

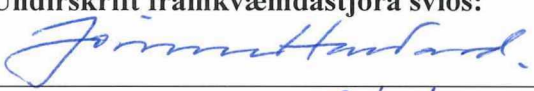
Áhættumat vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli

Bergur Einarsson
Einar Hjörleifsson
Tinna Þórarinsdóttir
Matthew J. Roberts

Áhættumat vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli

Bergur Einarsson
Einar Hjörleifsson
Tinna Þórarinsdóttir
Matthew J. Roberts

LYKILSÍÐA

Skýrsla nr. VI 2022-001	Dags. Mars 2022	ISSN 1670-8261	Dreifing: Opin ☒ Lokuð ☐
			Skilmálar:
Heiti skýrslu: Áhættumat vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli			Upplag: 5
			Fjöldi síðna: 100
Höfundur: Bergur Einarsson, Einar Hjörleifsson, Tinna Þórarinsdóttir og Matthew J. Roberts			Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir
			Verkefnisstjóri: Matthew J. Roberts
Gerð skýrslu/verkstig:			Verknúmer: 3721-0-0008
			Málsnúmer: 2020-0168
Unnið fyrir: Ofanflóðasjóð			
Samvinnuaðilar:			
Útdráttur: Þrjár sviðsmyndir jökulhlaupa frá Sólheimajökli vegna jarðhita- og eldvirkni undir Mýrdalsjökli hafa verið hermdar með straumfræðilegum líkanreikningum til þess að gera hættumat. Hættumatið leiðir í ljós að jökulhlaup geta haft umtalsvert tjónmætti og skapað geysimikla hættu á stórum svæðum við Sólheimajökul og á Sólheimasandi. Upplýsingar um viðveru og fjölda fólks á níu skilgreindum mismunandi viðverusvæðum innan mestu hlaupútbreiðslu eru síðan nýttar ásamt hættumatinu í áhættumat. Útreikningarnir byggjast á aðferðafræði bresku ríkisstofnunarinnar DEFRA til þess að meta áhættu fólks vegna vatnsflóða. Helstu niðurstöður áhættumatsins gefa til kynna að sé ekki gert ráð fyrir að komið hafi til rýmingar áður en að hlaup hefjist sé áhætta vissra hópa á svæðinu umtalsverð. Ljóst er að erfitt er að draga úr tjónmætti stórra jökulhlaupa með einhverskonar vörnum. Að draga úr tjónnæmi á svæðinu með lokunum og rýmingu þegar hlaup gætu verið yfirvofandi er því besta leiðin til þess að koma í veg fyrir slys á fólki eða manntjón. Hröð greining yfirvofandi hættu byggist á því að á hverjum tíma sé öflugt vöktunarkerfi til staðar. Einfaldar aðferðir til þess að taka tillit til áhrifa jakahranna og setframburðar á rennslisraða og vatnshæð í jökulhlaupum eru einnig kynntar í skýrslunni.			
Lykilorð: Jökulhlaup, Sólheimajökull, Jökulsá á Sólheimasandi, Sólheimasandur, hættumat, áhættumat, straumfræðilegir líkanreikningar, áhættureikningar, HEC-RAS		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs: 	
		Undirskrift verkefnisstjóra: 	
		Yfirlit af: SG, T6J	

Efnisyfirlit

Samantekt helstu niðurstaðna	11
1 Inngangur	13
1.1 Tilgangur og markmið verkefnis.....	13
1.2 Um hættumat og áhættumat.....	13
1.3 Þættir verkefnis	14
2 Bakgrunnur	15
2.1 Katla	15
Jarðfræðilegt yfirlit	15
Eldgosasaga.....	15
2.2 Saga jökulhlaupa frá Sólheimajökli	15
2.3 Sólheimajökull og Sólheimasandur sem áfangastaður ferðamanna	16
3 Aðferðafræði	20
3.1 Möguleg atburðarás og rennslissviðsmyndir.....	20
3.2 Hættumatsgreining	21
Landhæðargögn	22
Straumfræðilegir líkanreikningar	24
Tjónmætti	27
3.3 Áhættugreining.....	28
Skilgreining viðverusvæða	28
Mat á fjölda ferðafólks	28
Mat á viðverutíma ferðafólks	30
Útreikningar	30
4 Niðurstöður	34
4.1 Hættumat	34
Sviðsmynd 1 – 5.000 m ³ /s.....	34
Sviðsmynd 2 – 30.000 m ³ /s	41
Sviðsmynd 3 – 100.000 m ³ /s	47
Sviðsmyndir með 100.000 m ³ /s hámarksrennsli og upptök á jökli	53
Viðbótarsviðsmynd með 10.000 m ³ /s hámarksrennsli.....	55
4.2 Fjöldi og viðverutími ferðafólks	58
4.3 Áhættumat.....	58
4.4 Óvissupættir og næmnigreining.....	64
Óvissa tengd sviðsmyndunum.....	64
Straumfræðilegir líkanreikningar	65
Samanburður við fyrri líkanreikninga	67
Áhættureikningar	68
5 Samantekt, ábendingar og frekari rannsóknir	71
5.1 Samantekt	71
5.2 Ábendingar og umræður	73
5.3 Frekari rannsóknir	76

Þakkir	77
Heimildir	78
Viðaukar	
I Breytingar á hrýfisstuðli Manning vegna áhrifa setframburðar og jakahranna	84
II Setupphleðsla í jökulhlaupum	88
III Viðvera ferðafólks	90
IV Fjöldi ferðafólks	93
V Val á stuðlum í aðferðafræði DEFRA	99

Myndaskrá

1	Yfirlitskort af rannsóknarsvæðinu	17
2	Fjöldi ferðafólks sem fór eftir Sólheimajökulsvegi 2011–2018	18
3	Rennslissviðsmyndir	22
4	Uppruni landhæðarlíkans	23
5	Hrýfisstuðull Manning sem notast er við í straumfræðilegu líkanreikningunum....	26
6	Viðverusvæði fólks í námunda við Jökulsá á Sólheimasandi	29
7	Hámarksdýpi í 5.000 m ³ /s jökulhlaupi	36
8	Hámarksstraumhraði í 5.000 m ³ /s jökulhlaupi	37
9	Mesta útbreiðsla í 5.000 m ³ /s jökulhlaupi	38
10	Mesta tjónmætti í 5.000 m ³ /s jökulhlaupi	39
11	Framrásartími 5.000 m ³ /s jökulhlaups	40
12	Hámarksdýpi í 30.000 m ³ /s jökulhlaupi	42
13	Hámarksstraumhraði í 30.000 m ³ /s jökulhlaupi	43
14	Mesta útbreiðsla í 30.000 m ³ /s jökulhlaupi	44
15	Mesta tjónmætti í 30.000 m ³ /s jökulhlaupi	45
16	Framrásartími 30.000 m ³ /s jökulhlaups	46
17	Hámarksdýpi í 100.000 m ³ /s jökulhlaupi	48
18	Hámarksstraumhraði í 100.000 m ³ /s jökulhlaupi	49
19	Mesta útbreiðsla í 100.000 m ³ /s jökulhlaupi	50
20	Mesta tjónmætti í 100.000 m ³ /s jökulhlaupi	51
21	Framrásartími 100.000 m ³ /s jökulhlaups	52
22	Mesta útbreiðsla í 100.000 m ³ /s jökulhlaupi með upptök á jökli	54
23	Hámarksdýpi í 10.000 m ³ /s jökulhlaupi	56
24	Hámarksstraumhraði í 10.000 m ³ /s jökulhlaupi	57
25	Samanlögð einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa fyrir mismunandi meðalviðveru	61
26	Staðaráhætta af völdum jökulhlaupa á mismunandi viðverusvæðum	63
27	Skýringarmynd af áhrifum jaka á flæði jökulhlaups	85
28	Logri hlutfallslegrar setþykktar sem fall af hlutfallslegri fjarlægð frá jökli	88
29	Meðalfjöldi ferðafólks á klukkustund á viðverusvæðum 1–5	96
30	Meðalfjöldi ferðafólks á klukkustund á þjóðvegi 1	96
31	Sólheimasandur nálgun gagna um fjölda ferðafólks	97

Töfluskrá

1	Eiginleikar sviðsmynda fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli	22
2	Hætta sem fólki stafar af flóði, samkvæmt tjónmættisgildum DEFRA	27
3	Hermdir framrásartímar mismunandi sviðsmynda að helstu kennileitum	53
4	Fjöldi og viðvera ferðafólks á ári	58
5	Einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa, dæmigerður ferða- og leiðsögumaður	59
6	Einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa, dæmigerður jöklaleiðsögu- maður og starfsmaður á þjónustusvæðinu	60

7	Samanlögð einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa fyrir mismunandi meðalviðveru	60
8	Samanlögð einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa fyrir dæmigerðan leiðsögumann brotin niður eftir viðverusvæðum og sviðsmyndum	62
9	Staðaráhætta af völdum jökulhlaupa á mismunandi viðverusvæðum.....	62
10	Mögulegt manntjón í hlaupum	63
11	Samanburður á hermdri vatnshæð í völdum þversniðum við fyrri líkanreikninga..	67
12	Hámarkssetþykkt við jaðar og heildarmagn setefna sviðsmynda	89
13	Tímalengd skipulagðra ferða á Sólheimajökul	90
14	Viðvera á Þjóðvegi 1	91
15	Ferðatími um Sólheimasand, eftir gangstíg að flugvélaflaki	92
16	Skipting tímabila við greiningu á fjölda ferðafólks	93
17	Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæði 1	94
18	Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæðum 2–3	95
19	Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæðum 4–5	95
20	Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæði 6.....	97
21	Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæðum 7–9	98
22	Gildi stuðla sem meta þarf fyrir áhættu jöfnur DEFRA.....	100

Breytur og tákn

HR Tjónmætti af völdum vatnsflóða [–]

v Straumhraði [m/s]

D Vatnsdýpi [m]

DF Stuðull sem lýsir magni lausagrjóts, ísjaka, braks og annars efnis í flóði [–]

AV Tjónnæmi svæðis [–]

E Hlutfall fólks á útbreiðslusvæði flóðs sem stafar hættu af flóðinu [–]

PV Tjónnæmi fólks [–]

P_{inj} Líkur á því að slasast í tilteknu flóði [–]

P_f Líkur á því að látast í tilteknu flóði [–]

C Stuðull í áhættureikningum $C = 2 \frac{HR}{100}$ [–]

N Fjöldi fólks á flóðasvæði [–]

N_{inj} Mögulegur fjöldi slasaðra í tilteknu flóði [–]

N_f Mögulegur fjöldi látinna í tilteknu flóði [–]

S_{ft} Samfélagsleg áhætta [–]

A_z Flatarmál flóðasvæðis [–]

P_{vh} Árlegar líkur á að verða fyrir ákveðnu flóði [1/ár]

S_{inj} Árlegar slysalíkur einstaklings af völdum tiltekins flóðs [1/ár]

S_f Árlegar dánarlíkur einstaklings af völdum tiltekins flóðs [1/ár]

A Heildar áhætta vegna margra óháðra flóðasviðsmynda [–]

k Heildar fjöldi flóðasviðsmynda [–]

Q_{max} Hámarksrennsli hlaupsviðsmyndar [m³/s]

μ Seigja flóðvatns [P s]

ρ Eðlismassi flóðvatns [kg/m³]

v Eðlisseigja flóðvatns [m²/s]

n Hrýfisstuðull Manning [s/m^{1/3}]

n_{set} Hrýfisstuðull Manning, fyrir flæði þar sem tekið er tillit til setframburðar [s/m^{1/3}]

- μ_{set} Seigja fyrir flæði þar sem tekið er tillit til setframburðar [P s]
- ρ_{set} Eðlismassi fyrir flæði þar sem tekið er tillit til setframburðar [kg/m³]
- v_{set} Eðlisseigja , fyrir flæði þar sem tekið er tillit til setframburðar [m²/s]
- C_{rh} Rúmmálshlutfall fastra efna í flæði þar sem tekið er tillit til setframburðar [m²/s]
- R_h Straumgeisli í jöfnu Manning [m]
- S Halli farvegjar í jöfnu Manning [–]
- d Dýpi farvegjar í jöfnu Manning [m]
- n_b Breytt gildi hrýfisstuðls Manning til að taka tillit til jakahranna [s/m^{1/3}]
- R_{HEC} Straumgeisli flæðisins í HEC-RAS líkanreikningunum [m]
- y Hlutfallsleg setþykkt [–]
- x Hlutfallsleg fjarlægð frá jökli [–]
- $\Delta_{set_{max}}$ Hámarkssetþykkt við jaðar [m]
- V_{max} Heildarmagn setefna sem sest til í hlaupi [m³]
- e Grunntala náttúrulega lograns [~2.71828]

Samantekt helstu niðurstaðna

- Jökulhlaup eru þekkt frá Sólheimajökli. Frá jöklinum hafa komið bæði minni hlaup vegna jarðhitavirkni undir Mýrdalsjökli og stórhlaup vegna eldsumbrota í Kötlu.
- Sólheimajökull er vinsæll ferðamannastaður og mikil umferð fólks á jöklinum og svæðinu framan hans.
- Hættumat byggt á straumfræðilegum líkanreikningum fyrir þrjár sviðsmyndir jökulhlaupa frá Sólheimajökli vegna jarðhita- og eldvirkni undir Mýrdalsjökli bendir til að hætta á svæðinu geti verið umtalsverð.
 - Jökulhlaup geta skapað geysimikla hættu á helstu viðverusvæðum fólks við jökulinn, svo sem á: jöklinum sjálfum, við jaðar hans, á göngustígnum að jöklinum, á þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegar, á Sólheimajökulsvegi og við brúna yfir Jökulsá á Sólheimasandi á þjóðvegi 1.
 - Stærri hlaup geta líka skapað geysimikla hættu á öðrum viðverustöðum svo sem við flugvélarflakið á Sólheimasandi, á göngustígnum að því og á bílastæðinu við upphaf göngustígsins.
 - Hluti stórra hamfarahlaupa sem brjóta sér leið til jökulyfirborðs ofan jökuljaðars getur komið fram um Hólsárgil og dalinn austan við Jökulhaus. Fari þessi atburðarrás á versta veg með miklu rennsli fram úr Hólsárgili getur vatn náð að húsum á Ytri-Sólheimum 1 og á Sólheimahjáleigu. Vegurinn að Sólheimabæjunum gæti einnig farið á kaf í hlaupvatn.
- Samkvæmt áhættureikningum sem nýta niðurstöður hættumatsins og upplýsingar um viðveru og fjölda fólks á 9 mismunandi skilgreindum viðverusvæðum innan mestu hlaupútbreiðslu, er áhætta vissra hópa á svæðinu umtalsverð hafi ekki komið til rýmingar áður en hlaup hefjist. Áhættumatið er tilraunaverkefni og hérlendis eru hvorki til reglur né viðmið um ásættanlega áhættu vegna jökulhlaupa eða almennra vatnsflóða. Helstu niðurstöður áhættumatsins eru því settar fram í samanburði við önnur þekkt áhættuviðmið.
 - Einstaklingsbundin árleg dánaráhætta leiðsögumanns á svæðinu við og á Sólheimajökli, jöklaleiðsögumanns eða starfsmanns sem vinnur á þjónustusvæðinu við enda vegarins að jökli (með dæmigerða viðveru samsvarandi fullri vinnu allt árið) getur verið allt að 2 til 4 sinnum hærri heldur en almenn áhætta í umferðinni og meira en þrisvar sinnum hærri heldur en dæmigerð áhætta starfsfólks í byggingariðnaði.
 - Einstaklingsbundin áhætta hvers ferðamanns er lítil. Til samanburðar þá er hún er tveimur stærðargráðum minni heldur en meðaláhætta á að látast af völdum eldingar á heimsvísu.
 - Þó einstaklingsbundin áhætta hvers ferðamanns sé lítil þá eru þeir oft margir á svæðinu. Með upplýsingum um meðalviðveru og fjölda ferðamanna má meta mögulegt manntjón fyrir mismunandi sviðsmyndir. Líkur á slysi eða manntjóni fyrir ótiltekinn ferðamann eru umtalsverðar. Mögulega gætu tugir fólks farist í verstu tilfellum komi ekki til rýmingar.

- Meta má árlegan meðal fjölda andláta vegna jökulhlaupa á svæðinu öllu, án rýmingar, sem 0,005 til 0,1 andlát. Þ.e. að áhætta ferðamanna jafngildi einu andláti á 10 til 200 ára fresti. Vert er að hafa í huga að þessir atburðir eru ólíkir t.d. mannskæðum bílslysnum, sem eru nokkur á ári. Þessi meðaltöl ráðast af mögulegu talsverðu manntjóni í mjög sjaldgæfum atburðum. Þ.e. að meginþorra tímans séu engin mannskæð slys en svo þegar þau verði geti fleiri en einn farist.
- Staðaráhætta á þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegur er umtalsverð. Til samanburðar má nefna að staðaráhættan á þjónustusvæðinu jafngildir skilgreiningu á B eða C svæði í ofanflóðahættumati á mestum hluta bilsins sem hún kann að liggja á.
- Mikilvægt er að ferðafólk og sérstaklega leiðsögumenn og starfsfólk á svæðinu við og á Sólheimajökli sé vel upplýst um hættuna þar sem áhætta þess getur verið umtalsverð.
- Erfitt er að draga úr tjónmætti stórra jökulhlaupa með vörnum. Að draga úr tjónnæmi á svæðinu með lokunum og rýmingu þegar hlaup gætu verið yfirvofandi er því vænlegasta leiðin til að koma í veg fyrir slys á fólki eða manntjón.
- Framgangshraði hlaupanna getur verið mikill. Minnstur tími gefst til rýmingar á jöklinum sjálfum, á göngustígnum að honum, á þjónustusvæðinu og á Sólheimajökulsvegi. Rýmingar á þessum svæðum geta því ekki verið byggðar á fyrstu merkjum um hlaup við jaðar. Einnig er hættu á að Sólheimajökulsvegur verði ófær í hlaupum og fólk geti því orðið innlyksa við jökulinn og á þjónustusvæðinu.
 - Því er nauðsynlegt að notast við rýmingu og lokanir sem byggja á fyrstu merkjum um breytta jarðhitavirkni eða eldsumbrot sem gætu valdið hlaupum. Góð vöktun á eldstöðinni Kötlu er því mikilvæg. Einnig er mikilvægt að gott boðkerfi sé til staðar til þess að koma upplýsingum um yfirvofandi hættu og rýmingu til fólks á svæðinu.
 - Bæta má rauntímamat á yfirvofandi hættu með því að geta greint framrás jökulhlaupa sem næst upptakastað undir jöklinum. Endurbætur í mælakerfinu á svæðinu með i) samfelldum GPS-mælingum á jökulyfirborði yfir líklegum flóðfarvegi og ii) mælingum á hlaupóróa með hljóðnemunum eða fylkjum jarðskjálftanema, gætu því verið til úrbóta.
 - Mikilvægt er að þekking á forboðum jökulhlaupa sé eins góð og mögulegt er. Æskilegt er að frekari vinna verði unnin á því sviði og að viðmiðunarþröskuldar fyrir lokanir og rýmingu á svæðinu verði útbúnir. Slík forvinna myndi flýta túlkun mælinga og rýmingu þegar þarf.

1 Inngangur

1.1 Tilgangur og markmið verkefnis

Sólheimajökull er vinsæll ferðamannastaður og þar er fjöldi ferðamanna árið um kring. Jökulhlaup eru hluti af náttúrulegum aðstæðum við Sólheimajökul og geta valdið verulegu tjóni, jafnvel manntjóni (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000, Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2008). Því er mikilvægt að meta áhættu af jökulhlaupum á svæðinu svo að unnt sé að bregðast við mögulegri hættu með skipulags- og viðbragðsáætlunum. Markmið verkefnisins er því að leggja mat á hættu og áhættu vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli. Í verkefninu verður farið yfir fyrirbyggjandi rannsóknir og jökulhlaup af mismunandi stærðargráðum eru reiknuð með tímaháðum reikningum í tvívíðu straumfræðilíkani. Hraði, dýpi og útbreiðsla verða reiknuð fyrir flóð af mismunandi stærðargráðum, á bilinu 5.000 til 100.000 m³/s. Niðurstöður verða bornar saman við fyrri straumfræðilega reikninga á sambærilegum hlaupum á svæðinu. Við úrvinnslu verkefnisins er tekið tillit til upplýsinga um fjölda ferðamanna og dreifingu þeirra á svæðinu. Í samræmi við þá staðla sem Veðurstofan hefur innleitt í áhættumatsverkefnum er verkefnið unnið skv. áhættumatsramma Sameinuðu þjóðanna og Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar (Trausti Jónsson, 2002; <http://www.unisdr.org/>)

Verkefnið er hluti af heildarhættumati vegna eldgosa á Íslandi sem hlotið hefur yfirheitið GO-SVÁ. Veðurstofa Íslands stýrir GOSVÁ verkefninu, í samvinnu við Jarðvísindastofnun Háskólans, Almennavarnadeild Ríkislögreglustjóra, Landgræðsluna og Vegagerðina. GOSVÁ verkefnið er víðtækt og eitt af því sem fellur þar undir er að gera hættu- og áhættumat fyrir svæði sem orðið geta fyrir jökulhlaupum.

Afurðir verkefnisins eru i) hættumatskort sem sýna umfang, dýpi og hraða flóðanna og ii) áhættugreining miðað við áætlaða viðveru á völdum stöðum innan svæðisins. Ætlunin er að niðurstöðurnar nýtist sveitarfélaginu við ákvörðunartöku og skipulagsáætlanir en ekki síður viðbragðsaðilum við gerð viðbragðs- og rýmingaráætlaða.

1.2 Um hættumat og áhættumat

Jafnan er gerður sá greinarmunur á hættu- og áhættumati í umfjöllun um náttúruvá að hættumat taki til tjónmættis og lýsi stærð, afli og krafti náttúruváratburðar og hversu mikil líkindi eru á því að hann eigi sér stað, en áhættumat sé greining á bæði tjónmætti og af tjónnæmi, en það síðartalda segir til um hve viðkvæmt samfélagið, innviðir og kerfi eru fyrir tjóni sem hlýst af náttúruhamförum. Innan flóðatilskipunar Evrópusambandsins er fjallað um kortlagningu á hættu (e. hazard) annars vegar og áhættu (e. risk) hins vegar. Þar er skilgreint að við kortlagningu á flóðahættu skuli sýna umfang flóða, vatnsdýpi eða vatnsborð og flóðahraða eftir því sem við á innan svæða sem gætu farið undir vatn í mismunandi sviðsmyndum. Sviðsmyndirnar skulu hafa mismunandi endurkomutíma s.s. hamfaraatburðir (með lágar líkur), meðalstórir atburðir (með endurkomutíma ≥ 100 ár) og jafnvel tíðir atburðir ef það þykir nauðsynlegt. Flóðaáhættukort eiga að sýna afleiðingar flóða hvað varðar fjölda þeirra íbúa sem verða fyrir áhrifum flóða, umhverfisáhrif flóða, efnahagsleg áhrif o.s.frv. (Flóðatilskipun, kafla III, grein 6) og taka þannig tillit til tjónnæmis.

Þetta verkefni fylgir tillögum frá flóðatilskipun Evrópusambandsins að því leyti að flóðahættan er kortlögð fyrir mismunandi sviðsmyndir með ólíkan endurkomutíma flóða. Áhættan af völdum

jökulhlaupa er þó ekki sett fram á kortum heldur í töflum fyrir valda staði innan svæðisins og aðeins er fjallað um áhættu gagnvart fólki og þá sérstaklega ferðamönnum og starfsfólki í ferðaþjónustu en ekki efnahagslegu tjóni eða tjóni á menningarlegri arfleifð og umhverfi.

Greining áhættu í þessu verkefni byggir því einungis á persónubundinni áhættu en ekki tjónnæmi efnahagslegra þátta. Þetta var ákveðið í ljósi þess að um svæðið fer mikill fjöldi fólks daglega og er því talið mikilvægara að greina áhættu gagnvart fólki fremur en veraldlegum hlutum. Niðurstöður áhættugreiningarinnar má einnig framreikna fyrir hópa fólks. Útreikningar áhættu innan verkefnisins byggja á aðferðafræði sem breska ríkisstofnunin DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs) hefur lagt fram til þess að meta áhættu fólks vegna vatnsflóða (DEFRA, 2006a,b). Frekari útlistun á aðferðafræðinni má finna í íslenskri samantekt um aðferðina og notkun hennar (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2020).

Hérlandis eru hvorki til reglur né viðmið um ásættanlega áhættu vegna jökulhlaupa eða vatnsflóða en unnið er að tillögum um slík áhættuviðmið fyrir vatnsflóð (Tinna Þórarinsdóttir og Matthew J. Roberts, í vinnslu). Þetta verkefni er því tilraunaverkefni í að meta áhættu, en ekki aðeins hættu, vegna jökulhlaupa. Hér eru niðurstöður áhættugreininganna aðeins skoðaðar í samhengi við aðra áhættu eða hvað telst ásættanleg áhætta á öðrum sviðum. Ásættanleg áhætta táknar áhættustigið sem samþykkt er í samfélaginu og byggist á gildum þess á hverjum tíma. Við efri mörk getur áhættan talist óviðunandi en við lægri mörk nánast hverfandi. Milli þessara marka liggur breitt svæði þar sem nauðsynlegt er að taka ýmsar ákvarðanir til þess að koma áhættunni á ásættanlegt eða þolanlegt stig. Til eru upplýsingar um árlegar dánarlíkur vegna mismunandi áhættuþátta í daglegu lífi sem og mörk viðunandi áhættu af völdum ofanflóða sem nýta má til samanburðar við niðurstöður áhættugreiningar.

1.3 Þættir verkefnis

Skýrslan byggist upp á fimm köflum auk heimilda og viðauka. Í kafla 1 er gerð grein fyrir tilgangi og markmiði verkefnisins og fjallað um skilgreiningar hættu- og áhættumats. Í kafla 2 er farið yfir bakgrunn verkefnisins. Þar er yfirlit um i) jarðfræði og eldgosasögu svæðisins og ii) Sólheimajökul og Sólheimasand sem áfangastaði ferðafólks. Í kafla 3 má finna upplýsingar um aðferðafræði varðandi hættu- og áhættumatsgreiningu og farið yfir mögulegar atburðarásir og rennslissviðsmyndir. Kafla 4 fjallar um niðurstöður verkefnisins, samanburð við fyrri líkanreikninga og mögulega óvissu og næmnigreiningu. Í kafla 5 eru aðalatriði skýrslunnar dregin saman og lagðar fram ábendingar og tillögur að frekari rannsóknum. Lesendum, sem nægir að skoða niðurstöðurnar án þess að fara yfir aðferðir, er bent á töflur og myndir í kafla 4 og texta í kafla 5.

Viðaukar skýrslunnar eru fimm talsins og fjalla á ítarlegri hátt um sértæk viðfangsefni skýrslunnar. Viðauki I fjallar um breytingar á hrýfisstuðli Manning vegna áhrifa setframburðar og jakahranna. Í viðauka II er fjallað um setupphleðslu í jökulhlaupum þar sem könnuð voru áhrif setuppbyggingar á mögulega útbreiðslu hlaupsviðsmynda með 100.000 m³/s og 30.000 m³/s hámarksrennsli. Viðaukar III og IV fjalla um viðveru og fjölda ferðafólks á svæðinu. Í viðauka V er svo farið yfir val á stuðlum í aðferðafræði DEFRA sem beitt er við hættumat og áhættugreiningu.

2 Bakgrunnur

2.1 Katla

Kynningin hér að neðan á megineldstöðinni Kötlu er byggð á samantekt Guðrúnar Larsen og Magnúsar Tuma Guðmundssonar (2016) í Íslenskri eldfjallavefsjá og umfjöllun Guðrúnar Larsen, Magnúsar Tuma Guðmundssonar og Olgeirs Sigmarssonar (2013) í Náttúruvá á Íslandi.

Jarðfræðilegt yfirlit

Katla er hluti af um 80 km löngu eldstöðvakerfið á Austurgosbeltinu. Megineldstöðin rís hæst 1490 m h.y.s. í Goðabungu í Mýrdalsjökli. Mýrdalsjökull hylur megineldstöðina og fyllir Kötlu-öskjuna með ís. Ísinn innan öskjunnar er 400–700 m þykkur en norðan hennar er þykkt hans um 100–400 m (Helgi Björnsson o.fl., 2000). Á ísilögðum hlíðum utanverðrar öskjunnar í vestri, suðri og austri er ísþykktin yfirleitt undir 100 m. Gosum á jökulhulda hluta eldstöðvakerfisins fylgja jökulhlaup. Virkur sprungusveimur liggur út fyrir jökulinn til norðausturs frá megineldstöðinni.

Innan megineldstöðvarinnar eru basísk sprengigos algengust og er gjóskumagn (rúmmál) í hverju gosi yfirleitt á bilinu 0,02–2 km³. Súr sprengigos þekkjast líka en þau eru minni en þau basísku, 0,02 til >0,27 km³. Stærstu gosin eru basísk flæðigos úr sprungusveiminum en rúmmál hrauns úr þeim getur verið >18 km³. Langstærstur hluti hraunanna kom upp í einu gosi, Eldgjárgosinu á 10. öld.

Eldgosasaga

Á síðustu 11 öldum hafa orðið a.m.k. 21 eldgos í eldstöðvakerfi Kötlu. Mögulegt er að fleiri minni gos, sem ekki hafi náð að brjóta sér upp úr jöklinum, hafi orðið. Meðaltími á milli eldgosa sem ná til jökulyfirborðs er því um 50 ár. Síðan 1500 hefur tímabil milli gosa styst orðið 13 ár. Núverandi goshlé frá síðasta stórgosi, sem var 1918, er aftur á móti það lengsta á því tímabili. Ekki er hægt að útiloka að lítil eldgos hafi orðið við jökulbotn og valdið jökulhlaupum 1955, 1999 og 2011. Sterkar vísbendingar eru þó um að orsök þeirra liggi í breytingum á jarðhitavirkni (Galeczka o.fl., 2014).

Jökulhlaup hafa fylgt öllum Kötlugosum á sögulegum tíma sem sæmilegar heimildir eru til um. Síðan í Eldgjárgosinu 934–938 hafa öll jökulhlaup vegna eldgosagosa, sem ná til jökulyfirborðs, komið frá Kötlujökli og fram Mýrdalsand. Þekkt eru ummerki um a.m.k. 10 hlaup til vesturs niður Entujökul og svo um Syðri Emstruá og Markarfljót. Þessi hlaup eru öll forsöguleg og verða á rúmlega 7000 ára tímabili. Það síðasta varð fyrir um 1200 árum, en eftir Eldgjárgosið á fjórða áratug 10. aldar hafa engin umtalsverð jökulhlaup farið þessa leið. Jökulhlaup vegna eldgosa í suðvesturhluta Kötluöskjunnar hafa einnig komið fram niður á Skógasand eins og nánar rakið hér að neðan. Út frá eldgosasögu Kötlu á nútíma og skiptingu Kötluöskjunnar á milli vatnasviða má ætla að um 85–89% líkur séu að næsta gos verði á vatnasviði Kötlujökuls en 4–8% líkur fyrir hvort um sig af vatnasviðum Sólheima- og Entujökuls (Jónas Elíasson o.fl., 2005).

2.2 Saga jökulhlaupa frá Sólheimajökli

Seinustu ummerki um stórhlaup niður Sólheimasand af völdum eldgosa í Kötlueldstöðinni eru frá því snemma á tíundu öld og því annað hvort af völdum Kötlugossins 920 eða Eldgjárgossins

934–938 (Guðrún Larsen, 2000). Ummerki eru um fleiri stórhlaup frá Sólheimajökli og áætlað að a.m.k. 8 slík hafi gengið yfir sandinn á ~4000 ára tímabili (Maizels, 1989). Þessi hlaup hafa verið ráðandi afl í myndun sandsins sem er að miklu leyti gjóska borin fram í jökulhlaupum (Maizels, 1989).

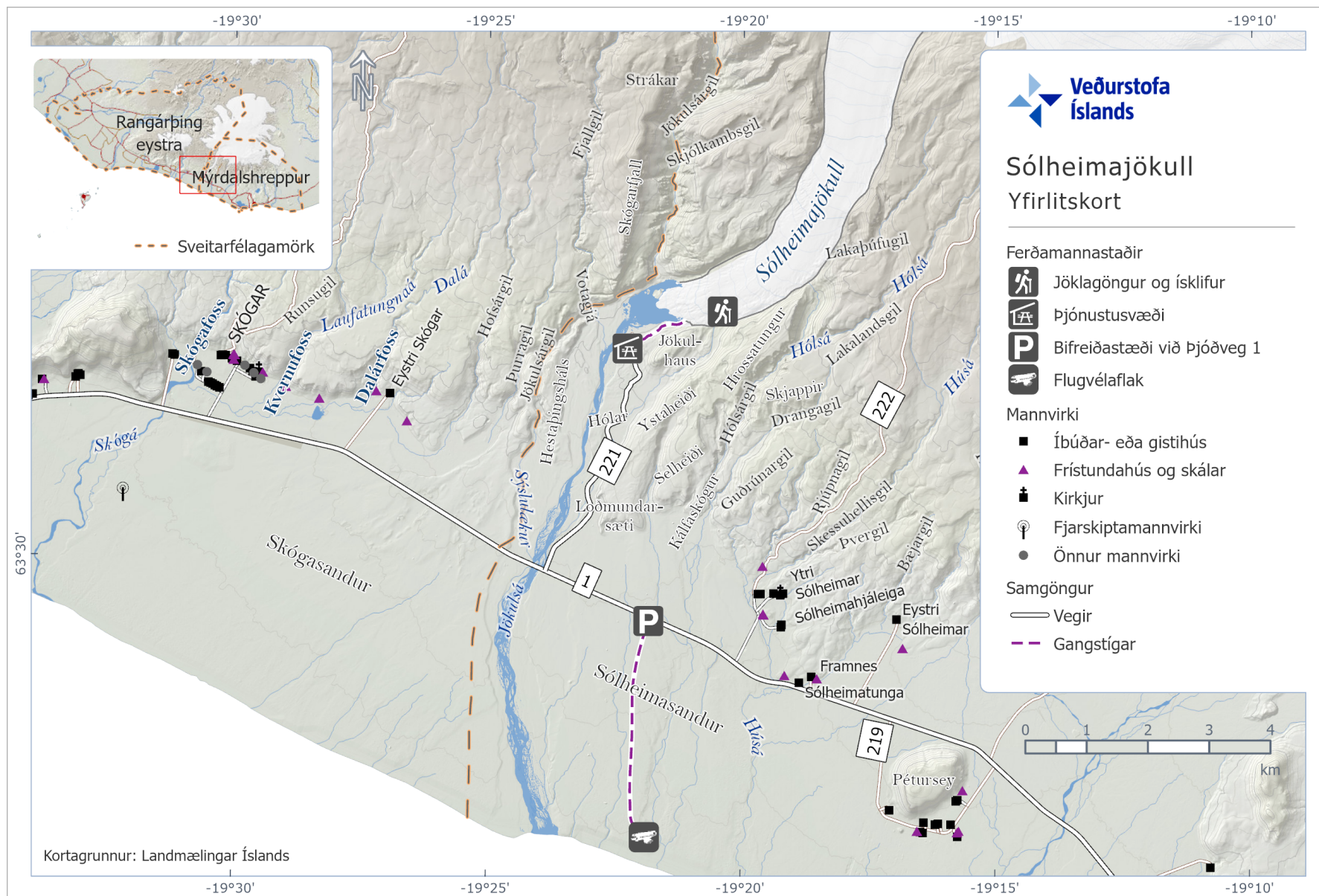
Undanfarin rúm 150 ár eru nokkur hlaup þekkt. Talið er að árið 1860 hafi hluti hlaups vegna Kötlugoss komið frá Sólheimajökli þó að meginhlaupið hafi komið frá Kötlujökli (Guðrún Larsen, 2000). Í kringum aldamótin 1900 eru svo þekkt hlaup, annaðhvort vegna lítilsháttar eldgosa eða jarðhitavirkni á vatnasviði jökulsins (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2015a). Næsta markverða hlaup er svo ekki fyrr en í júlí 1999 en þá kom fram hraðrásandi hlauptoppur á aðeins örfáum klukkustundum (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000; Russell o.fl., 2000). Hámarksrennsli þess hlaups hefur verið metið um $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ við brúna á Þjóðvegi 1 (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000) en á bilinu 2000–4400 m^3/s upp við jökul (Russell o.fl., 2010; Guan o.fl., 2015). Orsök hlaupsins er óþekkt (Guðrún Larsen og Magnús Tumi Guðmundsson, 2016). Hlaupið er upprunnið úr sigkatli í upptökum Sólheimajökuls. Sé gert ráð fyrir að ketillinn myndist á mjög stuttum tíma (klukkustundum eða 1–2 sólarhringum) þarf varmaflæðið að vera svipað og sést í eldgosum. Hafi vatnið safnast fyrir á lengri tíma gæti jarðhiti skýrt hlaupið. Báðir möguleikar koma til greina, þ.e. lítið eldgos, grunnt innskot eða önnur ástæða jarðhitabreytinga við jökulbotninn (Guðrún Larsen og Magnús Tumi Guðmundsson, 2016). Út frá rúmmáli ketilsins sem myndaðist og áætluðum rennslisferli hlaupsins má ætla að rúmmál þess hafi verið um $20 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000).

Með mælingum á vatnshæð og leiðni síðan 1999 og aukinni vöktun á Jökulsá á Sólheimasandi hefur orðið vart við allmörg smáhlaup í ánni (Sverrir Ó. Elefsen o.fl., 2002, Baldur Bergsson, 2016, Bergur Einarsson, 2019). Þessi hlaup eru að öllum líkindum tengd jarðhitavirkni við jökulbotn undir vatnasviði Sólheimajökuls. Þau valda 1–5 faldri rennslisaukningu í ánni auk 2–3 földunar á mældri leiðni. Fjórir slíkir atburðir hafa verið auðkenndir á tímabilinu 2010 til 2016 (Baldur Bergsson, 2016). Frá 2016 til 2019 eru 2–4 slíkir atburðir til viðbótar (Bergur Einarsson, 2019). Líklegt er að atburðir sem þessir hafi átt sér stað áður en vöktun með mælitækjum hófst. Mikil brennisteinslykt af ánni á löngum tímabilum fyrir 1999 bendir einnig til þess að oft hafi verið sírennsli jarðhitavatns í hana (Helgi Björnsson o.fl., 2000).

2.3 Sólheimajökull og Sólheimasandur sem áfangastaður ferðamanna

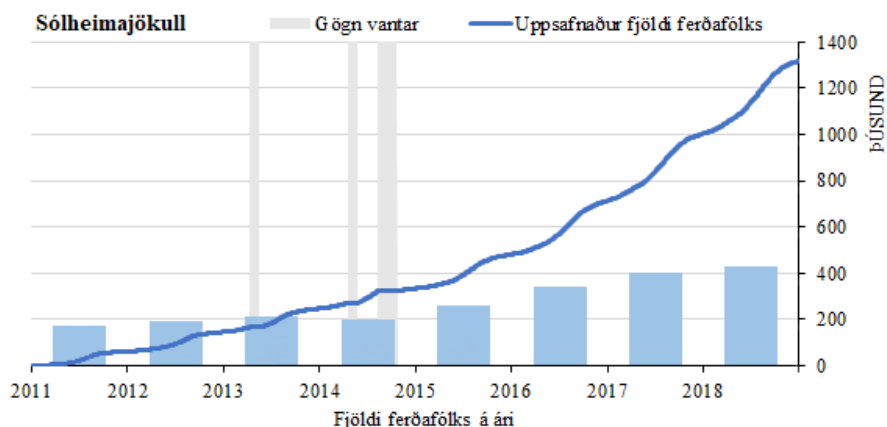
Sólheimajökull er skriðjökull sem skriður til suðvesturs undan Mýrdalsjökli. Framan við jökulinn er lón sem hefur myndast og stækkað samtíma hopi jökulsins. Frá lóninu rennur Jökulsá, jafnan kennd við Sólheimasand, sem hún flæmist um í átt til sjávar. Jökulsá á Sólheimasandi rennur rétt austan sveitarfélagamarka Rangárpings eystra (vestan Jökulsárgils) og Mýrdalshrepps (austan Jökulsárgils), sjá mynd 1. Sólheimajökull og Sólheimasandur eru fjölsóttir áfangastaðir ferðafólks og báðir staðir hafa vaxið í vinsældum á undanförunum árum.

Vegalengdin frá höfuðborgarsvæðinu til Sólheimajökuls er aðeins 165 km. Staðurinn er því vinsæll meðal ferðafólks sem hefur hug á jökлагöngum, en jökлагöngur ásamt ísklifri er eftirsótt afþreying erlends ferðafólks hér á landi (Oddný Þóra Óladóttir, 2019). Fjöldi ferðafólks sem sækir Sólheimajökul heim hefur aukist til muna á undanförunum árum, það styðja gögn frá Rannsóknarmiðstöð Ferðamála (Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir, 2018). Ef rýnt er í gögnin má sjá að ferðamannastraumur jókst jafnt og þétt til ársins 2016 (mynd 2) og tók þá stökk fram



Mynd 1. Sólheimajökull, Sólheimasandur og nærsvæði.

til 2018, nýjustu gögn frá 2019 sýna að fjölda ferðafólks árið 2019 svipar til ársins 2018 (Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir, 2019, óútgefið efni). Á mynd 2 má sjá að heildarfjöldi ferðafólks sem heimsækir Sólheimajökul á ári hverju hefur vaxið úr tæplega 200 þúsund árið 2011 í rúm 400 þúsund árið 2018. Þrátt fyrir þann mikla fjölda ferðafólks sem fer að Sólheimajökli hefur þolmörkum staðarins ekki verið náð skv. Önnu Dóru Sæþórsdóttur o.fl. (2016) en þess ber þó að geta að fjöldi ferðafólks jókst enn eftir útgáfu skýrslunnar 2016.



Mynd 2. Fjöldi ferðafólks sem fór eftir Sólheimajökulsvegi 2011–2018. Gögn: (Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir, 2018 og 2019).

Á Sólheimasandi er flak flugvélar sem nauðlenti þar árið 1973 (Tíminn, 22. nóvember 1973) án mannskaða. Flugvélin var skilin eftir og á undanförunum árum hefur flugvélaflakið fest sig í sessi sem áfangastaður ferðafólks sem ferðast um Suðurland (Kristján Már Unnarsson, 2016, 29. ágúst). Markviss talning hefur ekki farið fram á fjölda fólks sem leggur leið sína að flugvélaflakinu en í kafla 4.2 er lagt mat á fjöldann með hjálp gagna frá ferðaþjónustuaðilum og landeigendum. Almennt má segja að þróun í fjölda ferðafólks á svæðum við og á Sólheimajökli sé í takt við það stökk sem varð í fjölda ferðamanna á landsvísi sem er lýst í skýrslu ferðamála-, iðnaðar-, og nýsköpunarráðherra um þolmörk ferðamennsku (Þingskjal 717, 2017–2018).

Samgöngur hafa verið bættar til muna að Sólheimajökli og má gera ráð fyrir að það eigi þátt í vinsældum svæðisins. Sólheimajökulsvegur var endurgerður og lagt bundið slitlag frá þjóðvegi 1 að þjónustusvæðinu árið 2015 (Vegagerðin, 2016). Aðgengi og aðstaða til að skoða flugvélaflakið hefur einnig verið bætt til muna með bifreiðastæði sunnan þjóðveggar (Vegagerðin, 2017) og endurbættum gangstíg niður að flakinu (Ólöf Vala Sigurðardóttir, 2018). Til viðbótar stendur ferðafólki til boða að fara í skipulagðar sætaferðir frá bifreiðastæðinu að flakinu og aftur til baka á um hálf tíma fresti, frá kl. 10 til kl. 18 eftir því sem birta leyfir (Arcanum Glacier tours, á.á.). Meirihluti ferðafólks gengur þó enn stíginn (Benedikt Bragason, samtal 21. október 2019).

Eins og fram hefur komið er rannsóknarsvæðið við Jökulsá á Sólheimasandi að mörgu leyti sérstakt hvað varðar fjölda ferðafólks. Heimamenn eru í flestum tilfellum í minnihluta á svæðinu. Á sama tíma og fjöldi ferðafólks er kominn til að upplifa einstaka ferðamannastaði, nota heimamenn þjóðveg 1 mikið, enda grundvallar samgönguæð á Suðurlandi. Í viðhorfsskönnun Ferðamálastofu, meðal ferðafólks sem heimsótti Sólheimajökul, var upplifun ferðamanna metin á því hversu öruggt svæðið væri. Niðurstöður sýndu að 5–6% mátu svæðið óöruggt og var Sólheimajökull óöruggasti áfangastaðurinn af þeim átta sem bornir voru saman (Anna Dóra Sæþórsdóttir

o.fl., 2016). Það er því ljóst að ýmsar ástæður ýta undir mikilvægi áhættumats vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli og ber Sólheimajökull og Sólheimasandur sem áfangastaður ferðamanna þar einna hæst. Frekari umfjöllun um mat á viðveru ferðamanna og fjölda þeirra má finna í kafla 4.2. Ítarlegri umfjöllun um greiningu ferðamanna má svo finna í viðaukum III og IV.

3 Aðferðafræði

Þessi kafli lýsir aðferðafræði sem beitt er við hættu- og áhættumat í verkefninu. Skilgreindar eru mögulegar atburðarásir og rennslissviðsmyndir hlaupa frá Sólheimajökli. Farið er yfir úrvinnslu á landhæðargögnum og aðferðafræði straumfræðilegra líkanreikninga lýst. Við áhættugreininguna er notast við aðferðafræði bresku ríkisstofnunarinnar DEFRA og stutt yfirlit um hana er gefið í lok kaflans.

3.1 Möguleg atburðarás og rennslissviðsmyndir

Unnið er með þrjár rennslissviðsmyndir sem eru byggðar á mismunandi mögulegum hlaupum vegna jarðhita- og eldvirkni undir Mýrdalsjökli. Tekin eru til skoðunar: i) hlaup af völdum jarðhita við jökulbotn eða vegna lítilsháttar eldgosa undir jökli með $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli, ii) hlaup af völdum sprungugoss í hlíðum Kötlu með $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli eða að sama magn komi fram undan Sólheimajökli sem hluti stórs Kötluhlaups og iii) hamfarahlaup vegna stórgoss innan Kötluöskjunnar með $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli. Til viðbótar við þessar sviðsmyndir er rennslissviðsmynd með $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli notuð til næmnigreiningar á áhrifum óvissu í vali á rennslissviðsmyndum og til samanburðar við fyrri vinnu Magnúsar Tuma Guðmundsonar og fleiri (2015a). Við val á sviðsmyndum vegna eldgosa er byggt á ætluðu hámarksrennsli jökulhlaupa á vatnasviði Sólheimajökuls frá Magnúsi Tuma Guðmundssyni og fleirum (2005a,b). Ekki er til jafn ýtarlegt mat fyrir mögulega stærð hlaupa í tengslum við jarðhitavirkni undir Mýrdalsjökli en stærð hlaupa frá Sólheimajökli 1999 (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000; Andrew Russell o.fl., 2010) og Kötlujökli 1955 (Sigurjón Rist, 1967) og 2011 (Gunnar Þór Jónsson og Tinna Þórarinsdóttir, 2011) er notuð til viðmiðunar. Þar sem að um áhættumat er að ræða er notast við efri mörk á metnu hámarksrennsli fyrir mögulega atburði utan þess að $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli í hlaupum vegna stórgosa innan Kötluöskjunnar er stærðargráðumat og mögulegt er að slík hlaup hafi náð allt að $300.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli (Haukur Tómasson, 1996).

Í öllum sviðsmyndunum er gert ráð fyrir að hlaupin komi fram við sporð Sólheimajökuls. Þekkt er að hraðrísandi jökulhlaup geta brotið sér leið upp á jökulyfirborð innan við sporð jökulsins, svo sem var í hlaupinu 1999 (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000). Slíkt er einnig þekkt á fleiri stöðum, svo sem í Skaftárhlaupum og í hraðrísandi Skeiðarárhlaupum (Matthew James Roberts o.fl., 2000; Bergur Einarsson o.fl., 2016) og í Kötluhlaupum undir Kötlujökul (Haukur Tómasson, 1996; Guðrún Larsen, 2018). Þar sem Sólheimajökull er í afmörkuðum dal hefði slík atburðarás ekki mikil áhrif á sviðsmyndirnar fyrir minni hlaupin því að allt það vatn sem kæmi upp á jöklinum myndi renna að sporðinum og þar út í lónið, líkt og gert er ráð fyrir í sviðsmyndunum. Komi aftur á móti umtalsverður hluti hlaupvatns upp á jöklinum í sviðmyndinni með $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli er hætta á að hluti vatnsins leiti út úr megin dal Sólheimajökuls, annaðhvort austan við Jökulhaus eða um skarð efst í Hólsárgili. Slíkar sviðsmyndir væru í samræmi við jökulhlaupið 1918 þar sem fyrstu bylgjur hlaupsins á Kötlujökli komu upp á jöklinum sjálfum en ekki við jaðar. Þar kastaðist hluti hlaupvatns til vesturs yfir í Remundargil (Guðrún Larsen, 2018). Til að kanna áhrif svipaðrar atburðarásar voru útbúnar tvær viðbótasviðsmyndir fyrir stærsta tilfellið. Hlaupin koma fram austan megin á Sólheimajökli í báðum sviðsmyndunum, milli Jökulhauss og skarðsins yfir í Hólsárgil í annarri en ofan skarðsins yfir í Hólsárgil í hinni.

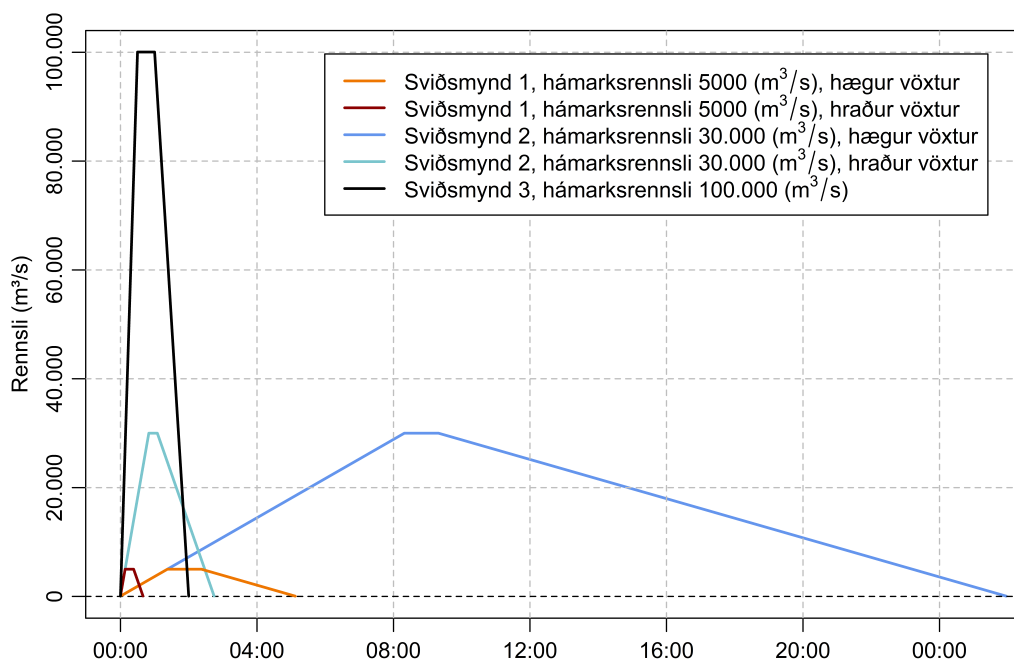
Þar sem stuðst er við tímaháða straumfræðilega reikninga en ekki æstætt ástand þarf auk hámarksrennslis að ákvarða lögun rennslisrits fyrir hverja rennslissviðsmynd. Tímaháðir reikning-

ar gefa möguleika á að meta framrásarhraða og þar með framrásartíma hlaupanna og eru því heppilegri í þessu tilfelli heldur en æstæðir reikningar. Í öllum tilfellum er notast við einföld trapisulaga rennslisrit og því þarf aðeins að ákvarða línulegan vaxtarhraða, varanda í hámarki og línulegan fallhraða. Við mat á vaxtarhraða minni sviðsmyndanna tveggja (hámarksrennsli $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ og $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$) og sviðsmynd næmnigreiningarinnar ($10.000 \text{ m}^3/\text{s}$) er notast við áætlað rennslisrit hlaupsins frá Sólheimajökli 1999 (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000) og hlaupsins frá Kötlujökli 2011 (Gunnar Þór Jónsson og Tinna Þórarinsdóttir, 2011). Þessi hlaup eru bæði hraðrisandi jökulhlaup og rísa mun hraðar heldur en t.d. mörg þekkt veldisvaxandi Skeiðarárhlaup (Bergur Einarsson o.fl., 2017) en þó er um stærðargráðu munur á vaxtarhraða þeirra. Vaxtarhraðinn í hlaupinu frá Sólheimajökli er um $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$ en vaxtarhraðinn í hlaupinu frá Kötlujökli 2011 er um $10 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Til að gera ráð fyrir þessari óvissu í mati á vaxtarhraða eru tvö tilfelli af hverri sviðsmynd útbúin, með sinn hvorn ofangreindra vaxtarhraða. Tilfellið með hraðari vaxtarhraðanum er notað í mat á framgangshraða jökulhlaupa því það gefur styttri viðbragstíma. Notast er við tilfellið með hægari vaxtarhraðanum í áhættumati og skoðun á mögulegri útbreiðslu hlaupa því að það tilfelli verður rúmmálsmeira og veldur meiri útbreiðslu og vatnsdýpi. Út frá lögun rennslisrita hlaupanna 1999 og 2011 má áætla að fallhraði sé gróflega um hálfur vaxtarhraðinn og því notast við þá nálgun. Gert er ráð fyrir að rennslisritið með hærri vaxtarhraðanum haldi flötu hámarki í 15 mínútur en tilfellið með hægari vaxtarhraðanum haldi flötu hámarki í 60 mínútur. Fyrir rishraða rennslisrits sviðsmyndar fyrir stór gos innan Kötluöskjunnar á vatnasviði Sólheimajökuls er notast við mat frá Magnúsi Tuma og fleirum (2015b) á mögulegri ísbráðnun vegna slíkra gosa og gosa undir jökli í Örafajökuls öskjunni. Aðeins er útbúið eitt rennslisrit með efra mati á mögulegum vaxtarhraða, $55 \text{ m}^3/\text{s}^2$ þar sem mikil óvissa er um ýmsa þætti varðandi slík hamfarahlaup og reikningarnir einungis hugsaðir til viðmiðunar. Gert er ráð fyrir að hlaupið haldi flötu hámarki í 30 mínútur og falli svo með hálfum vaxtarhraðanum. Rennslisrit sviðsmyndanna eru sýnd á mynd 3.

Fyrir áhættureikninga er nauðsynlegt að meta endurkomutíma hvernar hlaupsviðsmyndar. Fyrir hlaup vegna stórgosa í Kötluöskjunni á vatnasviði Sólheimajökuls er notast við mat Jónasar Elíassonar og fleiri (2005) fyrir endurkomutíma slíkra gosa upp á 600 ár. Endurkomutími eldgosa undir Sólheimajökli en utan Kötluöskjunnar hefur verið metinn 1.000–10.000 ár (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2005a). Hér er notast við neðri mörk þess bils fyrir endurkomutíma mögulegra hlaupa vegna slíkra gosa eða af völdum þess að hluti stórra Kötluhlaupa, sem mestmegnis koma fram á öðrum svæðum, komi fram undan Sólheimajökli líkt og gerðist 1860 (Guðrún Larsen, 2000). Ólíkt því sem oftast gildir um flóð af völdum veðurs þá er ekki einhalla samband á milli stærðar hlaupa og endurkomutíma við Sólheimajökul, þ.e. að flóð séu ólíklegri eftir því sem þau eru stærri. Hér er gert ráð fyrir að líklegra sé að fá hlaup með $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli heldur en hlaup með $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli. Það ræðst þó að hluta til af því að notast er við hámarksrennsli í hlaupi vegna goss í öskjunni á pari við stærri Kötluhlaup á síðustu öldum til að reikna með versta tilfelli. Fyrir hlaup af völdum jarðhitavirkni undir jöklinum er notast við gróft mat á sögulegum endurkomutíma slíkra atburða upp á 100 ár en heimildir um slík minni hlaup frá því fyrir 1950 eru litlar. Hámarksrennsli, vaxtarhraði, tími í hámarki, fallhraði og endurkomutími hlaupsviðsmynda eru tekin saman í töflu 1.

3.2 Hættumatsgreining

Hættumat vegna flóða byggist hér á straumfræðilegum líkanreikningum og er því fjallað bæði um landhæðargögn sem nýtt eru í líkanreikningana og vinnslu þeirra, en einnig um aðferðafræði



Mynd 3. Rennslissviðsmyndir fyrir straumfræðilega líkangerð vegna reikninga á áhættu af völdum jökulhlaupa frá Sólheimajökli. Hægur vöxtur rennslis í sviðsmyndum 1 og 2 er $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Hraður vöxtur rennslis er $10 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Vaxtarhraðinn í sviðsmynd 3 er $55 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Í öllum tilfellum er gert ráð fyrir að hlaupin falli með hálfum vaxtarhraðanum.

Tafla 1. Hámarksrennsli, endurkomutími, vaxtarharði, tími í hámarki og fallhraði sviðsmynda fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli.

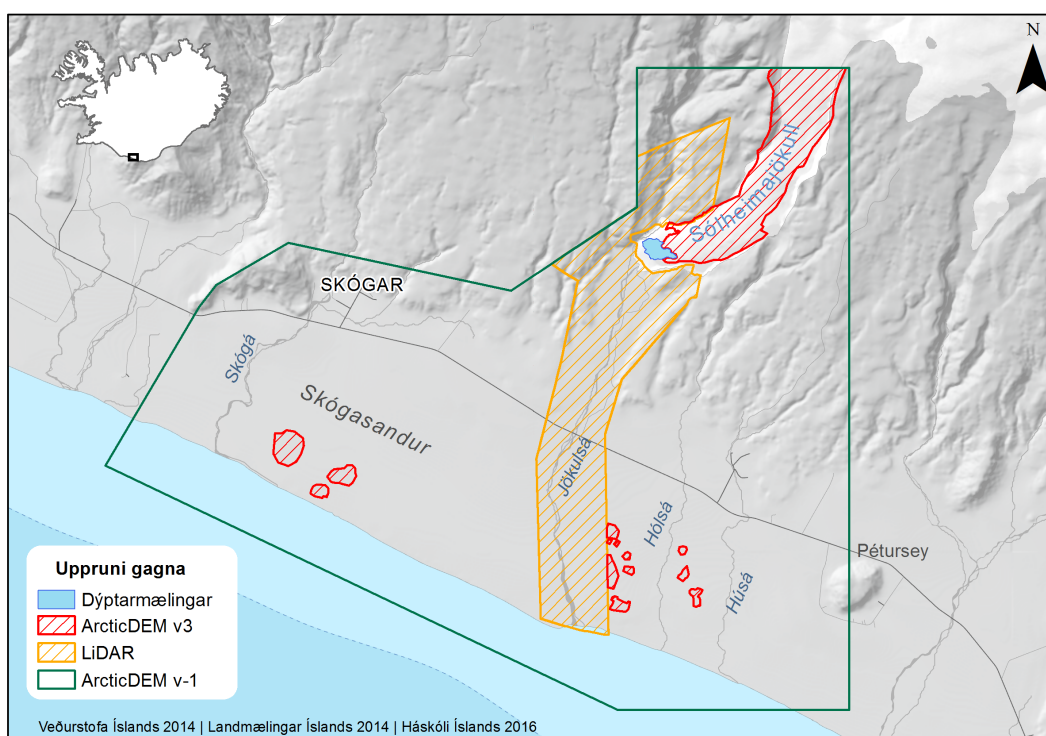
Hámarksrennsli [m^3/s]	Endurkomu- tími [ár]	Vaxtar- hraði [m^3/s^2]	Tími í hámarki [min]	Fallhraði [m^3/s^2]
5.000	100	1	15	0,5
5.000	100	10	60	5
30.000	1000	1	15	0,5
30.000	1000	10	60	55
100.000	600	55	30	27,5

straumfræðilegra líkanreikninga. Skilgreining tjónmættis er gerð með hliðsjón af upplýsingum frá DEFRA til samræmis við aðferðafræði sem beitt er í kafla 3.3 um áhættugreiningu.

Landhæðargögn

Til þess að unnt sé að framkvæma hættumatsgreiningu þarf að meta hraða og dýpi flóðvatns, oftast en ekki með straumfræðilíkani. Straumfræðireikningarnir byggja á undirliggjandi landhæðarlíkani. Landhæðarlíkanið sem hér er notað er samsett úr Lidar mælingum frá 2010 í 2x2 m upplausn (Tómas Jóhannesson o.fl., 2013) af farvegi árinna og á svæðum nærri farveginum en

ArcticDEM gögnum í 2x2 m upplausn á öðrum svæðum (Porter o.fl., 2018), sjá mynd 4. Áætluð lóðrétt óvissa samsetta líkansins er 0,5 m.



Mynd 4. Uppruni landhæðarlíkans.

Lögun yfirborðs og staða sporðs Sólheimajökuls ræðst af gervihnattamyndum frá árinu 2018 en jökullinn breytist hratt milli ára (Hrafnhildur Hannesdóttir, 2019). Búast má við að jökulsporðurinn geti hopað um tugi til hundruð metra á komandi árum og yfirborð jökulsins lækki jafnvel um tugi metra á sama tíma (Halldór Björnsson o.fl., 2018).

Samfara hopi jökulsins undanfarin ár hefur umtalsvert sporðlón myndast framan við hann síðan ~2010 (óútgefnar árlegar sporðamælingaskýrslur Einars Gunnlaugssonar, Hildigunnar Þorsteinsdóttur og Gunnlaugs Einarssonar). Búast má við að vatnsmassinn í lóninu og flæði í gegnum lónið geti haft áhrif á framgang jökulhlaupa frá jöklinum. Lögun lónbotnsins er því brennd sem hvilft í landhæðarlíkanið. Lögun hvilftarinnar byggir á brúun á dýptarmælingum frá Þorsteini Sæmundssyni á Jarðvísindastofnun Háskólans. Landhæðarlíkanið tekur því tillit til lögunar lónbotnsins en ekki vatnsyfirborðs þess. Með þessu móti kemur vatnsmassinn í lóninu fram í straumfræðilegu reikningunum.

Yfirborð brúarinnar á þjóðvegi 1 er numið burt úr landhæðarlíkaninu. Gert er ráð fyrir að hæð farvegarins undir brúnni sé brúun á milli landhæðar ofan og neðan við brúna. Ekkert tillit er því tekið til stöpla brúarinnar, en þess er gætt að lengd útjafnaða svæðisins sé jöfn lengd brúarinnar. Með þessu móti lýsir landhæðarlíkanið gróflega farveginum undir brúnni en ekki hæð brúargólfsins. Hæð og lögun þjóðvegar 1 á um 500 m kafla vestan brúarinnar og á um 400 m kafla austan hennar byggir á landhæðarlíkani frá Vegagerðinni, sem lýsir áætlaðri lögun kaflanna eftir þær breytingar sem nú er unnið að samfara tvöföldun brúarinnar.

Þrjár viðbótarútgáfur af landhæðarlíkaninu voru útbúnar til þess að kanna næmni straumfræðilegu líkanreikninganna fyrir áhrifum lónsins og áhrifum setuppbyggingar samfara stórhlaupum. Samskonar hlaupsviðsmyndir voru svo keyrðar á upphaflega landhæðarlíkanið og á þessar breyttu útgáfur. Niðurstöður úr samanburði á þeim keyrslum eru kynntar í kafla 4.4.

Til þess að kanna áhrif dýpis lónsins var útbúið líkan þar sem hámarksdýpt lónsins er sett 1 m, en mesta dýpt í mælingum Þorsteins Sæmundssonar er í raun 61 m. Með þessu móti verður lónið einungis örgrunn skál og hefur nær engin áhrif á flæði vatns frá jöklinum.

Möguleg áhrif setuppbyggingar í stórhlaupum voru könnuð með því að útbúa sitthvort landhæðarlíkanið fyrir hlaupsviðsmyndirnar með $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ og $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli. Í hvoru tilviki fyrir sig er 15% af heildarrúmmáli viðkomandi rennslisrits dreift yfir mesta útbreiðslusvæði viðkomandi hlaupsviðsmyndar og bætt við landhæðina. Þetta jafngildir því að sama hlutfallslegu magni fasts efnis af heildarrúmmáli og hefur verið metið fyrir Kötluhlaupið 1918 (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2018) sé dreift yfir útbreiðslu svæði flóðanna. Með þessu er reynt að draga fram verstu mögulegu áhrif setsins, gert er ráð fyrir að allt set í hlaupunum setjist til og ekki er tekið tillit til rofs. Einnig er gert ráð fyrir að allt setið setjist til á landi meðan að líklegt er að hluti þess berist fram í sjó. Setinu er ekki jafndreift yfir svæðið. Hlutfallslegu magni sets er lýst sem veldisfalli af fjarlægð frá jökuljaðri, þannig að þykkt setsins verði mest við jökuljaðar en 0 m niður við sjó. Lögun veldisfallsins ræðst gróflega af mati Guðrúnar Larsen (2018) á uppbyggingu á seti á Mýrdalsandi í Kötluhlaupinu 1918, sjá nánar í viðauka. Mesta hækkun landhæðargagna vegna upphleðslu sets, upp við jökul, verður 19 m fyrir hlaupsviðsmyndina með $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli en 10 m fyrir hlaupsviðsmyndina með $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli. Lóðréttur kantur myndast á jöðrum útbreiðslu svæða hlaupanna þar sem setinu er bætt við. Til að jafna út þessi skil er hæðarbreytingu á jaðri svæðisins jafnað út yfir 300 m breiðan borða.

Straumfræðilegir líkanreikningar

Notast er við tvívíða útgáfu af straumfræðilíkaninu HEC-RAS við reikninga á framgangi mismunandi sviðsmynda jökulhlaupa frá Sólheimajökli. Þessi útgáfa líkansins leysir tvívíðar dýpisheildaðar jöfnur Navier–Stokes tölulega á samfelldu reiknineti (Brunner, 2016). Reikninetið er skilgreint fyrirfram og er að mestu leiti reglulegt utan reita sem liggja að óreglulegum jöðrum eða þvert að sniðum sem skilgreind eru sérstaklega eftir vegum eða öðrum fyrirbærum þar sem æskilegt er að geta dregið fram niðurstöður á þversniðum út úr líkanreikningunum. Notast er við reikninet þar sem stærð reglulegra reita er $10 \times 10 \text{ m}$ fyrir hlaupsviðsmyndir með $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ og $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli, en $20 \times 20 \text{ m}$ fyrir hlaupsviðsmyndir með $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ og $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli. Í öllum tilfellum fylgir efri jaðar reikninarsins jaðri Sólheimajökuls en neðri jaðar strandlínunni við ósa Jökulsár á Sólheimasandi (sjá dæmi um reikninet á mynd 5). Til hliðar (austurs og vesturs) eru jaðrar reikninarsins valdir þannig að stærstu hlaup sem reiknuð eru á viðkomandi neti nái ekki að þeim.

Skilgreina þarf jaðarskilyrði á efri og neðri jaðri reikninarsins (Brunner, 2016). Á efri jaðri reikninarsins er notast við gefið rennslisrit sem steypt er inn á svæðið undir gefnum orkustigli. Orkustigullinn er valinn 0,09 til samræmis við meðalhalla yfirborðs Sólheimajökuls fyrsta kílómetrinn frá jaðri. Einungis er hugað að yfirborðshalla jökulsins en ekki halla jökulbotnsins enda ræður halli yfirborðs flæði vatns undir jökli að 9/10 við flestar aðstæður (Helgi Björnsson, 1988). Með þessu móti er einnig tekið tillit til að hluti vatnsins geti komið flæðandi eftir yfirborði jök-

ulsins. Vatnshæð utan jaðarsins er reiknuð sem normaldýpi fyrir gefið rennsli og orkustigul. Á neðri jaðri reikninetsins er gert ráð fyrir flæði með normaldýpi sem ræðst þá af gefnum orkustigli í gegnum þversniðið og aðflæði (Brunner, 2016). Orkustigullinn er valinn sem 0,01 til samræmis við landhalla við ósa Jökulsár á Sólheimasandi.

Kvarða þarf viðnámsstuðla í reikningunum. Viðnámi er lýst með tveimur mismunandi stuðlum, iðuseigju (e. eddy viscosity) og hrýfisstuðli Mannings. Í skriðþungajöfnuninni lýsir iðuseigjan tapi í réttu hlutfalli við skerhraða flæðisins, dýpi og aðra rúmafleiðuna af hraða. Þessum lið er ætlað að lýsa tapi vegna iða á víðum stærðarskala í streyminu. Tapið verður mikið þar sem miklar breytingar eru í hröðun flæðisins, skerhraði er hár (margfeldi orkustiguls og straumgeisla (e. hydraulic radius) er hátt) eða dýpi mikið. Hrýfisstuðull Manning lýsir aftur á móti áhrifum viðnáms flæðisins við botn og jaðra flæðisins. Hrýfisstuðullinn ræðst af grófleika efnisins í botninum og botngerð. Auk botngerðar ræðst núningur við botn og jaðra af straumhraða og lögun þversniðs streymisins þar sem aukinn hraði og styttri straumgeisli leiða til aukins viðnáms. Straumgeisli er skilgreindur sem hlutfallið á milli þverskurðarflatarmáls og vots ummáls flæðisins (e. wetted perimeter).

Aukið viðnám leiðir almennt til meira dýpis í flæðinu og þar af leiðandi aukinnar útbreiðslu flóða. Minna viðnám skilar aftur á móti meiri straumhraða, hraðari framrás flóða og þar með styttri viðbragðstíma til rýmingar. Það er því ljóst að í hættumati þarf að ná yfir mögulega dreifingu viðnámsstuðla, bæði í átt að lágu og háu viðnámi. Fyrir mat á iðuseigju er notast við líkleg gildi fyrir flæði þar sem mikil blöndun á sér stað þvert á flæðið. Slíkt á við fyrir flæði sem rennur á hrjúfu yfirborði, kvíslast mikið eða gengur yfir þurrt land en þessi skilyrði eiga öll við fyrir jökulhlaup niður Sólheimasand. Fyrir þessar aðstæður er mælt með að velja gildi fyrir iðuseigjustuðulinn í reikningunum á bilinu 2 til 5 (Brunner, 2016).

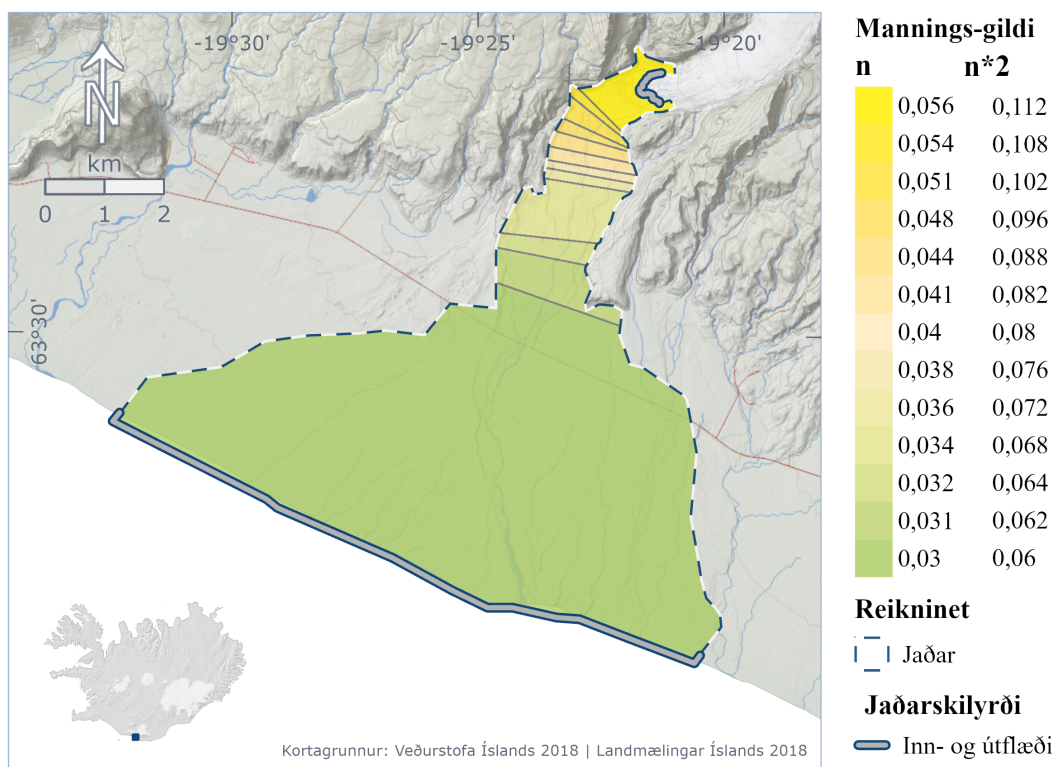
Fyrir grunnmat á hrýfisstuðli Manning er notast við vettvangsrannsóknir Andrew Russell og fleiri (2010) á völdum þversniðum á Sólheimasandi eftir jökulhlaupið 1999. Líta má á það mat sem lægri mörk líklegra gilda því að í slíku mati er ekki tekið tillit til áhrifa setframburðar og ísjaka, sem hvort tveggja eykur núning í jökulhlaupum. Munar þar sýnu mest um ísjaka sem myndast oft í hlaupum vegna þess að hluti jökulsporðsins þar sem hlaupið kemur fram brotnar upp og berst fram með flóðinu (Haukur Tómasson 1996; Guðrún Larsen, 2018). Einnig er þekkt að ísjakar myndist þar sem jökulhlaup sprengja sig upp á yfirborð jökulsins nærri jaðri hans og þar sem straumþungi í flæði úr slíkum uppsprettum rýfur jökulyfirborðið (Matthew James Roberts o.fl., 2000). Jakarnir geta svo hlaðist upp og myndað hrannir, sem halda aftur af rennslinu, neðar í farvegi hlaupsins (Haukur Tómasson, 1996).

Hægt er að lýsa áhrifum setframburðar á straumfræði hlaupanna með því að hækka hrýfisstuðul Manning og gera ráð fyrir hlutfallslegu rúmmáli sets í heildarrúmmáli flæðisins (e. bulked flow modeling) (Travis o.fl., 2012). Í þessari nálgun byggja breytingarnar á hrýfisstuðlinum á aukningu í seigju og eðlismassa hlaupvökvans vegna fasts efnis í flæðinu. Einnig er hægt að lýsa auknu viðnámi í streyminu vegna jakahranna í flóðfarveginum með því að hækka hrýfisstuðulinn umfram grunnmat miðað við botngerð (Tómas Jóhannesson o.fl., 2018). Með því móti má fá fram raunsætt dýpi og straumhraða í líkanreikningunum fyrir flæði á milli jakanna en því til viðbótar þarf að taka tillit til þess að jakarnir fylla upp í hluta þversniðsins. Til að lýsa áhrifum þess er einfaldast að auka við áætlað rennsli í hlaupsviðsmyndinni. Metið er hve stórt hlutfall þversniðsins er fyllt af jökum og rennslið aukið um sama hlutfall. Með þessu móti er tekið til

tillit til þess í reikningunum að í raun streymir hlaupið ekki í gegnum jakana heldur einungis á milli þeirra. Jöfnur fyrir breytingum á hrýfisstuðli Manning og öðrum þáttum vegna sets í flæðinu og jakahranna eru gefnar í viðauka II.

Næmnigreining á reikningunum gefur til kynna að þeir séu mun viðkvæmari fyrir breytingum á hrýfisstuðli Mannings innan mögulegra gilda, heldur en breytingum á iðuseigju innan mögulegra gilda (sjá kafla, 4.4). Breytingar á iðuseigjustuðulinn milli 2 og 5 virðist í raun hafa lítil áhrif á lokaniðurstöður. Gildi stuðulsins var því haldið föstu sem 2 í öllum reikningum.

Tvö tilfelli með háu og lágu mati á hrýfisstuðli Manning voru aftur á móti keyrð fyrir hverja hlaupsviðsmynd. Í öðru tilfallinu er notast við lægsta líklega gildi byggt á mati Andrew Russels og fleiri (2010) til þess að draga fram mesta mögulega framgangshraða flóðanna. Í hinu tilfallinu er gert ráð fyrir hámarksáhrifum sets og jakahranna á hrýfisstuðulinn til þess að draga fram mestu mögulegu útbreiðslu. Samanlögð áhrif sets og jakahranna jafngilda rétt rúmlega tvöföldun (111% aukning, sjá viðauka I) á grunnmatinu á hrýfisstuðlinum. Þar sem þetta byggir á umtalsverðum nálgunum er grunnmatið einfaldlega tvöfaldað (mynd 5).



Mynd 5. Hrífisstuðull Manning sem notast er við í straumfræðilegu líkanreikningunum. Jaðar dæmigerðs reikninets afmarkar það svæði er flóð getur runnið um. Jaðarskilyrði skilgreina annars vegar innflæði, þar sem flóð kemur fram og hins vegar útflæði við ströndina.

Í reikningum með háum hrýfisstuðli er rennsli einnig tvöfaldað til þess að gera ráð fyrir að um helmingur þversniðs hlaupfarvegarins sé fyllt jökum. Slíkt er líklega ofmat þegar stærri hlaup breiða úr sér eftir að komið er út á sandinn sunnan við Heiðarhorn en tekur þá tillit til óvissu

Tafla 2. Hætta sem fólki stafar af flóði, samkvæmt tjónmættisgildum í aðferðafræði DEFRA.

Tjónmætti (HR)	Litaflokkun	Hætta gagnvart fólki
<0,75		Lítill
0,75–1,25		Hófleg
1,25–2,0		Mikil
>2,0		Geysimikil

vegna þess að jakastíflur og jakahrannir geta stýrt hlaupleiðum um sandinn. Slíkt er t.d. þekkt í Kötluhlaupunum 1660 og 1721 (Guðrún Larsen, 2018).

Áður en sviðsmyndir eru keyrðar er líkaninu komið í upphafsstöðu með því að láta stöðugt rennsli renna inn á þurrt landhæðarlíkanið við efri jaðar viðkomandi reikninets þar til stöðugu rennsli niður að sjó er náð. Með þessu móti er vatn í lóninu framan við jökulinn og rennsli í farvegi árinna niður sandinn með eðlilegum straumhraða þegar jökulhlaupareikningar hefjast. Miðað er við er jafnt 50 cbmps rennsli en það jafngildir rennsli árinna á góðum sumardeg (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000). Vatnsdýpi og straumhraði fyrir fast rennsli eru háð viðnámsstuðlum og því nauðsynlegt að búa til sitthvora upphafsstöðuna fyrir sitthvort matið á hrýfisstuðli Mann-ing.

Tjónmætti

Við kortlagningu á flóðahættu er jafnan mælt með því að sýna útbreiðslu og dýpi rennissviðs-mynda á kortum og jafnvel straumhraða þar sem við á (Flóðatilskipun, kafla III). Með því að taka saman upplýsingar um dýpi og straumhraða má kortleggja tjónmætti flóðs en það segir til um afl og stærð þess (Trausti Jónsson, 2002). Við mat á tjónmætti er í sumum tilfellum einnig tekið tillit til annarra þátta líkt og vatnshita og magns lausagryjts og annars efnis sem getur ferðast með flóði. Hér er tjónmætti reiknað með hliðsjón af upplýsingum frá DEFRA til samræmis við þá aðferðafræði sem beitt er í kafla 3.3 um áhættugreiningu, jafna (1) sýnir hvernig tjónmætti, *HR* (e. hazard rating), er reiknað (DEFRA, 2006a).

$$HR = (v + 0,5)D + DF \quad (1)$$

Þar sem *v* er straumhraði í metum á sekúndu, *D* er flóðdýpi í metrum og *DF* er stuðull sem lýsir magni lausagryjts, ísjaka, braks og annars efnis í flóðinu. *DF* tekur gildi á bilinu 0–1. Gildið 0 á við hæg flóð sem bera ekki með sér lausagryjót, ísjakar eða annað efni. Gildið 0,5 á við flóð sem ber með sér lausagryjót, ísjaka og brak og gildið 1 á við flóð sem ber með sér mikið af slíku. Nota má tjónmætti flóða til að flokka hættu fólks að teknu tilliti til flóðhraða, dýpis og *DF* gildis, en samkvæmt DEFRA er mælt með eftirfarandi flokkun á tjónmætti (Surendran o.fl., 2008), sjá töflu 2. Frekari upplýsingar um aðferðafræðina og notkun hennar má finna í íslenskri samantekt (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2020) og skjölum DEFRA (2003; 2006a,b).

Í fyrri hættumatsvinnu vegna jökulhlaupa frá Örafajökli (Pagneux og Roberts, 2015) var notast

við margfeldi straumhraða og flóðdýpis. Í aðferðafræði DEFRA er fastanum 0,5 bætt við straumhraðann til að koma í veg fyrir að djúpt vatn með lítinn straumhraða flokkist sem hættulaust. Það er einnig viðbót að tekið er tillit til mögulegra áhrifa lausagríðs, jaka og annars efnis í flóðinu með stuðlænum *DF*.

3.3 Áhættugreining

Greining áhættu byggir hér einungis á persónubundinni áhættu en ekki tjónnæmi efnahagslegra þátta. Þetta var ákveðið í ljósi þess að um svæðið fer mikill fjöldi fólks daglega og er því talið mikilvægara að greina áhættu gagnvart fólki fremur en veraldlegum hlutum. Niðurstöður áhættugreiningarinnar má einnig framreikna fyrir hópa fólks með upplýsingum um fjölda fólks og meðal viðveru einstaklinga í hópnum. Útreikningar áhættu byggja á aðferðafræði sem breska ríkisstofnunin DEFRA hefur lagt fram til þess að meta áhættu fólks vegna vatnsflóða (DEFRA, 2006a,b). Frekari útlistun á aðferðafræðinni má finna í íslenskri samantekt um aðferðina og notkun hennar (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2020).

Áhættan er reiknuð innan skilgreindra viðverusvæða þar sem lagt hefur verið mat á fjölda fólks og viðveru þess innan flóðasvæðisins. Með þessu móti er hægt að skoða hvern skilgreindan viðverustað óháð þeim næsta. Hér á eftir fer því upptalning á viðverusvæðum sem skilgreind hafa verið, lýsing á aðferðafræði sem beitt er við mat á fjölda ferðafólks og viðverutíma og að lokum stutt lýsing á útreikningum sem beitt er við áhættureikningana.

Skilgreining viðverusvæða

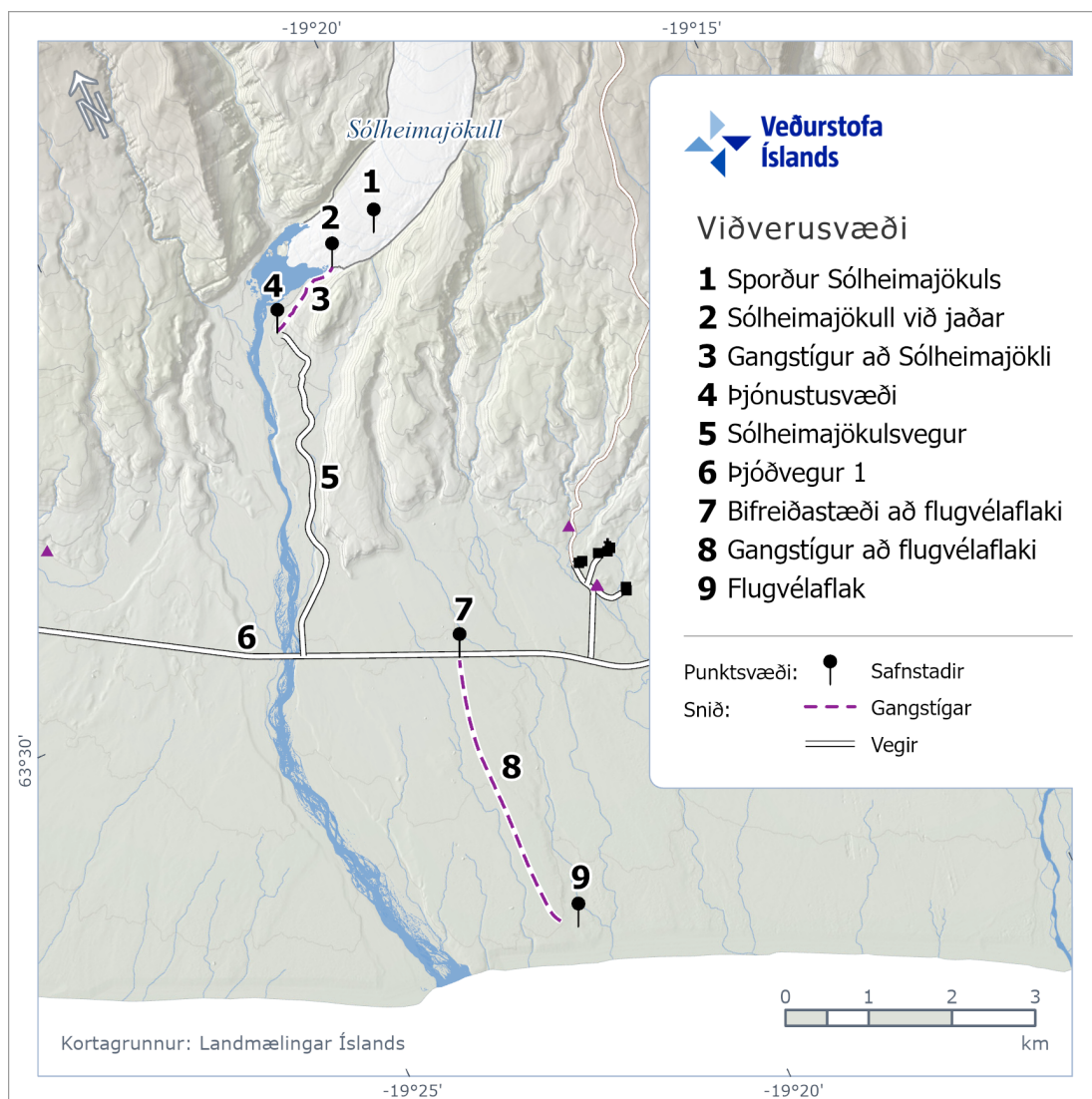
Helstu viðverusvæði fólks í námunda við Jökulsá á Sólheimasandi hafa verið skilgreind, sjá mynd 6. Tveir þekktir ferðamannastaðir eru á flóðasvæðinu og jafnframt liggur þjóðvegur 1, þvert yfir svæðið. Skilgreind viðverusvæði eru níu talsins og skiptast upp í punktsvæði og snið eftir því hvort um er að ræða tiltekna staði þar sem ætla má að fólk dvelji um tíma (punktsvæði) eða ferðist eftir (snið). Af þessum níu svæðum eru fjögur gangstígar og vegir og því flokkuð sem snið (svæði 3, 5, 6 og 8) en fimm sem punktsvæði (svæði 1, 2, 4, 7 og 9).

Mat á fjölda ferðafólks

Fjöldi ferðafólks er metinn út frá þremur gagnasettum sem eru svæðisbundin og eiga við skilgreind viðverusvæði (sjá mynd 6). Fyrir viðverusvæði 1–5 er notast við bifreiðatalningar Rögnvaldar Ólafssonar og Gyðu Þórhallsdóttur (2018 og 2019). Gögnin eru kvörðuð til þess að meta fjölda ferðafólks og gert er ráð fyrir að 4,3 einstaklingar séu í hverri bifreið. Sú kvörðun byggir á metnu hlutfalli fólksbifreiða annars vegar og rútubifreiða hins vegar og var metin af Rögnvaldi og Gyðu (2015, 2019).

Annað gagnasettið var nýtt fyrir viðverusvæði 6 og kemur frá Vegagerðinni (afhent, 2019). Um er að ræða bifreiðatalningar frá tveimur talningarstöðum, við Steina undir Eyjafjöllum og við Pétursey. Annar kvörðunarfasti er notaður til að meta fjölda fólks í hverri bifreið á þjóðveginum, þar sem stuðst er við kvarðann 3,0. Það er byggt á kvörðun fyrir Suðurland um að 2,8 einstaklingar séu almennt í fólksbifreið og 15 að jafnaði í rútubifreiðum, þá sé hlutfall rútubifreiða 1–3% (Gyða Þórhallsdóttir, munnleg heimild).

Þriðja gagnasettið var nýtt fyrir viðverusvæði 7–9 og er fengið frá Benedikt Bragasynti (afhent, 2019), einum landeigenda á sandinum þar sem flugvélaflakið er að finna. Þar eru ferðaþjón-



Mynd 6. Viðverusvæði fólks í námunda við Jökulsá á Sólheimasandi. Viðverusvæðin skiptast upp í punktsvæði og snið eftir því hvort um er að ræða tiltekna staði þar sem ætla má að fólk dvelji um tíma (punktsvæði) eða ferðist eftir (snið).

ustuaðilar með skipulagðar rútuferðir niður að flugvélaflakinu milli kl. 10–17 og hafa þeir tekið saman fjölda farþega sem ferðast með rútunum. Um er að ræða dagstalningar, en heildarfjöldi ferðamanna sem ferðast niður að flugvélaflakinu var áætlaður út frá metnu hlutfalli rútufarþega, sem eru um 10–20% allra gesta (Benedikt Bragason, munnleg heimild).

Til þess að öðlast betri skilning á því hvernig ferðafólk hagar ferðum sínum við Sólheimajökul var settur saman stuttur spurningalisti sem samanstóð af sjö spurningum og var hann sendur til sex ferðabjónustuaðila. Svör voru almennt góð og úrvinnsla spurningalistanna nýttist vel til að meta almennar tímasetningar í ferðum til og frá jöklinum. Auk þess fékkst betri mynd af dreifingu ferðafólks á svæðinu. Þar kom fram að rétt tæpur þriðjungur ferðafólks sem keyrir upp Sólheimajökulsveg fer í jöklagöngur eða ísklifur (30%). Aðrir ferðamenn fara í útsýnigöngur (63%) en fáir snúa við án þess að kanna landið (6%). Notast er við þessar hlutfallstölur þegar fjöldi ferðamanna á viðverusvæðum 1–5 er metinn.

Mat á viðverutíma ferðafólks

Lagt er mat á viðverutíma ferðafólks innan hvers svæðis (mynd 6). Viðverutímar eru ákvarðaðir á þrjá vegu. Í fyrsta lagi eru þeir metnir út frá ferðaáætlunum ferðaþjónustuaðila og áður nefndum spurningalista (sjá kafla 3.3.2). Með þeim gögnum er unnt að meta viðverutíma innan svæða 1–2. Í öðru lagi er miðað við lengd gangstíga eða vega og ferðahraði fólks metinn, á það við um viðverusvæðin sem flokkast sem snið (sjá kafla 3.3.1), svæði 3, 5, 6 og 8. Í þriðja lagi er sá tími gróflega metinn sem flest ferðafólk eyðir á svæðum 4, 7 og 9, óháð öðrum ferðatilhögunum. Nánari útlistun á mati á viðverutíma má finna í viðauka III.

Útreikningar

Líkt og áður hefur komið fram er hér fjallað um persónubundna áhættu en ekki tjónnæmi efna-hagslegra þátta. Aðferðafræðin (DEFRA, 2006a,b) er samansett úr þremur þáttum; i) mati á tjónmætti flóðsins (e. hazard rating, *HR*), ii) tjónnæmi svæðis (e. area vulnerability, *AV*) og iii) tjónnæmi fólks (e. people vulnerability, *PV*). Með því að taka saman upplýsingar um þessa þrjá þætti í einföldu stigakerfi má með áhættureikningum leggja fram mat á fjölda þeirra sem láta lífið í tilteknu flóði. Nánari umfjöllun um aðferðafræðina má finna í greinargerð Tinnu Þórarinsdóttur o.fl. (2020). Útreikningar eru framkvæmdir fyrir hvert viðverusvæði (mynd 6).

Tjónmætti

Tjónmætti er reiknað skv. jöfnu (1) í kafla 3.2.3. Þar sem um tímaháða reikninga er að ræða, er það tímaskref valið innan straumfræðilegu líkanreikninganna, þar sem dýpi og hraði ná hámarki saman á hverju viðverusvæði. Fyrir punktswæði reiknast stakt gildi en sniðum er skipt upp í bil þar sem hvert bil er meðhöndlað eins og punktswæði og upplýsingar að lokum dregnar saman í eina heild fyrir sniðið.

Tjónnæmi svæðis

Mat á tjónnæmi svæðis, *AV*, byggist á þremur þáttum; viðvörunarkerfi, rishraða (e. speed of onset) og svæðisbundnum eiginleikum. Heildarmat á tjónnæmi svæðis er eftirfarandi:

$$AV = \text{Mat á viðvörunarkerfi} + \text{rishraði} + \text{svæðisbundnir eiginleikar} \quad (2)$$

Mat á viðvörunarkerfi fer fram með eftirfarandi stigakerfi:

- 3 stig. Svæði án viðvörunarkerfis.
- 2 stig. Viðvörunarkerfi sem er takmörkunum háð er rekið á svæðinu.
- 1 stig. Áreiðanlegt viðvörunarkerfi ásamt neyðaráætlunum er rekið á svæðinu.

Í aðferðafræði DEFRA er gefin upp jafna til þess að leggja mat á viðvörunarkerfi ef nákvæmar upplýsingar liggja fyrir um árangur viðvörunarkerfa á tilteknum stað. Slíkar upplýsingar eru ekki tiltækar í þessu tilfelli og er því einfalda stigakerfið hér að ofan notað.

Svæðum eru gefin stig á bilinu 1–3 út frá upplýsingum um rishraða mögulegra flóða:

- 3 stig. Mjög áhættusöm svæði, þar sem hætta er á skyndiflóðum eða jökulhlaupum.
- 2 stig. Svæði með miðlungsáhættu þar sem ristími er um 1 klst.
- 1 stig. Áhættulítill svæði þar sem ristími er langur (margar klst.).

Mat á svæðisbundnum eiginleikum fer fram með eftirfarandi stigagjöf:

- 3 stig. Mjög áhættusöm svæði, t.d. fjölfarnir vegir, sumarhús, tjaldstæði og skólar á einni hæð.
- 2 stig. Svæði með miðlungsáhættu, t.d. tveggja hæða íbúðarhús og atvinnuhúsnæði.
- 1 stig. Áhættulítill svæði, t.d. margra hæða byggingar.

Stigagjöf svæðis út frá eiginleikum og byggingum er ætlað að endurspegla mat á því hvort fólk á tilteknu svæði eigi meiri eða minni möguleika á að leita skjóls fyrir flóðum heldur en á svæði með miðlungs eiginleikum. Þá er hægt að leggja mat á hlutfall þeirra í prósentum, E , sem stafar hætta af tilteknu flóði með jöfnunni:

$$E = HR \cdot AV \quad (3)$$

Hjá DEFRA kemur fram að ekki er um eiginlegar prósentur að ræða heldur einungis praktískt mat í ferlinu við útreikning á áhættu fólks vegna vatnsflóða. Í stórum jökulhlaupum líkt og í þeim sem hér eru til umfjöllunar, er straumhraði og vatnsdýpi slíkt að gildið, E , fer yfir 100, þ.e. öllum sem eru á svæðinu getur stafað hætta af flóðinu. Fari gildið yfir 100 er notast við E jafnt og 100 í áframhaldandi útreikningum.

Tjónnæmi fólks

Samkvæmt DEFRA er tjónnæmi fólks, PV , áætlað með því að leggja saman hlutfall hreyfihamlaðra eða fólks sem glímur við langtíma veikindi annars vegar og þeirra sem eru yfir 75 ára aldri hins vegar. Hér er vikið frá þessari frumskilgreiningu og tjónnæmi fólks (PV) metið út frá mati á hlutfalli fólks á svæðinu sem gæti átt í vandræðum með að forða sér en ekki einskorða það við aldur og hlutfall hreyfihamlaðra.

Áhættureikningar

Samkvæmt aðferðafræði DEFRA má reikna líkur á því að slasast í tilteknu flóði, P_{inj} sem:

$$P_{inj} = 2 \frac{E}{100} PV \quad (4)$$

Fyrir stór flóð þar sem tjónmætti er mikið ($E = 100$), og PV er metið mjög hátt ($> 0,5$) getur jafna 4 gefið niðurstöður > 1 . Í þessum tilfellum er P_{inj} sett jafnt og 1 til þess að koma í veg fyrir að fjöldi slasaðra sé metinn meiri en fjöldi fólks á svæðinu.

Til þess að áætla fjölda slasaðra, N_{inj} , á tilteknu svæði má margfalda P_{inj} með N :

$$N_{inj} = P_{inj} \cdot N = 2 \frac{E}{100} PV \cdot N \quad (5)$$

Þar sem N er fjöldi fólks innan þess svæðis sem er til skoðunar.

Eins má reikna líkur á því að látast í atburðinum, P_f :

$$P_f = 2P_{inj} \frac{HR}{100} = 4 \frac{E}{100} PV \frac{HR}{100} \quad (6)$$

Ef unnið er með mjög há HR gildi ($HR > 50$) geta þær aðstæður komið upp að líklegra er að látast en slasast. Hér er því lagt til að endurskrifa jöfnu (6) á eftirfarandi hátt:

$$P_f = P_{inj} \cdot C; \text{ þar sem } C = \min(1, 2 \frac{HR}{100}). \quad (7)$$

Á sama hátt má áætla fjölda þeirra sem látast, N_f , á tilteknu svæði með því að margfalda P_f með N :

$$N_f = P_f \cdot N \quad (8)$$

Þar sem N er aftur fjöldi fólks innan þess svæðis sem er til skoðunar.

Samfélagslega áhættu, S_{ft} , innan þess svæðis sem er til skoðunar má áætla sem:

$$S_{ft} = \frac{N_f}{A_z} \quad (9)$$

Þar sem A_z er flatarmál þess svæðis sem er til skoðunar. Þessi stærð er ekki notuð beint í þessari skýrslu en má nýta til framsetningu áhættu á kortum.

Árlegar dánarlíkur, S_f , og árlegar slysalíkur einstaklings, S_{inj} , af völdum tiltekins flóðs má þá reikna út með því draga saman upplýsingar um líkur á því að verða fyrir slíku flóði, P_{vh} , og líkur á því að látast, P_f , eða slasast, P_{inj} . Árlegar líkur á því að verða fyrir tilteknu flóði:

$$P_{vh} = \frac{\text{Árleg viðvera}}{\text{Endurkomutími flóðs}} \quad (10)$$

Árlegar líkur einstaklings á því að slasast vegna tiltekins flóðs á svæðinu verða þá:

$$S_{inj} = P_{vh} \cdot P_{inj} \quad (11)$$

Árlegar dánarlíkur einstaklings vegna tiltekins flóðs verða þá:

$$S_f = P_{vh} \cdot P_f \quad (12)$$

Sé gert ráð fyrir samfelldri viðveru á staðnum allt árið, í óstyrktu einbýlishúsi eða öðrum sam-
bærilegum vistarverum, eru árlegar dánarlíkur skilgreindar sem staðaráhætta.

Í jöfnu (10) er til einföldunar reiknað með einu tilteknu flóði í stað líkindadreifingar flóða af
mismunandi stærð með endurkomutíma sem lækkar yfirleitt með stærð flóðanna. Heildaráhætta
einstaklings, A , á svæði þar sem margar óháðar flóðasviðsmyndir eru mögulegar eru hins vegar
samanlagðar líkur á því að látast í flóðum af völdum hvernar sviðsmynda:

$$A = \sum_{i=1}^k S_{f_i} \quad (13)$$

Þar sem k er fjöldi sviðsmynda.

4 Niðurstöður

Hér eru fyrst kynntar niðurstöður hættumats fyrir hverja rennslissviðsmynd. Einnig er fjallið um hættumat vegna hlaupa með aðra upptakastaði en við jökuljaðar. Því næst er fyrir hverja sviðsmynd fjallað um áhættumat og einnig um heildaráhættu. Að lokum er farið yfir óvissuþætti í niðurstöðunum og áhrif mismunandi stuðla og inntaksgagna á niðurstöðurnar.

4.1 Hættumat

Helstu niðurstöður straumfræðilegu reikninganna eru kynntar fyrir hverja sviðsmynd. Grunn-niðurstöðurnar eru settar fram á kortum sem sýna hámarksdýpi (myndir 7, 12 og 17) og hámarks-straumhraða (myndir 8, 13 og 18) í hverjum reit. Þessum hámarksgildum fyrir hvora breytu er ekki nauðsynlega náð fyrir sama tímaskref. Straumhraði er t.d. oft meiri meðan vatn er að ganga yfir áður þurran reitinn heldur en síðar þegar vatnsdýpi á staðnum er orðið meira og nær hámarki. Einnig er ekki sjálfgefið að hámarksgildum hvorrar breytu sé náð yfir allt svæðið í sama tímaskrefi. Niðurstöðurnar eru því ekki skyndimynd af ástandi kerfisins í ákveðnu tímaskrefi. Rennslisrit allar sviðsmynda eru þó í hámarki nægjanlega lengi til að innrennsli við jökuljaðar og útrennsli við ósa er u.þ.b. jafnt á einhverjum tíma í reikningunum. Reikningarnir herma því líka æstætt ástand með hámarksrennsli til viðbótar við framgang hlaupanna niður farveginn. Búast má við að a.m.k. hámarksdýpi og oft mesta hraða sé náð á flestum stöðum í þeim tímaskrefum.

Til viðbótar við þessar grunnniðurstöður er kynnt fyrir hverja sviðsmynd i) útbreiðsla miðað við mismunandi forsendur um hrýfi og setuppbyggingu (myndir 9, 14 og 19), ii) tjónmætti byggt á jöfnu 1 (myndir 10, 15 og 20) og iii) og framrásartími (myndir 11, 16 og 21). Á kortum af útbreiðslu miðast „lægra mat“ á hrýfi við hrýfisstuðull Mannings skv. feltrannsóknnum Andrew Russell og fleiri (2010) (mynd 5). „Hærra mat“ gerir ráð fyrir að mögulega myndist jakahrannir sem hafi áhrifa á framgang hlaupsins. Þar er notast við tvöfalt mat á hrýfisstuðuli Mannings auk þess sem innrennsli er einnig tvöfaldað, sjá nánar kafla 3.2 og viðauka I. „Hærra mat og aukið set“ samsvarar reikningum í samræmi við hærra mat þar sem jafnframt er búið að hækka undirliggjandi landhæðarlíkan, samanber niðurstöður í kafla 3.2 og viðauka II. Niðurstöður um framrásartíma miðast við hærri rishraða rennslisrita sviðsmynda, þar sem fleiri en einn möguleiki kemur til greina. Einnig er notast við lægra mat á hrýfi. Þetta er gert til að endurspegla mögulegt versta tilfelli því þessi þættir leggja báðir til aukins framrásarhraða. Niðurstöður um framrásartíma eru settar fram í töflu 3, til viðbótar við kortaframsetningu (myndir 11, 16 og 21). Þessir framrásartímar miðast við upphaf jökulhlaups við jökuljaðar. Ferðatími undir jökli frá upprunastað að jaðri og tími frá upphafi breytinga í jarðhitavirkni eða eldgoss þar til rennslis undir jökli hefst bætist því við sé miðað við slíkar tímasetningar.

Sviðsmynd 1 – 5.000 m³/s

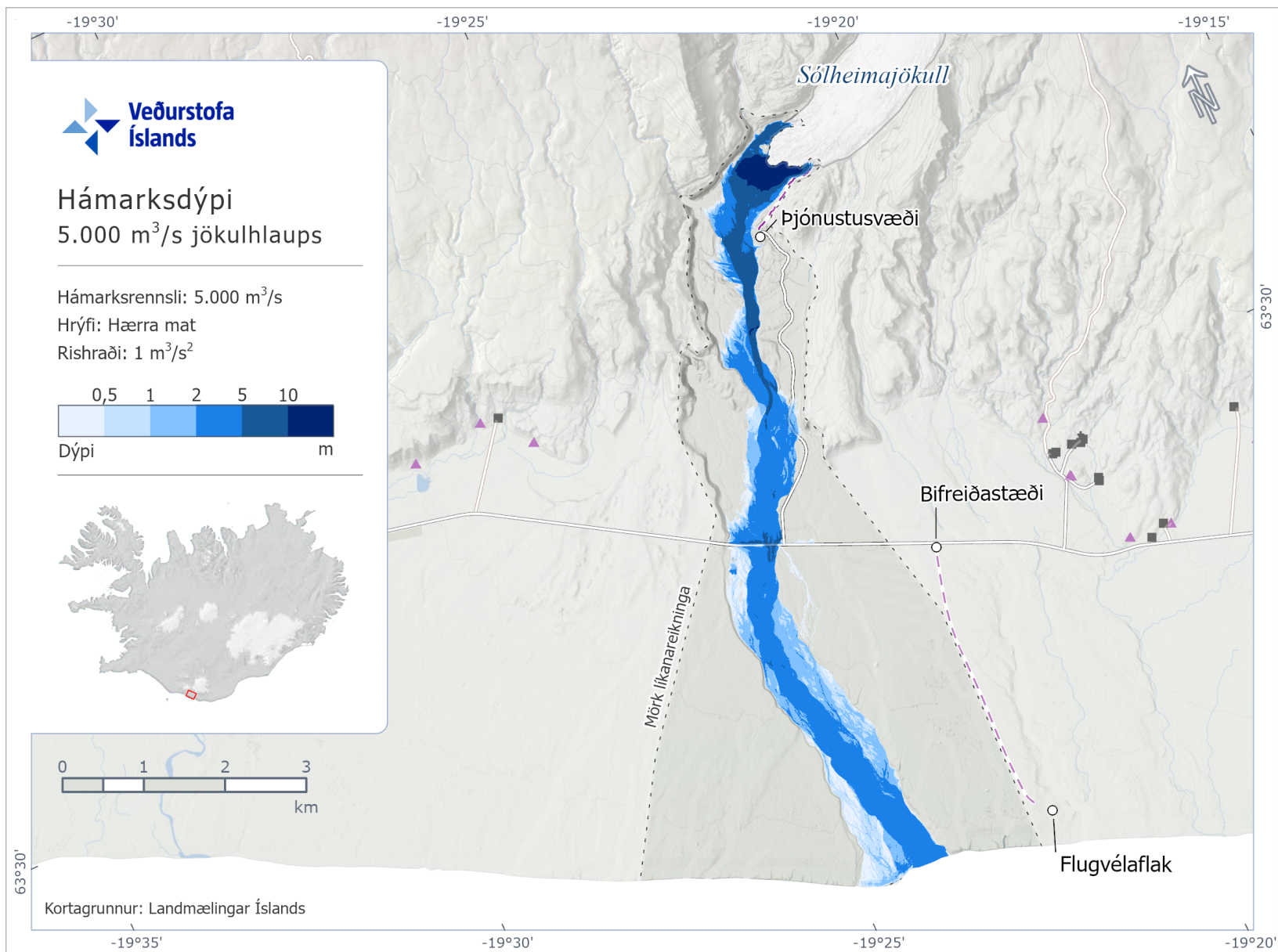
Hlaup með 5.000 m³/s hámarksrennsli er rúmlega tvöfalt stærra en síðasta umtalsverða hlaup frá Sólheimajökli, árið 1999. Útbreiðsla og flóddýpi verður því meira en þá var. Hluti Sólheimajökulsveggar fer á kaf vestur af fjallsbrúninni við Loðmundarsæti fyrir bæði hærra og lægra mat á hrýfi. Fyrir hærra mat á hrýfi flæðir einnig yfir veginn niður við gatnamótin við þjóðveg 1. Flóddýpi og straumhraði yfir veginum leiðir til geysimikils tjónmættis á meira en 500 m kafla (myndir 7, 8 og 10). Dýpi er meira en 2 m og straumhraði allt að 3 m/s á vissum svæðum veg-

arins. Það má því búast við að vegurinn verði ófær öllum tækjum í hlaupi af þessari stærð auk þess sem á honum verði miklar skemmdir.

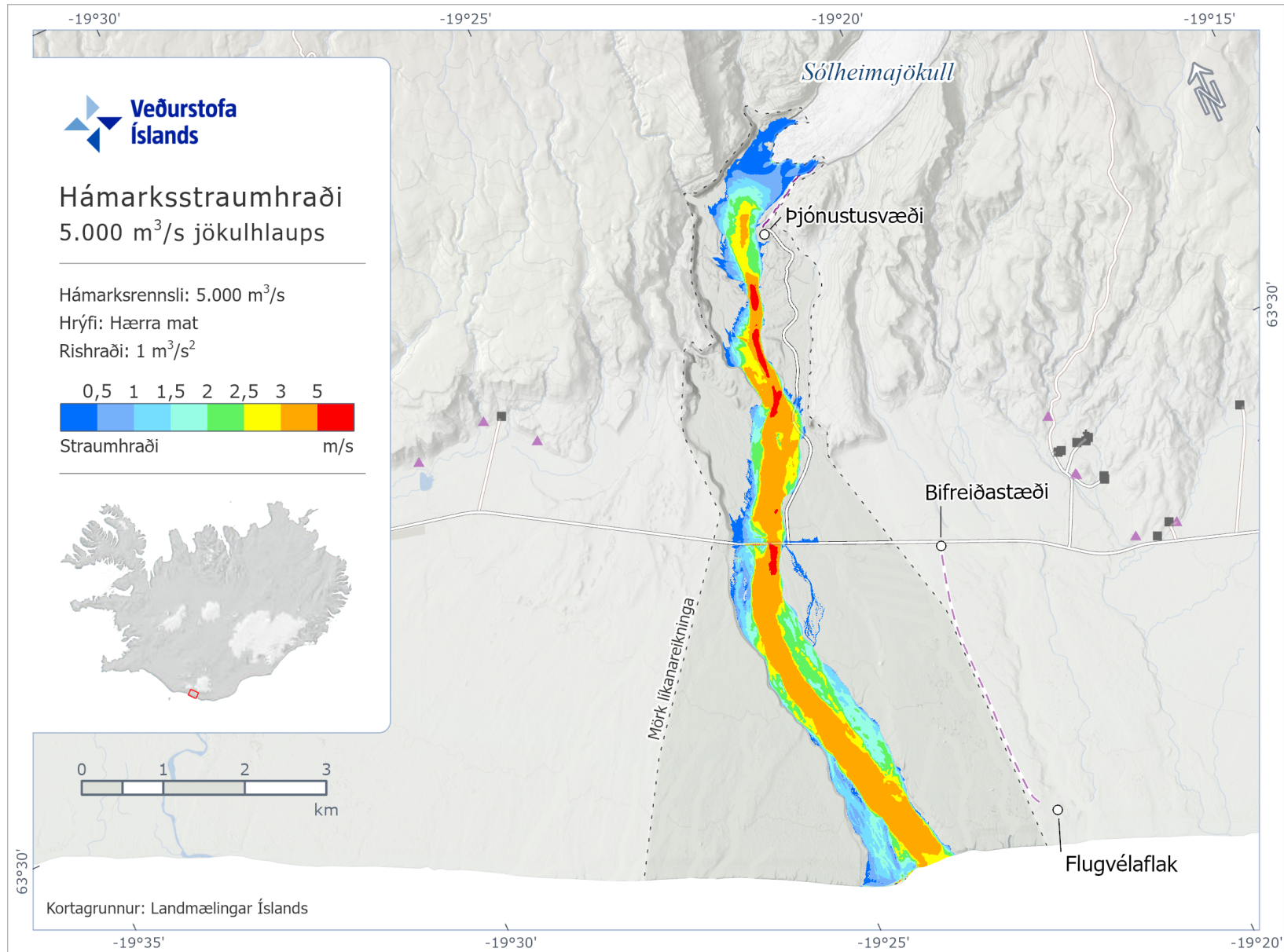
Talsvert yfirflæði verður yfir þjóðveg 1 í þessari sviðsmynd. 200 m fara undir vatn vestan við brúna á Jökulsá á Sólheimasandi en um 50 m austan hennar (mynd 9). Vatnsdýpi yfir veginum vestan brúar verður allt að 1.5 m og hámarksstraumhraði allt að 5 m/s. Vegurinn yrði því ófær á þessum kafla og búast mætti við rofi á veginum. Vatnshæð undir brúnni verður mest í rúmlega 56 m y.s. Þetta er u.þ.b. sama hæð og bitarnir undir brúnni. Ekki er gert ráð fyrir brúnni í reikningunum og ef bryti á henni mætti búast við að vatnshæð verði meiri. Straumhraði í brúarskarðinu verður allt að 6 m/s. Ekki er víst hvort að brúin standist slíkt álag. Ekki er gert ráð fyrir rofi á skarði í vegin í reikningunum en miðað við niðurstöður má búast við slíku strax við 2000 m³/s. Það má því búast við að vegurinn vestan brúar rofni áður en brúin fer. Slíkt léttir álagi af brúnni og minkar líkur á að hún skemmist.

Um 250 m af efsta hluta göngustígsins, frá þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegar og að jökuljaðrinum, fer á kaf í allt að 6 m djúpu vatni. Straumhraði á þessu svæði er lítill en tjónmættið verður verulegt vegna vatnsdýpisins. Aðgengi að og frá jöklinum eftir venjulegum aðkomuleiðum lokast því á meðan að á hlaupinu stendur.

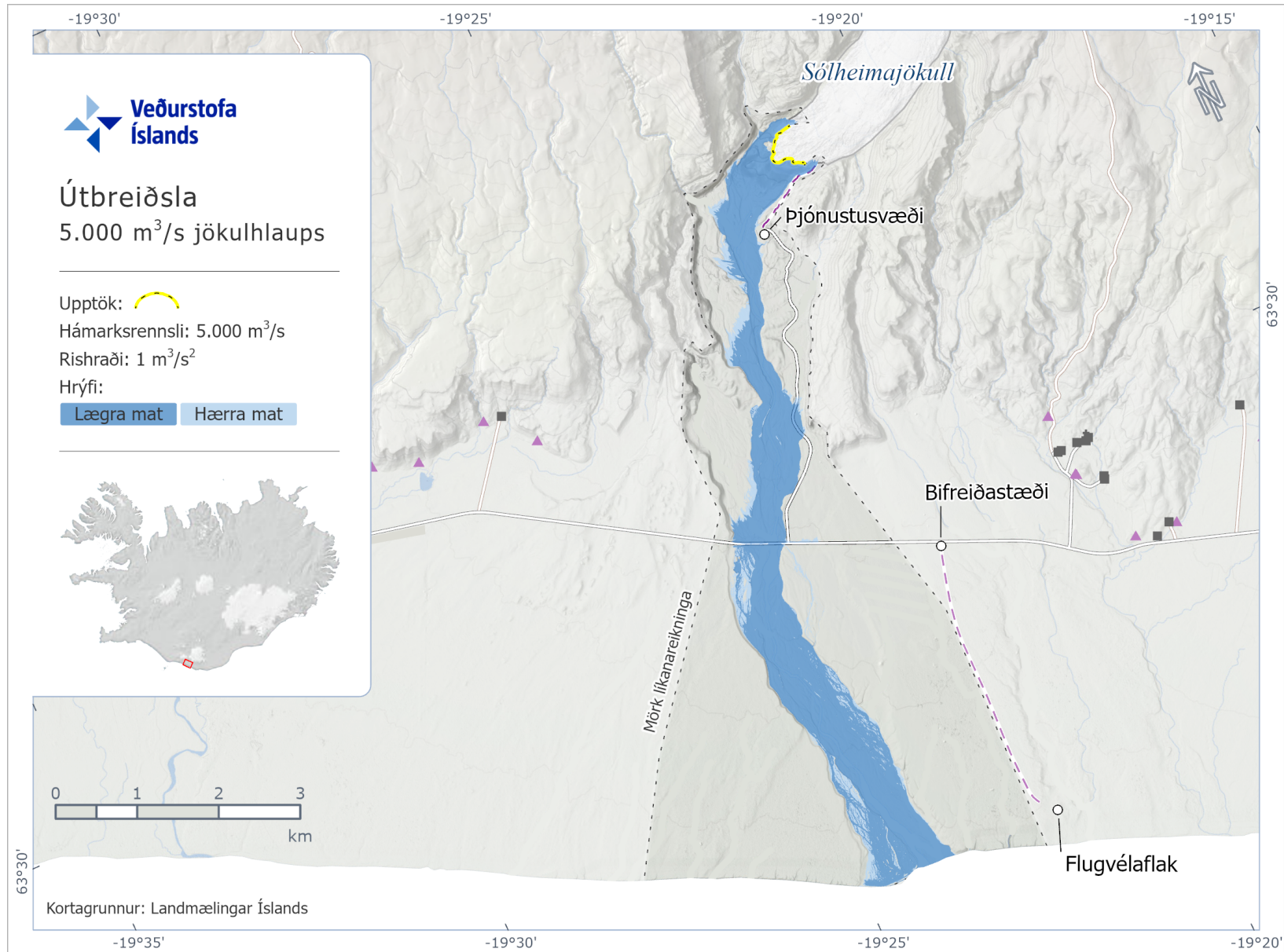
Önnur mikilvæg svæði svo sem þjónustusvæðið við enda Sólheimajökulsvegar fara ekki á kaf í hlaupi af þessari stærð. Meginniðurstöður um útbreiðslu og á hvaða svæðum hlaup af þessari stærð veldur vandræðum eru þær sömu fyrir herra og lægra mat á hrýfi (mynd 9).



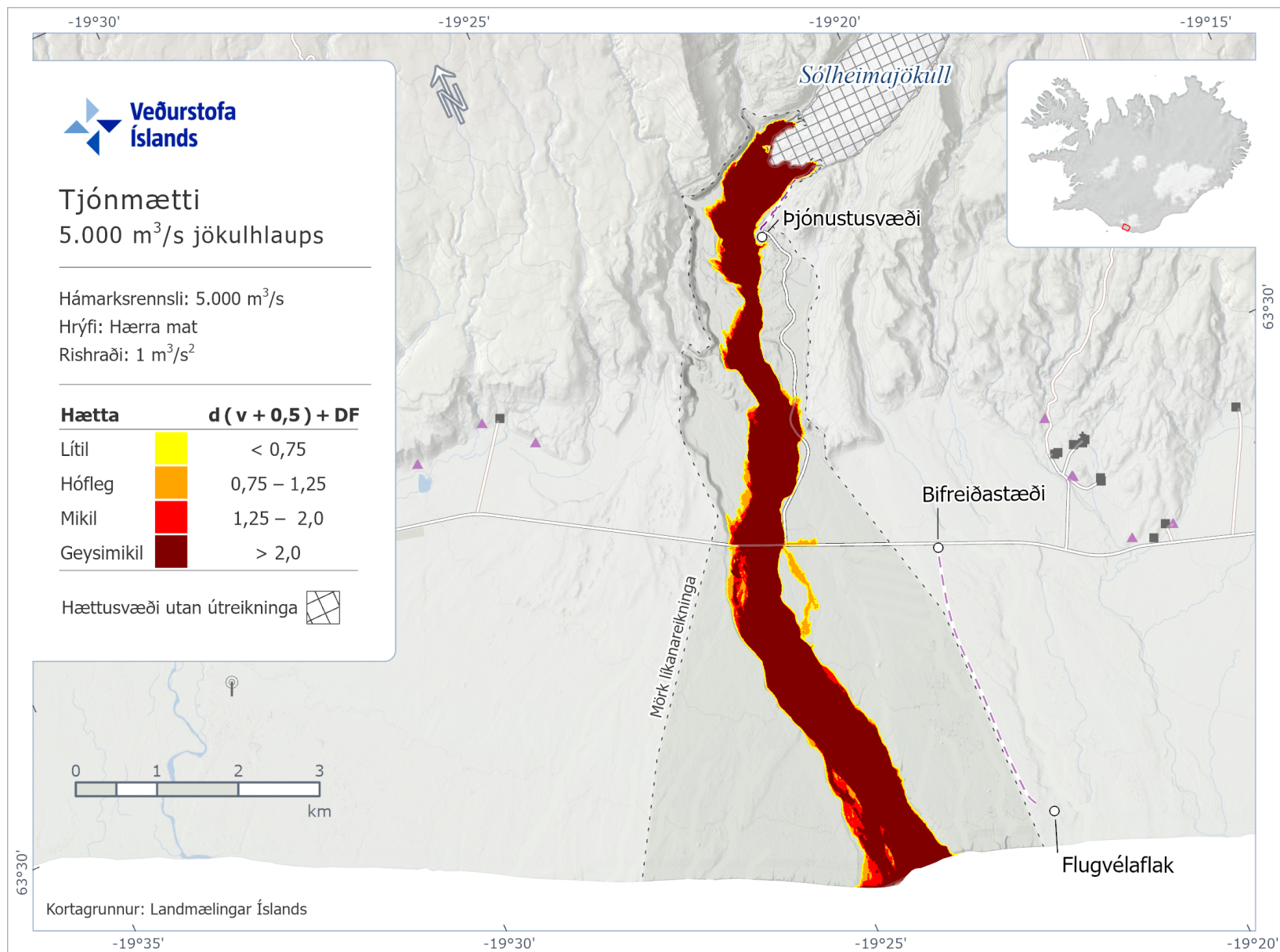
Mynd 7. Hámarksdýpi í 5.000 m³/s jökulhlaupi.



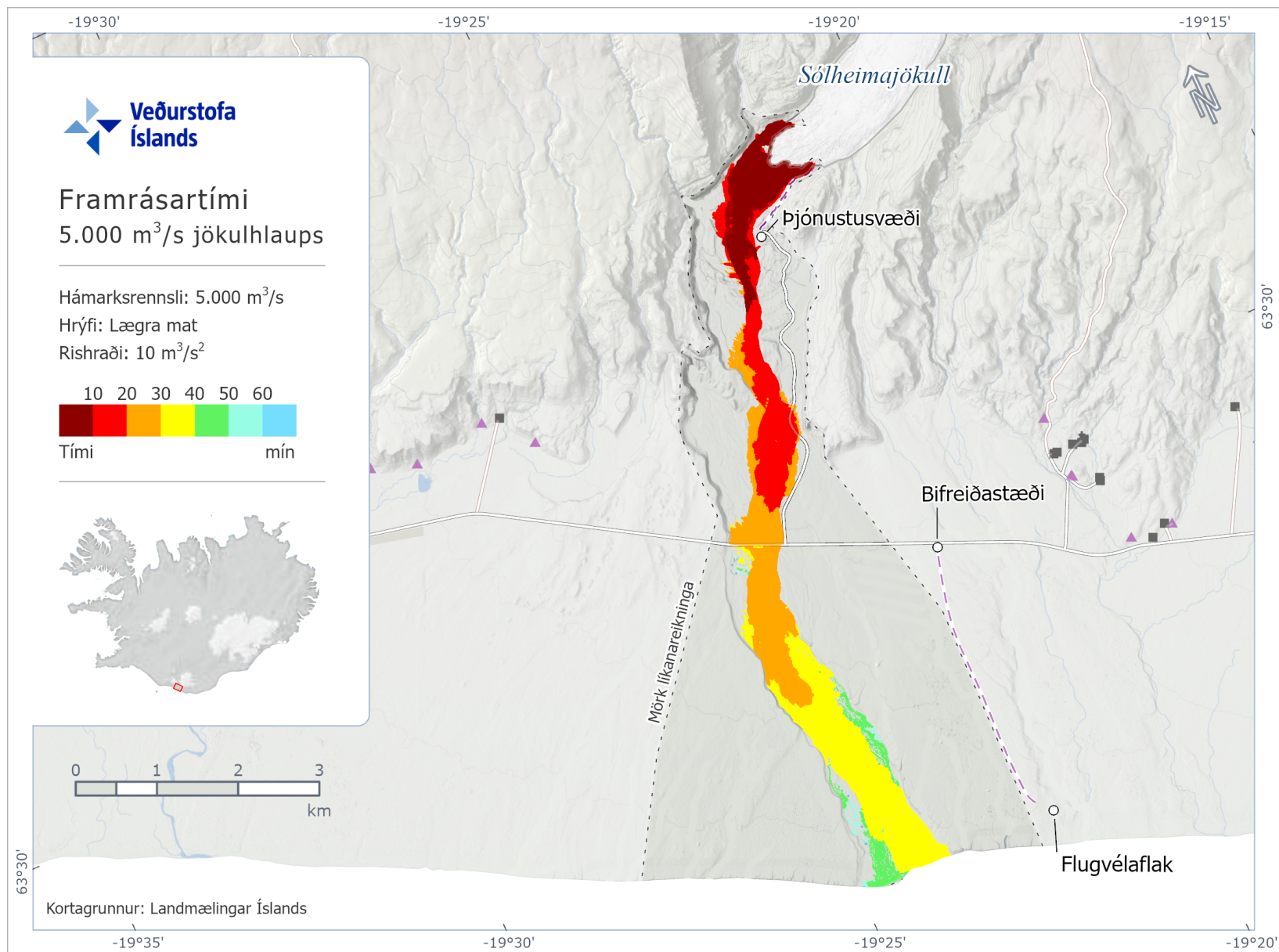
Mynd 8. Hámarksstraumhraði í 5.000 m³/s jökulhlaupi.



Mynd 9. Mesta útbreiðsla í 5.000 m³/s jökulhlaupi.



Mynd 10. Mesta tjónmætti í 5.000 m³/s jökulhlaupi.



Mynd 11. Framrásartími 5.000 m³/s jökulhlaups.

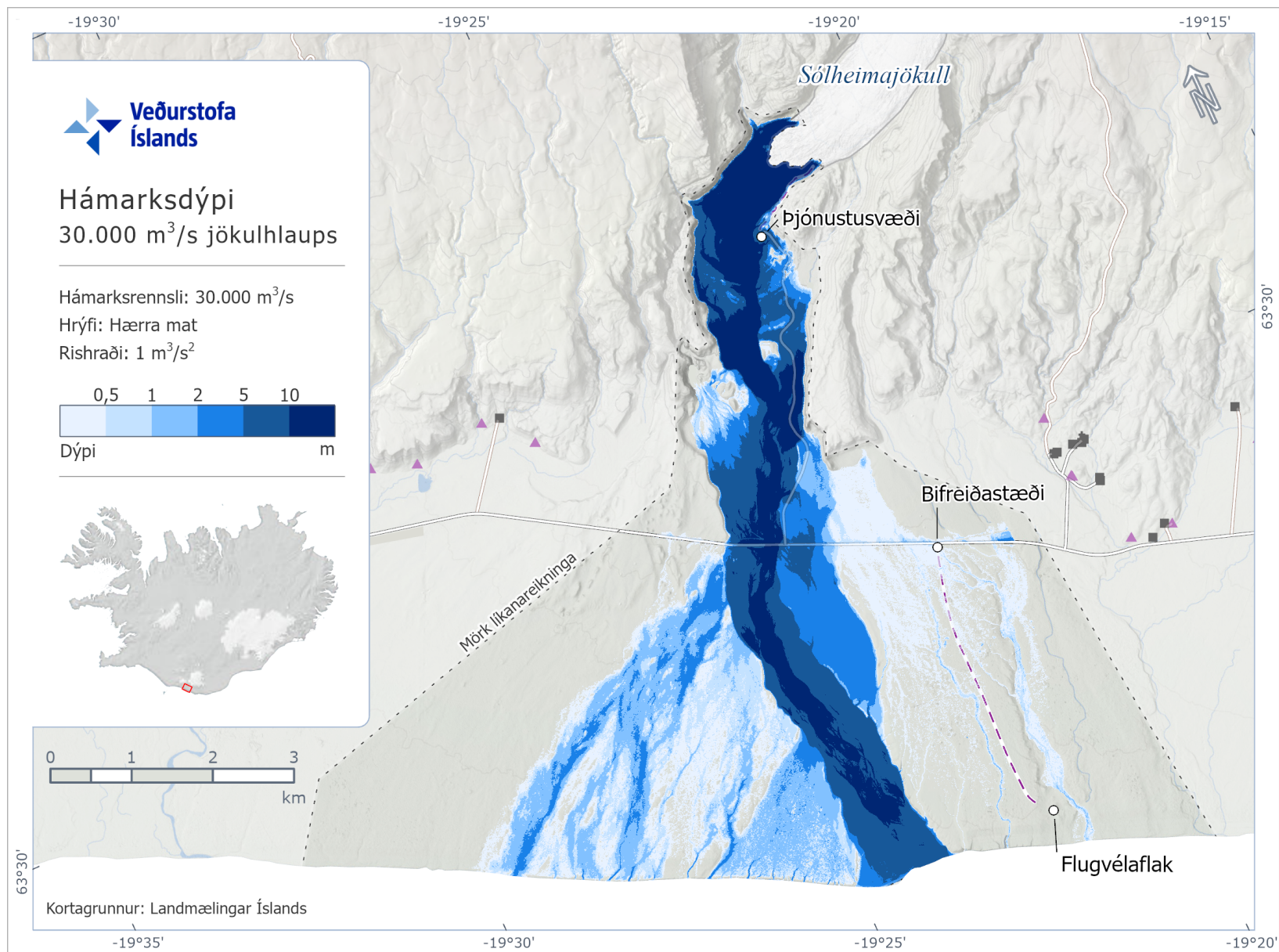
Sviðsmynd 2 – 30.000 m³/s

Útbreiðsla hlaupa með 30.000 m³/s hámarksrennsli á Sólheimasandi er mikil. Nær allur Sólheimajökulsvegur fer undir vatn auk 1–2 km af þjóðvegi 1 (mynd 14). Tjónmættið á þessum svæðum er geysimikið (mynd 15). Ljóst er miðað við straumhraða og dýpi að búast má við miklum skemmdum á bæði Sólheimajökulsvegi og þjóðvegi 1. Búast má við því að brúin á þjóðvegi 1 fari, en vatnshæð verður hæst meira en 4 m ofar en brúargólfíð auk þess sem straumhraði er allt að 10 m/s.

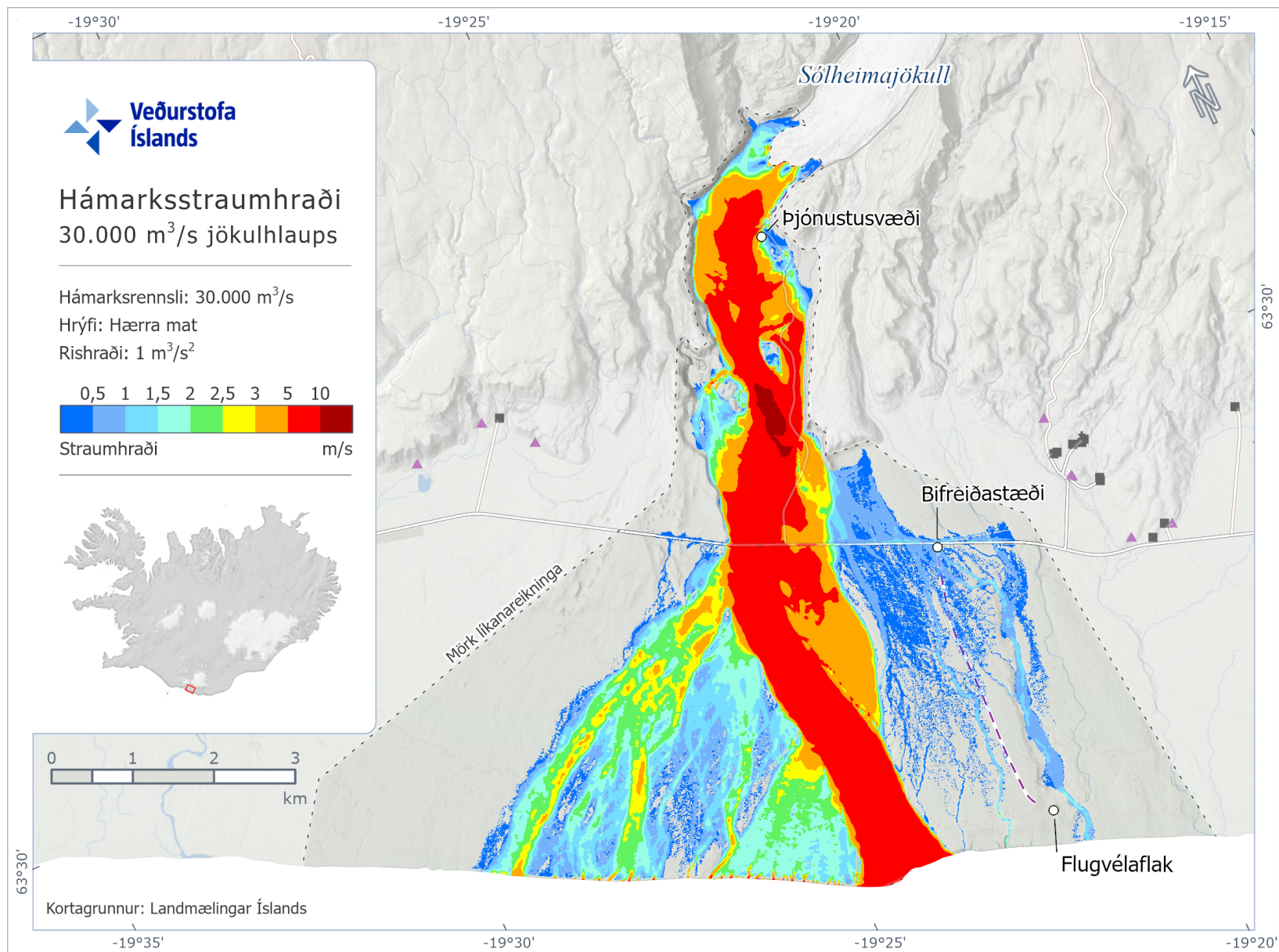
Talsverðu munar á því hversu stór hluti þjónustusvæðisins fer á kaf eftir því hvaða nálgun er notuð fyrir hrýfi. Fyrir lægra matið vatnar yfir hluta svæðisins með reyndar allt að 1,5 m djúpu en mjög straumlitlu vatni. Fyrir hærri matið fer hinsvegar allt svæðið á kaf í allt að 7 m djúpu vatni með allt að 5 m/s straumhraða. Hlaupin skapa þó hættu á þjónustusvæðinu í báðum tilfellum en tjónmættið er umtalsvert meira fyrir hærri matið á hrýfi.

Á göngustígnum að jöklinum kemur einnig fram mikill munur á niðurstöðum eftir því við hvaða mat á hrýfi er notast (mynd 14). Fyrir hærri mat á hrýfi fer nær allur ~1 km langur stígurinn á kaf í margra metra djúpu straumhórðu vatni. Fyrir lægra matið fara aðeins um 300 m næst jökli á kaf. Vatnsdýpi þar er þó allt að 10 m og jökulinn einangrast því frá þjónustusvæðinu í báðum tilfellum.

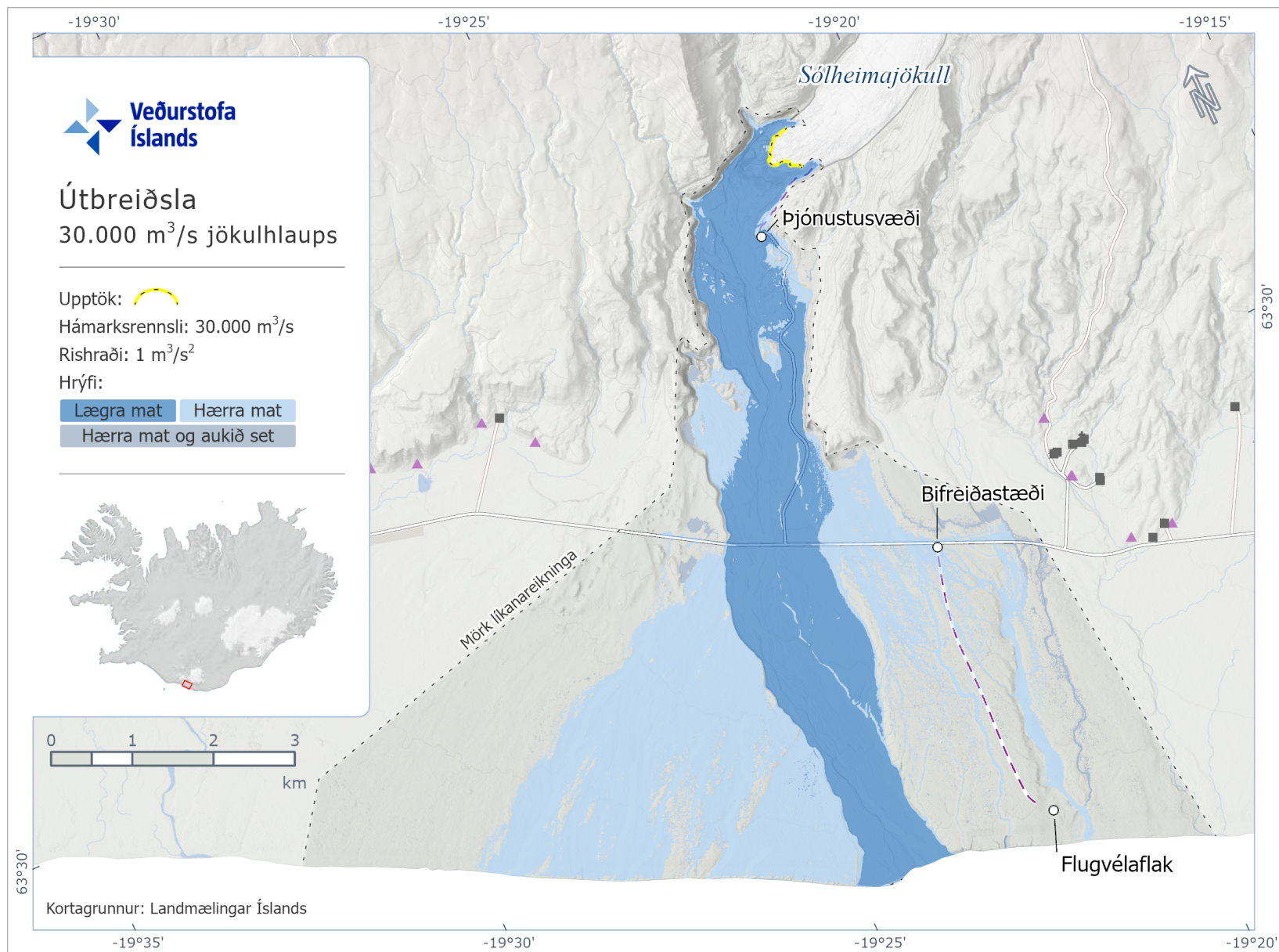
Fyrir hærri mat á hrýfi teygja talsverðir álar sig austur með þjóðvegi 1 í þessari sviðsmynd (mynd 14). Þetta vatn nær að hluta til yfir bílastæðið við göngustíginn að flugvélarflakinu á Sólheimasandi. Álar af vatni ná einnig yfir göngustíginn niður að flakinu. Tjónmættið í hluta þessarar ála er mikið og því ljóst að þetta gæti valdið a.m.k. gangandi vegfarendum hættu (mynd 15).



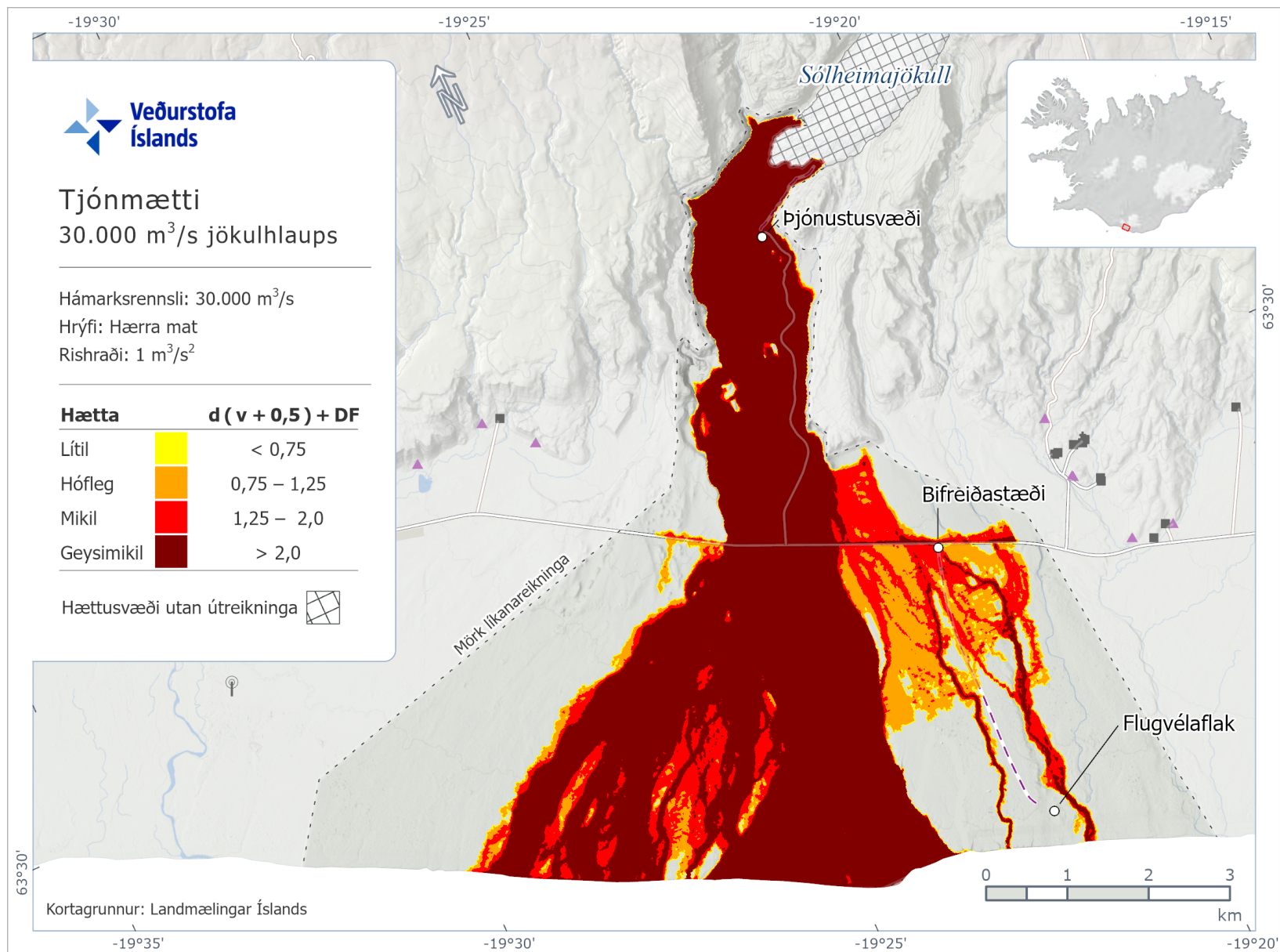
Mynd 12. Hámarksdýpi í 30.000 m³/s jökulhlaupi.

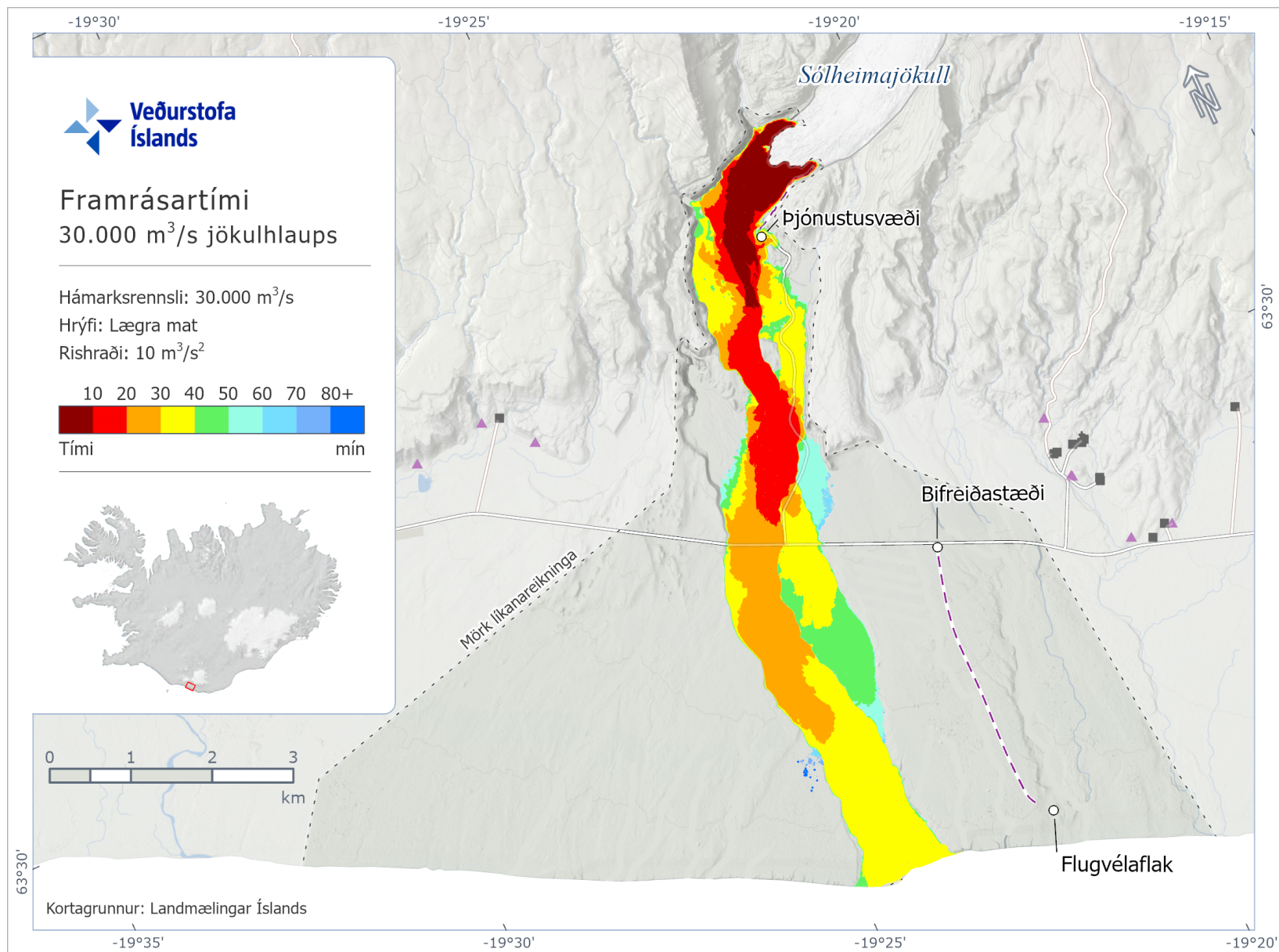


Mynd 13. Hámarksstraumhraði í 30.000 m³/s jökulhlaupi.



Mynd 14. Mesta útbreiðsla í 30.000 m³/s jökulhlaupi.



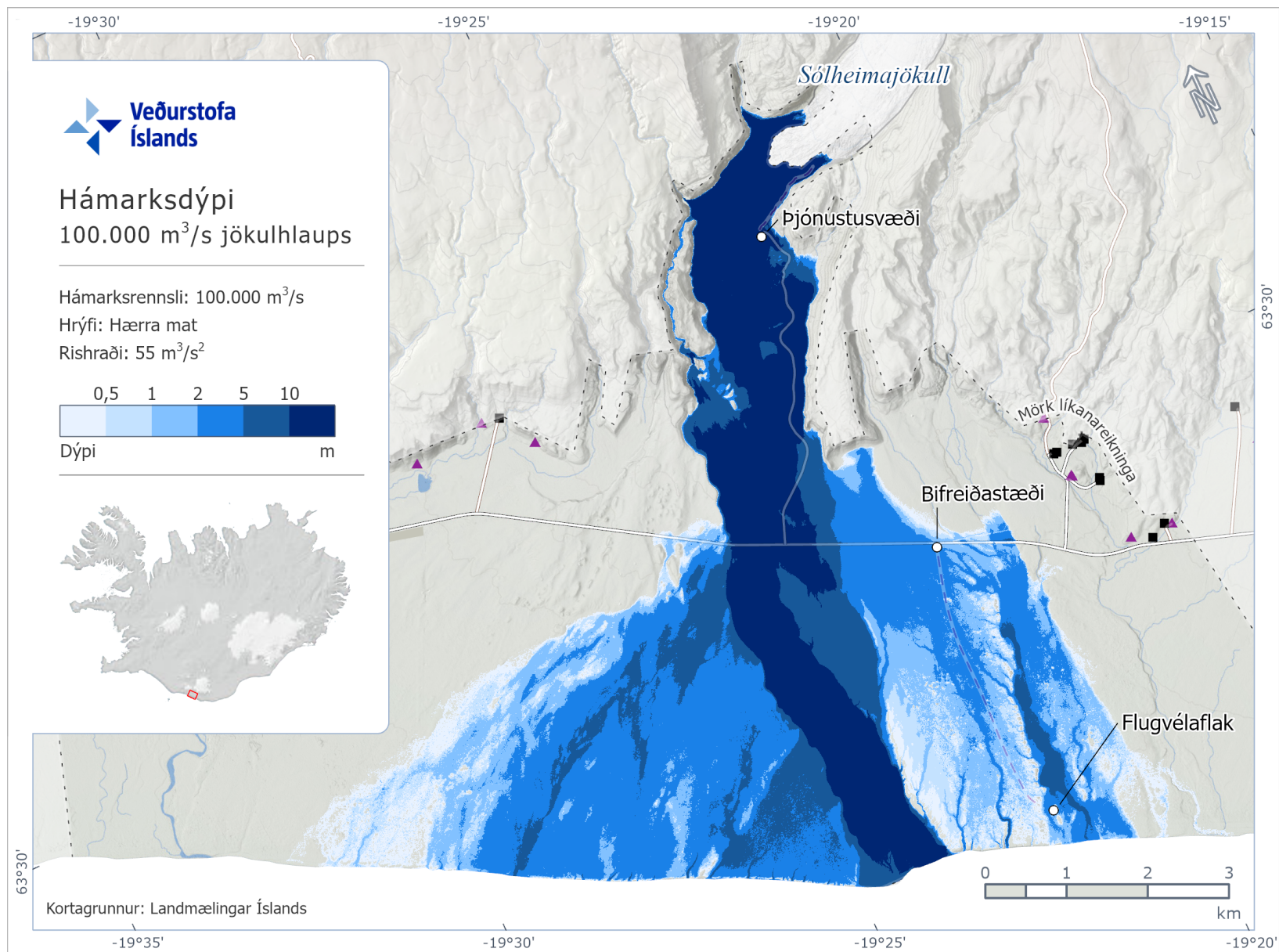


Mynd 16. Framrásartími 30.000 m³/s jökulhlaups.

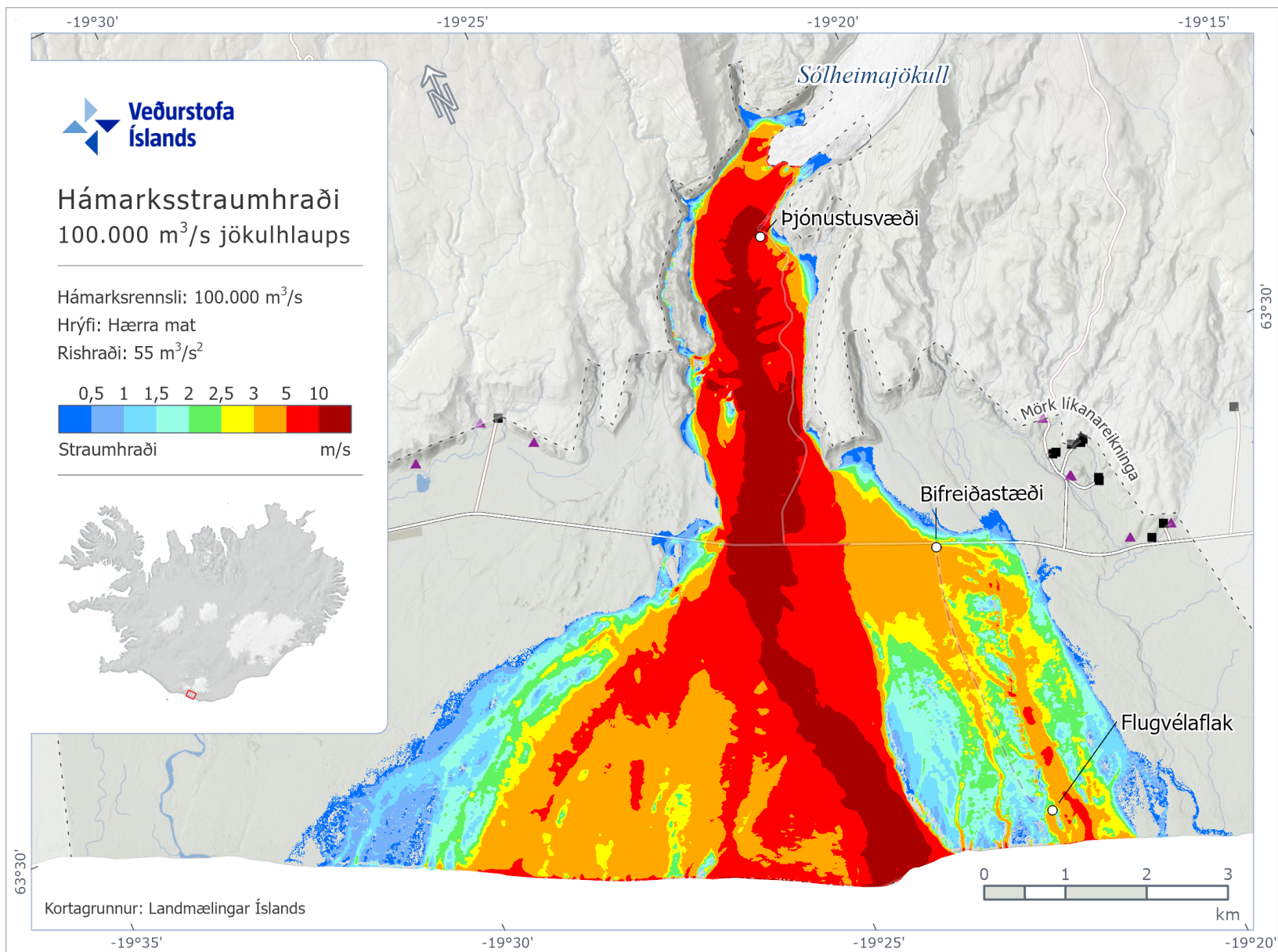
Sviðsmynd 3 – 100.000 m³/s

Hlaup af þessari stærðargráðu er hamfarahlaup. Allur göngustígurinn að jökli, þjónustusvæðið við enda Sólheimajökulsvegur, Sólheimajökulsvegur og 3–5 km af Þjóðvegi 1 fara á kaf í margra metra djúpt straumhart vatn (myndir 17 og 18). Búast má við miklum skemmdum á vegum, brúnni á Þjóðvegi 1 og byggingum á þjónustusvæðinu (mynd 20). Vatn streymir til austurs yfir stalla austan við farveg Jökulsár á Sólheimasandi (mynd 19). Vatn streymir einnig til austurs meðfram Þjóðvegi 1. Bílastæðið við göngustíginn niður að flugvélarflakinu á Sólheimasandi, göngustígurinn og svæðið við flugvélarflakið fara því á kaf í straumþungt vatn með geysimikið tjónmætti (mynd 20).

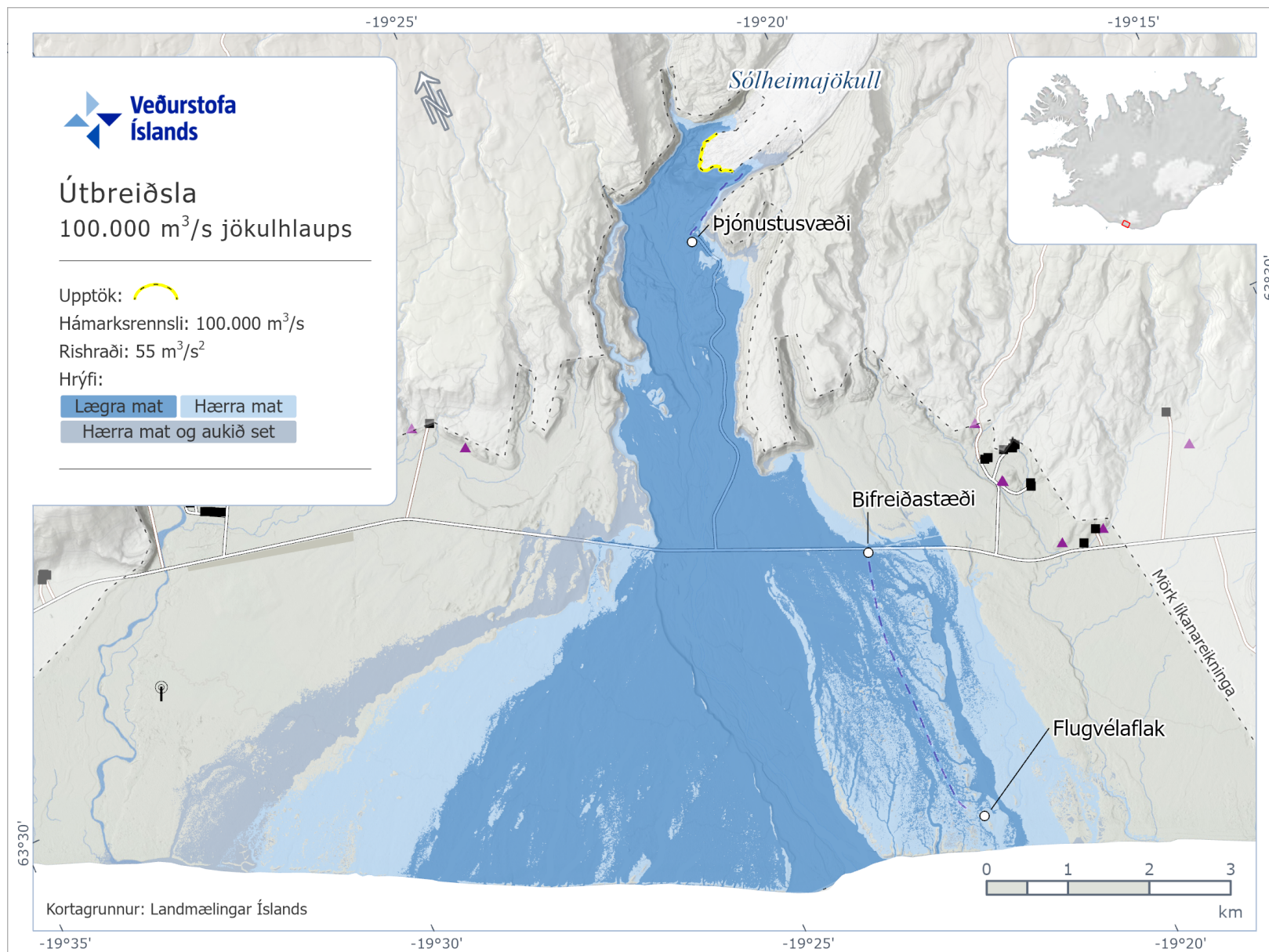
Farvegur Hólsár afmarkar að austan hlaup af þessari stærð (mynd 19). Vegamótin á Þjóðvegi 1 upp að Ytri-Sólheimum og Sólheimahjáleigu fara því ekki á kaf. Að vestan afmarkast hlaupið af talsverðum stöllum í landslaginu vestan við Sýslulæk. Hlaup í þessari sviðsmynd valda því ekki flóðahættu á Skógum. Neðan vegar dreifir hlaupið sér meira til vesturs og gengur meira en 5 km vestur fyrir farvegi Jökulsár á Sólheimasandi. Dreifingin er þó mest þegar nær dregur ströndu og hlaupin ná ekki að tünunum sunnan við Þjóðveg 1 neðan við Skóga. Sé gert ráð fyrir umtalsverðri setupphleðslu gengur viðbótaráll út úr hlaupinu til vestur. Eins og í fyrri sviðsmyndum nær hann þó hvorki að Skógum né tünunum sunnan við veg. Hann nær þó allt að ósum Skógaár rétt áður en komið er að ströndinni (mynd 19).



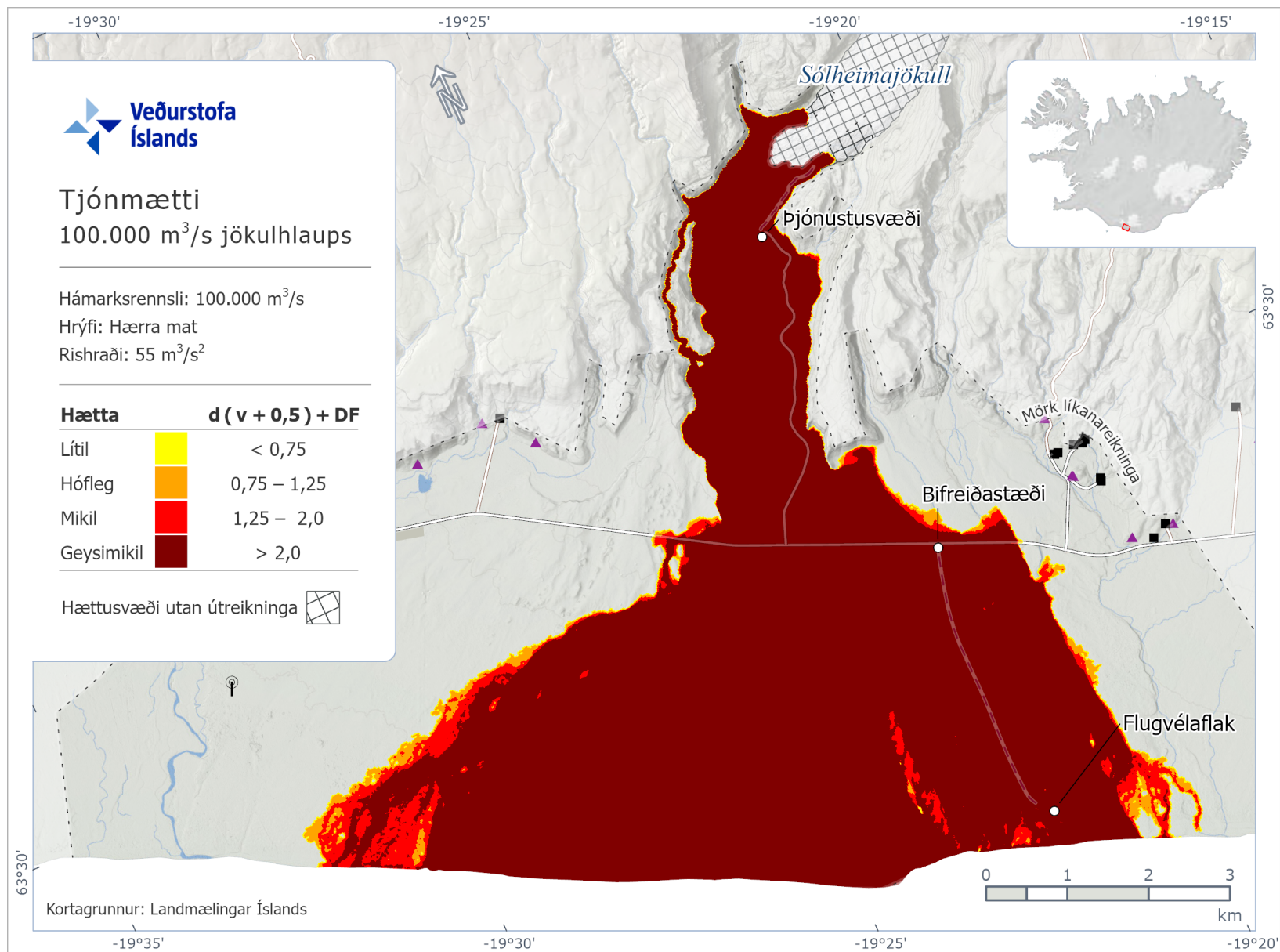
Mynd 17. Hámarksdýpi í 100.000 m³/s jökulhlaupi.

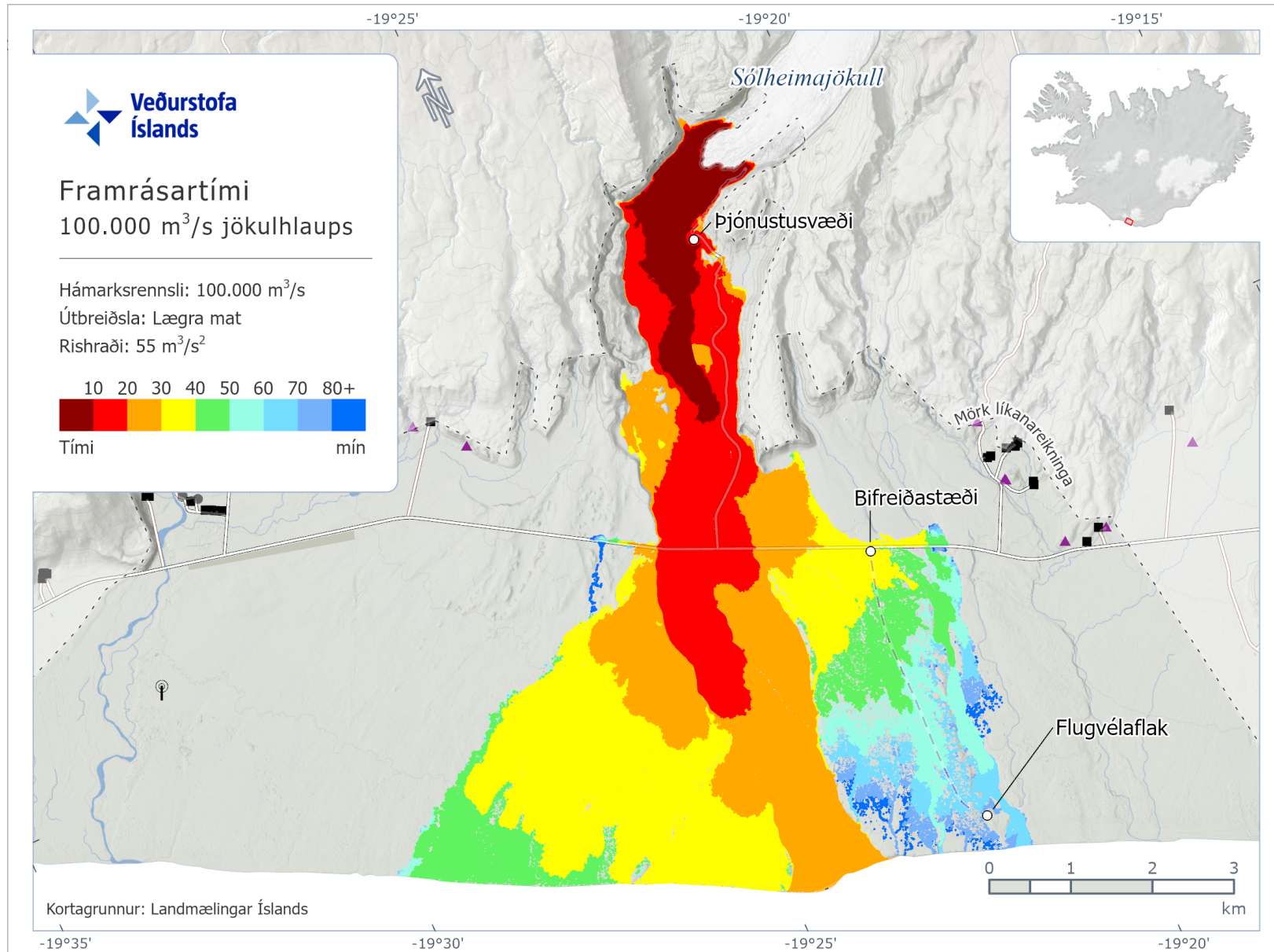


Mynd 18. Hámarsstraumhraði í 100.000 m³/s jökulhlaupi.



Mynd 19. Mesta útbreiðsla í 100.000 m³/s jökulhlaupi.





Mynd 21. Framrásartími 100.000 m³/s jökulhlaups.

Tafla 3. Hermdir framrásartímar mismunandi sviðsmynda fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli, að helstu kennileitum. Tímar miðast við upphaf hlaups við jökuljaðar og eru gefni í mínútum.

Sviðsmynd – Q_{max} [m ³ /s]	Göngustígur við jökul	Þjónustu- svæði	Sólheimajökulsvegur	Brú þjóð- vegi 1	Bílastæði við flak	Flak
1 – 5.000	2–7	NA	19–43	23–35	NA	NA
2 – 30.000	2–7	30–37	19–41	23–35	NA–450*	NA
3 – 100.000	2	14	12–16	16–24	44	90

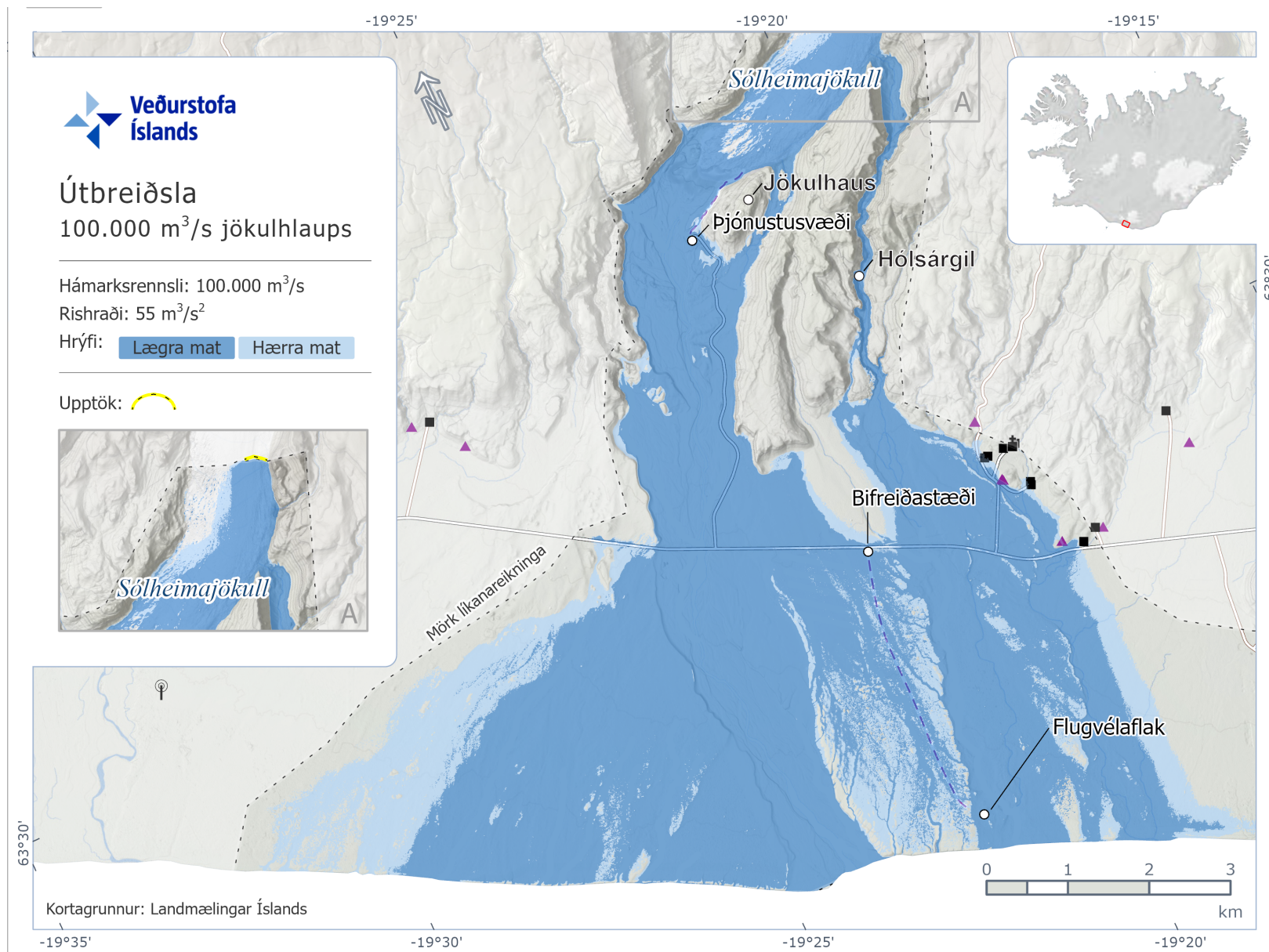
*Misjafnt er eftir forsendum hvort sviðsmyndir með 30.000 m³/s nái að bílastæðinu við upphaf gangstígarins niður að flugvélarflakinu eða ekki.

Sviðsmyndir með 100.000 m³/s hámarksrennsli og upptök á jökli

Hætta er á að vatn komi fram austan við Jökulhaus eða um Hólsárgil ef umtalsverður hluti hlaupvatnsins brýst til jökulyfirborðs eða kemur flæðandi niður eftir jöklinum (mynd 22). Yfirflæði í gegnum skarðið efst í Hólsárgili hefst við um 8.000–13.000 m³/s séu upptök hlaupa hermd austanmegin á jöklinum ofan gilsins. Séu upptökin hermd alveg vestast á skriðjöklinum, ofan gilsins, þarf talsvert meira rennsli á yfirborði jökulsins til þess að flæða fari yfir skarðið, eða um 51.000–62.000 m³/s. Séu upptök hlaupsins austanmegin jöklinum ganga um 16–17% af hámarksrennsli 100.000 m³/s hlaups yfir í Hólsárgil. Séu upptökin vestanmegin fara ekki nema ~4% af hámarksrennsli slíks hlaups niður Hólsárgil.

Fari þessi atburðarrás á versta veg með 16.000–17.000 m³/s rennsli fram úr Hólsárgili flæðir yfir veginn að bæjunum við Sólheima og Sólheimahjáleigu (mynd 22). Farvegur Húsár fyllist alveg framan við Ytri Sólheima 1 og þar fyrir neðan (mynd 22). Vatnsdýpi á veginum verður meira en 4 m þar sem hann liggur meðfram Húsánni. Allir Sólheimabæirnir myndu því lokast af í slíku flóði. Vatn nær að veginum að bæjunum um 40 mínútum eftir upphaf hlaups. Það vatnar að húsum á Ytri Sólheimum 1 og Sólheimahjáleigu en ekki öðrum bæjum. Vatn nær að húsunum tæpum 50 mínútum eftir upphaf hlaups. Einnig vatnar að frístundahúsinu að Ytri-Sólheimum 4 auk þess sem vegurinn þangað lokast með allt að 2 m djúpu vatni. Sá hluti þjóðvegur 1 sem fer á kaf í straumhart vatn í þessari sviðsmynd er um 1 km lengri til austurs heldur en í sviðsmyndinni þar sem allt vatnið kemur fram við jaðar Sólheimajökuls.

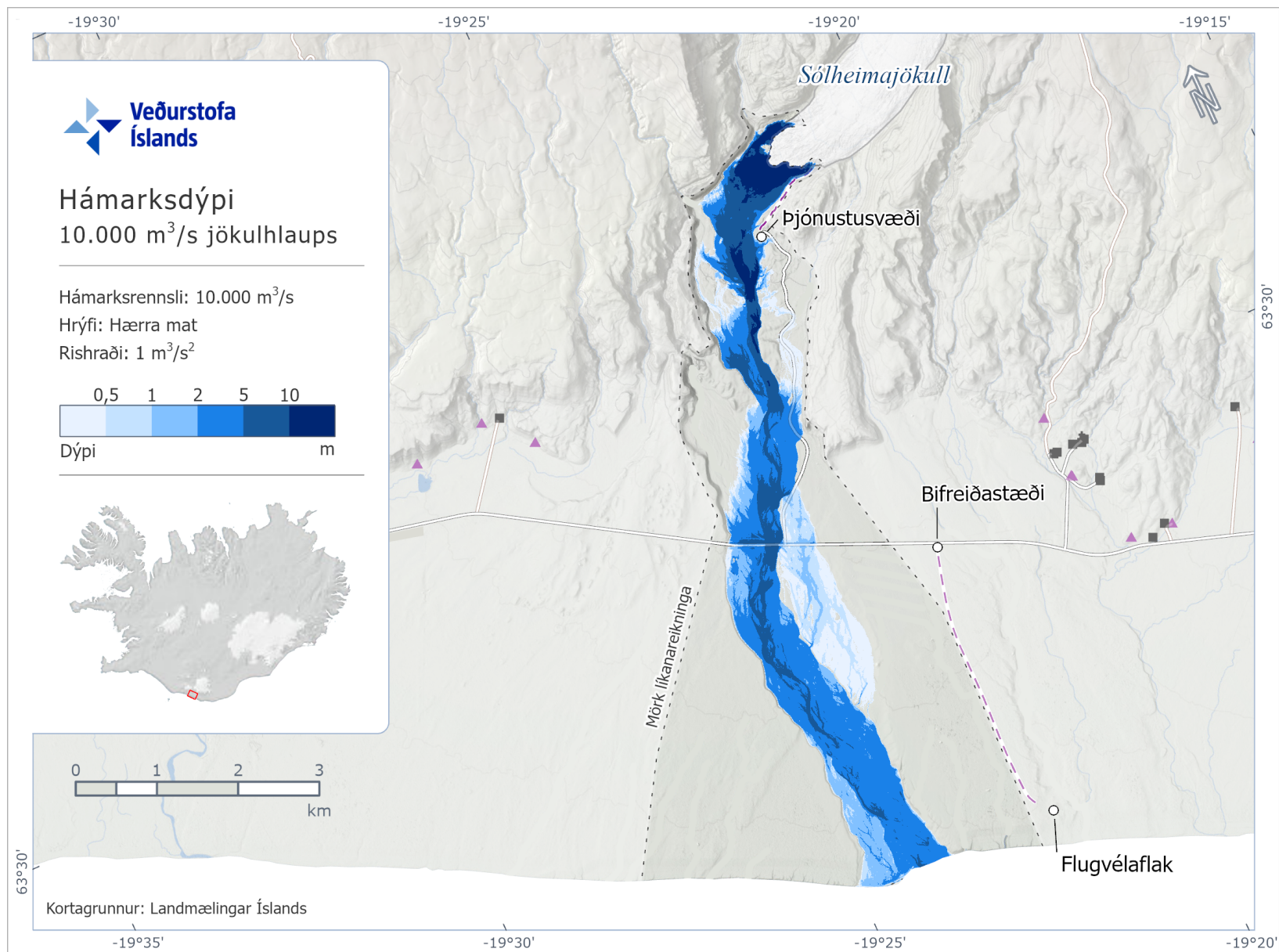
Vatn flæðir yfir skarðið austan við Jökulhaus ef rennsli ofan á jöklinum austanverðum fer yfir 18.000–33.000 m³/s. Rennslið yfir skarðið verður mest 7–9% af hermdu 100.000 m³/s hámarksrennsli ef vatnið kemur upp á milli Hólsárgils og skarðsins ofan við Jökulhaus. Komi hlaupið fram ofan Hólsárgils fara ekki nema tæplega 5.000 m³/s af 100.000 m³/s hámarksrennsli yfir skarðið við Jökulhaus. Komi hlaupin fram vestanmegin á jöklinum er varla að vatn komist yfir skarðið. Rétt nærri 100.000 m³/s hámarki flæða 150 m³/s austan við Jökulhaus. Flæði austan við Jökulhaus veldur því að flæði yfir Sólheimajökulsveg hefst fyrr en ella. Auk þess skapar það hættu í skarðinu og dalnum austan við Jökulhaus en ekki verða aðrar stórtækar breytingar á niðurstöðum neðar, samanborið við hermanir þar sem allt hlaupvatnið kemur upp við jökulsporið.



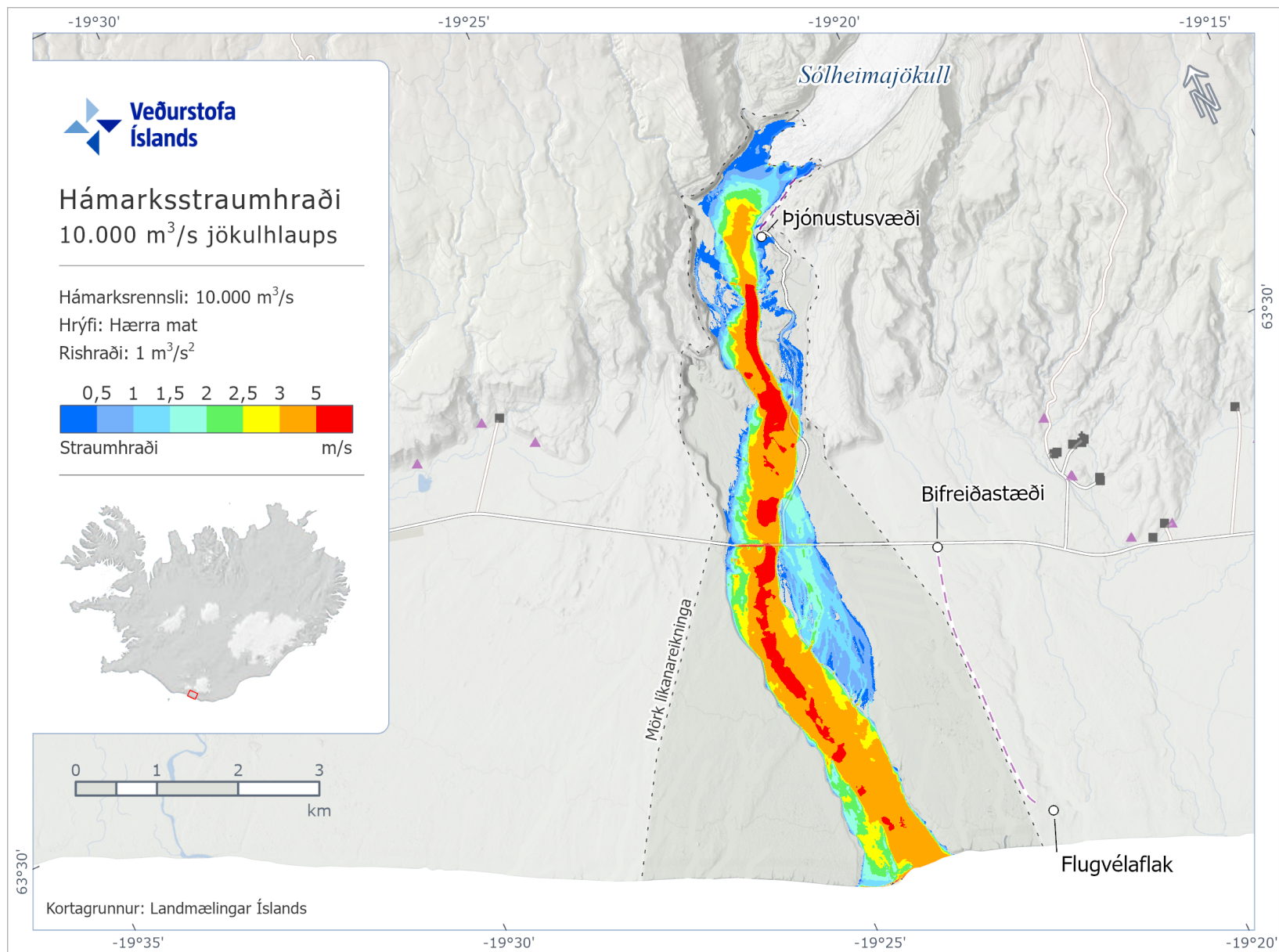
Mynd 22. Mesta útbreiðsla í 100.000 m³/s jökulhlaupi með upptök á jökli ofan Hólsárgils .

Viðbótarsviðsmynd með 10.000 m³/s hámarksrennsli

Niðurstöður viðbótarhermunar með 10.000 m³/s hámarksrennsli sýna að ekki flæðir yfir þjónustusvæðið við enda Sólheimajökulsvegar fyrir hlaup af þeirri stærð (myndir 23 og 24). Niðurstöðurnar falla annars vel á milli niðurstaðnanna úr sviðsmyndum 1 og 2. Þ.e. heldur lengri hlutar Sólheimajökuls vegar og þjóðvegur 1 fara á kaf en í sviðsmynd 1 en þó minna en í sviðsmynd 2. Megin niðurstöður eru því þær sömu og í þeim tveimur, búast má við að bæði Sólheimajökulsvegur og þjóðvegur 1 lokist, auk þess sem vegskemmdir yrðu væntanlega talsverðar. Búast má við að brúin á þjóðvegi 1 skemmist. Niðurstöður þessarar hermunar eru nýttar til samanburðar við fyrra hættumat Magnúsar Tuma Guðmundsonar o.fl. (2015a).



Mynd 23. Hámarksdýpi í 10.000 m³/s jökulhlaupi.



Mynd 24. Hámarksstraumhraða í 10.000 m³/s jökulhlaupi.

Tafla 4. Fjöldi og viðvera ferðafólks á ári. Gefið upp eftir mismunandi viðverusvæðum við Sólheimajökul og á Sólheimasandi.

Viðverusvæði		Heildarfjöldi ferðafólks á ári	Meðal viðvera ferðamanns [klst:mín]	Viðvera ferðamanns í lengri ferð [klst:mín]
1	Sólheimajökull	94.852	02:06	5:16
2	Sólheimajökull við jaðar	295.094	00:58	01:07
3	Gangstígur að Sólheimajökli*	295.094	00:43	00:43
4	Þjónustusvæði	315.382	00:30	00:30
5	Sólheimajökulsvegur*	315.382	00:10	00:10
6	Þjóðvegur 1	2.817.225	00:03	00:05
7	Bifreiðastæði að flugvélarflaki	161.456	00:30	00:30
8	Gangstígur að flugvélarflaki*	161.456	02:14	02:14
9	Flugvélarflak	161.456	01:00	01:00

*Báðar leiðir (fram og til baka)

4.2 Fjöldi og viðverutími ferðafólks

Heildarfjöldi ferðafólks yfir árið er notaður í áhættumatsreikningum ásamt metnum viðverutímum. Í töflu 4 eru þessar breytur teknar saman eftir viðverusvæðum. Um er að ræða tölur um ferðafólk á árunum 2018–2019 fyrir öll viðverusvæðin, ásamt metinni meðalviðveru ferðamanns og lengri viðveru ferðamanns.

4.3 Áhættumat

Helstu niðurstöður áhættureikninga eru settar fram í töflum 5 til 10 og á myndum 25 og 26. Í öllum tilvikum er áhættan sett fram sem árlegar dánarlíkur einstaklings af völdum jökulhlaupa eða sem staðaráhætta (tafla 9). Matið sem notast er við fyrir gildi á hinum ýmsu stuðlum í DEFRA jöfnunum og rök fyrir matinu má finna í viðauka V. Hér er ekki gert ráð fyrir rýmingu eða öðrum fyrirbyggjandi aðgerðum vegna merkja um jarðhræringar. Aðeins er gert ráð fyrir að fólk bregðist við og reyni að flýja svæðið (og flestum í raun takist það) þegar flóð er hafið. Gert er ráð fyrir því að dæmigerður ferðamaður taki áhættu sem þessa einu sinni á 5 ára fresti (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2016), heimsæki alla viðverustaðina og dveljist þar samkvæmt meðalviðveru, sjá töflu 4. Gert er ráð fyrir að viðvera dæmigerðs leiðsögumanns sé sú sama en að hann fari ferð sem þessa 235 daga á ári (samsvarandi fullri vinnu allt árið). Dæmigerður jöklaleiðsögumaður og starfsmaður á þjónustusvæðinu gista utan hættusvæða en ferðast þjóðveg 1 og Sólheimajökulsveg til og frá vinnu 235 daga á ári. Dvalartími dæmigerðs jöklaleiðsögumanns miðast svo við tvær ferðir að og frá jöklinum með sömu dvalartímum og ferðamaður. Gert er ráð fyrir að dæmigerður starfsmaður á þjónustusvæði dvelji þar í 8 tíma. Ólíklegt er að einhver raunverulegur einstaklingur falli nákvæmlega að þessum dæmum, enda eru þau aðeins sett fram til að áætla stærðargráðu áhættu mismunandi hópa.

Tafla 5. Einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa, dæmigerður ferða- og leiðsögumaður á viðverusvæðum við Sólheimajökul. Samanlögð áhætta vegna allra þriggja jökulhlaupasviðsmyndana og öll áhættugildi eru á árlegum grunni.

Viðverusvæði		Dæmigerður ferðamaður*	Dæmigerður leiðsögumaður**
1	Sólheimajökull	$2 \cdot 10^{-11} - 7 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-8} - 8 \cdot 10^{-7}$
2	Sólheimajökull við jaðar	$9 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$
3	Gangstígur að Sólheimajökli	$1 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$
4	Þjónustusvæði	$8 \cdot 10^{-10} - 1 \cdot 10^{-8}$	$9 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$
5	Sólheimajökulsvegur	$2 \cdot 10^{-10} - 4 \cdot 10^{-9}$	$3 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-6}$
6	Þjóðvegur 1	$9 \cdot 10^{-11} - 2 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$
7	Bifreiðastæði að flugvélarflaki	$2 \cdot 10^{-12} - 2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-6}$
8	Gangstígur að flugvélarflaki	$7 \cdot 10^{-12} - 4 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-6}$
9	Flugvélarflak	$0 - 3 \cdot 10^{-12}$	$0 - 4 \cdot 10^{-8}$

* Viðverutímar samkvæmt töflu 4 og gert ráð fyrir að áhætta sé tekin á 5 ára fresti.

** Dagleg viðvera sú sama og hjá meðalferðamanni en 235 daga á ári.

Áhætta dæmigerðra einstaklinga eftir viðverusvæðum (töflur 5 og 6), heildaráhætta (tafla 7 og mynd 25) og staðaráhætta (tafla 9 og mynd 26) er sett fram sem samanlögð áhætta, vegna allra þriggja jökulhlaupasviðsmyndanna sem unnið var með, samkvæmt jöfnu 13. Áhætta vegna sviðsmyndar 3 er í öllum tilfellum stærsti þátturinn, enda hætta af völdum sviðsmyndar 3 langmest auk þess sem líkur á slíkum atburði eru meiri en á sviðmynd 2. Hættan af sviðsmynd 1 er síðan lítil þó að líkur á henni séu mestar. Sviðsmyndir 1 og 2 skapa svo líka ekki hættu á öllum viðverustöðum. Dæmi um dreifingu heildaráhættu á hverjum viðverustað eftir sviðsmyndum er gefið í töflu 8. Staðaráhætta fyrir viðverusvæði sem eru skilgreind sem punktswæði er gefin í töflu 9 og á mynd 26. Skilgreining á staðaráhættu á ekki vel við á viðverusvæðum sem skilgreind eru sem þversnið, sem ferðast er eftir á ákveðnum hraða (göngustígar og vegir), þó hægt sé að skilgreina staðaráhættu fyrir hvern punkt slíkra þversniða.

Niðurstöður áhættumatsins eru gefnar upp sem bil utan um líklegt gildi. Bilin spanna stærðargráður og ljóst að mikil óvissa er í áhættumatinu. Efri mörk bilsins miðast við að hættan sé metin miðað við mögulega uppbyggingu jakahranna og setupphleðslu auk þess sem notast er við efrimörk líklegra gilda fyrir þá stuðla sem velja þarf gildi í jöfnum DEFRA, sjá kafla 3.3. Neðri mörkin miðast við lægra mat á hryfi og rennsli fyrir hverja sviðsmynd, þ.e. að ekki sé gert ráð fyrir jakahrönnum eða seti og notast er við lægra mat á stuðlum í jöfnum DEFRA.

Samanburður við viðunandi áhættu af völdum ofanflóða og árlegar dánarlíkur vegna mismunandi áhættuþátta gefur til kynna að áhætta starfsfólks sem ver löngum tímum á svæðinu sé umtalsverð (töflur 7 og 9 og myndir 25 og 26). Árlegar dánarlíkur starfsmanns með 8 tíma viðveru á þjónustusvæðinu eru t.d. $2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ (árlegar líkur á að látast 1 á móti 50.000 til 1 á móti 5.000). Þetta er sambærilegt við áhættu starfsfólks í byggingariðnaði og af umferð á þjóðvegum. Staðaráhætta við jökuljaðarinn og á þjónustusvæðinu er einnig há borið saman við ofanflóðaviðmið. Áhætta dæmigerðs ferðamanns er aftur á móti lítil vegna þess hve stutt viðvera hans er

Tafla 6. Einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa fyrir dæmigerðan jöklaleiðsögumann við Sólheimajökul og starfsmann á þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegur. Samanlögð áhætta vegna allra þriggja jökulhlaupasviðsmyndana og öll áhættugildi eru á árlegum grunni.

Viðverusvæði	Dæmigerður jökla-leiðsögumaður*	Dæmigerður starfsmaður á þjónustusvæði**
1 Sólheimajökull	$4 \cdot 10^{-8} - 2 \cdot 10^{-6}$	NA
2 Sólheimajökull við jaðar	$2 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-5}$	NA
3 Gangstígur að Sólheimajökli	$2 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5}$	NA
4 Þjónustusvæði	$2 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$
5 Sólheimajökulsvegur	$3 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-6}$
6 Þjóðvegur 1	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$

* Tvær ferðir á dag á jökul 235 daga á ári. Gist utan hættusvæða.

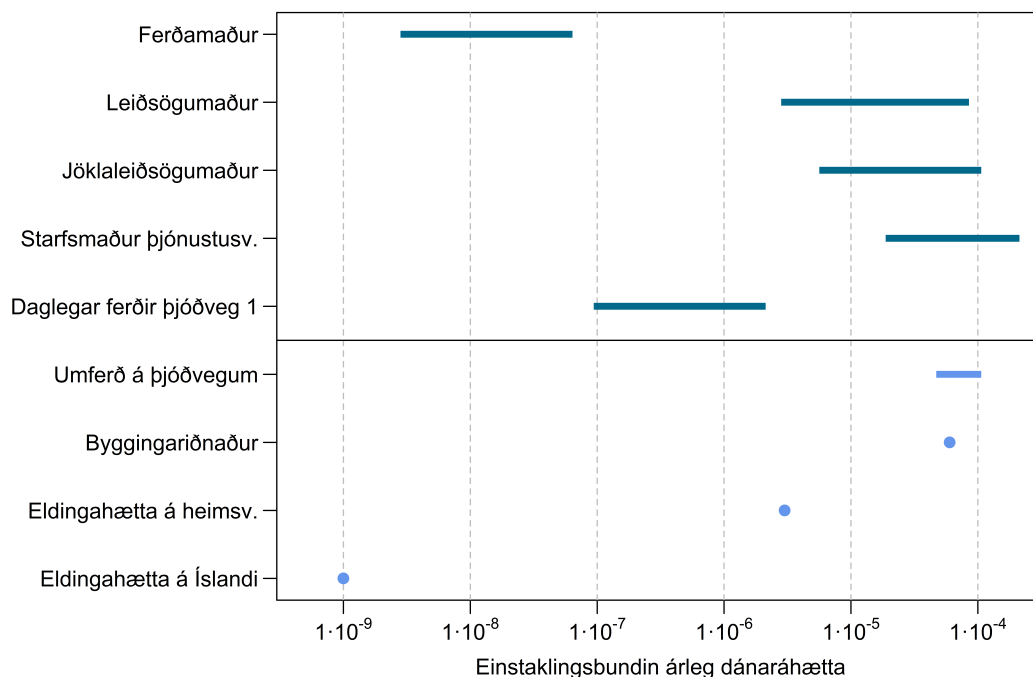
** 8 tíma vinnudagur á þjónustusvæðinu 235 daga á ári. Gist utan hættusvæða.

Tafla 7. Samanlögð einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa fyrir mismunandi meðalviðveru á svæðum við Sólheimajökul. Gert er ráð fyrir að ferðamaður og leiðsögumaður heimsæki öll viðverusvæði og dvelji þar meðalviðverutíma, ferðamaðurinn einu sinni á 5 ára fresti en leiðsögumaðurinn 235 daga ársins (samsvarandi fullri vinnu allt árið). Áhætta vegna mismunandi áhættuþátta annarsstaðar í samfélaginu er sýnd til sam-anburðar. Öll áhættugildi eru á árlegum grunni.

Jökulhlaupa áhætta	Árleg áhætta
Dæmigerður ferðamaður	$3 \cdot 10^{-9} - 6 \cdot 10^{-8}$
Dæmigerður leiðsögumaður	$3 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-5}$
Dæmigerður jöklaleiðsögumaður	$6 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-4}$
Dæmigerður starfsmaður á þjónustusvæði	$2 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$
Ferð fram og til baka þjóðveg 1 um Sólheimasand 235 daga á ári	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-6}$
Aðrir áhættuþættir	
Umferð á þjóðvegum ¹⁾	$5 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$
Byggingariðnaður í Bretlandi ²⁾	$6 \cdot 10^{-5}$
Eldingahætta á heimsvísu ³⁾	$3 \cdot 10^{-6}$
Áætluð eldingahætta á Íslandi ³⁾	$1 \cdot 10^{-9}$

Heimildir: ¹⁾ Óli H. Þórðarson á.á. ²⁾ HSE, 2001. ³⁾ Þórður Arason, 2013.

á svæðinu. Til dæmis er áhætta slíks erlends ferðamanns að látast af eldingu í heimalandi sínu meiri heldur en áhættan af því að hann látist í jökulhlaupi við að skoða helstu staði í grennd við Sólheimajökul. Þessar niðurstöður eru ræddar frekar í kafla 5.



Mynd 25. Samanlögð einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa fyrir mismunandi meðalviðveru á svæðum við Sólheimajökul. Gert er ráð fyrir að ferðamaður og leiðsögumaður heimsæki öll viðverusvæði og dvelji þar meðalviðverutíma, ferðamaðurinn einu sinni á 5 ára fresti en leiðsögumaðurinn 235 daga ársins (samsvarandi fullri vinnu allt árið). Áhætta vegna mismunandi áhættuþátta annarsstaðar í samfélaginu er sýnd til samanburðar. Öll áhættugildi eru á árlegum grunni og x-ás grafsins er á lograkvarða. Með „Daglegar ferðir þjóðveg 1“ er átt við ferð fram og til baka um þjóðveg 1 um Sólheimasand 235 daga á ári (samsvarar fjölda virkra daga á ári). Frekari skýringar á mismunandi viðveru, heimildir og töluleg gögn má finna í töflu 7.

Áhætta hvers einstaks ferðamanns er ekki mikil en fjöldi þeirra er mikill. Því er einnig hugað að mögulegri almennri hættu á manntjóni í jökulhlaupum. Með því að nýta tölur um heildarfjölda ferðafólks á ári, meðalviðveru (tafla 4) og jöfnur DEFRA má meta fjölda einstaklinga sem mögulega gætu látist í flóði, sjá töflu 10. Þessir reikningar eru óháðir einstaklingsbundinni áhættu. Hver ferðamaður staldrar í raun stutt við á svæðinu miðað við íbúa með fasta búsetu, líkt og gert er ráð fyrir í jöfnunum. Meðalviðvera er því nýtt til að breyta fjöldatölunum yfir í jafngildan fjölda með fasta stöðuga viðveru á svæðinu áður en þær eru nýttar í jöfnurnar. Rétt er að taka fram aftur að þessar tölur miðast við að ekki sé gert ráð fyrir rýmingu eða öðrum fyrirbyggjandi aðgerðum vegna merkja um jarðhræringar.

Með tölum um heildarfjölda á ári (tafla 4) og einstaklingsbundna dánaráhættu á hverjum stað (án þess að henni sé útjafnað yfir 5 ár líkt og að ofan) má meta árlegan meðal fjölda andláta vegna jökulhlaupa á svæðinu öllu sem 0,005 til 0,1 andlát. Þ.e. að áhætta ferðamanna jafngildi einu andláti á 10 til 200 ára fresti. Áhætta ferðamanna er ekki útjöfnuð yfir 5 ár í þessum reikningum, því að þó að einstaklingurinn taki aðeins áhættu sem þessa á ~ 5 ára fresti ráðast andlát í atburði af fjölda þeirra sem eru á svæðinu þegar að hann verður. Vert er að hafa í huga að þessir atburðir eru ólíkir t.d. mannskæðum bílslysum, sem eru nokkur á ári. Þessi meðaltöl ráðast

Tafla 8. Samanlögð einstaklingsbundin áhætta af völdum jökulhlaupa fyrir dæmigerðan leiðsögumann á svæðum við Sólheimajökul, brotin niður eftir viðverusvæðum og sviðsmyndum. Öll áhættugildi eru á árlegum grunni.

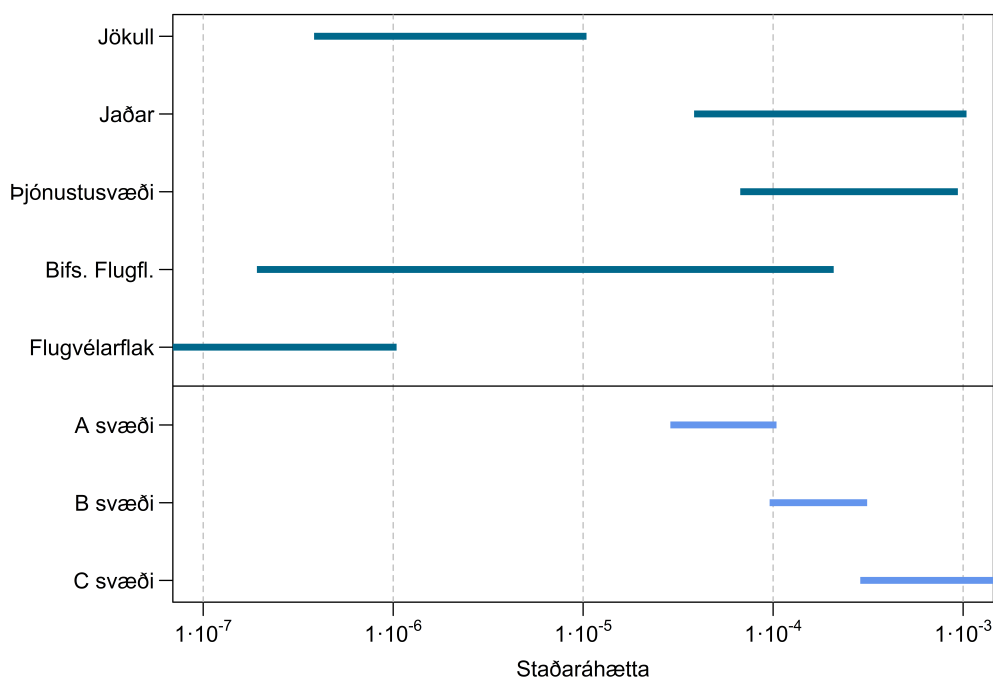
Viðverusvæði		Sviðsmynd 1	Sviðsmynd 2	Sviðsmynd 3
1	Sólheimajökull	0	$7 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8} - 5 \cdot 10^{-7}$
2	Sólheimajökull við jaðar	$1 \cdot 10^{-8} - 3 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-8} - 4 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$
3	Gangstígur að Sólheimajökli	$1 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-9} - 3 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-6} - 2 \cdot 10^{-5}$
4	Þjónustusvæði	0	$0 - 4 \cdot 10^{-6}$	$9 \cdot 10^{-7} - 9 \cdot 10^{-6}$
5	Sólheimajökulsvegur	$4 \cdot 10^{-10} - 2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7} - 3 \cdot 10^{-6}$
6	Þjóðvegur 1	$2 \cdot 10^{-8} - 4 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-9} - 4 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-6}$
7	Bifreiðastæði að flugvélarflaki	0	$0 - 1 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-6}$
8	Gangstígur að flugvélarflaki	0	$0 - 1 \cdot 10^{-8}$	$8 \cdot 10^{-9} - 5 \cdot 10^{-6}$
9	Flugvélarflak	0	0	$0 - 4 \cdot 10^{-8}$
Samtals		$3 \cdot 10^{-8} - 4 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6} - 6 \cdot 10^{-5}$

Tafla 9. Staðaráhætta af völdum jökulhlaupa á viðverusvæðum, sem skilgreind eru sem punktsvæði, við Sólheimajökul. Skilgreining á staðaráhættu á ekki vel við á viðverusvæðum sem skilgreind eru sem þversnið, sem ferðast er eftir á ákveðnum hraða (göngustígar og vegir), þó hægt sé að skilgreina staðaráhættu fyrir hvern punkt slíkra þversniða. Þeim er því sleppt í þessari samantekt. Samanlögð áhætta vegna allra þriggja jökulhlaupasviðsmyndanna. Viðmiðunargildi staðaráhættu sem notast eru við í ofanflóðahættumati er sýnd til samanburðar.

Jökulhlaupa áhætta		
Viðverusvæði		Staðaráhætta
1	Sólheimajökull	$4 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-5}$
2	Sólheimajökull við jaðar	$4 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-3}$
4	Þjónustusvæði	$7 \cdot 10^{-5} - 9 \cdot 10^{-4}$
7	Bifreiðastæði að flugvélarflaki	$2 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-4}$
9	Flugvélarflak	$0 - 1 \cdot 10^{-6}$
Ofanflóðaviðmið		
A svæði í ofanflóðahættumati ¹⁾		$3 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-4}$
B svæði í ofanflóðahættumati ¹⁾		$1 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-4}$
C svæði í ofanflóðahættumati ¹⁾		$> 3 \cdot 10^{-4}$

Heimild: ¹⁾ Umhverfissráðuneytið (2000).

af mögulegu talsverðu manntjóni í mjög sjaldgæfum atburðum. Þ.e. að meginþorra tímans séu engin mannskæð slys en svo þegar þau verði geti fleiri en einn farist.



Mynd 26. Staðaráhætta af völdum jökulhlaupa á viðverusvæðum, sem skilgreind eru sem punktsvæði, við Sólheimajökul. Skilgreining á staðaráhættu á ekki vel við á viðverusvæðum sem skilgreind eru sem þversnið, sem ferðast er eftir á ákveðnum hraða (göngustígar og vegir), þó hægt sé að skilgreina staðaráhættu fyrir hvern punkt slíkra þversniða. Þeim er því sleppt í þessari samantekt. Samanlögð áhætta vegna allra þriggja jökulhlaupasviðsmyndanna og x -ás grafsins er á lograkvarða. Viðmiðunargildi staðaráhættu sem notast er við í ofanflóðahættumati eru sýnd til samanburðar. Frekari skýringar á mismunandi viðverusvæðum, heimildir og töluleg gögn má finna í töflu 9.

Tafla 10. Mögulegt manntjón (væntigildi) í mismunandi sviðsmyndum fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli. Tölurnar miðast við að ekki sé rýmt.

Sviðsmynd	Mögulegt manntjón
1	0 – 1
2	0 – 18
3	3 – 46

Líkt og sést af stóru bili niðurstaðnanna í töflu 10 er óvissa í þessu mati mikil. Því til viðbótar má búast við að stór hlaup um miðjan dag á háönn gæti valdið umtalsvert meira manntjóni heldur en þessar meðaltölur gefa til kynna. Sé t.d. notast við meðalfjöldatölur fyrir háönn (sjá viðauka IV) og viðveru ekki dreift yfir allan sólarhringinn, heldur aðeins hálfan því fáir eru á ferðinni á nóttunni, má áætla að í allra verstu tilfellum gætu á bilinu 10 til 150 manns látist í einu stórflóði, hafi ekki komið til rýminga áður. Að sama skapi er ólíklegt að stórflóð um miðja nótt á lágönn ylli nokkru manntjóni.

4.4 Óvissupættir og næmnigreining

Talsverð óvissa er um áhættu og aðrar niðurstöður vegna ýmissa þátta. Strax í upphafi er mikil óvissa fólgin í mati á þeim atburðarrásum sem dregnar eru upp með hlaupsviðsmyndunum. Alls ekki er víst að meirihluti hlauprennslis komi fram við jökulrönd líkt og gert er ráð fyrir, hámarksrennslis verði í samræmi við valin gildi eða að lögun rennslisrits hlaupanna verði í samræmi við þær nálganir sem hér eru gerðar. Slíkir þættir munu ráðast af orsökum hlaupsins, aðstæðum á upprunastað og framgangi þess undir jöklinum. Einnig er talsverð óvissa í straumfræðilegu líkanreikningunum. Bæði vegna óvissu í inntaksgögnum svo sem landhæðarlíkönunum, mati á stuðlum sem notast er við til að lýsa viðnámi í reikningunum og vegna nálgana sem gerðar eru í reikningunum. Ferli í hlaupunum, svo sem jakaburður auk graftar og upphleðslu sets, sem ekki eru hermd beint í reikningunum eru óviss. Sama gildir um áhættureikningana, en þar valda bæði nálganir, mat á stuðlum og óvissa í inntaksgögnum svo sem fjölda ferðamanna óvissu.

Undanfarna áratugi hafa verið miklar breytingar á svæðinu framan við Sólheimajökul vegna hörfunar jökulsins. Einnig hafa orðið miklar breytingar vegna uppbyggingu innviða svo sem tilfærslu bílastæða og breytinga á veginum að þjónustusvæðinu við jökulinn. Búast má við umtalsverðum náttúrufarsbreytingum á svæðinu og áframhaldandi hörfun jökulsins á komandi árum vegna loftslagbreytinga (Halldór Björnsson o.fl., 2018). Umferð og fjöldi ferðamanna á svæðinu hefur einnig tekið miklum breytingum (mynd 2). Þær sneggstu og óvæntustu eru nýlegt a.m.k. tímabundið hrun í fjölda í ferðamanna vegna heimsfaraldurs Covid-19 sjúkdómsins (Gyða Þórhallsdóttir og Rögnvaldur Ólafsson, óbirt gögn). Áhættumatið miðast við lögun jökulsins, innviði og fjölda ferðamanna eins og staðan var í kringum 2018. Breytingar frá því ástandi leggja til óvissu í áhættumatinu sem hér er kynnt. Þar af leiðandi þarf að endurtaka matið í framtíðinni ef miklar varanlegar breytingar hafa orðið.

Óvissa tengd sviðsmyndunum

Katla er mikilvirk megineldstöð og því má búast við gosum hvar sem er undir vatnasviði Sólheimajökuls (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2005a). Eðli goss og ísþykkt yfir gosstöðvunum geta haft mikil áhrif á hraða og magn ísbráðunar (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2005b; 2015b). Þessir þættir, auk þess hvernig jökulhlaupið gengur fram undir jöklinum (Bergur Einarsson o.fl., 2016) ráða svo hámarksrennslis og lögun rennslisrits hlaupsins. Mögulegar hlaupsviðsmyndir eru því fjölmargar en hér eru aðeins þrjár teknar til skoðunar. Þó að þær séu sérstaklega valdar sem dæmigerðar og tillit sé tekið til mismunandi mögulegs vaxtarhraða gæti atburðarrásin í raun verið önnur. Slíkt getur haft mikil áhrif á útbreiðslu og tjónmætti. Sem dæmi um óvissuna má sjá mismun á útbreiðslu hlaupsviðsmynda með 10.000 og 30.000 m³/s hámarksrennslis á myndum 23 og 12. Þessar sviðsmyndir falla báðar undir mögulegt flóð af völdum sprungugoss utan við Kötluöskjuna í Sólheimajökli eða í suðurhlíðum Mýrdalsjökuls (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2005a). Þessi munur skapar talsverða óvissu um lykilniðurstöður svo sem hvort þjónustusvæðið við enda Sólheimajökulsvegar sé á hættusvæði eða ekki í hlaupum af völdum slíkra eldgosa.

Fyrir aðrar atburðarásir, svo sem hlaup af völdum jarðhitavirkni eða smágosa undir jöklinum skapast óvissa um aðrar lykilniðurstöður, svo sem hvort að þjóðvegur 1 rofni og hvort brúin á honum standist hlaup eða ekki. Samkvæmt hermunum á hlaupi með 5.000 m³/s má búast við því að þjóðvegur 1 rofni vestan Jökulsár á Sólheimasandi og brúin á henni gæti mögulega skemmst, eins og lýst er að ofan. Það er aftur á móti þekkt úr umtalsverðu hlaupi árið 1999, sem fellur í

þennan flokk, að vegurinn rofnaði ekki og að eldri og um 1 m lægri brú á sama stað stóð af sér hámarksrennsli allt að a.m.k. $1700 \text{ m}^3/\text{s}$. Hvort að brúin sjálf sem slík fari, vegurinn öðru hvoru megin hennar rofni og aðrir slíkir þættir geta einnig haft áhrif á framgang hlaups.

Rennslisrit með annarri lögun en trapisulaga voru ekki prófuð. Lítill sem enginn munur kemur fram á hámarks-útbreiðslu, -dýpi og -straumhraða í niðurstöðum hermana með sama hámarksrennsli en mismunandi vaxtarhraða. Framrásarhraði flóðfaldsins verður aftur á móti umtalsvert meiri eftir því sem vaxtarhraðinn er hærri. Það munar t.d. um 20 mínútum hvenær byrjar að flæða yfir Sólheimajökulsveg í sviðsmyndum fyrir hlaup með bæði 5.000 og $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli eftir því hvort að notast er við vaxtarhraða upp á $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$ eða $10 \text{ m}^3/\text{s}^2$. Rúmlega 10 mínútna munur kemur fram á því hvenær flóðfaldurinn nær niður að þjóðvegi 1 fyrir þessa mismunandi vaxtarhraða og sömu rennslistilfelli.

Ekki er hægt að komast hjá þessari óvissu þar sem framtíðin er óþekkt. Til þess að hætta sé ekki vanmetin er notast við líkleg efri mörk hámarksrennslis, rishraða hlaupa og annarra þátta í hermdum sviðsmyndum. Þetta getur leitt til ofmats á áhrifum hlaupa.

Straumfræðilegir líkanreikningar

Áhrif iðuseigju og lónsins framan við Sólheimajökul

Notast er við tvívíða straumfræðilega reikninga í þessu verkefni auk þess sem gert er ráð fyrir að eðlismassi hlaupvatns sé 1000 kg/m^3 . Þetta veldur því að reikningarnir eiga ekki möguleika á að grípa hugsanlegt flókið samspil eðlisþyngra hlaupvatns og vatns sem er fyrir í sporðlóninu sem nú er framan við Sólheimajökul. Reikningarnir eiga heldur ekki möguleika á að grípa möguleg mismunandi áhrif þess hvort lagskipt streymi myndist í gegnum lónið. Sama gildir um möguleg mismunandi áhrif þess hvort að hlaupvatn komi inn við yfirborð lónsins ofan af jöklinum eða inn í lónið undan jöklinum og þá við botn þess. Samkvæmt prófunum valda þessar nálganir þó ekki verulegri óvissu í reikningunum. Til þess að kanna möguleg áhrif lónsins voru sviðsmyndir með 10.000 og $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli keyrðar á útgáfu af landhæðarlíkaninu þar sem búið er að breyta lóninu í aðeins 1 m djúpa skál og því hvorki umtalsverður vatnsmassi né dýpi í því til þess að hafa áhrif á hraðasviðið í reikningunum. Svipuð áhrif sjást fyrir báðar sviðsmyndirnar við þessar breytingar. Yfir meirihluta lónsins er aukningin í straumhraða innan við 20%. Aukningin verður þó allt að 6-föld á dýpstu svæðunum. Örlítið aukin útbreiðsla sést við vestanvert lónið. Utan lónsvæðisins verða aftur á móti hverfandi breytingar. Strax 300 m neðan við lónið sjást engar marktækar breytingar á hraða, dýpi, útbreiðslu hlaupa eða þróun rennslis. Flæði í gegnum lónið virðist því ekki hafa umtalverð áhrif i) með straum áhlaðanda á vatnshæð í ráðandi þversniði við upphaf farvegarins neðan við lónið eða ii) á straumhraða í gegnum það þversnið.

Fyrir þær aðstæður sem búast má við í jökulhlaupum niður Sólheimasand er æskilegt að velja gildi á stuðul, sem lýsir iðuseigju í reikningunum, á bilinu 2 til 5 (Brunner, 2016). Þrjár keyrslur af sömu sviðsmynd ($10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli) með mismunandi gildum (2, 3 og 5) voru prófaðar til að kanna næmni reikningana fyrir mismunandi vali á þessum stuðli. Í öllum tilvikum komu fram breytingar á streymi í stórum iðum sem koma fram í reikningunum, í lóninu framan við jökulinn. Um miðbik reikningana verða þeir tölulega óstöðugir í nokkrum reitum innan þessara iða í lóninu ef gildið 5 er valið á stuðulinn. Fram að þeim tímapunkti líta niðurstöðurnar eðlilega út og eru notaðar til samanburðar við hin tvö tilfelli. Utan lónsins sjást engar marktækar

breytingar á hraða, dýpi, útbreiðslu hlaupa eða þróun rennslis, enda mun minna um að stórar iður myndist neðar í farveginum. Líkt og að ofan virðast breytingar í hraðasviðinu í lóninu ekki skila sér í breytingum í flæði hlaupanna neðan lónsins.

Áhrif setupphleðslu á reikningana

Ein þeirra nálgana sem gerð er í líkanreikningunum felst í að þeir herma ekki beint upphleðslu og rof sets. Strax fyrir minni hlaup líkt og hlaupið 1999 eru botnbreytingar umtalsverðar (Russell o.fl., 2010; Stains og Carrivick, 2015). Slíkar breytingar hafa áhrif á útbreiðslu flóðanna, dýpi og aðrar niðurstöður sem nýttar eru í áhættumatið og geta því valdið óvissu í niðurstöðum. Núverandi líkön sem herma rof og uppsöfnun sets í flóðfarveginum ná ekki að spá nákvæmlega fyrir um þessar breytingar í hlaupum á við 1999 hlaupið (Guan o.fl., 2015) og að öllum líkindum ennþá síður fyrir stærri hlaup. Slík líkön hafa þó verið notuð til að magntaka og skilja betur slíkar breytingar í raunverulegum hlaupum (Guan o.fl., 2015). Þær líkanniðurstöður benda til þess að rof og setupphleðsla geti valdið hækkun á botni farvegarins um allt að 3 m og rofi upp á allt að 4 m fyrir hlaup með 2000 m³/s hámarksrennslis. Þær breytingar valda svo breytingum í straumhraðasviði hlaupsins, sem svo hafa áhrif á framgangshraða flóðsins. Samanburður bendir til að reikningar sem ekki taka tillit til rofs og setupphleðslu ofmeti komutíma flóðfaldsins niður að brú á þjóðvegi eitt um ~3 mínútur og komutíma hámarksins á sama stað um ~7 mínútur (Guan o.fl., 2015). Vert er að hafa í huga að í líkanreikningum Guan o.fl. (2015) á flóðinu 1999 leiddi það að taka tillit til rofs og upphleðslu sets til þess að vatnshæð minnkaði á flestum stöðum. Slík ferli leiða til minni útbreiðslu og minnka líkur á að áhættumatið sem unnið er í þessari skýrslu feli í sér vanmat á hættu. Endurtekin jafn stór hlaup niður sama farveg leiða einnig til myndunar skýrari afmarkaðs farvegar og minni útbreiðslu (Guan o.fl., 2016).

Fyrir stærri hlaup má búast við stórtækari breytingum í farvegi hlaupanna vegna rofs og setupphleðslu. Þetta á einkum við stórhlaup af völdum Kötlugosa þar sem búast má við miklu magni gosefna í hlaupinu. Landhæðarbreytingar á Mýrdalssandi hafa t.d. verið metnar sem 2–10 m á víðfeðmum svæðum í hlaupinu 1918 (Guðrún Larsen, 2018). Niðurstöður líkanreikninga á breyttum landhæðarlíkönum (sjá viðauka II) benda til þess að slíkar breytingar hafi ekki umtalsverð áhrif á útbreiðslu stórhlaupa (sviðsmyndir með 30.000 og 100.000 m³/s hámarksrennslis) frá Sólheimajökli, sjá myndir 14 og 19. Þó að aukin botnhæð hlaupfarvegarins vegna setupphleðslu leiði ekki til mikið aukinnar útbreiðslu eða vatnsdýpis í efri hluta farvegarins hækkar hún hæð hámarksvatnsborðs yfir sjó umtalsvert. Mesta vatnshæð á þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegar hækkar t.d. um 10 og 16 m fyrir sviðsmyndirnar með 30.000 og 100.000 m³/s hámarksrennslis. Neðar í farveginum, þar sem hann er ekki jafn afmarkaður af landslagi veldur setbreytingin því að nýr all teygir sig til austurs í sviðsmyndinni með 30.000 m³/s hámarksrennslis og í sviðsmyndinni með 100.000 m³/s hámarksrennslis teygir nýr all sig til vesturs.

Vert er að hafa í huga að aðferðafræðin sem beitt er, er frekar einföld. Setviðbótinni er dreift yfir útbreiðslusvæði viðkomandi hlaups sviðsmyndar í upphaflegu reikningunum án setbreytinga. Með setbreytingunum er því verið að taka landsvæði sem ber hlaupið og lyfta því öllu. Búast má við hlaupið rúmist ennþá meira og minna innan sama svæðis þó að því hafi verið lyft. Ójafnari upphleðsla sets eða jakahranna gæti því hugsanlega leitt til meiri stýringa á flæðið og beint því út fyrir útbreiðslusvæðin sem sýnd eru á myndum 14 og 19.

Ekki er tekið sérstaklega tillit til áhrifa sets á straumfræði hlaupanna. Þau áhrif eru lítil miðað við áhrif jakahranna á streymið (sjá viðauka I) og því ekki kynnt með sérstökum niðurstöðum.

Tvöföldun á reiknuðu rennsli og hrýfisstuðli Manning til þess að taka tillit til áhrifa jakahranna gengur væntanlega lengra og veldur meiri breytingu heldur en straumfræðileg áhrif sets í hlaupunum.

Áhrif óvissu í landhæðarlíkani og reiknineti

Setbreytingarnar valda ekki afgerandi breytingum á útbreiðslu hermdra hlaupa. Þær eru þó margföld óvissan sem við búumst við í landhæðarlíkaninu sem var notað. Það er því ólíklegt að óvissa í mati á landhæð valdi umtalsverðri óvissu í lokaniðurstöðum. Niðurstöður tilrauna með að keyra sömu rennslissviðsmyndir á 10x10 og 20x20 m reiknineti benda til þess að reikningarnir séu ekki viðkvæmir fyrir möskvastærð á þessu bili.

Áhrif jakahranna á flæðið

Áhrif mögulegrar upphleðslu jakahrannanna eru umtalsverð. Ætla má að þetta sé einn af aðal-óvissupáttum í reikningunum. Niðurstöður þar sem tekið er tillit til þessa þáttar eru því kynntar sérstaklega á útbreiðslukortum (myndir 9, 14 og 19) og tekið tillit til áhrifa hans í áhættumati. Við það eitt að auka viðnám í flæðinu með því að tvöfalda gildi hrýfisstuðuls Manning eykst útbreiðsla. Jakahrannir fylla svo upp í hluta þverskurðarflatarmáls rennslisins og því þarf að auka reiknað rennsli til samræmis við það, sjá viðauka I. Þetta eykur hermda útbreiðslu ennþá meira.

Að tvöfalda bæði reiknað rennsli og viðnámsstuðul Manning eru umtalsverðar breytingar frá bestu ágiskun. Vel má vera að jakaburður í hlaupum verði lítill eða að upphleðsla jaka í hrannir hafi ekki mikil áhrif á rennslið. Þessar breytingar á reikningunum má túlka annaðhvort sem slæma ólíklega sviðmynd vegna áhrifa jakahranna eða sem möguleika sem endurspeglar óvissu vegna fleiri þátta svo sem setflutninga í flæðinu.

Samanburður við fyrri líkanreikninga

Jökulhlaup frá Sólheimajökli með 2.000, 5.000 og 10.000 m³/s hámarksrennsli hafa verið hermd með jöfnu Mannings á völdum þversniðum (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2015a). Niðurstöður þeirra hermanna eru sambærilegar við þær niðurstöður sem fást hér fyrir sviðsmynd 1 og hermun með 10.000 m³/s hámarksrennsli. Samanburður á vatnshæð í völdum þversniðum gefa minni mun en 0,5 m (tafla 11) og meginniðurstöður verða því svipaðar. Þjónustusvæðið við enda Sólheimajökulsvegar er t.d. óhult fyrir hlaupum af þessari stærð samkvæmt báðum greining-

Tafla 11. Samanburður á hermdri vatnshæð í völdum þversniðum við fyrri líkanreikninga Magnúsar Tuma Guðmundssonar og fleiri (2015a) fyrir sviðsmyndir af jökulhlaupum frá Sólheimajökli. Allar hæðir eru gefnar í metrum yfir sjó.

Sviðsmynd - Q_{max} [m ³ /s]	Vatnshæð við þjónustusvæði (M.T.G. o.fl., 2015a)	Vatnshæð við þjónustusvæði	Vatnshæð á Sólheimajökulsvegi (M.T.G. o.fl., 2015a)	Vatnshæð á Sólheimajökulsvegi
5.000	96,7	96,5	71,4	70,9
10.000	98,6	98,6	72,3	72,3

um en Sólheimajökulsvegur fer á kaf þar sem hann liggur lægst vestan Loðmundarsætis. Hafa verður í huga að mat á hrýfisstuðli Manning er ekki fyllilega sambærilegt og í reikningunum sem hér eru kynntir. Matið er svipað nærri jökli en talsvert lægra fyrir svæði nær Þjóðvegi 1, sambærilegt við þversnið 8 og 9 hjá Magnúsi Tuma Guðmundsyni o.fl. (2015a). Hrýfisstuðull Manning á þessu svæði er hér metin sem $0.031 \text{ s/m}^{1/3}$ (mynd 5) samanborið við $0.05 \text{ s/m}^{1/3}$ hjá Magnúsi Tuma Guðmundsyni o.fl. (2015a). Sólheimajökull hefur einnig hupað um 325 m á milli áranna 2015 og 2019 (Hrafnhildur Hannesdóttir, 2019; óbirt gögn Jökklarannsóknafélags Íslands). Þetta hefur leitt til þess að meðfram lóninu er kominn áframhaldandi stígur yfir láglent svæði frá norðanverðum Jökulhaus að jökli. Þessi nýi viðbótar $\sim 300 \text{ m}$ kafli fer á kaf í hermunum sem hér eru framkvæmdar (myndir útbreiðsla $5e3$ og $1e4$) og skýrir muninn samanborið við niðurstöður Magnúsar Tuma Guðmundssonar o.fl. (2015a) um að stígurinn að jökli fari ekki á kaf í hlaupum af þessum stærðum.

Í tengslum við gerð rýmingaráætlana fyrir eldgos undir Mýrdalsjökli hermdi Verkfræðistofan Vatnaskil útbreiðslu jökulhlaups frá Sólheimajökli, með $250.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli. Hluti vatnsins, $150.000 \text{ m}^3/\text{s}$, koma fram í upptökum á jökli ofan Hólsársgils en restin, $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$, kemur fram við jökuljaðar (Vatnaskil, 2006). Sú sviðsmynd um jökulhlaup sem unnið er með í þeim reikningum er því ekki fyllilega sambærileg þeim sviðsmyndum sem hér eru kynntar. Útbreiðsla til vesturs ætti samt að liggja nærri sviðsmynd 3 sem unnið er með hér og útbreiðsla til austurs nærri viðbótar sviðsmyndinni þar sem $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ koma fram í upptökum austanmegin á jöklinum ofan Hólsársgils. Sviðsmyndin í reikningum Vatnaskila er í hvoru tilfelli fyrir sig með $50.000 \text{ m}^3/\text{s}$ meira hámarksrennsli. Efra mat á hrýfisstuðli Mannig er aftur á móti hærra hér, $0.12 \text{ s/m}^{1/3}$ á móti $0.1 \text{ s/m}^{1/3}$, sem leiðir til aukins vatnsdýpis.

Meginniðurstöður þessara hermanna eru þær sömu þrátt fyrir þennan mun á hlaups sviðsmyndunum og mismunandi reiknilíkön, landhæðarlíkön og forsendur. Hlaupin ná hvorki vestur að Skógum né túnunum sunnan við Skóga en það liggur nærri því í báðum hermunum að vatn nái vestur að ósum Skógaár. Að austan fer umtalsvert meira rennsli um Hólsárgil í reikningum Vatnaskila ($46.000\text{--}66.000 \text{ m}^3/\text{s}$) en í þeim niðurstöðum sem kynntar eru hér að ofan ($16.000\text{--}17.000 \text{ m}^3/\text{s}$). Ræður þar væntanlega bæði að rennsli um upptök á jöklinum er meira í sviðsmynd Vatnaskila og að lægra er frá jökulyfirborðinu upp í botn skarðsins við upptök gilsins. Af sam-anburði landhæðarlíkana á þessu svæði má sjá að jökulinn hefur lækkað a.m.k. 20 m á milli 2004 og 2014 (Joaquín M.C. Belart, 2018). Þessi munur á rennsli um Hólsárgil í hermununum virðist ekki valda miklum mun á útbreiðslu hlaupanna neðan þess. Í báðum tilfellum nær vatn að Ytri-Sólheimum 1, Ytri-Sólheimum 4 og Sólheimahjáleigu en ekki Ytri-Sólheimum 2 og Sólheimatungu.

Áhættureikningar

Áhrif grunnforsendna DEFRA jafnanna

Einn af stærstu óvissuþáttunum í áhættureikningunum eru grunnforsendur og nálganir DEFRA aðferðafræðinnar sem ekki er víst að standist fyrir jökulhlaup með gríðarlegu tjónmætti. Hlaupin sem hér eru hermd ná vatnsdýpi og vatnshraða á vissum svæðum sem eru mun meiri en búast má við í flóðum vegna veðurtengdra þátta á flestum vatnasviðum. Kötluhlaup í hámarki eru stærsta vatnsfall í heimi miðað við augnabliksrennsli (Haukur Tómasson, 1996).

Á svæðum þar sem tjónmætti hlaups, HR (jafna 1), nær gildum á bilinu 11 til $20 \text{ m}^2/\text{s}$ breyta

grunnforsendur DEFRA jafnanna. Fyrir gildi á þessu bili, verður mat á hlutfalli þeirra á svæðinu sem er hætta af búin af hlaupinu herra en 100%. Nákvæmt gildi innan bilsins er háð tjónnæmi svæðisins, AV (jafna 2). Fari tjónmætti hlaupsins yfir $50 \text{ m}^2/\text{s}$ bregðast fleiri forsendur reikninganna og hætta á að láta í vissu hlaupi verður meiri heldur en á að slasast. Fyrir há gildi á tjónmætti reiknast líka líkur á að láta eða slasast meiri en 100%. Þessi gildi eru mjög háð hlutfalli fólks á svæðinu sem á erfiðara með að forða sér, PV .

Af þessu er ljóst að tjónmætti sem verður allt að $200 \text{ m}^2/\text{s}$ á mörgum svæðum nærri jökuljaðri, við brúna á þjóðvegi 1 og á þjónustusvæðinu í stærri hlaupum gefur óraunverulegar niðurstöður um áhættu. Hægt er að leiðrétta fyrir hlutfallstölum sem fara yfir 100% (sjá kafla 3) en reikningarnir eru næmir fyrir því hvernig það er gert. Séu leiðréttingar ekki gerðar fyrr en við lok reikninganna, þ.e. engar leiðréttingar fyrr en dánaráhætta verður hærri en 100%, fást 2–4 falt hærri niðurstöður um heildaráhættu heldur en ef þessar leiðréttingar eru gerðar fyrr í reikningunum líkt og hér er gert. Séu engar leiðréttingar gerðar, gerandi ráð fyrir að mannfólk sé líkt köttum að því að leyti að vera með fleiri líf en eitt og geta því látist oftar en einu sinni, fást niðurstöður sem eru í sumum tilfellum meira en 10 sinnum hærri en hér eru kynntar. Níu líf kattarins myndu því ekki duga öllum til að sleppa lifandi frá þeim reikningum.

Áhrif vals á stuðlum í DEFRA jöfnunum

Í DEFRA aðferðafræðinni sem notast er við þarf að velja fimm stuðlum gildi út frá eiginleikum flóðsins og hættusvæðisins. Valið á DF , sem lýsir magni lausagrjóts, ísjaka, braks og annars efnis í flóðinu, veldur allt að helmingi óvissu á tjónmættisgildum upp að gildinu 2. Áhrifin af vali á DF minnka eftir því sem tjónmættisgildin hækka umfram gildið 2. Tjónmættisgildin eru meira og minna umtalsvert hærri fyrir stærri sviðsmyndirnar tvær en val á DF hefur allt að 3 föld áhrif á lokaniðurstöðu einstaklingsbundinnar áhættu á vissum svæðum fyrir sviðsmynd 1 (t.d. á göngustígnum að jökli). Á sama stað hefur valið hefur aftur á móti minna en $\sim 10\%$ áhrif á lokaniðurstöður fyrir sviðsmynd 2 og engin áhrif á lokaniðurstöðu fyrir sviðsmynd 3.

Valið á þremur stuðlum sem saman lýsa tjónnæmi svæðisins, AV , veldur minni óvissu. Ef ekki þarf að gera leiðréttingar á hlutfalli þeirra sem hætta er búin af hlaupinu, E , eru lokaniðurstöður áhættu í línulegu sambandi við summu þessara þriggja stuðla. Ef gera þarf leiðréttingar á E til að halda hlutfallinu við 100% minnka áhrif þessara stuðla á lokaniðurstöður, því meira sem leiðréttingin er meiri. Val þessara stuðla hefur t.d. engin áhrif á lokaniðurstöður um einstaklingsbundna áhættu á göngustígnum að Sólheimajökli fyrir sviðsmynd 3. Eiginleikar svæðisins eru frekar skýrir og summan örugglega ávallt bilinu 5 til 9. Val þessara stuðla veldur því minni en helmingi óvissu í lokaniðurstöðum.

Valið á fimmta stuðlinum (tjónnæmi fólks, PV) getur valdið umtalsverðri óvissu í áhættureikningunum. Lokaniðurstöður eru í beinu línulegu sambandi við valið á stuðlinum og gildi hans ekki vel afmarkað. Notast er við stærðargráðubíl í reikningunum, þ.e. stuðlinum er annaðhvort gefið gildin 0,02–0,2 eða 0,03–0,3 fyrir efra og neðra mat á hverju svæði. Þetta veldur því allt að 10 faldri óvissu á áhættumatinu.

Aðrir þættir

Til viðbótar þáttunum hér að ofan í aðferðafræðinni skilar óvissan í hættumatinu sér inn í áhættumatið. Sama á við um óvissu í viðverutíma ferðamanna en ekki er lagt sérstakt mat á þá óvissu hér. Óvissa í fjölda ferðamanna skilar sér einnig inn í mat á mögulegu manntjóni. Til þess að

reyna að koma þessari miklu óvissu til skila eru allar niðurstöður settar fram sem bil utan um líkleg gildi. Bilin utan um lokaniðurstöður einstaklingsbundinnar áhættu og mögulegt manntjón spanna oft meira en tvær stærðargráður. Niðurstöðurnar nýtast samt til viðmiðunar og umræðu, sjá kafla 5.

5 Samantekt, ábendingar og frekari rannsóknir

Hér eru fyrst helstu niðurstöður verksins dregnar saman. Síðan er farið yfir ábendingar og umræður. Að lokum eru svo æskilegar frekari rannsóknir kynntar.

5.1 Samantekt

Þrjár sviðsmyndir jökulhlaupa frá Sólheimajökli vegna jarðhita- og eldvirkni undir Mýrdalsjökli hafa verið hermdar með straumfræðilegu líkani. Fjórða sviðsmyndin var einnig hermd til samanburðar við fyrra hættumat. Niðurstöður þessara hermna eru nýttar í hættumat á svæðinu framan við Sólheimajökul. Það er gott samræmi milli meginniðurstaðna í þessu verki og fyrra hættumats Magnúsar Tuma Guðmundssonar og fleiri (2015a) fyrir minni hlaup og Vatnaskila (2006) fyrir stærri hlaup. Þetta styrkir niðurstöður okkar og gefur til kynna að mismunandi nálganir og líkön í straumfræðilegum reikningum valdi ekki afgerandi óvissu.

Helstu niðurstöður hættumatsins gefa til kynna að jökulhlaup frá Sólheimajökli geti skapað umtalsverða hættu framan við jökulinn og á Sólheimasandi.

- Hlaup af völdum jarðhita við jökulbotn eða vegna lítilsháttar eldgosa undir jökli með $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli geta skapað fólki, farartækum og mannvirkjum geysimikla hættu á hlutum Sólheimajökulsvegar, á köflum af þjóðvegi 1 við brúna á Jökulsá á Sólheimasandi og á göngustígnum að jökli frá þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegar (mynd 10). Slík hlaup geta náð að: göngustígnum að jökli á 2–7 mínútum, Sólheimajökulsvegi á 19–43 mínútum og brú á þjóðvegi 1 á 23–35 mínútum, frá upphafi hlaups við jökuljaðar (tafla 3).
- Hlaup af völdum meðalstórs goss í öskjunni á vatnasviði jökulsins með $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli eða að sama magn komi fram undan Sólheimajökli sem hluti stórs Kötluhlaups getur skapað fólki, farartækum og mannvirkjum geysimikla hættu á hlutum Sólheimajökulsvegar, á köflum af þjóðvegi 1 við brúna á Jökulsá á Sólheimasandi, á þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegar og á göngustígnum að jökli frá þjónustusvæðinu (mynd 15). Hlaup sem þetta getur einnig skapað mikla hættu á göngustígnum niður að flugvélaflakinu á Sólheimasandi og bifreiðastæðinu þar við. Hlaup af þessari stærð geta náð að: göngustígnum að jökli á 2–7 mínútum, þjónustusvæðinu á 30–37 mínútum, Sólheimajökulsvegi á 19–41 mínútum, brú á þjóðvegi 1 á 23–35 mínútum og bifreiðastæðinu við göngustíginn að flugvélaflakinu á nokkrum klukkutímum, frá upphafi hlaups við jökuljaðar (tafla 3).
- Hamfarahlaup vegna stórgoss á vatnasviði Sólheimajökuls innan Kötluöskjunnar með $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli geta skapað fólki, farartækum og mannvirkjum geysimikla hættu á öllu svæðinu framan við jökulinn. Allur göngustígurinn að jökli, þjónustusvæðið við enda Sólheimajökulsvegar, Sólheimajökulsvegur og 3–5 km af þjóðvegi 1 fara á kaf í margra metra djúpt straumhart vatn (myndir 17 og 18). Vatn streymir einnig til austurs meðfram þjóðvegi 1. Bílastæðið við göngustíginn niður að flugvélaflakinu á Sólheimasandi, göngustígurinn og svæðið við flugvélarflakið fara því á kaf í straumpungt vatn með geysimikið tjónmætti (mynd 20). Farvegur Hólsár afmarkar að austan hlaup af þessari stærð ef þau koma öll fram við jökuljaðar (mynd 19). Til vesturs ná hlaup sem þessi hvorki

að Skógum né túnunum sunnan við veg. Hlaup af þessari stærð geta náð að: göngustígn-um að jökli á 2 mínútum, þjónustusvæðinu á 14 mínútum, Sólheimajökulsvegi á 12–16 mínútum, brú á þjóðvegi 1 á 16–24 mínútum og bifreiðastæðinu við göngustíginn að flugvélaflakinu á 44 mínútum og flugvélaflakinu á 90 mínútum, frá upphafi hlaups við jökuljaðar (tafla 3).

- Brjótí stór hluti hamfarahlaups sér leið til jökulyfirborðs ofan jaðars getur hluti hlaupvatns komið fram um Hólsárgil eða dalinn austan við Jökulhaus. Hversu mikið hlaupvatn gæti komið fram um þessa farvegi er mjög háð hve stór hluti hlaupsins myndi brjóta sér leið til jökulyfirborðs og hvar það kæmi fram á jöklinum. Fari þessi atburðarrás á versta veg með 16.000–17.000 m³/s rennsli fram úr Hólsárgili nær vatn að húsum á Ytri-Sólheimum 1 og á Sólheimahjáleigu (mynd 22). Vegurinn að Sólheimabæjunum færi einnig á kaf í hlaupvatn með geysimikið tjónmætti.

Þó aðalsviðsmyndirnar þrjár séu látnar koma fram við jökuljaðar má búast við að mikil hætta verði á jöklinum sjálfum í öllum tilfellum. Þekkt er að jökulhlaup frá Sólheimajökli (Oddur Sigurðsson o.fl., 2000) og öðrum stöðum (Matthew J. Roberts o.fl., 2000) geta brotið sér leið til jökulyfirborðs ofan jaðars. Slíkt getur skapað hættu á öllum neðri hluta jökulsins. Uppbrot á jökulsporðinum, gasmengun, flóðbylgja í lóninu framan jökulsins þegar jökulhlaup skellur í það og aðrir slíkir mögulegir fylgifiskar jökulhlaupa geta einnig skapað hættu á jöklinum sjálfum, við jaðar hans og við lónið framan hans.

Upplýsingar um viðveru og fjölda fólks á 9 mismunandi skilgreindum viðverusvæðum innan mestu hlaupútbreiðslu eru síðan nýttar ásamt hættumatinu í áhættumat. Útreikningarnir byggja á aðferðafræði DEFRA til þess að meta áhættu fólks vegna vatnsflóða. Áhættumatið er tilrauna-verkefni og hérlandis eru hvorki til reglur né viðmið um ásættanlega áhættu vegna jökulhlaupa eða almennra vatnsflóða. Helstu niðurstöður áhættumatsins eru því settar fram í samanburði við önnur þekkt áhættuviðmið. Helstu niðurstöður áhættumatsins gefa til kynna að hafi ekki verið rýmt áður en að hlaup hefst sé áhætta vissra hópa á svæðinu umtalsverð.

- Einstaklingsbundin árleg dánaráhætta leiðsögumanns á svæðinu við og á Sólheimajökli, jöklaleiðsögumanns eða starfsmanns sem vinnur á þjónustusvæðinu við enda vegarins að jökli (með dæmigerða viðveru samsvarandi fullri vinnu allt árið) er á bilinu frá $3 \cdot 10^{-6}$ og allt að $2 \cdot 10^{-4}$ (tafla 7 og mynd 25). Áhætta í efri hluta þessa mögulega bils er allt að 2 til 4 sinnum hærri heldur en almenn áhætta í umferðinni og meira en 3 sinnum hærri heldur en dæmigerð áhætta starfsfólks í byggingariðnaði.
- Einstaklingsbundin áhætta hvers ferðamanns er lítil, $3 \cdot 10^{-9}$ – $6 \cdot 10^{-8}$ (tafla 7 og mynd 25). Hún er tveimur stærðargráðum minni heldur en meðaláhætta á að látast af eldingu á heimsvísu, $3 \cdot 10^{-6}$.
- Þó einstaklingsbundin áhætta hvers ferðamanns sé lítil þá eru þeir oft margir á svæðinu. Með upplýsingum um meðalviðveru og fjölda ferðamanna má meta mögulegt manntjón fyrir mismunandi sviðsmyndir. Líkur á slysi eða manntjóni fyrir ótiltekinn ferðamann eru umtalsverðar. Mögulega gætu tugir fólks farist í verstu tilfellum komi ekki til rýmingar (tafla 10).

- Meta má árlegan meðal fjölda andláta vegna jökulhlaupa á svæðinu öllu, án rýmingar, sem 0,005 til 0,1 andlát. Þ.e. að áhætta ferðamanna jafngildi einu andláti á 10 til 200 ára fresti. Vert er að hafa í huga að þessir atburðir eru ólíkir t.d. mannskæðum bílslysum, sem eru nokkur á ári. Þessi meðaltöl ráðast af mögulegu talsverðu manntjóni í mjög sjaldgæfum atburðum. Þ.e. að meginþorra tímans séu engin mannskæð slys en svo þegar þau verði geti fleiri en einn farist.
- Staðaráhætta á þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegur er umtalsverð, $7 \cdot 10^{-5}$ – $9 \cdot 10^{-4}$. Til samanburðar má nefna að stærstur hluti þessa mögulega bíls jafngildir skilgreiningu á B eða C svæði í ofanflóðahættumati (tafla 9 og mynd 26). Nýting svæða þar sem ofanflóðahætta er slík er takmörkunum háð. Staðaráhætta þar sem göngustígur frá þjónustusvæðinu kemur að jaðri Sólheimajökuls og á jöklinum sjálfum er einnig umtalsverð en líkur á uppbyggingu varanlegra mannvirkja á þeim stöðum eru væntanlega litlar.

Mikil árstíðabundin sveifla og dagsveifla er í tjónnæmi á svæðinu vegna árstíða- og dagsveiflu í fjölda ferðamanna (sjá viðauka III). Ekki er búist við mikill árstíða- eða dagsveiflu í upphafstíma hlaupa og einstaklingsbundin áhætta er því ávallt sú sama en fjöldinn hefur áhrif á heildaráhættu á slysum eða manntjóni. Fjöldi ferðamanna þegar hann er hvað minnstur að vetri er þó umtalsverður undanfarin ár og því nauðsyn á viðbúnaði allt árið. Veturnir 2019/2020 og 2020/2021 eru undantekningar frá þróun seinustu ára því þá fækkaði ferðamönnum stórlega vegna heimsfaraldurs Covid19 (Gyða Þórhallsdóttir og Rögnvaldur Ólafsson, óbirt gögn). Slíkar sveiflur í fjölda ferðamanna á milli ára hafa líka áhrif á tjónnæmi á svæðinu.

5.2 Ábendingar og umræður

Áhætta fólks vegna jökulhlaupa á Sólheimajökli sjálfum, á svæðinu við jaðar hans og á þjónustusvæðinu við enda Sólheimajökulsvegur er mikil. Umferð fólks á svæðinu með auknum ferðamannastraum er mikil og því líkur á mögulegum hópslysum með jafnvel tugum látinna og slasaðra í verstu tilfellum (tafla 10). Ljóst er að erfitt er að draga úr tjónmætti hlaupa af þessum stærðum með einhverskonar vörnum. Að draga úr tjónnæmi á svæðinu með lokunum og rýmingu þegar hlaup gætu verið yfirvofandi er því vænlegasta leiðin til þess að koma í veg fyrir slys á fólki og manntjón.

Mikilvægt er að þekking á forboðum jökulhlaupa sé eins góð og mögulegt er. Æskilegt er að frekari vinna verði unnin á því sviði og að viðmiðunarþröskuldar fyrir lokanir og rýmingu á svæðinu verði útbúnir. Slík forvinna myndi flýta túlkun mælinga og rýmingu þegar þarf. Það verður þó aldrei alveg komist hjá því að fyrstu merki um umbrot geta oft verið óljós og erfitt að spá fyrir um hvernig atburðarásin mun þróast. Margskonar jarðfræðileg virkni er í kringum Kötlu og undir Mýrdalsjökli. Umtalsverðrar túlkunar mælinga verður því alltaf þörf. Einnig er hætt við því að stundum þurfi að grípa til lokana og rýmingar vegna óljósra fyrstu merkja, sem svo leiða ekki til hlaups. Erfitt er að komast hjá slíkum „úlfur úlfur“ tilfellum en nauðsynlegt að halda árvekni þrátt fyrir þau.

Framgangshraði hlaupanna getur verið mikill þegar að þau eru hafin. Minnstur tími gefst til rýmingar á jöklinum sjálfum, göngustígnum að honum, þjónustusvæðinu og á Sólheimajökulsvegi. Rýming á þessum svæðum getur því ekki byggt á fyrstu merkjum um hlaup við jaðar. Einnig er hætt á að Sólheimajökulsvegur verði ófær í hlaupum og fólk verði innlyksa við jökulinn og

á þjónustusvæðinu. Því er nauðsynlegt að notast frekar við rýmingar og lokanir sem byggja á fyrstu merkjum um breytta jarðhitavirkni eða eldsumbrot sem gætu valdið hlaupum. Góð vöktun á eldstöðinni Kötlu með jarðskjálftamælingum, samfelldum GPS-mælingum, mælingum á gasútstreymi, leiðnimælingum í ám og öðrum slíkum aðferðum er því nauðsynleg. Gott kerfi til þess að koma upplýsingum um yfirvofandi hættu og rýmingu til fólks á svæðinu er einnig nauðsynlegt. Mikilvægt er að ferðafólk og sérstaklega leiðsögumenn og starfsfólk á svæðinu sé vel upplýst um hættuna og þekki rétt viðbrögð við yfirvofandi jökulhlaupi til að rýming gangi vel.

Í öllum tilfellum væri æskilegt að loka og rýma þjóðveg 1 nærri Jökulsá á Sólheimasandi sé hlaup hafið því bæði vegkaflar nærri brúnni yfir ána og brúin sjálf geta verið í hættu. Viðverutími hvers einstaklings á hættusvæðunum á þjóðvegi 1 er stuttur þar sem flestir keyra einfaldlega í gegnum svæðið. Áhættan af því að fara þar um er því mun minni heldur en að fara upp að jöklinum (tafla 7 og mynd 25).

Öðrum viðverusvæðum svo sem bæjunum á Sólheimum og flugvélarflakinu á Sólheimasandi og bifreiðastæðinu þar við, er síðan aðeins búin hætta af hlaupum samfara miklum eldsumbrotum. Búast má við að forboðar slíkra atburða verði meiri og skýrari heldur en forboðar minni jarðhitatengdra hlaupa (Páll Einarsson, 2018). Atburðarásin í slíkum eldsumbrotum getur þó verið hröð (Páll Einarsson, 2018) ferðaleið hlaupanna undir jökli stutt og brött miðað við t.d. Grímsvatnahlaup (Baldur Bergsson, 2016) og framgangstími hlaupanna að þessum svæðum innan við klukkustund (tafla 3). Því er nauðsynlegt að rýming, t.d. gangandi fólks niður við flugvélarflakið, hefjist sem fyrst og gangi vel komi til hlaupa af völdum eldgosa.

Við gerð viðbragðs- og rýmingaráætlana þarf að hafa í huga að ýmsar aðrar hættur geta fylgt umbrotum sem valda hlaupum. Fyrir hlaup af völdum eldsumbrota er um að ræða t.d. öskufall, gasmengun, eldingar, jarðskjálftar, gushlaup og hraunflæði (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2008). Atburðir þar sem margar hættur fara saman geta flækt og torvelað rýmingu og auk-ið áhættu. Ganga af jökli eða akstur á Sólheimajökulsvegi í öskufalli getur t.d. verið miklum vandkvæðum bundin, jarðskjálftar samfara eldsumbrotum geta valdið grjóthruni úr Jökulhaus á göngustíginn að jökli eða vegaskemmdum og fleira getur komið til.

Niðurstöður líkanreikningana sýna að hlaupin ná hvorki hátt upp í hliðar Jökulhauss né brekkurnar sitthvoru megin við jökulinn. Það er því alltaf möguleiki og skynsamlegt að leita upp í brekkur og af lægri svæðum sé í óefni komið. Yrði fólk t.d. innlyksa á þjónustusvæðinu í stórhlaupi hefur það mikla möguleika á að leita skjóls frá hlaupinu með því að einfaldlega hlaupa upp í brekkurnar á Jökulhaus. Fólk á jöklinum sjálfum gæti á svipaðan hátt leitað skjóls með því að hækka sig upp í hliðarnar til hliðar við jökulinn, þar sem þær eru ekki of brattar og torkleifar. Sé hlaupið samfara eldsumbrotum gætu aðrar hættur svo sem öskufall og eldingar torvelað slíkan flóttu og gert hann hættulegan. Ekki er því ráð að treysta á að einfaldlega hækka sig í landslaginu sem megin viðbragð við jökulhlaupum, þó að það sé sjálfsagt viðbragð séu aðrir möguleikar ekki tiltækir.

Komi til þess að fólk hafi orðið innlyksa í jökulhlaupum þarf að hafa í huga við björgunaraðgerðir eftir fyrsta hlaupið að eldsumbrotum fylgir oft fjöldi hlaupa sem koma hvert á eftir öðru með mislöngum bilum á milli. Dæmi um þetta eru hlaup samfylgjandi Kötlugosinu 1918 (Haukur Tómasson, 1996) og Eyjafjallajökulsgosinu 2010 (Sigrún Karlsdóttir o.fl., 2012). Ekki er víst að fyrsta hlaupið sé stærst í svona atburðarás þó að það sé líklegt.

Í hlaupum af völdum jarðhitavirkni getur losun jarðhitatengdra gasa frá hlaupvatninu skapað hættu (Baldur Bergsson, 2016). Gasið getur dreifst yfir mun stærra svæði en hlaupvatnið sjálft og þar með skapað hættu utan hlaupfarvegarins. Þessi hættu getur fylgt minniháttar hlaupum eins og í júlí 2014, sem að öðru leyti eru hættulítill (Baldur Bergsson, 2016). Þessi ferli eru ekki hermd hér en ljóst er að taka þarf tillit til gashættunnar í viðbragðs- og rýmingaráætlunum.

Áhætta af því að dvelja langdvölum á þjónustusvæðinu framan við Sólheimajökul er umtalsverð. Staðaráhætta á þjónustusvæðinu jafngildir skilgreiningu á B eða C svæði í ofanflóðahættumati (tafla 9 og mynd 26). Ekki eru til viðmið um ásættanlega áhættu af völdum vatnsflóða og jökulhlaupa líkt og fyrir ofanflóð en unnið er að tillögum um slík áhættuviðmið fyrir almenn vatnsflóð (Tinna Þórarinsdóttir og Matthew J. Roberts, í vinnslu). Það er þó ljóst að áhættan er slík að uppbygging á aðstöðu sem leiðir til aukinnar viðveru fólks, svo sem gisti aðstöðu, er ekki æskileg á svæðinu.

Af hermunum á hlaupum sem brjóta sér leið upp að jökulyfirborðinu ofarlega á jöklinum er ljóst að flæði niður Hólsárgil getur skapað umtalsverða hættu. Umtalsvert flæði á yfirborði jökulsins þarf til þess að yfirflæði yfir í Hólsárgil hefjist. Líkur á því að hlaup komi að hluta fram niður gilið eru því litlar og erfitt er að meta endurkomutíma fyrir slík flóð. Það er þó ljóst að endurkomutíminn er lengri heldur en endurkomutími stórhlaupa af völdum Kötlu gosa, sem er 600 ár. Niðurstöður líkanreikninganna benda ótvírætt til þess að þetta sé ein af mögulegum verstu sviðsmyndum. Gangi vatn fram Hólsárgil er hættu á að vegurinn að Sólheimabæjunum lokist auk þess sem vatn getur náð að húsum bæði á Sólheimahjáleigu og Ytri-Sólheimum 1. Þessar niðurstöður miðast við óvissar forsendur um stærð hlaupsins og því er ekki hægt að útiloka að hús gætu verið í hættu í stærri hlaupum en hér eru hermd. Það er ljóst að rýma þarf þau hús sem lægst standa á Sólheimabæjunum sé hættu á gosi undir jökli og meðfylgjandi stórfloðum, líkt og gert er ráð fyrir í núverandi rýmingaráætlunum (Lögreglustjórnin á Suðurlandi o.fl., 2017).

Jafnvel við verstu tilfelli sem hér eru hermd, hlaup þar sem tekið er tillit til áhrifa jakahranna á flóðið og setuppbyggingu í farvegi, rennur vatn ekki til Skóga. Ekki er þó hægt að útiloka að allra stærstu stórhlaup frá Sólheimajökli geti náð að Skógum en það verður að teljast hugsanlegt versta tilfelli en ekki sennilegt versta tilfelli.

Búast má við að Sólheimajökull haldi áfram að lækka og hopa á komandi árum (Halldór Björnsson o.fl., 2018). Þessar breytingar munu geta haft áhrif á ýmsa þætti tengda hættunni af jökulhlaupum við Sólheimajökul. Hættan á jökulhlaupum mun þó vera til staðar svo lengi sem jökull er í Kötluöskjunni. Hættan mun því ekki hverfa á næstu áratugum þrátt fyrir væntanlegt hop jökulsins. Helstu breytingar á jökulhlaupahættunni með hörfun jökulsins eru minni líkur á yfirflæði í stórhlaupum yfir í Hólsárgil eða austan við Jökulhaus þar sem búast má við að sífellt herra verði frá jökulyfirborði og upp í skörðin við upphaf gilsins og norðaustan við hausinn. Einnig má búast við að hættan á flóðbylgjum vegna kelfingar framan af jöklinum samfara jökulhlaupum aukist með stækkandi lóni.

Sístækkandi lón framan við jökulinn, samfara hopi hans, getur einnig skapað nýjar hættur ótengdar jökulhlaupum og magnað fleiri hættur sem þeim fylgja. Skriðu- og berghlaupshætta í lón framan við hopandi jökla getur skapað mikla hættu líkt og nú er raunin við Svínafellsjökul í Örafum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., í vinnslu). Hætta á umtalsverðum flóðbylgjum í lóninu samfara því að stór jökulhlaup komi fram í það eykst einnig eftir því sem lónið stækkar. Dæmi eru um að Kötluhlaup hafi jafnvel valdið umtalsverðum sjávarflóðum þegar þau ganga í sjó fram (Guðrún

Larsen og Þórir N. Kjartansson, 2018) og því er mögulegt að þau valdi miklum flóðbylgjum gangi þau fram í þröngt afmarkað jökullón.

5.3 Frekari rannsóknir

Einu núverandi vöktunarkerfin á jarðhita- eða eldvirkni, sem eru virk í rauntíma við Sólheimajökul eru jarðskjálftamælingar og leiðni- og vatnshæðarmælingar á brúnni á Jökulsá á Sólheimasandi (Baldur Bergsson, 2016). Æskilegt er að kanna möguleika á uppsetningu fjölbreyttari vöktunar. Hver vöktunaraðferð hefur kosti og galla og fjölþætt vöktun er því öruggust. Æskilegt er að leggja áherslu á vöktunaraðferðir sem gætu gefið upplýsingar um framgang jökulhlaups áður en það nær jaðri jökulsins. Núverandi mælingar á leiðni og vatnshæð við brúna á þjóðvegi 1 gefa t.d. ekki aðvörun fyrir en fyrstu merki um hlaupið eru komin fram undan jökuljaðri og framhjá þjónustusvæðinu og Sólheimajökulsvegi.

Mögulega mætti kanna hvort að raunhæft væri að vera með samfelldar GPS-mælingar á yfirborði jökulsins yfir líklegustu leið hlaupa undir Sólheimajökli. Slíkar mælingar gætu gefið viðvörun um leið og flóðstafn jökulhlaups á leið niður jökulinn gengi undir mælistaðinn og lyftir jöklinum (Bergur Einarsson o.fl. 2016). Samfelldar mælingar á gasi við jökuljaðar gætu mögulega gefið aðvörun um hlaup um leið og fyrstu merki þess ná jökuljaðri (Baldur Bergsson, 2016). Einnig mætti kanna mögulegar mæliaðferðir til þess að nema betur og staðsetja óróan samfara framgangi hlaupa undir jöklinum. Slíkt mætti hugsanlega gera með hljóðnemum sem notaðir hafa verið til að nema aurflóð niður eldfjöll, sjá https://volcanoes.usgs.gov/observatories/cvo/monitoring_lahars.html. Annar möguleiki væri að notast við fylki jarðskjálftanema en slíkar aðferðir hafa verið notaðar til greina framgang Skaftárhlaupa undir Skaftárjökli (Eibl o.fl., 2020). Vöktun með fjarkönnun gæti einnig verið framtíðarmöguleiki samfara aukinni þróun slíkrar tækni. Nánari umfjöllun um núverandi og mögulega vöktun á svæðinu við Sólheimajökul má sjá í meistararitgerð Baldurs Bergssonar (2016).

Góð þekking á forboðum jökulhlaupa er mikilvæg auk þess sem nauðsynlegt er að forboðar séu greindir rétt (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl. 2016). Bæði er mikilvægt að þekkja alla mögulega forboða en einnig að þekkja hvaða breytingar í virkni eru í raun ekki forboðar jökulhlaupa, til þess að hægt sé að halda tilfellum ónauðsynlegra lokana og rýminga í lámarki. Rannsóknaaðferðir svo sem íssjarmælingar á uppsöfnun vatns við jökulbotn (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2018), yfirborðsmælingar á lögun jarðhitakatla (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2007), gasmælingar í yfirflugi (Evgenia Ilyinskaya o.fl., 2018) og aðrar slíkar rannsóknir eru því mikilvægar þó þær geti ekki skilað viðvörunum um yfirvofandi hlaup í rauntíma.

Þetta verkefni er fyrsta tilraun til þess að nýta aðferðafræði DEFRA til að meta áhættu af völdum vatnsflóða á Íslandi. Aðferðir DEFRA miðast upphaflega við vatnsflóð á Bretlandi og frekari rannsóknar er þörf á beitingu aðferðafræðinnar hér á landi og hversu viðeigandi hún sé fyrir áhættu af völdum jökulhlaupa.

Í þessari skýrslu er einvörðungu litið til áhættu fólks. Æskilegt er að kanna möguleika á að nota hermanir jökulhlaupanna og hættumatið einnig til mats á mögulegu efnahagslegu tjóni og tjóni á menningarlegri arfleið og umhverfi.

Í hermununum sem hér eru kynntar er notast er við einfaldar aðferðir til að taka tillit til áhrifa jakahranna og setframburðar á rennslisraða og vatnshæð (sjá viðauka I og II). Áhrifin geta verið

umtalsverð eins og sjá má á mismunandi útbreiðslu hlaupa á myndum 9, 14, 19 og 22. Þessar nálganir eru mjög almennar og æskilegt er að kanna nánar áhrif þessara þátta á flæðieiginleika hlaupa með fræðilegri vinnu, hermunum og tilraunum.

Mikilvægt er að kanna hvort að hægt sé að ná fram úrbótum í öryggismálum og aðgengi við Sólheimajökul með því að færa þjónustusvæðið yfir í skarðið norðaustan við Jökulhaus. Slík tilfærsla myndi minnka staðaráhættu vegna jökulhlaupa á þjónustusvæðinu umtalsvert. Þetta myndi einnig færa þjónustusvæðið á hærri stað í landslaginu sem minnkar hættu vegna gaslosunar frá minni jarðhitahlaupum (Baldur Bergsson, 2016). Með úrbótum á aðgengi niður brekkuna úr söðlinum norðaustan við Jökulhaus og niður á jökul, t.d. með stigum svipuðum þeim sem reistir hafa verið við Skógarfoss eða mörgum öðrum sambærilegum stöðum í Ölpunum, myndi aðgengi að jöklinum sjálfum verða betra. Þetta myndi koma í veg umferð gangandi fólks um hættulegan hluta núverandi göngustígs sem ógnað er af grjóthruni úr Jökulhaus. Einnig yrði aðgengi að jöklinum frá þjónustusvæðinu styttri en búast má við að vegalengdin frá núverandi þjónustusvæði að jöklinum lengist með hverju ári með áframhaldandi hop jökulsins vegna loftslagsbreytinga. Það væri því vert að kanna nánar hvort að þessi tilfærsla sé raunhæf og til úrbóta.

Þakkir

Við þökkum Tómasi Jóhannessyni og Magnúsi Tuma Guðmundsyni fyrir yfirlestur á skýrslunni og fyrir umræður og ábendingar meðan á verkinu stóð. Við þökkum einnig Birni Inga Jónssyni, Kjartani Þorkelssyni og Ágústi Gunnari Gylfasyni fyrir umræður og ábendingar sem bættu verkið og skýrsluna.

Heimildir

- Anna Dóra Sæþórsdóttir, Anna Mjöll Guðmundsdóttir og Þorkell Stefánsson (2016). *Polmörk ferðamanna á átta vinsælum ferðamannastöðum á Suður- og Vesturlandi*. Reykjavík: Ferðamálastofa.
- Arcanum Glacier tours (á.á). The Plane Wreck Shuttle. Sótt 19. febrúar 2020 á: <https://www.arcanum.is/tours/the-plane-wreck-shuttle/>
- Baldur Bergsson (2016). *Volcanogenic floods at Sólheimajökull. Hazard identification, monitoring and mitigation of future events*. Meistararitgerð, Verkfræði- og náttúruvísindasvið, Háskóli Íslands, 97 bls.
- Bergur Einarsson (2019). *Samantekt um jökulhlaup og ummerki leka frá jarðhitakötlum í Mýrdalsjökli 2010–2018 í gögnum úr vöktunarmælum í Markarfljóti, Múlavísl og Jökulsá á Sólheimasandi*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, greinargerð BE/2019-01.
- Bergur Einarsson, Eyjólfur Magnússon, Matthew J. Roberts, Finnur Pálsson, Thorsteinn Thorsteinsson og Tómas Jóhannesson (2016). A spectrum of jökulhlaup dynamics revealed by GPS measurements of glacier surface motion. *Annals of Glaciology*, **57**, 47–61 (doi: 10.1017/aog.2016.8)
- Bergur Einarsson, Tómas Jóhannesson, Thorsteinn Thorsteinsson, Eric Gaidos og Thomas Zwinger (2017). Subglacial flood path development during a rapidly rising jökulhlaup from the western Skaftá cauldron, Vatnajökull, Iceland. *Journal of Glaciology*, **63**(240), 670–682 (doi:10.1017/jog.2017.33)
- Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA USA: USACE Hydrologic Engineering Center, HEC.
- Costa, J. E. (1988). Rheologic, morphologic, and sedimentologic differentiation of water floods, hyperconcentrated flows, and debris floes, birt í: Baker, V.E., Kochel, C.R., and Patton, P.C., editors, *Flood geomorphology*, New York, John Wiley and Sons, 113–122.
- Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) (2003). Flood Risks to People. Phase 1 (Skýrsla FD2317/TR).
- Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) (2006a). Flood Risks to People. Phase 2 (Skýrsla FD2321/TR2).
- Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) (2006b). R&D OUTPUTS: FLOOD RISKS TO PEOPLE. Phase 2 (Skýrsla FD2321/TR1).
- Evgenia Ilyinskaya, Mobbs, S., Burton, R., Burton, M., Pardini, F., Pfeffer, M.A., Purvis, R., Lee, J., Bauguitte, S., Brooks, B., Colfescu, L., Petersen, G.N., Wellpott, A. og Bergsson, B. (2018). Mikil gaslosun frá Kötlu 2016 og 2017. Birt í: *Kötluráðstefna, 100 ár liðin frá upphafi gossins 12. október 1918 Vík í Mýrdal, 12. október 2018*, Jarðfræðifélag Íslands, 10–16.
- Eibl, E.P.S., Bean, C.J., Einarsson, B., Pálsson, F. og Vogfjörð, K.S. (2020). Seismic ground vibrations give advanced early-warning of subglacial floods. *Nature Communications*, **2504**(11), (doi.org/10.1038/s41467-020-15744-5)
- Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Tayo van Boeckel, Joaquín, M.C. Belart, Magnús T. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og Helgi Björnsson (2018). Skyggst í undirheima Mýrdalsjökuls með íssjá. Birt í: *Kötluráðstefna, 100 ár liðin frá upphafi gossins 12. október 1918 Vík í Mýrdal, 12. október 2018*, Jarðfræðifélag Íslands, 17–21.

- Flóðatilskipun Evrópupingsins og ráðsins (2007). *Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks* Sótt á: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2007/60/oj>
- Flugvél með 7 manns nauðlenti á Sólheimasandi, (1973, 22. nóvember). Tíminn, bls. 1. Sótt 19. nóvember 2019 á: <https://timarit.is/page/3741788#page/n0/mode/2up>
- Galeczka, I., Eric H. Oelkers og Gislason, S.R. (2014) The chemistry and element fluxes of the July 2011 Múlakvísl and Kaldakvísl glacial floods, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **273**, 41–57. (doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.12.004)
- Guan, M., Wright, N.G., Sleight, P.A. og Carrivick, J.L. (2015). Assessment of hydro-morphodynamic modelling and geomorphological impacts of a sediment-charged jökulhlaup, at Sólheimajökull, Iceland. *Journal of Hydrology*, **530**, 336–349. (doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.062)
- Guan, M., Carrivick, J. L., Wright, N. G., Sleight, P. A. og Staines, K. E. H. (2016). Quantifying the combined effects of multiple extreme floods on river channel geometry and on flood hazards. *Journal of Hydrology*, **538**, 256–268. (doi:10.1016/j.jhydrol.2016.04.004)
- Guðrún Larsen (2000) Holocene eruptions within the Katla volcanic system, south Iceland: Characteristics and environmental impact. *Jökull*, **49**, 1–28.
- Guðrún Larsen (2018). *Kötluhlaup eftir 1600: Umfang, hlaupleiðir, tjón og umhverfisbreytingar, ásamt viðaukum*. Reykjavík, Jarðvísindastofnun Háskólans, rannsóknaskýrsla RH-13_2018. 66 bls.
- Guðrún Larsen, Magnús Tumi Guðmundsson og Olgeir Sigmarsson (2013). Katla. Í Júlíus Sólmes, Freysteinn Sigmundsson og Bjarni Bessason (ritstj.), *Náttúruvá á Íslandi*. Reykjavík, Viðlagatrygging Íslands og Háskólaútgáfan, 211–233.
- Guðrún Larsen og Magnús T. Guðmundsson (2016). Katla. Í: Bergrún A. Óladóttir, Guðrún Larsen og Magnús T. Guðmundsson. *Íslensk eldfjallavefsjá*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans, Almannavarnardeild Ríkislögreglustjóra. Sótt af <http://icelandicvolcanoes.is/?volcano=KAT>
- Guðrún Larsen og Þórir N. Kjartansson (2018). Jökulhlaupið 1721 - flóðalda í Vík? Birt í: *Kötluráðstefna, 100 ár liðin frá upphafi gossins 12. október 1918 Vík í Mýrdal, 12. október 2018*, Jarðfræðifélag Íslands, 38–41.
- Gunnar Þór Jónsson & Tinna Þórarinsdóttir (2011). *Hlaup í Múlakvísl 8.–10. júlí 2011*. Veðurstofa Íslands, greinarg. GThJ-TTh/2011-01.
- Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson og Trausti Jónsson (2018). *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um loftslagsbreytingar 2018*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, 236 bls.
- Haukur Tómasson (1996). The jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology*, **22**, 249–254. (doi:10.3189/1996AoG22-1-249-254)
- Health and Safety Executive (HSE) (2001). Reducing risks, protecting people. HSE's decision-making process. Sótt af: <https://www.hse.gov.uk/risk/theory/r2p2.pdf>
- Helgi Björnsson (1988) *Hydrology of Ice Caps in Volcanic Regions*. Reykjavík: Vísindafélag Íslendinga, Háskóli Íslands.
- Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús Tumi Guðmundsson (2000). Surface and bedrock topography of the Mýrdalsjökull ice cap, Iceland: The Katla caldera, eruption sites and routes of jökulhlaups, *Jökull*, **49**, 29–46.

- Helgi Gunnar Gunnarsson, Sveinn Óli Pálmarsson, Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og Guðrún Larsen (2018). Hermun Kötluhlaups í Múlakvísl og mat á rennsli til Víkur. Birt í: *Kötluráðstefna, 100 ár liðin frá upphafi gossins 12. október 1918 Vík í Mýrdal, 12. október 2018*, Jarðfræðifélag Íslands, 46–50.
- Hessel, R. (2002). *Modelling soil erosion in a small catchment on the Chinese Loess Plateau*. Doktorsritgerð, Faculty of Geographical Sciences, Utrecht University.
- Hrafnhildur Hannesdóttir (2019) Jöklabreytingar (Glacier variations) 1930–1970, 1970–1995, 1995–2017 og 2017–2018, *Jökull*, **69**, 129–136.
- Joaquín M.C. Belart (2018). *Mass balance of Icelandic glaciers in variable climate*. Doktorsritgerð, Jarðvísindadeild, Háskóla Íslands.
- Jónas Elíasson, Guðrún Larsen, Magnús Tumi Guðmundsson og Freysteinn Sigmundsson (2005). Líkindi eldgosa, hlaupa og færslu eldvirkni milli svæða innan Kötluoðskjunnar. Í Magnús Tumi Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*. Reykjavík: Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan, bls. 135–150.
- Jónas Elíasson, Snorri Páll Kjarran, Sigurður Lárus Hólm, Magnús Tumi Guðmundsson og Guðrún Larsen (2007). Large hazardous floods as transitory waves. *Environmental Modelling & Software*, **22**, 1392–1399.
- Kristján Már Unnarsson (2016, 29. ágúst). *Ferðamenn flykkjast að gamla flugvélarflakinu*. Vísir. Sótt 14. nóvember 2019 á: <https://www.visir.is/g/2016160828808>
- Lögreglustjórinn á Suðurlandi, Almannavarnadeild ríkislögreglustjóra, Almannavarnanefnd Rangárvalla- og V-Skaftafellssýslu (2017). *Viðbragðsáætlun vegna eldgoss undir Mýrdalsjökli, Útgáfa 2.0, 30.01.2017*. Lögreglustjórinn á Suðurlandi, Almannavarnanefnd Rangárvalla- og V-Skaftafellssýslu og Ríkislögreglustjórinn
- Magnús Tumi Guðmundsson, Jónas Elíasson, Guðrún Larsen, Ágúst Gunnar Gylfason, Páll Einarsson, Tómas Jóhannesson, Kristín Martha Hákonardóttir og Helgi Torfason (2005a). Yfirlit um hættu vegna eldgosa og hlaupa frá vesturhluta Mýrdalsjökuls og Eyjafjallajökli. Í Magnús Tumi Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*. Reykjavík: Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan, bls. 11–44.
- Magnús Tumi Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir (2005b). Ísbráðnun og upptakrennsli jökulhlaupa vegna eldgosa í Eyjafjallajökli og vestanverðum Mýrdalsjökli. Í Magnús Tumi Guðmundsson og Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*. Reykjavík: Ríkislögreglustjórinn og Háskólaútgáfan, bls. 159–180.
- Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir, Arnór Bergur Kristinsson og Snæbjörn Guðbjörnsson (2007). Geothermal activity in the subglacial Katla caldera, Iceland, 1999–2005, Studied with radar altimetry. *Annals of Glaciology*, **45**, 66–72.
- Magnús Tumi Guðmundsson, Guðrún Larsen, Ármann Höskuldsson, Ágúst Gunnar Gylfason (2008). Volcanic hazards in Iceland. *Jökull*, **58**, 251–268.
- Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og Björn Oddsson (2015a). *Sólheimajökull: Hættumat vegna lítilla og meðalstórra jökulhlaupa*. Reykjavík: Jarðvísindastofnun Háskólans, Skýrsla: RH-02-2015
- Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og Eyjólfur Magnússon (2015b). Örfajökull Volcano: Eruption melting scenarios. Í Emmanuel Pagneux, Magnús T. Guðmundsson, Sigrún Karlsdóttir og Matthew J. Roberts (ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland. An assess-*

- ment of hazards and risks at Öraefajökull and on the Markarfljót outwash plain (bls. 45–72). Reykjavík. Veðurstofa Íslands, Jarðvísindastofnun Háskólans og Almannavarnadeild Ríkislögreglustjóra.
- Magnús Tumi Guðmundsson, Emmanuel Pagneux, Matthew J. Roberts, Ásdís Helgadóttir, Sigrún Karlsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Þórdís Högnadóttir, Ágúst Gunnar Gylfason (2016). *Jökulhlaup í Öraefum og Markarfljóti vegna eldgosa undir jökli, Forgreining áhættumats*. Reykjavík: Jarðvísindastofnun Háskólans, Veðurstofa Íslands, Ríkislögreglustjóri, 65 bls.
- Magnús Tumi Guðmundsson, Guðrún Larsen, Þórdís Högnadóttir og Maria H. Janebo (2018). Þar brunuðu fram heilar heiðar snævi þaktar: Ísbráðnun í gosinu 1918, tengsl hlaups og goss og eðliseiginleikar stórra Kötluhlaupa. Birt í: *Kötluráðstefna, 100 ár liðin frá upphafi gossins 12. október 1918 Vík í Mýrdal, 12. október 2018*, Jarðfræðifélag Íslands, 57–59.
- Matthew J. Roberts, Russell, A.J., Tweed, F.S. og Knudsen, Ó. (2000). Ice fracturing during jökulhlaups: implications for englacial floodwater routing and outlet development. *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**(13), 1429–1446. (doi: 10.1002/1096-9837(200012)-25:13<1429)
- Maizels, J. K. (1989). Sedimentology, paleoflow, dynamics and flood history of jökulhlaup deposits: paleohydrology of Holocene sediment sequences in southern Iceland sandur deposits. *Journal of sedimentology and petrology*, **59**, 204–223.
- Oddný Þóra Óladóttir (2019). *Erlendir ferðamenn á Íslandi 2018: Lýðfræði, ferðahegðun og viðhorf*. Reykjavík: Ferðamálastofa.
- Oddur Sigurðsson, Snorri Zóphóníasson og Erlingur Ísleifsson (2000). Jökulhlaup úr Sólheimajökli 18. júlí 1999. *Jökull*, **49**, 75–80.
- Óli H. Þórðarson (á.á.). Banaslys í umferðinni frá upphafi bílaaldar á Íslandi, 1915–2014. Sótt 6. apríl 2020 á vef Samgöngustofu: [https://www.samgongustofa.is/media/umferd/Banaslys-i-umferdinni-1915-2014-Oli-Hloka-\(1\).pdf](https://www.samgongustofa.is/media/umferd/Banaslys-i-umferdinni-1915-2014-Oli-Hloka-(1).pdf)
- Ólöf Vala Sigurðardóttir (2018). *Hver eru viðhorf landeigenda á fjölgun ferðamanna á landi í einkaeigu?: Sólheimasandur, Hrunalaug og Brúarfoss*. Óútgefin BA ritgerð. Háskólinn á Hólum.
- Pagneux, E. og M.J. Roberts (2015). Öraefi district and Markarfljót outwash plain: Rating of flood hazards. In E. Pagneux, M.T. Guðmundsson, S. Karlsdóttir og M.J. Roberts (Ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Öraefajökull and on the Markarfljót outwash plain* (bls. 101–122). Reykjavík, Iceland: IMO, IES-UI, NCIPDCPEM.
- Páll Einarsson (2018). Sögulegar heimildir um aðdraganda Kötlugosa og samانبurður við mæld-a forboða eldgosa seinustu áratuga á Íslandi. Birt í: *Kötluráðstefna, 100 ár liðin frá upphafi gossins 12. október 1918 Vík í Mýrdal, 12. október 2018*, Jarðfræðifélag Íslands, 66–69.
- Porter, C., Morin, P., Howat, I., Noh, M.J., Bates, B., Peterman, K. og 23 aðrir (2018) *ArcticDEM*, Harvard Dataverse, V1, (doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH)
- Russell, A.J., Tweed, F.S. og Knudsen Ó. (2000). Flash flood at Sólheimajökull heralds the reawakening of an Icelandic subglacial volcano. *Geology today*, May-June 2000, 102–106.
- Russell, A.J., Tweed, F.S., Roberts, M.J., Harris, F.D., Guðmundsson, M.T., Knudsen, Ó. og Marren, P.M. (2010). An unusual jökulhlaup resulting from subglacial volcanism, Sólheimajökull, Iceland. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 1363–1381.
- Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir (2015). *Fjöldi ferðamanna á átta áfangastöðum á Suður- og Vesturlandi 2014 til 2015*. Reykjavík: Ferðamálastofa.
- Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir (2018). *Dreifing ferðamanna um landið: Talningar ferðamanna á áfangastöðum út árið 2017*. Akureyri: Rannsóknarmiðstöð ferðamála.

- Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir (2019). *Sólheimajökull stöðuskýrsla*. Óútgefin gögn.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason og Tómas Jóhannesson (2016). Hættumat vegna berghlaupa í Öskju. Skýrsla 2016-007. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Þorsteinn Sæmundsson Tómas Jóhannesson og Ragnar Heiðar Þrastarson (í vinnslu). *Hættumat fyrir svæðið neðan Svínafellsjökuls vegna berghlaups úr Svínafellsheiði, greinargerð með hættumatskort*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands. Skýrsla í vinnslu.
- Sigrún Karlsdóttir, Ágúst Gunnar Gylfason, Ármann Höskuldsson, Bryndís Brandsdóttir, Evgenia Ilyinskaya, Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir og fleiri (2012). *The 2010 Eyjafjallajökull eruption, Iceland. Report to ICAO - June 2012*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands. 206 bls.
- Sigurjón Rist (1967). Jökulhlaups from the ice cover of Mýrdalsjökull on June 25, 1955 and January 20, 1956. *Jökull*, **17**, 243–248.
- Staines, K.E.H. og Carrivick, J.L. (2015). Geomorphological impact and morphodynamic effects on flow conveyance of the 1999 jökulhlaup at Sólheimajökull, Iceland. *Earth Surf. Process. Landforms*, **40**, 1401–1416. (doi: 10.1002/esp.3750)
- Surendran, Gibbs, Wade og Udale-Clarke (2008). *Supplementary note on flood hazard ratings and thresholds for development planning and control purpose – Clarification of the Table 13.1 of FD2320/TR2 and Figure 3.2 of FD2321/TR1*. http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=FD2321_7400_PR.pdf
- Sverrir Óskar Elefsen, Árni Snorrason, Hreinn Haraldsson, Sigurður Reynir Gíslason og Hrefna Kristmannsdóttir (2002). Real-time monitoring of glacial rivers in Iceland. Birt í: *The Extremes of the Extremes: extraordinary Floods*, ritstj. Árni Snorrason, Helga P. Finnsdóttir og Marshall Moss, IAHS publication no. **271**, 199–204.
- Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson, Matthew J. Roberts og Einar Hjörleifsson (2020). *Áhættureikningar vatnsflóða og jökulhlaupa: Notkun aðferðafræði frá DEFRA við áhættumat á Íslandi*, Reykjavík: Veðurstofa Íslands, greinargerð TTh/ofl/2020-01.
- Tinna Þórarinsdóttir og Matthew J. Roberts (í vinnslu). *Tillögur að áhættuviðmiðum fyrir vatnsflóð*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands. Skýrsla í vinnslu.
- Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson og E. Berthier (2013). Ice-volume changes, bias-estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by LiDAR mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Annals of Glaciology*, **54**(63), 63–74. (doi: 10.3189/2013AoG63A422)
- Tómas Jóhannesson, Matthew J. Roberts og Oddur Sigurðsson (2018). Framrásarhraði jökulhlaupa á Mýrdalssandi. Birt í: *Kötluráðstefna, 100 ár liðin frá upphafi gossins 12. október 1918 Vík í Mýrdal, 12. október 2018*, Jarðfræðifélag Íslands, 81–86.
- Trausti Jónsson (2002). *Hættumat og hlutverk Veðurstofunnar í ljósi hættumatsramma Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, Skýrsla nr. VÍ-ÚR11.
- Travis, Q.B., Teal, M. og Gusman, J. (2012). Best Methods and Inherent Limitations of Bulk Flow Modeling with HEC-RAS. Birt í: *World Environmental And Water Resources Congress 2012*. (doi: 10.1061/9780784412312.121)
- Umhverfisráðuneytið (2000). *Reglugerð nr. 505/2000 um hættumat vegna ofanflóða, flokkun og nýtingu hættusvæða og gerð bráðabirgðahættumats*.
- Vatnaskil, Verkfræðistofa. (2006). *Sólheimajökull*, Vatnaskil 05012006. Minnisblað. 16 bls.

- Vegagerðin (2016). *Ársskýrsla Vegagerðarinnar 2015: Fylgiskjal 2 Greinargerð um framkvæmdir við nýbyggingu þjóðvega 2015*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Vegagerðin (2017). Ekkert lát á vinsældum flugvélarflaksins á Sólheimasandi: útlendingar og aðrir ferðamenn flykkjast á sandinn. Sótt 28. janúar 2020 á vef Vegagerðarinnar: <http://www.vegagerdin.is/upplýsingar-og-utgafa/frettir/ekkert-lat-a-vinsael-dum-flugvelarflaksins-a-solheimasandi>
- Þingskjal 717, 495. mál. 148. löggjafarþing 2017–2018. Skýrsla Þórdísar Kolbrúnar Reykfjörð Gylfadóttur, ferðamála-, iðnaðar- og nýsköpunarráðherra um þolmörk ferðamennsku.
- Þórður Arason (2013). Sótt af: http://hergilsey.is/arason/rit/2013/arason_2013_vff_e.pdf

I Breytingar á hrýfisstuðli Manning vegna áhrifa setframburðar og jakahranna

Tekið er tillit til áhrifa setframburðar og jakahranna á flæði hlaupanna með breytingum á hrýfisstuðli Manning og rennslisgildum.

Áhrif setframburðar

Aukið magn fastra efna í flæðinu hefur áhrif á bæði seigju, μ , og eðlismassa, ρ , vökvans. Draga má breytingar á seigju og eðlismassa saman í breytingar á eðlisseygju vökvans, ν , þar sem:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (14)$$

Þessu til viðbótar eykur viðbót fastra efna heildarrúmmál flæðisins. Hér er miðað við að fast efni sé um 15% af heildarrúmmáli, sem er sama hlutfall og hefur verið metið fyrir Kötluhlaupið 1918 (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2018). Hlaup hegða sér ennþá sem vatnsflóð og hegðar sér að mestu eins og Newtonskur vökvi við þetta rúmmálshlutfall fastra efna. Fari hlutfallið yfir 20% eru hlaup skilgreind sem aurflóð (Costa, 1988). Að óathuguðu máli má því búast við að ásættanlegt sé að herma þessi hlaup sem vatnsflóð en búast megi við einhverjum frávikum þar sem við nálgumst mörkin milli aur- og vatnsflóða. Til eru jöfnur sem að taka tillit til áhrifa fastra efna á reikninga með HEC-RAS. Hér fylgjum við nálgun Travis og fleiri (2012). Umfram viðbót föstu efnanna í heildarrúmmál flóðsins þarf að gera ráð fyrir auknum núningi vegna setframburðarins. Það má gera með því að taka tillit til hlutfallslegra breytinga í eðlisseygju í aðlöguðu gildi fyrir hrýfisstuðlu Mannings, n_{set} , samkvæmt eftirfarandi jöfnu:

$$n_{set} = (\nu_{set}/\nu)^{1/9} n \quad (15)$$

Eðlisseygjan að teknu tilliti til áhrifa föstu efnanna, ν_{set} , ræðst af eðlismassa og seigju vökvans með föstu efnunum, ρ_{set} og μ_{set} . Ef gert er ráð fyrir að fasta efnið sé með eðlismassa á bilinu 2500–3000 kg/m³ og hlutfall þess í flæðinu sé 15% eins og áður var um getið verður:

$$\rho_{set} = [2500, 3000] \cdot 0.15 + 0.85 \cdot 1000 = [1225, 1300] \quad (16)$$

ef gert er ráð fyrir að eðlimassi vatns sé 1000 kg/m³. Til eru ýmsar reynsluformúlur fyrir hlutfallslegri breytingu seigju vökva sem fall af rúmmálshlutfalli fastra efna í flæðinu. Hér voru fjórar reyndar (Do Ik Lee, 1969; Krone, 1963; Fei Xiangjun, 1982; Moliboxino, 1956; allar fengnar úr Hessel, 2002) og gáfu þær niðurstöður á bilinu 1,5–1,8 fyrir μ_{set}/μ . Jafna Do Ik Lee (1969), fengin úr Hessel (2002), gefur gildi nærri miðgildi bilsins og er því gefin hér sem dæmi:

$$\mu_{set}/\mu = (1 - C_{rh})^{-(2.5 + 1.9C_{rh} + 7.7C_{rh}^2)} \quad (17)$$

þar sem C_{rh} er rúmmálshlutfall fastra efna í flæðinu. Við höfum þá

$$\begin{aligned} n_{set}/n &= (v_{set}/v)^{1/9} = \left(\frac{\mu_{set}/\rho_{set}}{\mu/\rho} \right)^{1/9} = \left(\frac{\mu_{set}}{\mu} \frac{\rho}{\rho_{set}} \right)^{1/9} \\ &= \left([1.5, 1.8] \cdot \frac{1000}{[2500, 3000]} \right) = [1.01, 1.04] \end{aligned} \quad (18)$$

Heildaráhrif setframburðar á hlaupin verða því mest aðeins 15% rennslisviðbót og að hámarki 4% hækkun á hrýfisstuðli Manning.

Áhrif ísjaka

Í stórum jökulhlaupum svo sem Kötluhlaupinu 1918 niður Mýrdalssand er þekkt að umtalsvert magn ísjaka getur borist með flóðinu og myndað hrannir sem halda aftur af rennslinu (Haukur Tómasson, 1996; Guðrún Larsen, 2018). Hægt er að taka tillit til áhrifa þessara jakahranna í straumfræðilegu líkanreikningunum með mismunandi nálgunum. Í líkanreikningum Vatnaskila vegna mögulegs flæðis að Vík í Mýrdal í Kötluhlaupum er jakastífla sem lokar hluta ákveðinna rennslisþversniða mynduð með því að breyta undirliggjandi landhæðarlíkani (Helgi Gunnar Gunnarsson o.fl., 2018). Slíkt krefst greiningar á því hvar líklegt er að jakastíflur myndist og hvar áhrif þeirra gætu verið mest. Önnur aðferð byggir á greiningu Tómasar Jóhannessonar og fleiri (2018) á sambandi viðnámsstuðla í minni jökulhlaupum við viðnámsstuðla í stórum jökulhlaupum þar sem jakahrannir hafa umtalsverð áhrif á rennslid. Hægt er að nýta slíkt samband til að hækka hrýfisstuðul Manning þannig að líkanreikningar lýsi réttu vatnsdýpi og straumhraða í rásum milli jakahranna. Þá má fá fram raunhæft mat á útbreiðslu og framgangi flóða að teknu tilliti til áhrifa jakahranna með því að auka hermt rennslis hlutfallslega til samræmis við hlutfall rennslisþversniðsins sem áætlað er að jakar loki.

Stórhlaup geta brotið upp umtalsverðan hluta jökulsporðsins sem þau brjótast út undan (Haukur Tómasson, 1996). Efri hluti hlaupfarvegarsins niður Sólheimasand er svo talsvert afmarkaður af brekkum og bökkum. Hér er því gert ráð fyrir að jakar fylli upp í helming rennslisþversniðs hlaupsins. Gert er ráð fyrir að ísjakarnir standi upp úr flæðinu og séu jafn breiðir og bilið á milli þeirra (Mynd 27). Til viðbótar er gert ráð fyrir að bilið á milli jaka og þar með breidd þeirra séu jöfn dýpi flæðisins.



Mynd 27. Skýringarmynd af áhrifum jaka (bláir) á flæði jökulhlaups. Ísjakar fylla hálft þversnið rennslisins. Breidd jakanna er jöfn bilinu á milli þeirra, sem enn fremur er jafnt dýpi streymisins.

Þetta er talsvert einfölduð mynd af flæði jökulhlaups á milli óreglulegra brota úr jökulsporðinum en ætti að grípa megináhrif jakahrannanna. Það er einnig ólíklegt að þetta ástand myndist á neðri hluta sandsins þar sem hlaupin dreifa úr sér. Þessari nálgun er þó haldið þar og litið svo á að hún

lýsi frekar svæði með mögulegum hlaupleiðum vegna áhrifa jakahranna á rennsli að svæðinu, heldur en að búast megi við að allt svæðið sé undir í einu.

Markmiðið er að straumfræðilegu líkanreikningarnir gefi rétt vatnsdýpi og réttan straumhraða í bilunum á milli jakanna. Straumhraðanum, v , í rennslinu má lýsa með jöfnu Mannings

$$v = \frac{1}{n} R_H^{2/3} S^{1/2} \quad (19)$$

þar sem n er hrýfisstuðull Manning (lýsandi fyrir viðnám við botn streymisins og hliðar jakanna), R_H er straumgeisli flæðisins og S er halli farvegarins. Þar sem gert er ráð fyrir að dýpi flæðisins, d , sé það sama og bilið á milli jakanna verður

$$R_H = \frac{d^2}{3d} = \frac{d}{3} \quad (20)$$

Höfum því

$$v = \frac{1}{n} \left(\frac{d}{3} \right)^{(2/3)} S^{1/2} \quad (21)$$

Markmiðið er nú að fá fram sama dýpi og straumhraða úr líkanreikningunum, sem ekki vita af jökunum. Landhalli er sá sami í reikningum og í rauninni en við breytum hrýfisstuðlinum. Í reikningum gildir samkvæmt jöfnu Manning að

$$v = \frac{1}{n_b} R_{HEC}^{2/3} S^{1/2} \quad (22)$$

þar sem n_b er breytt gildi hrýfisstuðls Manning sem tekur tillit til jakanna og R_{HEC} er straumgeisli flæðisins í líkanreikningunum. Fyrir streymi þar sem breiddin er mun meiri en dýptin má áætla straumgeisla sem dýpi flæðisins. Við höfum því $R_{HEC} = d$, sem gefur

$$v = \frac{1}{n_b} d^{2/3} S^{1/2} \quad (23)$$

Við getum þá tekið saman jöfnur (21) og (23)

$$\frac{1}{n} \left(\frac{d}{3} \right)^{(2/3)} S^{1/2} = \frac{1}{n_b} d^{2/3} S^{1/2} \Rightarrow \frac{1}{n} \frac{1}{3^{2/3}} = \frac{1}{n_b} \Rightarrow n_b = 3^{2/3} n \Rightarrow n_b \approx 2n \quad (24)$$

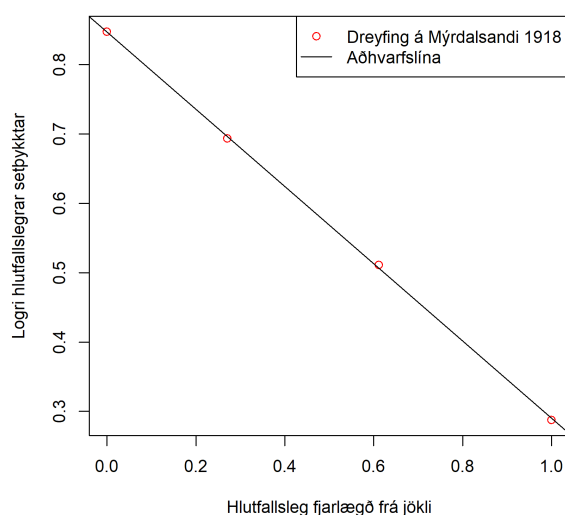
Niðurstöður þessarar margföldunar skila háum viðnámsstuðlum sem eru í samræmi við fyrri vatnafræðilega greiningu á stórhlaupum (mynd 5). Til samanburðar má nefna mat Hauks Tómassonar (1996) fyrir viðnám í Kötluhlaupinu 1918 upp á $0,1 \text{ s/m}^{1/3}$ fyrir 1918 hlaupið, mat Jónasar Elíassonar og fleiri (2007) sem jafngildir u.þ.b. Manning gildum á bilinu $0,05\text{--}0,11 \text{ s/m}^{1/3}$,

og mat Helga Gunnars Gunnarssonar og fleiri (2018) á hrýfisstuðli Manning á bilinu 0,05–0,1 s/m^{1/3} í reikningum á Kötluhlaupum niður Mýrdalssand.

Ljóst er að áhrif jakahranna yfirgnæfa þær breytingar sem gera þarf á hrýfisstuðli Manning sam-anborið við áhrif setframburðar. Þessi áhrif eru tekin saman í breytingum á stuðlinum og gildi hans einfaldlega tvöfaldað. Rennslið í reikningunum er einnig einfaldlega tvöfaldað miðað við það sem gert er ráð fyrir í hverri sviðsmynd vegna þess að ekki flæðir í gegnum jakana. Viðbót við heildarrúmmál flæðisins vegna setframburðar er óveruleg í þessu samhengi.

II Setupphleðsla í jökulhlaupum

Tvö landhæðarlíkön voru útbúin til að kanna áhrif setuppbyggingar á mögulega útbreiðslu hlaupsviðsmynda með $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ og $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli. Í hvoru tilviki fyrir sig er 15% af heildarrúmmáli viðkomandi rennslisrits dreift yfir mesta útbreiðslusvæði viðkomandi hlaupsviðsmyndar og bætt við landhæðina. Viðkomandi rennslissviðsmynd er svo keyrð aftur á uppfærða landhæðarlíkanið. Setinu er ekki dreift jafnt yfir útbreiðslusvæði flóðanna. Stuðst er við dreifingu setuppbyggingar á Mýrdalssandi eftir 1918 Kötluhlaupið (Guðrúnar Larsen, 2018) við ákvörðun á lögun setgeirans. Samkvæmt gögnum sem dregin eru af lögun austari setgeirans á mynd 4.8.3 í skýrslu Guðrúnar Larsen má áætla að lögun setgeirans falli ágætlega að hliðruðu veldisfalli. Setþykktin er þá mest upp við jökul en minnst nærri strönd. Veldisfall sem lýsir hlutfallslegri setdreifingu, y , sem falli af hlutfallslegri fjarlægð frá jökli, x , er felld að gögnunum með línulegri aðhvarfsgreiningu á logra gagnanna (Mynd 28).



Mynd 28. Logri hlutfallslegrar setþykktar sem fall af hlutfallslegri fjarlægð frá jökli. Aðhvarfslína sem felld er að gögnunum er einnig sýnd.

Hlutfallsleg fjarlægð frá jökli er sett sem 0 við jökul en 1 við strönd. Til einföldunar er gert ráð fyrir að setupphleðslan sé 0 við ströndina. Hlutfallslegri setdreifingu er hliðrað um $4/3$ til að gögnin falli betur að veldisfalli, sú hliðrun er því dregin frá aðfellda veldisfallinu. Jafna fallsins er:

$$y = e^{-0.5571x+0.8469} - \frac{4}{3} \quad (25)$$

Til að jafnan lýsi svo raunverulegri setdreifingu er hún sköluð með hámarkssetþykkt við jökuljaðar fyrir hvora sviðsmynd. Hámarkssetþykkt við jaðar, $\Delta_{set_{max}}$, ræðst af heildarmagni setefna,

Tafla 12. Hámarkssetþykkt við jaðar og heildarmagn setefna í sviðsmyndum jökulhlaupa frá Sólheimajökli þar sem 15% af heildarrúmmáli viðkomandi rennslisrits er set.

Hámarksrennsli Sviðsmyndar [m ³ /s]	Heildarrúmmál setefna [10 ⁶ m ³]	Hámarkssetþykkt við jökuljaðar [m]
30.000	24,9	12,5
100.000	67,6	19

V_{max} , og heildi hlutfallslegrar dreifingar yfir útbreiðslusvæði viðkomandi sviðsmyndar. Heildið verður svo að samtölu því gögnin eru á staksettu neti.

$$\Delta_{setmax} = \frac{V_{max}}{\Sigma y} \quad (26)$$

Hámarkssetþykkt við jaðar og heildarmagn setefna fyrir hvora sviðsmynd er gefin í töflu 12.

Með þessu móti má reikna setviðbótina sem leggst við hvern reit landhæðarlíkansins út frá hlutfallslegri fjarlægð hans frá jökuljaðri. Set viðbótin er umtalsverð í báðum tilfellum en ekki óeðli-
leg samanborið við i) uppsöfnun sets upp á mest 6 m við jökuljaðar í mun minna hlaupi 1999 (Andrew Russell o.fl., 2010), ii) uppsöfnun sets á Mýrdalssandi upp á 8 m í Kötluhlaupinu 1918 (Guðrún Larsen, 2018) og iii) tuga metra setupphleðslu í Gígjökulslóninu í hlaupum samfara Eyjafjallajökulsgosinu 2010, þau hlaup voru umtalsvert minni en þau sem eru hermd hér, en lónsvæðið við Gígjökul er setgildra afmörkuð af landslagi (Sigrún Karlsdóttir o.fl., 2012).

Tafla 13. Tímalengd skipulagðra ferða á Sólheimajökul.

Ferðatímar	Meðalferð [klst : mín]	Lengsta ferð [klst : mín]
Uppgefin tími ferðar	3:26	6:30
Svör ferðaðþjónustuaðila		
Að jökli	0:19	0:20
Við jökuljaðar	0:20	0:20
Á jökli	2:06	5:16
Óskilgreindur tími	0:20	0:40
Frá jökli	0:21	0:30
Samtals:	3:26	7:06

III Viðvera ferðafólks

Sólheimajökull (viðverusvæði 1)

Allflestir sem leið sína á Sólheimajökul fara þangað í skipulögðum ferðum ferðaðþjónustuaðila. Leiðsögumenn halda á jökulinn frá kl. 9 á morgnana fram til kl. 18 yfir hásumarið, dvalartími gesta stýrist af því hvaða ferð er valin hverju sinni og er um margar skipulagðar ferðir að velja úr. Tímalengd skipulagðra ferða er tekin saman í töflu 13, flestar ferðir eru 3 til 4 klukkustundir en geta lengst orðið 7 klukkustundir.

Ferðafólk í meðaljöklaferð er um 3 klst. og 26 mínútur í ferðinni, ef við drögum frá ferðatímana til og frá jöklinum, sem og viðverutíma við jökuljaðar þá má gera ráð fyrir 2 klst. og 6 mínútna viðveru á jöklinum. Ef við gerum slíkt hið sama við lengstu ferð, fáum við 5 klst. og 16 mínútna viðveru á jöklinum.

Sólheimajökull við jökuljaðar (viðversuvæði 2)

Viðvera við jökuljaðar er um 20 mínútur fyrir þá sem fara í skipulagðar ferðir upp á jökulinn, það er tími þar sem farið er í mannbrodda og rætt um hættur á jöklinum. Á niðurleið er líka stoppað þar við og broddar teknir af og er sá tími hluti af óskilgreindum tíma í Töflu 2 og leggst sá tími við dvalartíma við jökuljaðar. Einn ferðaðþjónustuaðili býður upp á kayak ferðir á lóninu fyrir framan jökulsporðinn, þær eru 2 og hálf klukkustund og þar af er viðvera við jökuljaðarinn um 1 klukkustund og 52 mínútur. Ferðamenn sem koma á eigin vegum og ganga stíginn stoppa einnig við jökulsporðinn og virða fyrir sér útsýnið og lónið, taka myndir o.s.frv., sú viðvera var metin um klukkustund.

Til að reikna út meðalviðveru við jaðar Sólheimajökuls fyrir alla hópa er stuðst við áður nefnt mat á hlutfalli ferðafólks sem fer í skipulagðar ferðir á jökulinn ásamt greiningu á fjölda skipulagðra ferða yfir daginn. Þá er reiknað með að 30% dvelji í 40 mínútur við jökuljaðarinn, 63% dvelji í klukkustund og 7% dvelji í 1 klukkustund og 52 mínútur. Það var metið að hlutfall ferðamanna í kayak ferðum gæti mest náð 7% allra ferðamanna á svæðinu. Þá reiknast meðal viðveran við jökuljaðar 58 mínútur, mesta viðvera frá sömu forsendum reiknast 1 klukkustund og 7 mínútur.

Tafla 14. Viðvera á Þjóðvegi 1 á hættusvæðum vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli.

Þjóðvegur	Lengd [m]	Hraði [km/klst]	Tími [klst:mín:sek]
Akstur við brú	981	50	00:01:11
Akstur við bifreiðastæði að Super DC-3	200	70	00:00:10
Annar akstur á þjóðvegi innan svæðis:	3308	90	00:02:12
Samtals:	4489		00:02:33

Gangstígur að Sólheimajökli (viðverusvæði 3)

Gangstígurinn að Sólheimajökli er um 1 km langur. Miðað var við að ferðamaður gangi stíginn á 3 km/klst hraða, þá tekur það hann rúma 21 mínútu að ganga stíginn, það helst í hendur við uppgefin tíma ferðapjónustuaðila sbr. töflu 13. Ferðamaður gengur stíginn fram og til baka er því með viðveru upp á 43 mínútur.

Þjónustusvæði (viðverusvæði 4)

Viðvera á þjónustusvæðinu er metin 30 mínútur við að fara í og úr bifreið, leggja borða nesti og eða veitingar á staðnum.

Sólheimajökulsvegur (viðverusvæði 5)

Sólheimajökulsvegur er um 4,3 km langur, gert er ráð fyrir því að fólk keyri hann á um 50 km/klst. Hraðinn er lækkaður frá hámarkshraða þar sem gert er ráð fyrir að fólk hægi á sér fyrir gatnamótin að þjóðveginum sem og aðkomu að þjónustusvæðinu. Einnig er vegurinn talsvert hlykkjóttur og erfitt að halda fullum hámarkshraða á löngum köflum á leiðinni. Miðað við þennan hraða þá reiknast viðveran á Sólheimajökulsvegi, 5 mínútur og 10 sekúndur aðra leiðina, sem þá margfaldast með tveimur og er því heildarviðveran á sólheimajökulsvegi rúmlega 10 mínútur.

Þjóðvegur 1 (viðverusvæði 6)

Viðverutími á Þjóðvegi 1 er miðaður við akstursðátíma (tafla 14). Gert er ráð fyrir að fólk aki á hámarkshraða vega en hægi á sér niður í 50 km/klst við brúnna auk þess sem dregið er úr hraða við aðkomu að bifreiðastæðinu við flugvélaflakið sunnan þjóðveggar. Heildarviðvera einstaklings er því tæpar 3 mínútur.

Bifreiðastæði að flugvélaflaki (viðverusvæði 7)

Viðvera á bifreiðastæðinu er metin 30 mínútur við að fara í og úr bifreið, leggja borða nesti og eða veitingar á staðnum.

Gangstígur að flugvélaflaki (viðverusvæði 8)

Viðverutími fólks er mismunandi eftir því hvort fólk kýs að ganga eða ferðast með rútubifreið ferðapjónustuaðila. Í töflu 15 eru sett fram 2 dæmi, þar af eitt með rútuferð en annað miðað

Tafla 15. Ferðatími um Sólheimasand, eftir gangstíg að flugvélaflaki.

Sandur	Rútuferð [klst:mín:sek]	Göngufólk [klst:mín:sek]
Að svæði	00:10:00	01:07:05
Á svæði	01:00:00	01:00:00
Frá svæði	00:10:00	01:07:05
Samtals:	01:20:00	03:14:10

við göngufólk, miðað er við að fólk gangi á hraðanum 3 km/klst. Fyrir göngufólk, tekur ferðin að flugvélaflakinu rúma klukkustund og aðra rúma klukkustund til baka. Þá reiknast viðveran á gangstígnum 2 klukkustundir og 14 mínútur. Kjósi ferðafólk að taka rútu er metið að hver ferð eftir stígnum taki um 10 mínútur og heildarviðveran á stígnum verði því um 20 mínútur.

Flugvélaflak Douglas Super DC-3 (viðverusvæði 9)

Reiknað er með að fólk dvelji á svæðinu í um 1 klukkustund, óháð því hvort það gangi eða taki þangað rútu, eins og sýnt var í töflu 15 hér fyrir ofan.

Tafla 16. Skipting tímabila við greiningu á fjölda ferðafólks á hættusvæðum vegna jökulhlaupa frá Sólheimajökli.

Tímabil	ISO vikur	2018	2019
Síðla vetrar	8–15	19. febrúar–15. apríl	18. febrúar–14. apríl
Vetrarlok	16–22	16. apríl – 3. júní	15. apríl – 2. júní
Vor	23–27	4. júní – 8. júlí	3. júní – 7. júlí
Háönn	28–32	9. júlí – 12. ágúst	8. júlí – 11. ágúst
Haust	33–37	13. ágúst – 16. september	12. ágúst – 15. september
Framan af vetri	38–43	17. september – 28. október	16. september – 27. október
Hávetur*	44–7	29. október – 17. febrúar	28. október – 16. febrúar

* Nær fram yfir 7. viku næsta árs.

IV Fjöldi ferðafólks

Leitast var við að gefa mynd af dreifingu á fjölda ferðafólks yfir árið á ólíkum svæðum. Þá er dreginn fram heildar-, meðal- og mesti fjöldi ferðafólks eftir skilgreindum tímabilum. Tímabilin eru ákvörðuð út frá ISO vikum að fyrirmynd Rögnavalda Ólafssonar og Gyðu Þórhallsdóttur (2015). Í töflu 16 má sjá skilgreind tímabil og tekin eru dæmi um upphafs og endadagsetningar hvers tímabils árin 2018 og 2019 til glöggvunar.

Dreifing ferðafólks yfir sólarhringinn er einnig sett fram til að gefa betri heildarmynd af ferðum um svæðið. Fyrir viðverusvæði 1–6 reyndist það unnt með klukkustunda mælingum, en ekki reyndist mögulegt að meta sólarhringsdreifinguna á svæðum 7–9 (sjá mynd, 6). Þar má að vissu leyti gera ráð fyrir að meginþorri ferðafólks ferðist um svæðið í dagsbirtu, en samkvæmt samtali við landeigendur er fólk á eigin vegum oft á ferðinni þar eftir myrkur, bifreiðastæðið sé að auki vinsælt hjá leigjendum minni hús- og sendibifreiða og oftar en ekki hafi einhverjir þeirra nærursetu þar (Benedikt Bragason, samtal).

Sólheimajökull

Fjöldi ferðafólks sem fer á Sólheimajökli í jöklagöngur eða ísklifur, er metin tæpur þriðjungur allra þeirra sem fara norður Sólheimajökulsveg, það gera 94.852 manns árið 2018.

Dreifingu fólks yfir árið má sjá þegar við setjum gögnin fram eftir tímabilum (tafla 17). Þar er meðalfjöldi ferðafólks á tímabili sett fram ásamt hæsta melda dagsgildi hvers tímabils. Heildarfjöldi á tímabili er einnig tilgreindur, sem sagt allt ferðafólk sem kom á svæðið á tímabilinu, en minnt er á að tímabilin skarast ekki um áramót. Í töflu 17 má sjá að frá vori fram á haust fara eru yfir 370 manns á jökulísnum á meðaldeg. Mesti fjöldi ferðafólks sýnir að yfir 500 manns eru á jöklinum þegar mest lætur.

Dreifing ferðafólks yfir sólarhringinn á jöklinum stýrist fyrst og fremst af tveimur þáttum, tímaáætlunum ferðapjónustuaðila og af dagsbirtu. Ferðapjónustuaðilar halda á jökulinn frá kl. 9 á morgnana fram til kl. 18 yfir hásumarið. Aukin dagsbirta yfir sumartímann gerir fólki kleift

Tafla 17. Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæði 1 í áhættumati fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli, eftir tímabilum 2018. Heimild: Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir, 2019.

Tímabil	Meðalfjöldi á dag	Mesti fjöldi á dag	Heildarfjöldi á tímabili
Síðla vetrar	210	369	11.768
Vetrarlok	260	395	12.741
Vor	372	490	13.028
Háönn	426	512	14.917
Haust	421	503	14.739
Framan af vetri	296	396	12.434
Hávetur*	123	246	13.802

*2017–2018

að stunda útivist lengur yfir hásumarið, nánari dreifingu yfir háönn og hávetur má sjá í næsta undirkafla (mynd 29).

Sólheimajökull jökuljaðar, gangstígur að Sólheimajökli, Þjónustusvæðið og Sólheimajökulsvegur.

Mun hærra hlutfall ferðast að jaðri Sólheimajökuls, eftir gangstígnum að Sólheimajökli (um 94%), sem sagt allir þeir sem fara í útsýnisgöngu frá Þjónustusvæðinu auk þeirra sem eru í skipulögðum ferðum á jöklinum. Sá heildarfjöldi reiknast 295.094 manns, árið 2018. Allir þeir sem ferðast norður Sólheimajökulsveg koma inn á Þjónustusvæðið, heildarfjöldi yfir árið fyrir Þjónustusvæðið og Sólheimajökulsveg verður því sá sami. Fjöldinn er reiknaður beint út frá kvörðuðum bifreiðatalningum. Um er að ræða áðurnefnt ferðafólk, svo bætast við þeir sem koma á svæðið en ferðast ekki um það (um 6%), heildartalan 2018 er semsagt 315.382 einstaklingar.

Í töflum 18 og 19 eru teknar saman tölur um meðal- og mesta fjölda ferðafólks á dag eftir tímabilum, ásamt heildarfjölda hvers tímabils eftir viðverusvæðum. Tafla 18 á við fjölda ferðafólks við jaðar Sólheimajökuls, sem og þá sem ganga eftir stígnum, viðverusvæði 2–3. Tafla 19 á við alla sem aka Sólheimajökulsveg og alla sem dvelja á Þjónustusvæðinu, viðverusvæði 4–5. Að meðaltali fara um að um 1300 að jökuljaðri á hverjum sumardeggi og um 100 fleiri koma á Þjónustusvæðið um Sólheimajökulsveg, en mest hafa um 1700 manns verið þar árið 2018.

Dreifing fólks yfir sólahringinn yfir háönn og hávetur sýnir vel hvenær flestir eru á svæðinu (mynd 29). Um sumarið fer fólk að tínast á svæðið um og eftir kl. 7 á morgnanna, flestir eru þar milli kl. 13 og 17, en allflestir eru farnir milli kl. 21 og 23. Um hávetur fer fólk á svæðið eftir kl. 8 og flestir eru þar milli kl. 11 og 17. Eiginlega allir eru farnir eftir kl. 18.

Þjóðvegur 1

Vegagerðin hefur frá árinu 1975 verið með skipulagða umferðatalningu á vegum landsins og rekur nú um 280 fasta talningastaði, ásamt skynditalningum (Vegagerðin, á.á.). Gögn frá Vegagerðinni eru nýtt til að meta viðveru fólks á Þjóðveginum, viðverusvæði 6. Annar kvörðunarfasti

Tafla 18. Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæðum 2–3 í áhættumati fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli, eftir tímabilum 2018. Heimild: Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir, 2019.

Tímabil	Meðalfjöldi á dag	Mesti fjöldi á dag	Heildarfjöldi á tímabili
Síðla vetrar	654	1.148	36.613
Vetrarlok	809	1.228	39.638
Vor	1.158	1.525	40.533
Háönn	1.326	1.592	46.409
Haust	1.310	1.564	45.855
Framan af vetri	921	1.232	38.684
Hávetur*	383	764	42.940

*2017–2018

Tafla 19. Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæðum 4–5 í áhættumati fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli, eftir tímabilum 2018. Heimild: Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir, 2019.

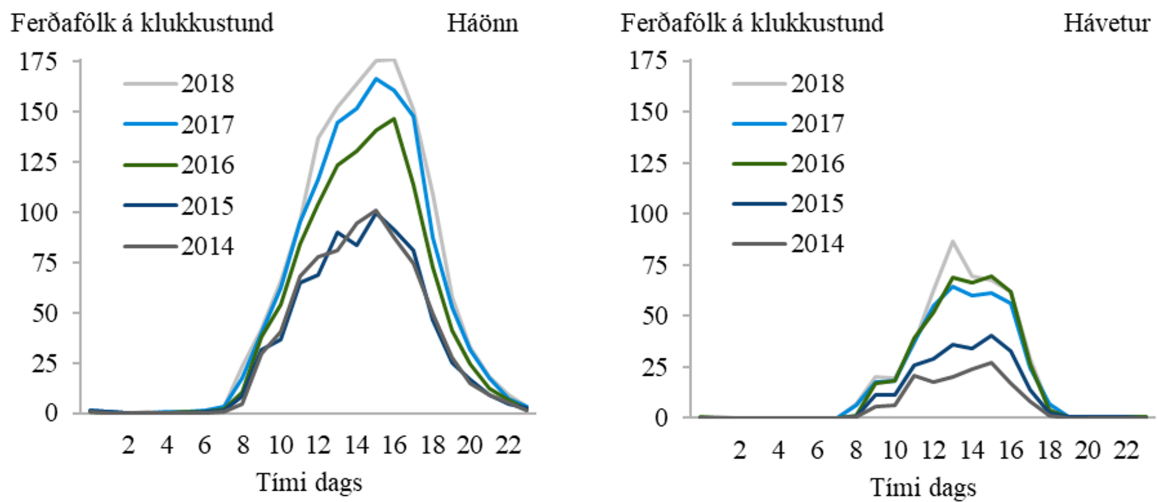
Tímabil	Meðalfjöldi á dag	Mesti fjöldi á dag	Heildarfjöldi á tímabili
Síðla vetrar	699	1.227	39.130
Vetrarlok	865	1.312	42.363
Vor	1.238	1.629	43.319
Háönn	1.417	1.701	49.600
Haust	1.400	1.672	49.007
Framan af vetri	984	1.316	41.343
Hávetur*	410	817	45.892

*2017–2018

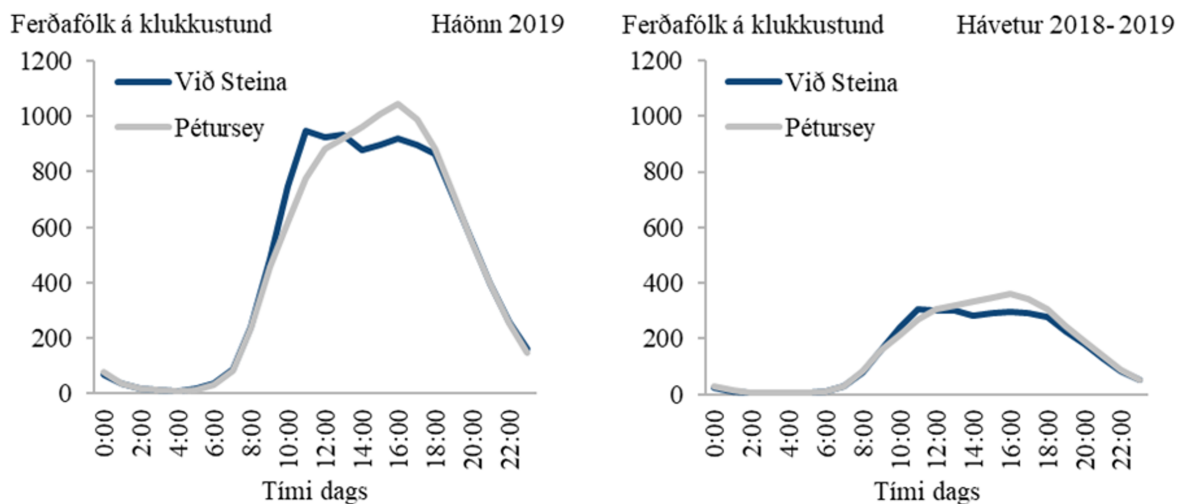
er notaður til þess að meta fjölda fólks út frá hverri bifreið. Heildarfjöldi yfir árið 2018 er metinn út frá báðum talningarstöðum, sitthvoru megin við rannsóknarsvæðið, talningar frá báðum stöðum eru lagðar saman og deilt í þær með 2, gögn vantar fyrir júní og júlí fyrir Steina undir Eyjafjöllum og er því aðeins notast við gögn frá Pétursey þá mánuði til að meta heildarfjöldann 2018, hann reiknast þá 2.817.225 einstaklingar yfir árið.

Ef við skoðum dreifinguna eftir tímabilum (tafla 20) má sjá að rúmlega helmingi fleiri ferðast um svæðið yfir hásumarið borið saman við háveturinn.

Dreifing fólks yfir sólarhringinn er svipuð yfir háönn og hávetur þ.e. lítill munur er á ferðamynstri milli árstíða (mynd 30). Fólk kemur á svæðið yfir daginn frá kl. 7 og umferðin dregst saman kl 23. um kvöldið. Flestir ferðast um svæðið milli kl. 10 og 18.



Mynd 29. Meðalfjöldi ferðafólks á klukkustund á viðverusvæðum 1–5 í áhættumati fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli. Háönn til vinstri, hávetur til hægri. Heimild: Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir, 2019.



Mynd 30. Meðalfjöldi ferðafólks á klukkustund á þjóðvegi 1, viðverusvæði 6 í áhættumati fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli. Háönn til vinstri, hávetur til hægri. Heimild: Vegagerðin, 2019.

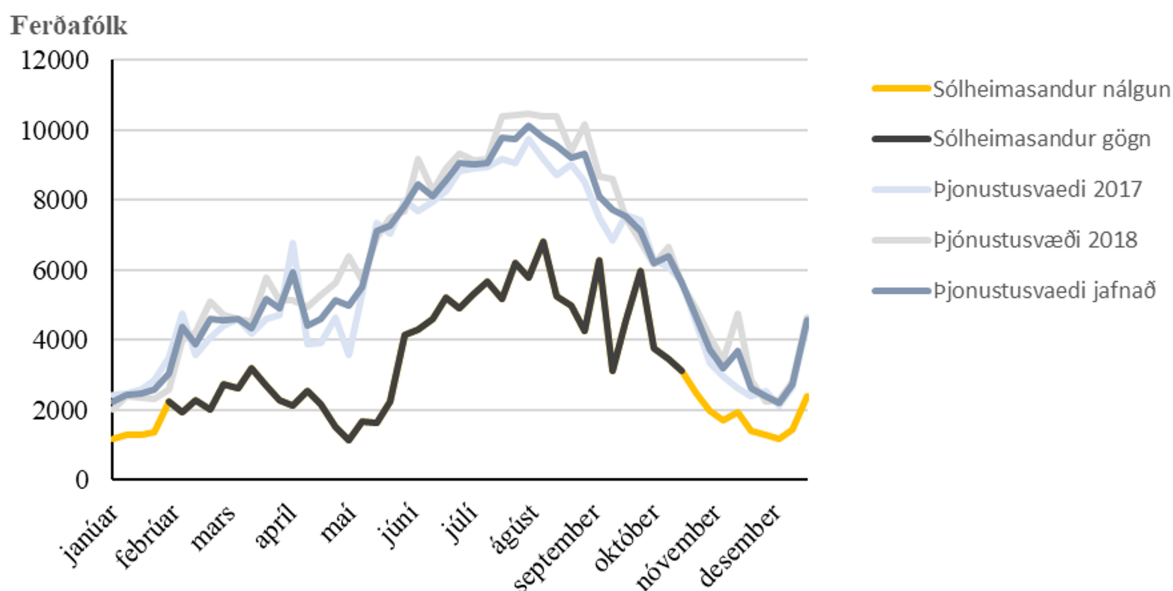
Tafla 20. Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæði 6 í áhættumati fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli, eftir tímabilum 2018. Heimild: Rögnvaldur Ólafsson og Gyða Þórhallsdóttir, 2019.

Tímabil	Meðalfjöldi á dag	Mesti fjöldi á dag	Heildarfjöldi á tímabili
Síðla vetrar	6.782	11.229	379.770
Vetrarlok	7.117	9.891	348.728
Vor*	9.358	12.381	327.528
Háönn*	11.103	13.329	388.596
Haust	11.487	13.002	402.060
Framan af vetri	8.879	11.418	372.936
Hávetur	4.754	7.665	496.455

*Gögn frá 2019

Bifreiðastæði, gangstígur að flugvélaflaki og flugvélaflakið.

Heildarfjöldi ferðafólks fyrir viðverusvæði 7–9 er metinn fyrir allt árið 2019 með gögnum frá Benedikt Bragasoni (2019). Gögnin um fjölda rútufarþega eru sköluð upp og í þeirri úrvinnslu er metið að 10% nýti rútuna yfir sumartímann, en um 20% yfir vetrartímann. Gagnasafnið nær ekki yfir háveturinn. Til þess að fá heildarfjölda yfir allt árið eru gögnin nálgðuð að dreifingu ferðafólks á Sólheimajökli, en ákveðið samræmi má greina milli ferðamannafjölda þar og á Sólheimasandi (mynd 31). Með þessari nálgun reiknast heildarfjöldinn 161.456 einstaklingar yfir árið 2019. Sami fjöldi er notaður fyrir þessi 3 viðverusvæði.



Mynd 31. Nálgun gagna um fjölda ferðafólks á Sólheimasandi vegna áhættumats fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli.

Tafla 21. Áætlaður fjöldi ferðafólks á viðverusvæðum 7–9 í áhættumati fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli, eftir tímabilum. Heimild: Benedikt Bragason, 2019.

Tímabil	Meðalfjöldi á dag	Mesti fjöldi á dag	Heildarfjöldi á tímabili
Síðla vetrar	355	710	19.860
Vetrarlok	263	405	12.865
Vor	661	1.190	23.130
Háönn	804	1.180	28.150
Haust	787	1.220	27.540
Framan af vetri	570	1.295	23.950

Til þess að gefa mynd af dreifingu ferðafólks yfir árið er í töflu 21 tekinn saman metin fjöldi ferðafólks sem ferðast niður Sólheimasand til að skoða flugvélaflakið eftir tímabilum. Fjöldinn er áætlaður út frá dagsgildum. Ekki er gerð tilraun til að nálgast gögn hér fyrir hávetur. Þar má sjá að yfir hásumarið eru u.þ.b. 800 manns á svæðinu á Háönn, en fer hæst í um 1200 manns. Jafnframt má greina talsverðan árstíðamun.

Dreifing fólks yfir sólarhringinn er ókunn á Sólheimasandi en gert er ráð fyrir því að hún sé svipuð og á öðrum svæðum, þ.e. að langflest ferðafólk ferðist að flugvélaflakinu yfir daginn, milli kl. 8 og 18.

V Val á stuðlum í aðferðafræði DEFRA

Í aðferðafræði DEFRA þarf að meta gildi fimm stuðla, sjá nánar kafla 3.2 og 3.3. Hér er farið yfir hverjir þeir eru og rök fyrir vali á líklegu bili sem búast má við að þeir liggi á, sjá töflu 22. Í öllum tilfellum eru reikningarnir framkvæmdir fyrir efri og neðri mörk líklegs bils hvers stuðuls, til þess að taka tillit til mögulegrar óvissu í stuðlasetningunni.

DF, Magn braks Stuðull sem lýsir magni lausagrjóts, ísjaka, braks og annars efnis í flóðinu. Stuðullinn tekur gildi á bilinu 0 til 1 eftir því hversu mikið er af slíku í flóðvatninu. Magn jaka í jökulhlaupum getur verið mjög misjafnt eftir því hversu mikið af ís brotnar úr jökulsporðinum. Sé magnið mikið er eðlilegt að velja þennan stuðul 1. Sé framburður aftur á móti lítill og ekki mikill jakaburður auk þess sem ekki er mikið á svæðinu af trjám eða öðru, sem gæti orðið að braki, gæti stuðullinn einnig tekið gildið núll.

AV, Rishraði Stuðull sem ræðst af viðbúnum rishraða mögulegra flóða. Stuðullinn tekur gildið: 3 sé rishraði undir 1 klst., 2 sé rishraði um klst. en 1 sé hann umtalsvert meiri heldur en ein klukkustund. Fyrir þær sviðsmyndir sem eru kannaðar hér (sjá kafla 3.1) er rishraði í öllum tilfellum undir 1 klst. nærri jökli. Lengra frá er óvissa meiri og hlaupin geta verið lengur að rísa. Vegna þessa er notast við gildi á bilinu 2–3 fyrir ofan þjóðveg en 1–3 neðan við þjóðveg.

AV, Svæðisbundnir eiginleikar Stuðull sem lýsir svæðisbundnum eiginleikum svo sem hvort á svæðinu séu áhættusamir staðir þar sem erfitt er að leita skjóls, svo sem fjölfarnir vegir og tjaldstæði eða hvort á svæðinu séu margra hæða traustbyggðar byggingar sem búast megi við að standist flóð. Stuðullinn fær gildið 3 fyrir viðkvæm svæði en 1 fyrir öruggari svæði. Á öllum viðverusvæðunum er lítið um skjól og byggingar sem búast má við að gætu staðist flóð. Gámahús á þjónustusvæðinu er eina mögulega undantekningin, þó að líklega sé réttast að flokka það sem sumarhús á áhættusömu svæði. Öllum viðverusvæðum er því gefið gildið 3, fyrir utan þjónustusvæðið en þar er notast við bilið 2–3.

AV, Mat á viðvörunarkerfi Stuðull sem lýsir gæðum viðvörunarkerfis á svæðinu. Stuðullinn tekur gildi á bilinu 1 til 3. Einn jafngildir áreiðanlegu viðvörunarkerfi ásamt neyðaráætlunum en 3 er fyrir svæði án viðvörunarkerfis. Sé horft fram hjá GPS og jarðskjálfta mælingum á jarðhræringum í kringum Kötlu er eina viðvörunarkerfið sem nú er rekið við Sólheimajökul sí tengdur rafleiðni- og vatnshæðarmælir á brúnni á þjóðvegi 1 yfir Jökulsá á Sólheimasandi (Sverrir Elefsen o.fl., 2002). Viðvaranir fyrir svæðið ofan brúar eru því litlar. Viðverusvæðum þar er því gefin gildi á bilinu 2 til 3. Neðan brúar má búast við að mögulega sé hægt að gefa viðvörun ef hlaup er hafið og gildunum því leyft að fara niður í 1, þó að það sé líklega talsvert bjartsýnt. Til viðmiðunar má nefna að fá svæði á Englandi fá gildi undir 2 (DEFRA, 2006a). Valdi jarðhræringar umtalsverðum fyrirboða fyrir jökulhlaupi, sem gefur góðan tíma til rýminga, er myndin önnur eins og rætt er í kafla 5.

PV, Tjónnæmi fólks Stuðull sem er hér metinn út frá á hlutfalli fólks á svæðinu sem gæti átt í vandræðum með að forða sér en er ekki einskorðaður við aldur og hlutfall hreyfihamlaðra líkt og upphaflega í aðferðafræði DEFRA. Búast má við að hluti ferðafólks sé ókunnugt ójöfnu undirlagi og grófu landslagi líkt og finna má á mörgum viðverusvæðanna við Sólheimajökul. Þessi hópur og leiðsögumenn hans verða því hægari í förum og viðkvæmari

Tafla 22. Gildi stuðla sem meta þarf fyrir áhættu jöfnur DEFRA. Viðverusvæði í áhættumati fyrir jökulhlaup frá Sólheimajökli.

Viðveru- svæði	<i>DF</i>	<i>AV</i> rishraði	<i>AV</i> svæðisgerð	<i>AV</i> viðvörðun	<i>PV</i>
1	0–1	2–3	3	2–3	0,03–0,3
2	0–1	2–3	3	2–3	0,03–0,3
3	0–1	2–3	3	2–3	0,03–0,3
4	0–1	2–3	2–3	2–3	0,02–0,2
5	0–1	2–3	3	1–3	0,02–0,2
6	0–1	2–3	3	1–3	0,02–0,2
7	0–1	1–3	3	1–3	0,02–0,2
8	0–1	1–3	3	1–3	0,02–0,2
9	0–1	1–3	3	1–3	0,02–0,2

fyrir flóðahættu. Erfitt er að leggja mat á þetta hlutfall og stærðargráðu bil er því notað til þess að taka tillit til óvissunnar sem af því ræðst. Gert er ráð fyrir að landslag á göngustígnum, við jökuljaðar og á jöklinum sjálfum sé heldur erfiðara yfirferðar en á þjónustusvæðinu og vegum þar fyrir neðan. Athugið að þó að göngustígurinn frá þjónustusvæðinu og að jökli sé sjálfur frekar auðveldur yfirferðar getur verið torvelt að ganga upp brekkuna þvert á stíginn.