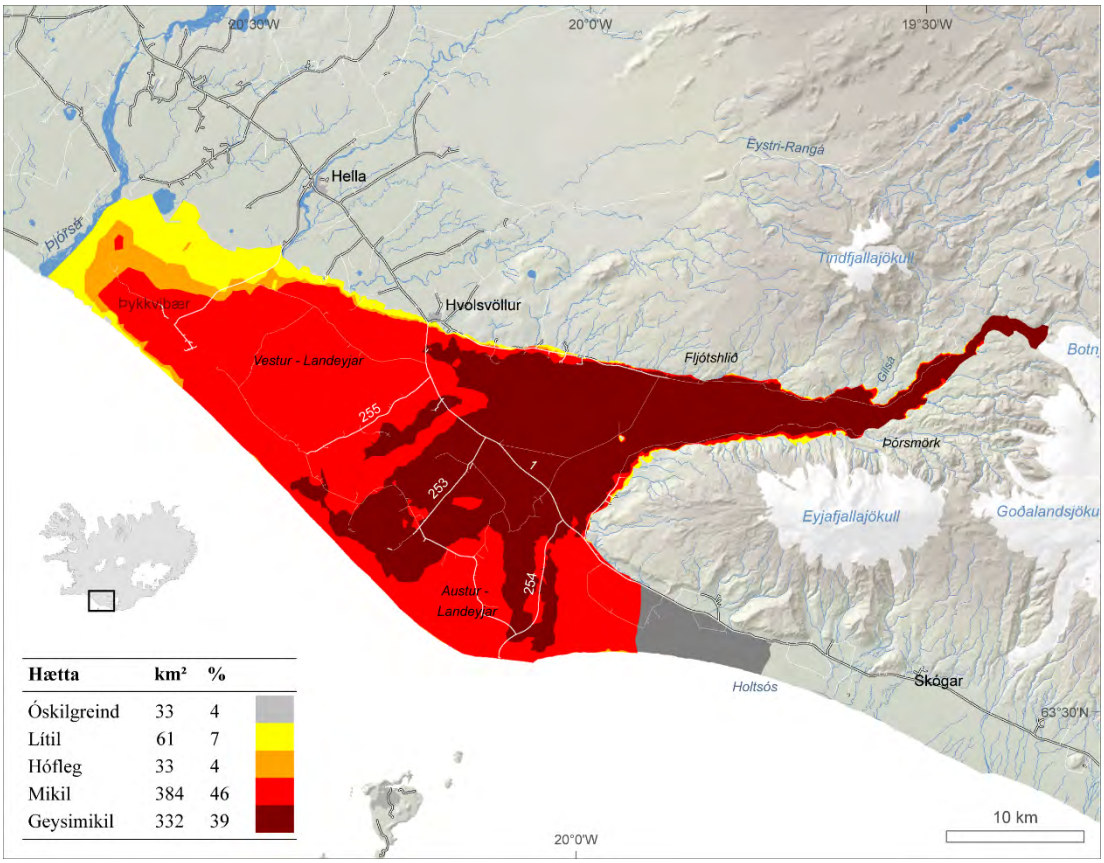
Kort af dýpi og útbreiðslu sem fengust út úr þessari hermun Vatnaskila eru lögð til grundvallar skiptingu svæðisins. Svæðið í heild sinni nær frá Þjórsá í vestri og alllangt austur með Eyjafjöllum út í Holtsós. Flatarmál þess er um 840 ferkílómetrar. Niðurstaðan er að hættan sé geysimikil á 39% svæðisins (332 km^2), mikil á 46% þess, hófleg á 4% og lítil á 7% (mynd 34).

[45] Hreinn Haraldsson, 1981.
[46] Kate Smith, 2004.
[47] Magnús Tumi Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), 2005.
[48] Guðrún Larsen og fleiri, 2005.
[49] Gunnar Orri Gröndal og fleiri, 2005.
[50] Sigurður Lárus Hólm og Snorri Páll Kjaran, 2005.



Mynd 33. Mat á tjónmætti jökulhlaupa úr Öræfajökli byggt á upplýsingum um reiknaðan hraða og dýpt flóða ásamt líkum á að vatnhiti geti verið hár og að mikið af seti geti borist með flóði.

Stærð svæðisins þar sem hættan er mikil eða geysimikil helgast einkum að því að dýpi er mikið þar sem dalur Markarfljóts heldur að hlaupinu og gætir þeirra áhrifa langt niður í Landeyjar.

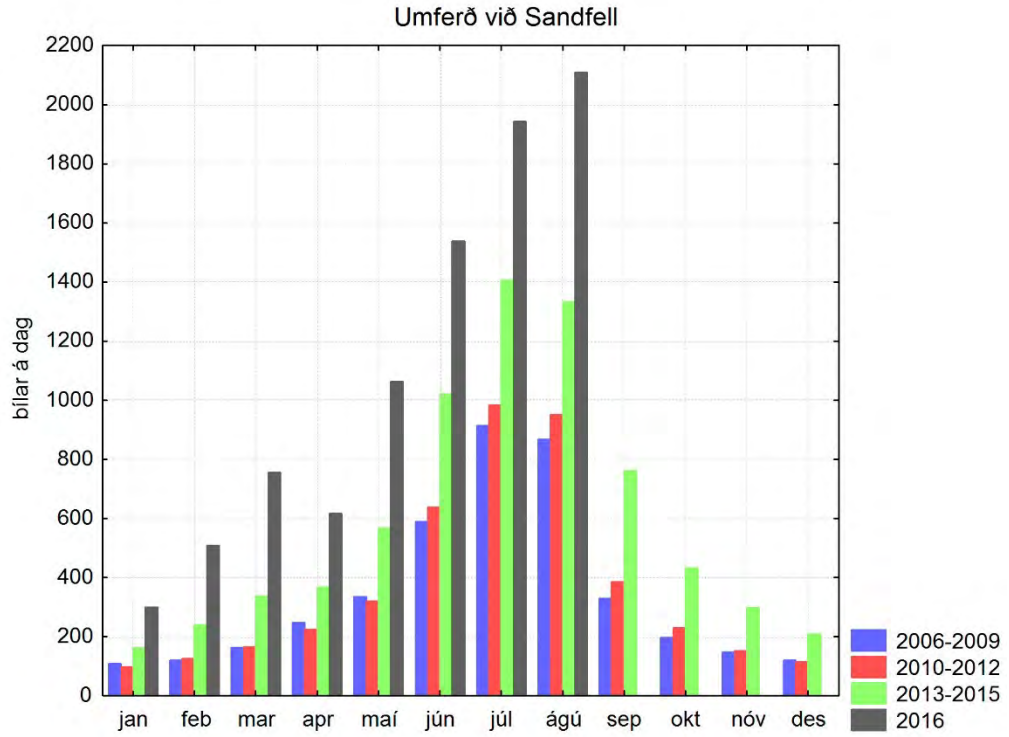


Mynd 34. Mat á tjónmætti jökulhlaupa í Markarfljótsaurum byggt á upplýsingum um dýpt flóða.

3.4 Berskjöldun byggðar og ferðamanna við jökulhlaup úr Öræfajökli

Á flestum svæðum á Íslandi er nú nauðsynlegt að taka tillit til bæði heimamanna og ferðamanna við hvers kyns mat á hættu og þörf fyrir viðbrögð og eftirlit. Fjöldi og dreifing þessara tveggja hópa er metin innan Öræfasveitar[51]. Jafnframt er skoðuð árstíðabundin dreifing ferðamanna en þær tölur eru mikilvægar ef grípa þarf til rýminga eða ná sambandi við fólk á svæðinu með stuttum fyrirvara. Þegar þessi hluti verkefnisins var unninn þá lágu fyrir niðurstöður fyrir tímabilið 2007–2011 og var það því notað. Mikil fjölgun ferðamanna hér á landi hefur átt sér stað undanfarin misseri og ár sem þýðir að tölurnar sem fram koma hér eru of lágar. Þetta sést glögglega á mynd 35, en þar sést einnig að ferðamannatímabilið hefur lengst. Þetta undirstrikar mikilvægi þess að greining af þessu tagi sé unnin reglulega og tillit tekið til niðurstaðna við gerð viðbragðs- og rýmingaráætlana.

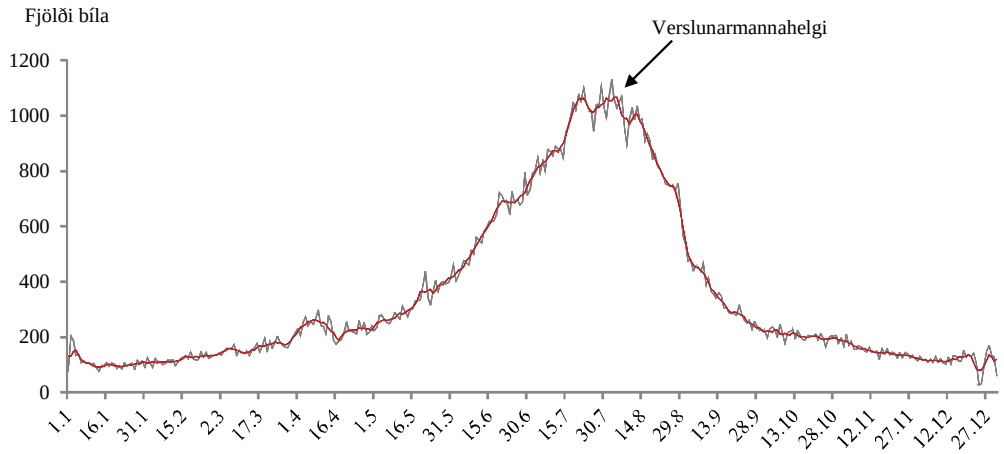
[51] Emmanuel Pagneux, 2015a.



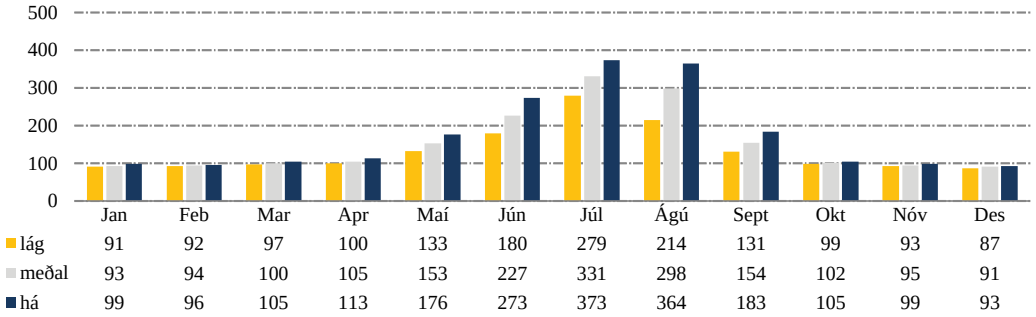
Mynd 35. Fjöldi bíla á dag í hverjum mánuði um Hringveginn við Sandfell í Öræfum á tímabilinu 2006–2016. Umferðin er tvö til þrefalt meiri 2016 en var 2006-2009 (Heimild: upplýsingar frá sjálfvirkri stöð Vegagerðarinnar við Sandfell).

Stuðst er við talningar á fjölda bíla sem fara um sjálfvirkar talningarstöðvar Vegagerðarinnar við Sandfell (mynd 36). Einnig eru opinberar tölur Hagstofunnar um gistinætur notaðar. Samanburður leiðir í ljós að góð fylgni er milli fjölda bíla á sólarhring sem fara framhjá Sandfelli og fjölda gistinátta í héraðinu, a.m.k. yfir sumarmánuðina.

Árið 2012 bjuggu 86 manns í Öræfasveit. Skaftafell liggur utan áhrifasvæðis jökulhlaupa úr Öræfajökli og er því ekki með í tölunum sem hér fara á eftir. Á mynd 37 er niðurstaða mats á fjölda fólks (íbúa og ferðamanna) sem gista á áhrifasvæðinu yfir nótt á tímabilinu 2007–2011. Eins og sést á myndinni er fjöldi ferðamanna í hámarki seint í júlí, en ætla má að fjöldi gistinátta hafi náð 250 á tímabilinu (myndir 37 og 39). Á sama tímabili er áætlað að fjöldi næturgesta í Skaftafelli hafi náð u.þ.b. 450. Fáir ferðamenn gistu á áhrifasvæðinu yfir veturinn (október-apríl) eða u.þ.b. 10 til 20 manns á nóttu. Í ljósi þeirrar miklu fjölgunar ferðamanna sem orðið hefur á Íslandi frá 2011, má reikna með að ferðamenn, einkum yfir veturinn séu nú mun fleiri.

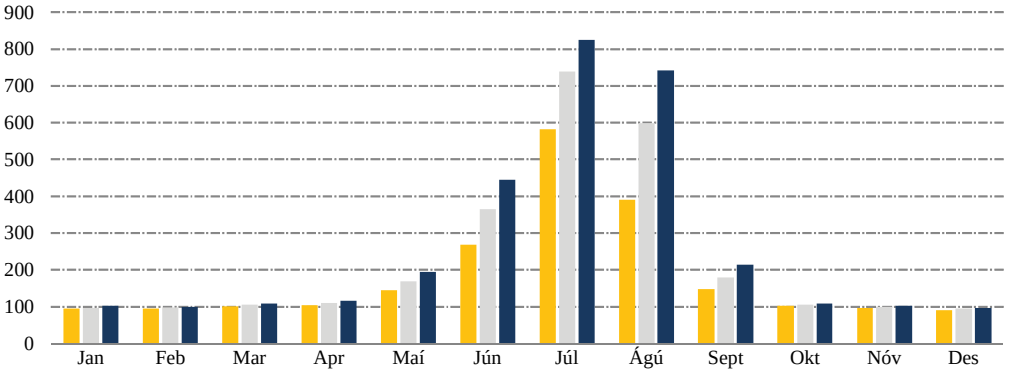


Mynd 36. Meðaltal fjölda bíla á dag um Hringveginn við Sandfell í Öræfum á tímabilinu 2007–2011 (5-daga hlaupandi meðaltal sýnt með rauðri línu).



	Jan	Feb	Mar	Apr	Maí	Jún	Júl	Ágú	Sept	Okt	Nóv	Des
lág	91	92	97	100	133	180	279	214	131	99	93	87
meðal	93	94	100	105	153	227	331	298	154	102	95	91
há	99	96	105	113	176	273	373	364	183	105	99	93

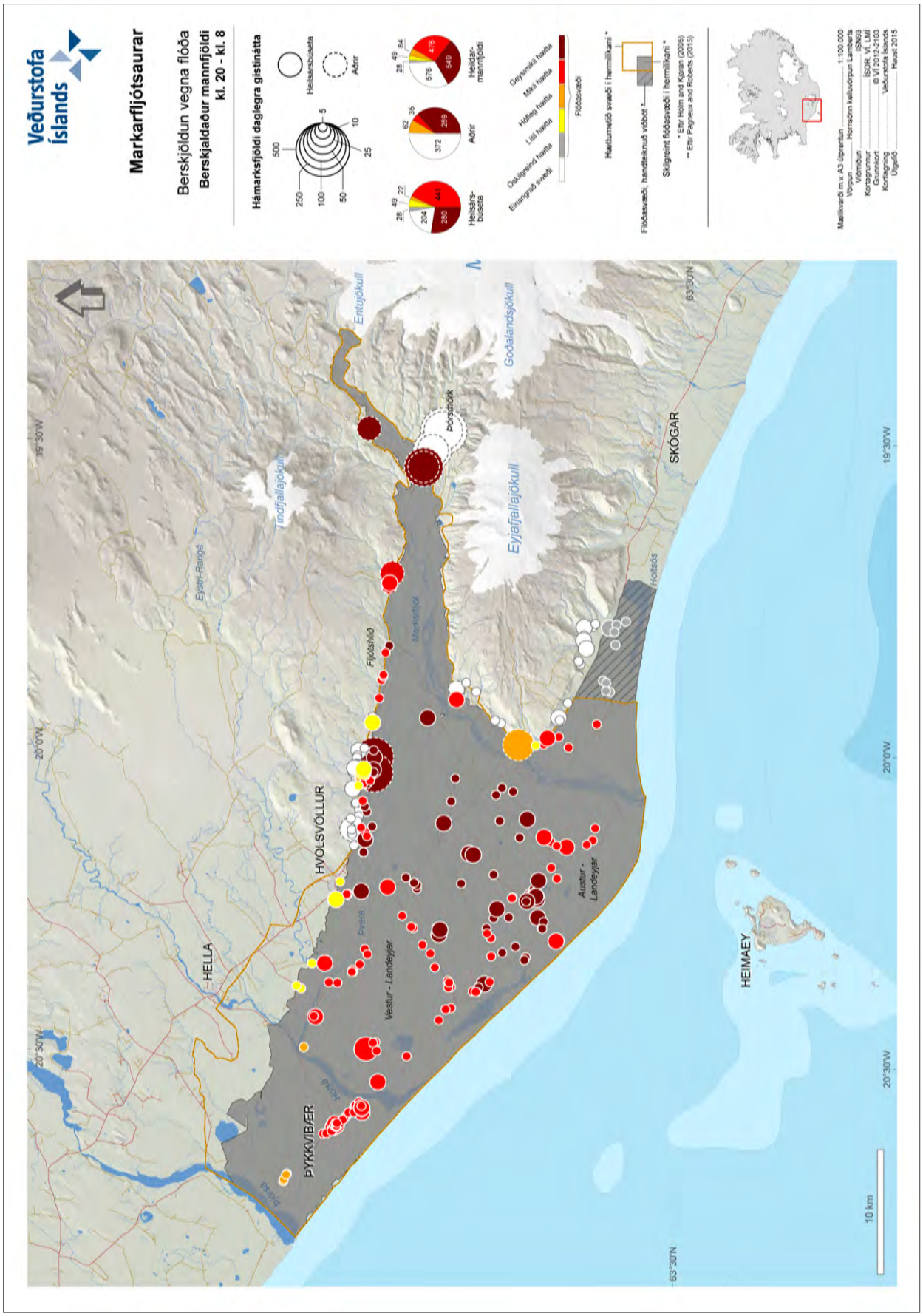
Mynd 37. Mat á fjölda fólks sem gistir á áhrifasvæði jökulhlaupa í Öræfum (íbúa og ferðamanna) á tímabilinu 2007–2011. Tölurnar sýna áætlaðan minnsta, meðal- og mesta fjölda á einni nóttu í hverjum mánuði.



	Jan	Feb	Mar	Apr	Maí	Jún	Júl	Ágú	Sept	Okt	Nóv	Des
lág	95	96	101	104	145	269	583	390	148	103	97	91
meðal	97	99	105	110	170	366	738	599	179	106	100	95
há	103	100	109	117	195	445	824	742	214	109	103	97

Mynd 38. Mat á fjölda fólks sem gisti á áhrifasvæði jökulhlaupa á Markarfljóts-aurum (íbúa og ferðamanna) á tímabilinu 2007–2011. Tölurnar sýna áætlaðan minnsta, meðal- og mesta fjölda á einni nóttu í hverjum mánuði.

Mynd 39. Áætluð dreifing fólks á næturstaði á tímabilinu 2007–2011 á áhrifasvæði jökulhlaupa úr Öræfajökli. Tölurnar sýna áætlaðan mesta fjölda á einni nóttu þegar ferðamannatíminn er í hámarki.



Mynd 40. Áætluð dreifing fólks á næturstaði á tímabilinu 2007–2011 á áhrifasvæði jökulhlaupa á Markarfljótsaurum og Landeyjum. Tölurnar sýna áætlaðan mesta fjölda á einni nóttu þegar ferðamannatíminn er í hámarki.

3.5 Berskjöldun byggðar og ferðamanna við hamfarahlaup niður Markarfljót

Svæðið sem berskjaldað er fyrir hamfarahlaupum til vesturs frá Kötlu er miklu stærra en Öræfasveitin og fjöldi íbúa á svæðinu árið 2012 var 1024. Fjöldi gistinátta ferðamanna á viðmiðunartímabilinu var svipaður og fyrir Öræfin, en þó var rólegasta tímabilið mun styttra (mynd 39). Ferðamenn dreifast mikið um svæðið, m.a. er jafnan á sumrum allmargir ferðamenn í Þórsmörk (mynd 40). Eins og fyrir Öræfasveit má reikna með að fjöldi ferðamanna hafi aukist verulega síðan 2011.

4 Mat á rýmingartíma fyrir Öræfasveit

Mikilvægur þáttur í gerð áætlana um viðbrögð við eldgosavá við Öræfajökul er mat á þeim tíma sem það tæki að rýma hættusvæði. Lagt hefur verið mat á þennan tíma og hægt er að bera hann saman við þann tíma sem það getur tekið hlaup að ná að þjóðvegi 1[52]. Eins og kemur fram í kafla 2.3.3 er hann á bilinu 20–30 mínútur. Þessi tími er það skammur að óraunhæft er að rýming geti átt sér stað eftir að gos hefst, hún yrði að gerast áður en gos brýst út og byggjast á forboðum eldgoss, væntanlega jarðskjálftavirkni, jarðskjálftaóróa og e.t.v. öðrum merkjum eins og gasstreymi. Eigi að síður er nauðsynlegt að meta rýmingartímann til að skipuleggja viðbrögð og flóttaleiðir.

4.1 Ferðatími jökulhlaupa

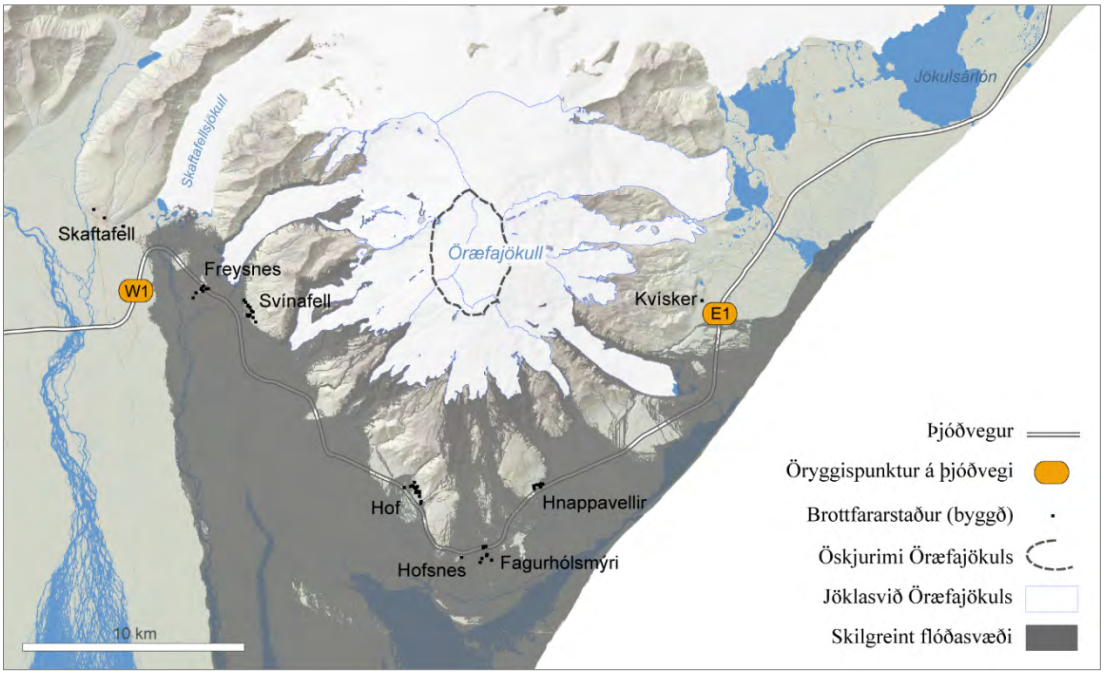
Eins og kemur fram í kafla 2.3 og myndum 2631 getur ferðatími jökulhlaupa frá upptökum að þjóðvegi 1 verið mjög skammur. Fyrir eldgos í öskjunni reiknast þessi tími 26–27 mínútur bæði við Virkisjökul-Falljökul og Kotárjökul og er jafnvel minni fyrir sprungugos í hlíðum jökulsins eða rúmlega 20 mínútur. Hliðstæður tími fæst fyrir hlaup vegna gjóskuflóða niður Svínafellsjökul og hjá Fagurhólsmýri. Þær tölur eiga þó ekki við um upphaf gosa, því stórgos þarf fyrst að vinna sig gegnum ísinn í öskjunni áður en svo mikill mökkur rís til himins að líkur séu á stórum gjóskuflóðum.

4.2 Rýmingartími

Tíminn sem þarf til rýmingar sem gerð er í skyndi skiptist í nokkra þætti. Stuðst hefur verið við þær aðferðir sem notaðar eru við mat á viðbrögðum við bruna í byggingum. Aðeins einn vegur liggur í gegnum svæðið, þjóðvegur 1. Flóttaleiðir liggja því annaðhvort til vesturs eða austurs. Skilgreindir eru tveir staðir á þjóðvegi 1 sem öryggispunktar við jaðar rýmingarsvæðis, að vestanverðu við Skeiðarárbrú og að austan við Fjallsá (mynd 41). Rýmingartími er sá tími sem líður þar til allir eru komnir í eða framhjá punktunum.

Rýmingartímanum er skipt í viðbragðstíma, aksturstíma og tímann sem líður frá því fyrsti bíll yfirgefur hættusvæðið (fer framhjá vegpunkti í jaðri svæðisins) þar til sá síðasti gerir það. Viðbragðstíminn er settur sem 15 mínútur en það tekur alltaf ákveðinn tíma fyrir fólk að meðtaka skilaboð og bregðast við. Í kjölfar hans er tíminn sem það tekur að aka í vestur eða austur eftir atvikum þar til komið er að vegpunkti. Fjöldi fólks í hverjum bíl skiptir máli við að skilgreina hve langur rýmingartíminn er. Raunhæft virðist vera að 2–3 séu í hverjum einkabíl og 20–25 í hverjum hópferðabíl. Í ljós kemur að við góðar aðstæður taki aldrei minna en 30 mínútur að rýma svæðið (tafla 5). Svo stuttur tími gengi því aðeins upp ef allir, ferðafólk og heimafólk, séu viðbúin því að yfirgefa svæðið með hraði. Ef veðuraðstæður eru ekki hagstæðar eða ef erfiðlega gengur að ná til allra ferðamanna, getur þessi tími orðið mun lengri.

[52] Emmanuel Pagneux, 2015b.



Mynd 41. Vegpunktar á þjóðvegi 1 sem notaðir eru við mat á þeim tíma sem það tekur að komast út af skilgreindu áhrifasvæði jökulhlaupa úr Öræfajökli.

Tafla 5. Lágmarkstími (mínútur) við ákjósanleg veðurskilyrði sem þarf til að ná annaðhvort vestur fyrir vegpunktinn W1 eða austur fyrir vegpunktinn E1.

Brottfarastaður	**Öryggispunktur W1**		**Öryggispunktur E1**	
	Lágmark	Hámark	Lágmark	Hámark
Skaftafell, Bölti	24	32	-	-
Freysnes	19	20	43	44
Svínafell	21	22	42	43
Hof, Litla-Hof	30	32	33	35
Hofsnes	32	32	29	29
Fagurhólsmýri, Fagurhólar	33	33	29	29
Hnappavellir	36	36	26	26

Í ljósi þess hve stuttur tími gefst til rýmingar, er hugsanlegt að ekki sé óhætt að yfirgefa svæðið eftir þjóðvegi 1. Af þeirri ástæðu gæti þurft að velja söfnunarsvæði fólks á einhverjum bæjanna. Væntanlega er heppilegast að slíkir söfnunarstaðir séu á Svínafelli, Hofi og Hnappavöllum. Ekki er hægt að segja til um það nú hvernig best skuli að slíkum áætlunum staðið, en almennt séð væri öruggast að miða áætlanir við að svæðið sé rýmt að fullu áður en eldgos hefst. Ef gos verður svo stórt að umtalsverð gjóskuflóð verða, geta þau náð niður á láglendi og valdið þar dauða og eyðileggingu á bæjum, þó svo að jökulhlaup nái ekki að þeim.

5 Helstu niðurstöður

5.1 Öræfajökull

1) Hæð Öræfajökuls og lega á suðausturströnd Íslands veldur því að ís mun þekja efri hluta fjallsins meðan jöklar finnast á Íslandi. Endurkomutími eldgosa er á bilinu 500-1000 ár.
2) Tvö gos eru þekkt frá því land byggðist, gosið 1727 og stórgosið 1362. Stór jökulhlaup fylgdu báðum gosum og manntjón varð. Sandur lagðist yfir svæði sem áður voru gróin, einkum í fyrra gosinu og áttu hlaupin án efa þátt í að gera Litlahérað óbyggilegt um tíma, þó gjóskufallið hafi sjálfsagt vegið þar þyngst á metunum. Hlaupin sem fylgdu gosinu 1362 eru talin hafa náð rennsli af stærðargráðunni 100.000 rúmmetrar á sekúndu meðan hlaupin sem komu 1727 voru sennilega ekki meira en um helmingur af því í hámarki.
3) Jökulhlaup sem tengjast gosum í Öræfajökli eru talin vera af þremur gerðum. Tveggja fyrstu gerðanna væri einkum að vænta í upphafi gosa:
   - Hlaup sem verða vegna eldgosa í öskju Öræfajökuls þar sem ís er yfir 500 metra þykkur. Stórhlaup, af stærðargráðunni 100.000 rúmmetrar á sekúndu geta orðið í stórgosum eins og 1362. Jökulhlaupa af þeirri stærðargráðu væri að vænta niður Virkisjökul-Falljökul eða Kvíárjökul auk þess sem eitthvert vatn gæti komið niður Kotárjökul.
   - Hlaup sem yrðu vegna sprungugosa í jökli þöktum hlíðum Öræfajökuls þar sem ísinn er 50–100 metra þykkur gætu náð hámarksrennsli á bilinu 1.000 – 10.000 rúmmetrar á sekúndu. Slík hlaup geta komið fram víðast hvar á svæðinu frá Virkisjökli austur um að Hrútárjökli.
   - Hlaup gætu orðið í stórgosum vegna falls gosmakkar sem leiddi til gjóskuflóða, þar sem heit gjóska, 300–600°C, færi eftir yfirborði jökulsins á miklum hraða og bræddi ís og hjarn. Slík gjóskuflóð mynduðust í gosinu 1362. Rennsli gæti verið á bilinu 1.000–20.000 rúmmetrar á sekúndu. Í stórgosi gætu hlaup af þessu tagi komið fram frá Svínafellsjökli í vestri að Hrútárjökli eða Fjallsjökli í austri.
4) Jökulhlaup sem orsakast af eldgosum geta flokkast undir aurflóð og flutt með sér gríðarmikið af gosefnum og ís sem brotnar upp úr skriðjöklum í atganginum.
5) Aðdragandi jökulhlaupa vegna eldgosa getur verið mjög skammur og framrásarhraði þeirra mikill. Hlaup gætu náð að þjóðvegi 1 framan við helstu framrásarleiðir á 20–30 mínútum frá upphafi gosa.
6) Stærstur hluti láglendis á svæðinu milli Skaftafellsár og Breiðár (340 km^2) flokkast undir svæði sem hlaup kynnu að fara yfir, ef til goss kemur. Ósennilegt er að í hverju gosi fari hlaup yfir nema lítinn hluta svæðisins, en mjög fáir staðir geta talist öruggir.
7) Jökulhlaup vegna eldgosa í Öræfajökli geta valdið fullkominni eyðingu mannvirkja og gróðurlendis þar sem þau fara yfir. Möguleg áhrif slíkra hlaupa á innviði og efnahag svæðisins gætu því orðið mikil.

8) Ef frá Öræfajökli kæmi stærsta gerð af hlaupi sem talið er mögulegt, og að slíkt gerðist án viðvörunar og rýmingar, gætu allt að 130 manns verið í lífshættu og 240–250 manns til viðbótar lokast inni vegna skemmda á vegakerfinu. Forsenda byggðar og áframhaldandi uppbyggingar ferðamennsku og annarrar atvinnustarfsemi í Öræfasveit er því gott vöktunar- og viðbragðskerfi. Í því fælist nákvæm vöktun eldfjallsins ásamt því að sett yrði upp viðeigandi viðvörunarkerfi og viðbragðsáætlanir gerðar og þær uppfærðar með reglulegu millibili.
9) Að sumarlagi eru ferðamenn nú margfalt fleiri en heimamenn og nemur fjöldi gistinátta þeirra yfir 90% af viðveru á stöðum þar sem hætta er á að flóð fari yfir eða einangrist í eldgosum.
10) Full rýming Öræfasveitar milli Skaftafellsár og Fjallsár tekur að lágmarki 35–40 mínútur.

5.2 Markarfljót

Athugun á tjónmætti á svæðinu frá Markarfljóti vestur að Þjórsá (um 800 km^2) vegna hugsanlegs hamfarahlaups úr norðvesturhluta Kötluöskjunnar bendir til eftirfarandi:

1) Hlaup geta valdið stórtjóni á eignum og innviðum á öllu svæðinu og alger eyðilegging gæti orðið á svæði sem er um 330 ferkílómetrar að stærð og nær frá Entujökli að vegi 255 (Akureyjarvegi).
2) Ef slíkt hlaup kæmi að sumarlagi væru yfir þúsund manns á flóðasvæðinu en innan þess eru margir vinsælir ferðamannastaðir.
3) Eyðilegging vegakerfis gæti valdið því að um 600 manns (miðað er við fjölda ferðamanna 2007–2011) myndu lokast inni í Fljótshlíð, Þórsmörk og á láglendinu við undirhlíðar Eyjafjallajökuls að norðvestan, vestan og suðvestan.
4) Um 40% þeirra sem gætu verið í hættu eru ferðamenn, miðað við tölur um fjölda ferðamanna 2007–2011. Sé tekið tillit til þeirrar aukningar sem orðið hefur á allra síðustu árum (fram til 2016) má reikna með að þessi tala fari hækkandi.

6 Ábendingar

6.1 Áhættustjórnun vegna jökulhlaupa

6.1.1 Vöktun og viðvörunarkerfi

Til að mögulegt sé að draga úr áhættu að því marki að ásættanlegt sé, ef til eldgoss eða eldgosa kemur, verður að tryggja að til staðar séu viðunandi eftirlitskerfi. Það þýðir að við bæði Öræfajökul, Kötlu og að sama skapi Eyjafjallajökul, séu tæki sem greina aðdraganda eldgosa. Miðað við núverandi þekkingu væri horft til kerfis sem samanstæði af búnaði sem greint geta aukna jarðskjálftavirkni, aflögun vegna kvikusöfnunar, útflæði gass, aukningu í jarðhita eða rennsli vatns. Jafnframt er ljóst að til þarf að vera viðbragðsáætlun sem byggist á því að forða fólki úr hættu áður en til goss kemur.

Markarfljót: Kerfi er þegar til staðar en fara þarf yfir hvort það sé nægilega þétt og fullkomið til að geta varað við öllum þeim sviðsmyndum sem taldar eru mögulegar. Bæði þarf að horfa til þess að notaður sé réttur tækjabúnaður og hvort á einhverjum stöðum þurfi að bæta við.

Öræfajökull: Hér vantar mæla- og vöktunarkerfið að mestu leyti. Vinna þarf úttekt á þörf fyrir mælikerfi og gera úrbætur eins og þarf. Jafnframt þarf að vinna viðbragðsáætlanir.

6.1.2 Landnotkun og skipulag

Ef auka á þol svæðanna og draga úr tjónnæmi þeirra til framtíðar, þarf að búa svo um hnútana að tillit sé tekið til náttúruvárinnar í allri landnýtingu og skipulagsvinnu. Það er utan við verksvið hópsins sem unnið hefur þetta hættumat að taka á skipulagi. Hins vegar er ljóst að fullt gagn verður ekki af þeirri vinnu sem unnin hefur verið fyrr en tryggt er að skipulag, lög og reglugerðir taki eldgosavá á þessum svæðum, ekki síst vá af völdum jökulhlaupa, að fullu með í reikninginn. Umhverfis- og auðlindaráðuneytið hóf formlega vinnu við að skilgreina áhættuviðmið vegna eldgosa í ársbyrjun 2016.

6.1.3 Upplýsingagjöf og uppbygging þekkingar meðal almennings

Aukin ferðamennska, bæði í Öræfum og í nágrenni við Markarfljót, veldur því að fjöldi fólks sem er í og við flóðfarvegi á hverjum tíma fer mjög vaxandi. Ef vel á að vera þarf því að vinna skipulega að því að auka vitneskju ferðafólks um vána.

6.2 Frekari rannsóknir

Hættu gætir vegna jökulhlaupa sem tengjast eldvirkni og jarðhita við margar jökulár innan gosbeltisins. Mat á þeirri vá er víða skammt á veg komin eða hún hefur ekki farið fram. Því þarf að vinna eftirfarandi verk víða:

- Jarðfræðileg kortlagning eldra jökulhlaupasets þar sem það er að finna, til að meta stærðir og áhrif eldri hlaupa.
- Mat á mögulegri ísbráðnun (bráðnunarmætti) vegna eldgosa og jarðhita í vestanverðum Vatnajökli, þar sem endurtekin hlaup hafa komið um áratugi og árhundruð.
- Meta bráðnunarmætti fyrir aðra staði á Íslandi á grundvelli jarðfræðilegra ummerkja og sögulegra heimilda. Meta endurkomutíma jökulhlaupa á þeim svæðum þar sem slík hlaup hafa orðið.
- Frekara mat á bráðnunarmætti eldgosa við mismunandi aðstæður. Þetta mat þarf að nálgast bæði með frekari fræðilegri vinnu en einnig tilraunum í tilraunastofu og skoðun á eldri atburðum. Þetta á t.d. við um áhrif gjóskuflóða og flæðigos undir jökli.
- Meta þarf hversu berskjölduð svæði nærri eldfjöllum eru vegna eldgosa í jöklum. Horfa þarf til margvíslegra þátta sem kunna að vera breytilegir frá einum stað til annars, m.a. ýmissa félagslegra þátta.
- Meta áhrif aurburðar og foks á landsvæði og þar með áhrif á landbúnað og fyrirbyggjandi áhrif uppgræðslu lands og uppbyggingu vistkerfa.

Frekari vinna sem snýr sérstaklega að Öræfum:

- Meta þarf mögulega stærð, áhrif og útbreiðslu hlaupa vegna gjóskuflóða í austurhlíðum fjallsins.
- Í sprengigosum hleðst oft upp mjög mikið magn gjósku í hlíðum eldfjalla. Aurflóð (e. lahars) geta komið í kjölfar gosa þegar regn bleytir gjóskuna þannig að hún verður óstöðug. Slík flóð geta komið fram hvaða gil sem er, óháð því hvort jökull sé á vatnasvæðinu og óháð venjulegum rennslisleiðum jökulhlaupa.

Atriði sem snúa að hermun jökulhlaupa og rétt væri að vinna að:

- Flutningur ísjaka með hlaupum og áhrif þeirra á rennslishraða, rennslisleiðir og flóðdýpt hefur lítið verið rannsakaður.
- Mat á framrásarhraða hlaupa með hermun er mjög háð flæðieiginleikum hlaupsins. Magn fastefnis (gjósku, annars framburðar o.s.frv.) og áhrif kornastærðar og annarra eiginleika gjóskunnar á hraðann hafa lítið verið rannsakaðar. Fara þarf skipulega yfir þessi áhrif og magngera þau, ekki síst til að fá betra mat á eiginleikum eldri hlaupa sem féllu fyrir daga vatnamælinga.

7 Heimildir

Ármann Höskuldsson og Páll Imsland, 2013. Öræfajökull og Snæfell. Í Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.), *Náttúruvá á Íslandi* (bls. 269–277). Viðlagatrygging Íslands, Háskólaútgáfan.

Ármann Höskuldsson og Þorvaldur Þórðarson, 2006. Eldgos í Öræfajökli 1362 og myndun gusthlaupa í upphafi eldgoss. Geoscience Society of Iceland, Spring meeting. Reykjavík.

Ármann Höskuldsson og fleiri, 2016 [Ármann Höskuldsson, Kristín Vogfjörð, Evgenia Ilyinskaya, Björn Oddsson, Emmanuel Pagneux]. Öræfajökull. Í Evgenia Ilyinskaya, Guðrún Larsen og Magnús T. Guðmundsson (ritstj.), *Catalogue of Icelandic Volcanoes*. Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans, Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Ásdís Helgadóttir og fleiri, 2015 [Ásdís Helgadóttir, Emmanuel Pagneux, Matthew J. Roberts, Esther H. Jensen og Eiríkur Gíslason]. Öræfajökull Volcano: Numerical simulations of eruption-induced jökulhlaups using the SAMOS flow model. Í Emmanuel Pagneux, Magnús T. Gudmundsson, Sigrún Karlsdóttir & Matthew J. Roberts (ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland. An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain* (bls. 73–100). Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans, Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Björn Oddsson o. fl., 2016 [Björn Oddsson, Magnús T. Gudmundsson, Ben R. Edwards, Thorvaldur Thórdarson, Eyjólfur Magnússon, Gunnar Sigurðsson]. 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

Einar Hálfdanarson og Jón Þorkelsson, 1918–1920. Frásögn síra Einars Hálfdanarsonar um hlaupið úr Öræfajökli 1727. *Blanda 1918–1920*, 1. bindi, 1. hefti, 54–59.

Emmanuel Pagneux, 2015a. Öræfi district and Markarfljót outwash plain: Spatio-temporal patterns in population exposure to volcanogenic floods. Í E. Pagneux, M. T. Gudmundsson, S. Karlsdóttir, & M. J. Roberts (Ritstj.), Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain (bls. 125–142). Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Emmanuel Pagneux, 2015b. Öræfajökull: Evacuation time modelling of areas prone to volcanogenic floods. Í E. Pagneux, M. T. Gudmundsson, S. Karlsdóttir, & M. J. Roberts (Ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain* (bls. 141–164). Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Emmanuel Pagneux og Matthew J. Roberts, 2015. Öræfi district and Markarfljót outwash plain: Rating of flood hazards. Í E. Pagneux, M. T. Gudmundsson, S. Karlsdóttir, & M. J. Roberts (Ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain* (bls. 101–122). Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Emmanuel Pagneux og fleiri (ritstj.), 2015 [Emmanuel Pagneux, Magnús T. Gudmundsson, Sigrún Karlsdóttir, Matthew J. Roberts]. *Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain*. Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans, Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Emmanuel Pagneux og fleiri, 2015 [Emmanuel Pagneux, Sigrún Karlsdóttir, Magnús T. Gudmundsson, Matthew J. Roberts, Víðir Reynisson]. Volcanogenic floods in Iceland: An exploration of hazards and risks. Í Emmanuel Pagneux, Magnús T. Guðmundsson, Sigrún Karlsdóttir & Matthew J. Roberts (ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland. An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain* (bls. 7–16). Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Eyjólfur Magnússon og fleiri, 2012a [Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Helgi Björnsson and Sverrir Guðmundsson]. Removing the ice cap of Öræfajökull central volcano, SE-Iceland: Mapping and interpretation of bedrock topography, ice volumes, subglacial troughs and implications for hazards assessments. *Jökull*, 62, 131–150.

Eyjólfur Magnússon og fleiri, 2012b [Eyjólfur Magnússon, Magnús T. Gudmundsson, Gunnar Sigurðsson, Matthew J. Roberts, Friðrik Höskuldsson, Björn Oddsson]. Ice-volcano interactions during the 2010 Eyjafjallajökull eruption, as revealed by airborne radar. *J. Geophys. Res.* 117, B07405, doi:10.1029/2012JB009250.

Forbes og fleiri, 2014 [Forbes, A.E.S, S. Blake, H. Tuffen, A. Wilson]. Fractures in a trachyandesitic lava at Öræfajökull, Iceland, used to infer subglacial emplacement in 1727–8 eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 288 (2014) 8–18. http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.10.004

Guðrún Larsen og fleiri, 2005 [Guðrún Larsen, Kate Smith, Anthony Newton og Óskar Knudsen]. Jökulhlaup til vesturs frá Mýrdalsjökli: Ummerki um forsöguleg hlaup niður Markarfljót. Í Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli* (bls. 75–98). Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan.

Guðrún Larsen og fleiri, 2013a [Guðrún Larsen, Guðrún Sverrisdóttir, Haukur Jóhannesson, Árni Hjartarson, Páll Einarsson]. Hekla. Í Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.), *Náttúruvá á Íslandi* (bls. 189–209). Viðlagatrygging Íslands og Háskólaútgáfan.

Guðrún Larsen og fleiri, 2013b [Guðrún Larsen, Magnús Tumi Guðmundsson, Olgeir Sigmarsson]. Katla. Í Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.), *Náttúruvá á Íslandi* (bls. 211–233). Viðlagatrygging Íslands og Háskólaútgáfan.

Guðrún Larsen, 2000. Holocene eruptions within the Katla volcanic system, south Iceland: Characteristics and environmental impact. *Jökull*, 49, 1–28.

Gunnar Orri Gröndal og fleiri, 2005 [Gunnar Orri Gröndal, Guðrún Larsen og Sverrir Elefsen]. Stærðir forsögulegra hamfaraflóða í Markarfljóti – mæling á farvegum neðan Einhyrningsflata. Í Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli* (bls. 99–104). Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan.

Gunnar Orri Gröndal og Sverrir Elefsen, 2005. Farvegir Markarfljóts í Landeyjum og rennsli jökulhlaupsins 1822. Í Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli* (bls. 105–111). Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan.

Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 1998. Jarðfræðikort, berggrunnskort, 1:500.000. Náttúrufræðistofnun.

Haukur Tómasson, 1996. The Jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology*, 22, 249–254.

Hjalti Guðmundsson, 1998. Holocene glacier fluctuations and tephrochronology of the Öræfi district, Iceland. Óbirt doktorsritgerð, University of Edinburgh.

Hreinn Haraldsson, 1981. The Markarfljót sandur area, Southern Iceland: Sedimentological, petrological and stratigraphic studies. *Striae*, 15, 1–65.

Jóhann Helgason, 2007. Skaftafell, berggrunnskort. 1:25.000. Jarðfræðistofan Ekra.

Kate Smith, 2003. Holocene jökulhlaups, glacier fluctuations and palaeoenvironment, Mýrdalsjökull, South Iceland. Óbirt doktorsritgerð, University of Edinburgh.

Magnús Tumi Guðmundsson og fleiri, 2005 [Magnús T. Guðmundsson, Jónas Elíasson, Guðrún Larsen, Ágúst Gunnar Gylfason, Páll Einarsson, Tómas Jóhannesson, Kristín Martha Hákonardóttir and Helgi Torfason]. Yfirlit um hættu vegna eldgosa og hlaupa frá vesturhluta Mýrdalsjökuls og Eyjafjallajökli. Í Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli* (bls. 11–44). Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan.

Magnús Tumi Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), 2005. *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*. Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan. 210 bls.

Magnús Tumi Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir, 2005. Ísbráðnun og upptakarennsli 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* (bls. 159–180). Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan.

Magnús Tumi Guðmundsson og fleiri, 2008 [Magnús T. Guðmundsson, Guðrún Larsen, Ármann Höskuldsson, Ágúst Gunnar Gylfason]. Volcanic hazards in Iceland. *Jökull*, 58, 251–268.

Magnús Tumi Guðmundsson og Guðrún Larsen, 2013. Jökulhlaup. Í Júlíus Sólnes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.), *Náttúruvá á Íslandi* (bls. 156–170). Viðlagatrygging Íslands og Háskólaútgáfan.

Magnús Tumi Gudmundsson og fleiri, 2015 [Magnús Tumi Gudmundsson, Þórdís Högnadóttir, Eyjólfur Magnússon]. Öræfajökull Volcano: Eruption melting scenarios. Í Emmanuel Pagneux, Magnús T. Gudmundsson, Sigrún Karlsdóttir & Matthew J. Roberts (ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland. An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain* (bls. 45–72). Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Matthew J. Roberts og Magnús Tumi Gudmundsson, 2015. Öræfajökull Volcano: Geology and historical floods. Í Emmanuel Pagneux, Magnús T. Guðmundsson, Sigrún Karlsdóttir & Matthew J. Roberts (ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland. An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain* (bls. 17–44). Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.

Myers, B., Driedger, C., 2008. Geologic hazards at volcanoes. U.S. Geological Survey General Information Product 64, 1 sheet [http://pubs.usgs.gov/gip/64/].

Oddur Sigurðsson og R. S. Williams Jr., 2008. Geographic names of Iceland's glaciers: Historic and modern. U.S. Geological Survey Professional Paper 1746, 225 p., plus app. Vef: http://pubs.usgs.gov/pp/1746/

Prestvik, T., 1982. Petrography, chemical characteristics and nomenclature of Öræfajökull rocks. (Bergfræðileg einkenni gosbergs úr Öræfajökli). *Jökull*, 32, 69–76.

Sigurður Lárus Hólm og Snorri Páll Kjaran, 2005. Reiknilíkan fyrir útbreiðslu hlaupa úr Entujökli. Í Magnús T. Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli* (bls. 197–210). Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan.

Sigurdur Thorarinsson, 1958. The Öræfajökull eruption of 1362. *Acta Nat. Isl.* II, 2, 1–100.

Sigurður Þórarinsson, 1957. Hérað milli sanda og eyðing þess. *Andvari*, 82, 1, 35–47.

Sigurður Þórarinsson, 1974. Vötnin stríð. Saga Skeiðarárhlaupa og Grímsvatnagosa. Menningarsjóður, Reykjavík.

Tómas Jóhannesson og fleiri, 2013 [Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson & E. Berthier]. Ice-volume changes, bias-estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by LiDAR-mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Annals of Glaciology* 54(63), 63–74, doi 10.3189/2013AoG63A422.

Trausti Jónsson, 2002. Hættumat og hlutverk Veðurstofunnar í ljósi hættumatsramma Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar. Skýrsla nr. VÍ-ÚR11.

UNISDR, 2009. 2009 UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction.

Waythomas og fleiri, 2014 [Waythomas, Christopher F., Thomas C. Pierson, Jon J. Major, William E. Scott]. Voluminous ice-rich and water-rich lahars generated during the 2009 eruption of Redoubt Volcano, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 259, 389–413, doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.05.012

Witham, C. S., 2005. Volcanic disasters and incidents: a new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, 191–233.

Jökulhlaup í Öræfum og Markarfljóti vegna eldgosa undir jökli
Forgreining áhættumats

Jarðvísindastofnun Háskólans
Sturlugata 7
101 Reykjavik
Vefur: www.jardvis.hi.is
Sími: 525 4800

Veðurstofa Íslands
Bústaðavegur 7–9
108 Reykjavik
Vefur: www.vedur.is
Sími: 522 6000

Ríkislögreglustjóri
Skúlagata 21
101 Reykjavik
Vefur: www.almannavarnir.is
Sími: 444 2500

Forsíðumynd: Svínafellsjökull og Öræfajökull 5. nóvember 1996
© Oddur Sigurðsson

ISBN 978-9979-9975-8-0