

Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá

Hermun flóðasviðsmynda



Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá

Hermun flóðasviðsmynda

Emmanuel Pagneux, Matthías Á. Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Bogi B. Björnsson,
Davíð Egilson og Matthew J. Roberts

Lykilsíða

Skýrsla nr. VÍ 2018-008	Dags. Júlí 2018	ISSN: 1670-8261	Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Hermun flóðasviðsmynda		Upplag: 25 Fjöldi síðna: 32 Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir	
Höfundar: Emmanuel Pagneux, Matthías Ásgeir Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Bogi Brynjar Björnsson, Davíð Egilson og Matthew J. Roberts		Verkefnisstjóri: Matthew J. Roberts Verknúmer: 3721-0-0006	
Gerð skýrslu/verkstig: Lokaskýrsla		Málsnúmer: 2016-134	
Unnið fyrir: Ofanflóðasjóð			
Samvinnuaðilar:			
Útdráttur: Í þessu riti er gerð grein fyrir niðurstöðum mats í Skaftá á útbreiðslu einstakra líkanreiknaðra jökulhlaupa úr Skaftárkötlum. Hermdar voru sviðsmyndir sem nema 50% og 100% hækkun hámarksrennslis hlaupsins haustið 2015 við jaðar Skaftárjökuls. Líkanreikningarnir miða við að hlaupvatn allt kæmi fram í Skaftá, undan jökli við Skaftárbotna Vestari. Geoclaw straumfræðilíkan og ArcticDEM landlíkan voru notuð við hermun hlaupanna. Tölur um útbreiðslu, flóðadýpi, vatnshæðir, flóðahraða, tjónmættisstuðul og staðsetningu straumfalds flóðasviðsmynda voru reiknaðar á 30 mínútna fresti og skrifaðar á reglulegu reiknineti með 10 m upplausn. Ferðatímar flóða, hámarksrennslis og uppsafnað rennslis voru reiknuð út á lykilstöðum.			
Lykilorð: Skaftárhlaup, flóðasviðsmyndir, útbreiðsla, tjónmætti, straumfræðilíkan, ArcticDEM, Geoclaw		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs:  Undirskrift verkefnisstjóra:  Yfirfarið af: Sigurlaug Gunnlaugsdóttir, Njáll Fannar Reynisson, Jón Kristinn Helgason	

Efnisyfirlit

Myndaskrá.....	6
Töfluskrá.....	6
Ágrip	7
Abstract.....	7
1 Inngangur	9
2 Aðferðir.....	10
2.1 Straumfræðilíkan.....	10
2.1.1 Kostir.....	10
2.1.2 Takmarkanir	10
2.2 Landlíkan	11
2.3 Sviðsmyndir	11
2.3.1 Úthlaupssvæði.....	11
2.3.2 Stærð hlaupa.....	11
2.3.3 Vatnsrit.....	13
2.3.4 Manning hrýfisstuðull	14
2.3.5 Írennsli	15
2.4 Greining á tjónmætti flóðvatns	16
2.5 Úttaksgögn	16
3 Helstu niðurstöður.....	18
3.1 Útbreiðsla.....	18
3.2 Vatnshæð.....	18
3.3 Vatnsmagn	18
3.4 Hámarksrennsli	19
3.5 Flóðferðatímar.....	19
3.6 Afleiðingar	19
4 Lokaorð	29
5 Þakkir	30
6 Heimildir	30

Myndaskrá

Mynd 1. Skaftárkatlar og leið jökulhlaups í Skaftá undir jökli	9
Mynd 2. Úthlaupssvæði (rauða lína) við jaðar Skaftárjökuls.....	12
Mynd 3. Mælt hámarksrennsli Skaftárhlaupa við Sveinstind.....	12
Mynd 4. Stuðull fyrir ris- og falltíma flóðasviðsmynda.....	13
Mynd 5. Vatnsrit sviðsmynda við jaðar Skaftárjökuls.....	14
Mynd 6. Reiknistaðir rennslis og ferðatíma hlaupa.....	17
Mynd 7. Útbreiðsla hlaupvatns á hálendi	20
Mynd 8. Útbreiðsla hlaupvatns í byggð	21
Mynd 9. Aukin vatnshæð, í metrum, miðað við ástand í hlaupi haustið 2015.....	22
Mynd 10. Dreifing hlaupvatns í % magns sem rennur fram neðan mælis við Skaftárdal.....	22
Mynd 11. Reiknað hámarksrennsli (m ³ /s) frá og með Skaftárdal.	23
Mynd 12. Tjónmætti hlaupa við Skaftárdal.....	25
Mynd 13. Tjónmætti hlaupa við Flögulón.....	26
Mynd 14. Tjónmætti hlaupa við Meðalland.....	27
Mynd 15. Tjónmætti hlaupa við Kirkjubæjarklaustur.....	28

Töfluskrá

Tafla 1. Jökulhlaup skoðuð við gerð vatnsritsstuðuls	13
Tafla 2. Framreikningur ris- og falltíma flóðasviðsmynda	14
Tafla 3. Manningstuðlar sem hafa verið notaðir við fyrri hermanir jökulhlaupa á Íslandi.	15
Tafla 4. Kvarði yfir tjónmætti jökulhlaupa.....	16
Tafla 5. Flóðferðatímar (klst.) við upphaf hlaups.....	23
Tafla 6. Lengd vegakafla sem verða fyrir áhrifum hlaupa	24
Tafla 7. Staðbundið tjónmætti	24

Ágrip

Í þessu riti er gerð grein fyrir niðurstöðum mats í Skaftá á útbreiðslu einstakra líkanreiknaðra jökulhlaupa úr Skaftárkötlum. Hermdar voru sviðsmyndir sem nema 50% og 100% hækkun hámarksrennslis hlaupsins haustið 2015 við jaðar Skaftárjökuls. Líkanreikningarnir miða við að hlaupvatn allt kæmi fram í Skaftá, undan jökli við Skaftárbotna Vestari. Geoclaw straumfræðilíkan og ArcticDEM landlíkan voru notuð við hermun hlaupanna.

Tölur um útbreiðslu, flóðadýpi, vatnshæðir, flóðahraða, tjónmættistuðul og staðsetningu straumfalds flóðasviðsmynda voru reiknaðar á 30 mínútna fresti og skrifaðar á reglulegu reiknineti með 10 m upplausn. Við lok líkanreikninga hverrar sviðsmyndar voru hæstu gildi úttaka vistuð fyrir hvern stakan reit innan svæðisins. Ferðatímar flóða, hámarksrennslis og uppsafnað rennslis voru reiknuð út á lykilstöðum.

Gert var ráð fyrir írennslis í Eldhraunið í nágrenni Ásakvísla. Hins vegar var ekki unnt að herma útbreiðslu flóðvatns í hrauninu austan við Árkvíslar, þar sem flóðvatn hverfur ofan í hraunið. Sviðsmyndirnar sýna því ekki útbreiðslu hlaups sunnan megin við Þjóðveginn, í Tungulæk og Grenlæk.

Abstract

Floods representing 50% and 100% peak discharge increase compared to that of the Autumn 2015 glacial outburst on the Skaftá River were simulated. Floodwater originated from the Skaftá cauldrons and burst out from Skaftárjökull glacier at Skaftárbotna vestari. The simulations were performed using the Geoclaw hydraulic model and ArcticDEM elevation model.

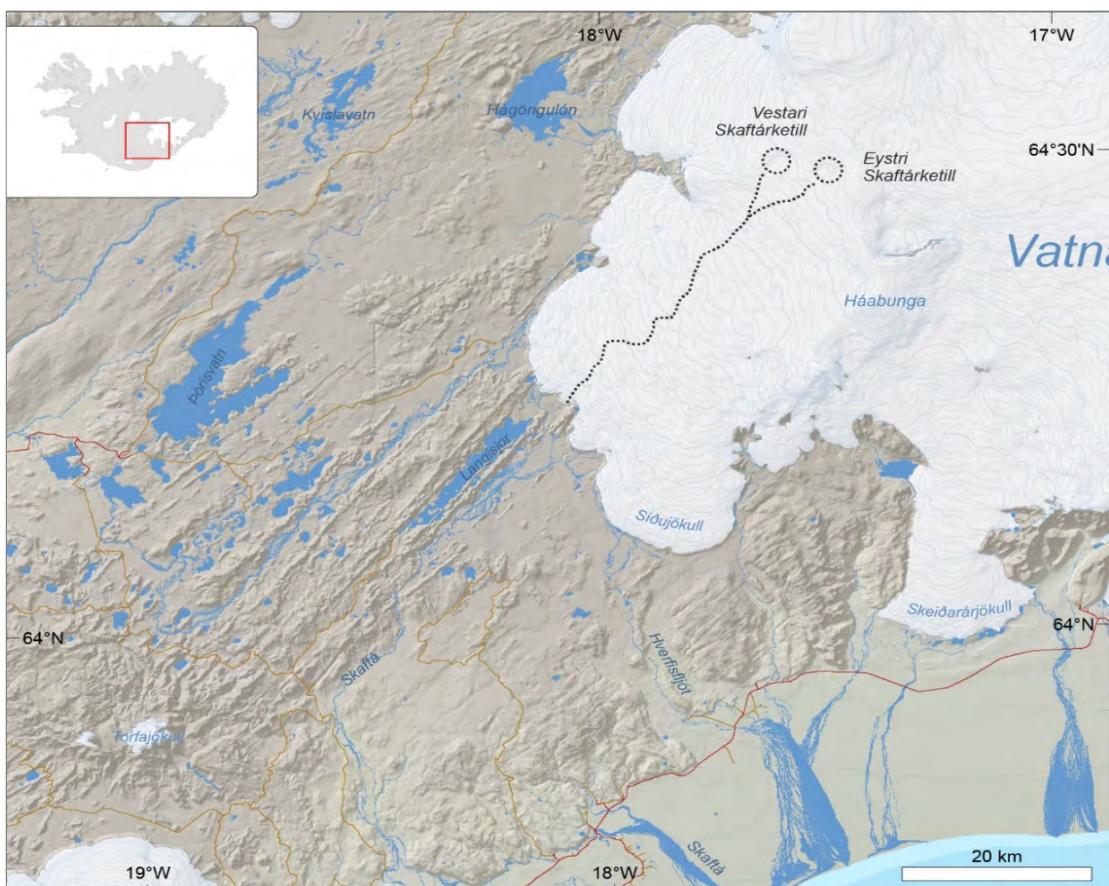
Inundation extent, depths of flooding, water stage, flow velocities, damage potential index, and position of the flood front were extracted at a 30-min interval and written out on a 10-m grid. Flood travel times, peak discharge, and total runoff were estimated at key locations.

Floodwater infiltration in the Eldhraun lava field could be accounted for in the simulations in the vicinity of Ásakvíslar only. Floodwater dispersion through Eldhraun towards Tungulækur and Grenlækur rivers could not be estimated.

1 Inngangur

Skaftárhlaup sem varð um mánaðamótin september/október 2015 var miklu stærra en dæmi eru um og olli tjóni og röskun í byggð og á grónu landi. Þar sem um stærri atburð var að ræða en áður hefur sést og vísbendingar eru um að breytingar væru á mynstri Skaftárhlaupa var ákveðið í samráði við stjórnvöld að framkvæma hættumat vegna Skaftárhlaupa. Megintilgangur slíks hættumats er að gera samfélagið betur í stakk búið til þess að takast á við næstu Skaftárhlaup og draga úr tjóni af þeirra völdum. Vinnan er hluti af verkefni um hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá. Verkefnið er unnið í áfanga II í áætluninni GOSVÁ, heildarhættumat vegna eldgosa á Íslandi.

Í þessu riti er gerð grein fyrir niðurstöðum mats á útbreiðslu einstakra líkanreiknaðra jökulhlaupa í Skaftá sem koma úr Skaftárkötlum (Mynd 1). Skilgreindar voru sviðsmyndir sem byggja á þeirri tilgátu að útbreiðsla hlaupa ráðist fyrst og fremst af hámarksrennslinu. Uppsöfnuð áhrif jökulhlaupa, sérstaklega breytingar í farvegi Skaftár með tímanum vegna setflutninga, eru ekki metin hér. Fjallað er um það atriði í Esther H. Jensen o.fl. (2018).



Mynd 1. Skaftárkatlar og leið jökulhlaups í Skaftá undir jökli. Lengd leiðarinnar milli jaðars Skaftárjökuls og katlanna er 40–43 km. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.

2 Aðferðir

Hér að neðan er raktar í stuttu máli helstu breytur í hermunum jökulhlaupa. Ákveðið var að nota GeoClaw straumfræðilíkan (§ 2.1) og ArcticDEM landlíkan (§ 0) við hermun hlaupanna. Úthlaupssvæði við jaðar jökuls var staðsett miðað við líklegustu rennslisleið hlaupvatns frá Skaftárkötluum (§ 2.3.1). Sett voru fram vatnsrit til að lýsa tímaþróun rennslis undan jökli (§ 2.3.2). Einn Manning hrýfisstuðull var notaður (§ 2.3.4).

2.1 Straumfræðilíkan

Við hermun hlaupa í Skaftá var forritið GeoClaw (Clawpack Development Team, 2017) notað. Líkanið var upprunalega ætlað að herma myndun og útbreiðslu flóðbylgna en hefur einnig verið notað til að herma m.a. stíflubrest (George, 2011) og sjávarflóð (Mandli & Dawson, 2014). Á Íslandi hefur GeoClaw verið notað við hermun á flóðbylgju sem varð í Öskjuvatni árið 2014 eftir að berghlaup gekk út í vatnið (Gylfadóttir o.fl., 2017) og við hermun á sviðsmyndum jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum (Sigríður S. Gylfadóttir o.fl., 2017). Líkanið var endurkvarðað við hermun jökulhlaupsins í Skaftá haustið 2015, en ítarlegri upplýsingar um stillingu og kvörðun líkansins má finna í Matthías Á. Jónsson o.fl. (2018).

2.1.1 Kostir

Forritið GeoClaw var notað við straumfræðilega líkanreikninga í Skaftá þar sem notkun líkansins hafði gefið góða raun í fyrri líkanreikningum á jökulhlaupi í Jökulsá á Fjöllum (Sigríður S. Gylfadóttir o.fl., 2017) og leitast var eftir að nota tvívítt líkan sem gæti gefið raunhæfa nálgun á dreifingu flóðvatns á stórum svæðum sem verða umflotin í flóðum. Kostur GeoClaw felst m.a. í getu líkansins til að flytja vatn eftir alls kyns farvegum og um flatlendi því flæði vatns innan líkansins stjórnast einungis af undirliggjandi landlíkani og hrýfisstuðli Mannings.

2.1.2 Takmarkanir

Með GeoClaw eru jökulhlaup einungis hermd sem yfirborðsflæði, þ.e.a.s. á ógegndræpu yfirborði. Þess vegna gefur hermun hlaupa vafasamar niðurstöður á svæðum þar sem talsvert vatnsmagn síast niður í jarðlögin og rennur fram sem grunnvatn eins og raunin er í Eldhrauni. Niðurstöður GeoClaw líkanreikninganna sem fjallað er um í Matthías Á. Jónsson o.fl. (2018) gefa til kynna að nauðsynlegt sé að lækka hámarksrennsli flóðvatns um $\sim 600 \text{ m}^3/\text{s}$ við upptök til að líkanið gefi rétta útbreiðslu hlaupsins 2015 í nágrenni Ásakvísla. Of mikið rennsli orsakar óeðlilega háa vatnshæð og of mikla flóðhraða sem skila sér í of stuttum flóðferðatímum á láglandinu. Talið er að írennsli niður í hraunin neðan mælistöðvarinnar við Skaftárdal eigi stóran þátt í þessari nauðsynlegu aðgerð (Freysteinn Sigurðsson, 1997; Snorri Zóphóníasson, 1997; Snorri Zóphóníasson, 2015). Þess ber að geta að ekki er heldur tekið tillit til rofs eða framburðar í líkanreikningunum þó að ljóst sé að áhrif þess eru umtalsverð í því rennslismagni sem hér um ræðir.

2.2 Landlíkan

Við hermunina var notuð útgáfa 3.0 af ArcticDEM hæðarlíkaninu. Líkanið nær til alls Norðurheimskautssvæðisins í 2·2 m upplausn, og er unnið upp úr WorldView gervitunglamyndum í samstarfi ýmissa bandarískra aðila (Polar Geospatial Center, 2016). Staðsetningar- og hæðar-nákvæmni gagnanna eftir leiðréttingu er 1m að jafnaði.

Líkanið var lagað að vatnafari á völdum stöðum. Aðlögun fólst einkum í að fjarlægja fyrir-stöður fyrir vatnið í farvegi Skaftár s.s. brýr og lagfæra villur í farveginum líkt og pytti eða hæðir til að tryggja réttan vatnshalla. Til að forðast óstöðugleika í GeoClaw á þeim stöðum þar sem straumhraði er hæstur var þörf á að auka möskvastærð landlíkansins í 10 m. Ítarlegri upplýsingar um það atriði má finna í Matthías Á. Jónsson o.fl. (2018). Gróf áferð sums staðar í líkaninu og notkun 10 m möskvanets gera það að verkum að vegir og varnargarðar sjást ekki alltaf vel. Til þess að dreifing flóðvatns í byggð væri í samræmi við það sem vitað er, þurfti að lagfæra í landlíkaninu varnargarða sem leiða Árkvísar austur til Stóra-Brests og svo Þjóðvegarkafllann sem liggur yfir farveg Ásakvísla.

2.3 Sviðsmyndir

2.3.1 Úthlaupssvæði

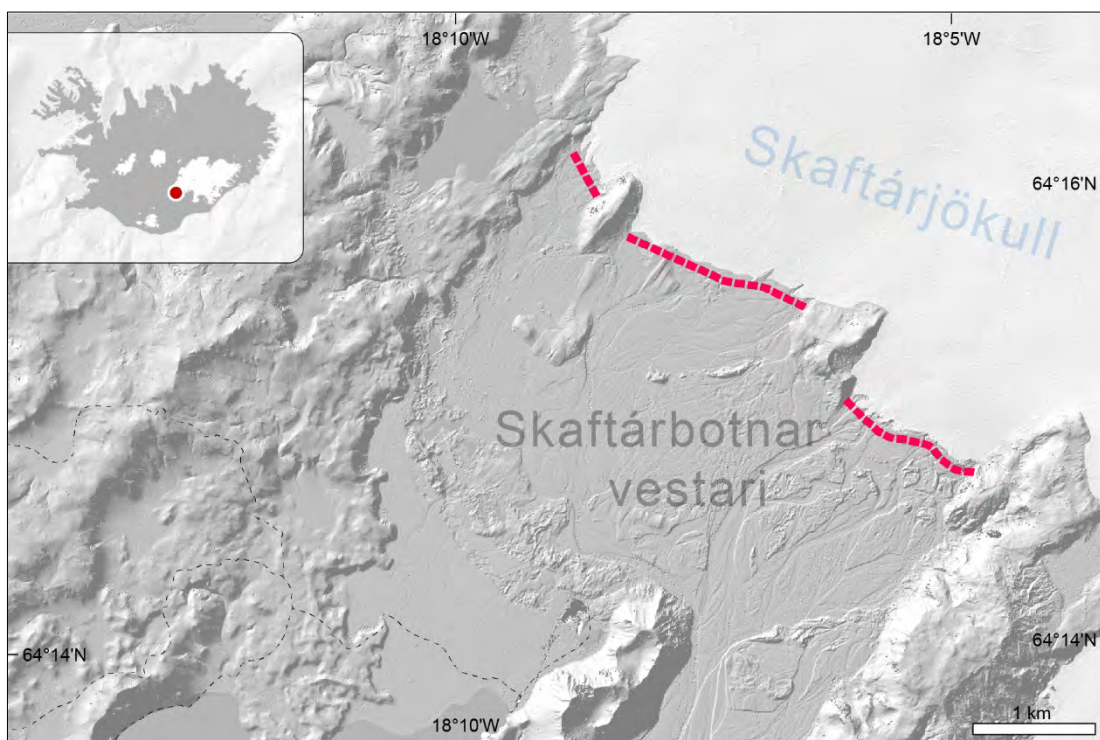
Í reikningunum var gert ráð fyrir að hlaupvatn allt kæmi fram í Skaftá, með útrás við Skaftárbotna Vestari— sandurinn sem liggur milli jaðars Skaftárjökuls og Langasjós (Mynd 2). Samkvæmt Finni Pálssyni o.fl. (2016) er það svæðið þar sem flóðvatn Skaftárhlaupa er líklegast að koma fram undan jökli við núverandi aðstæður. Mest af flóðvatninu í hlaupi haustið 2015 braust fram undan Skaftárjökli á þessu svæði (Emmanuel Pagneux o.fl., 2018). Skipting hlaupsins 1995 í Skaftá, Hverfisfljóti og Djúpa (Snorri Zóphóniásson og Svanur Pálsson, 1996) er talin afleiðing af framgangi Síðujökuls 1994 (Oddur Sigurðsson og Bergur Einarsson, 2005) og er slík dreifing hlaups nú talin ólíkleg vegna þess að aðstæður eru aðrar en fyrstu árin eftir framhlaupið.

2.3.2 Stærð hlaupa

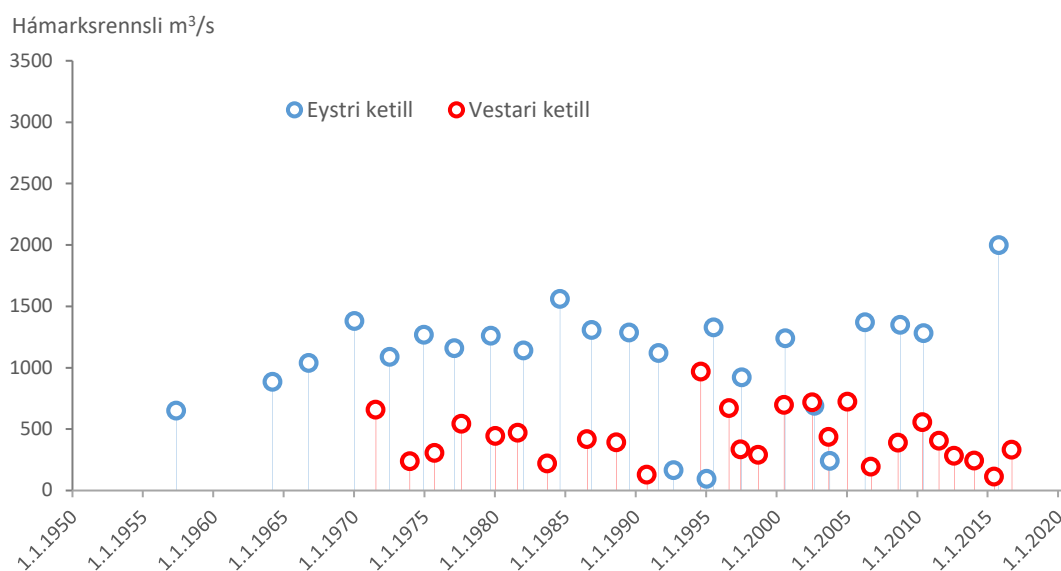
Við val á sviðsmyndum var horft til stærðargráðu á hámarksrennsli hlaupa sem mælst hafa yfir tímabilið 1945–2016 (Mynd 3). Ákveðið var að líkanreikna tvö rennslistilfelli, þ.e. 4500 og 6000 m³/s hámarksrennsli við jaðar Skaftárjökuls:

- 4500 m³/s nemur ~50 % aukningu miðað við stærðargráðu hlaupsins haustið 2015 við jaðar Skaftárjökuls. Hlaupið hefur verið metið tæplega 3000 m³/s samanlagt við Sveinstind¹ og í hliðarfarvegum við Kamba (Matthías Á. Jónsson o.fl., 2018). Gert er ráð fyrir að hámarksrennsli í næsta hlaupi vaxi á móta mikið frá hlaupinu 2015 og sem nemur hlutfallslegri rennslisaukningu 2015 miðað við fyrra hámark. Ef hlaupin fara vaxandi áfram er þetta talinn raunhæfur en fremur svartsýnn möguleiki.
- 6000 m³/s nemur ~100% aukning miðað við stærðargráðu hlaupsins haustið 2015. Gert er ráð fyrir að hámarksrennslið tvöfaldist, sem talið er ólíklegur en hugsanlegur möguleiki og ætlað er að gefa hugmynd um afleiðingar aftakahlaups ef þróunin verður á versta veg.

¹ Vatnshæðarmælir vhm 166.



Mynd 2. Úthlaups svæði (rauða lína) við jaðar Skaftárjökuls sem notað er í hermunum. Mest af flóðvatninu braust undan Skaftárjökli á þessu svæði í hlaupi haustið 2015 (Emmanuel Pagneux o.fl. 2018).



Mynd 3. Mælt hámarksrennsli Skaftárhlaupa við Sveinstind (vatnshæðarmælir vhm 166, án framhjärenslis við Kamba).

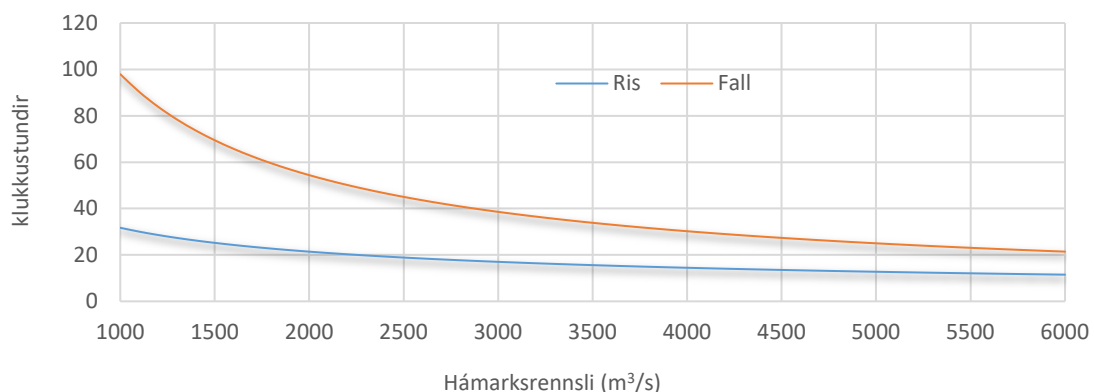
2.3.3 Vatnsrit

Vatnsrit fyrir sviðsmyndirnar tvær voru áætluð með hliðsjón af fyrri flóðum. Beitt var aðhvarfsgreiningu til að meta hvort unnt væri að byggja á rennsli flóðtopps til að ákvarða lengd riss og hnigs flóðferils sviðsmyndanna. Skoðuð voru vatnsrit jökulhlaupa sem höfðu flóðtopp við Sveinstind yfir 600 m³/s (Tafla 1). Niðurstöður aðhvarfsgreiningarinnar gefa til kynna góða fylgni milli a) mesta augnabliksrennslis og lengdar rennslisaukningarinnar ($r^2=0,83$) og b) mesta augnabliksrennslis og lengdar rennslisaukningarinnar ($r^2=0,79$). Útreiknaðar aðfallslínur (Mynd 4) voru notaðar til að ákvarða tímalengd ris og hjöðunar fyrir ofangreindar tvær sviðsmyndir. Á hinn bóginn eru engin tengsl sjáanleg milli þess hve lengi hámarksrennslis er og stærðar þess ($r^2=0,26$). Lengd hámarksflóðtoppsins í öllum sviðsmyndum var því ákveðin sem 5 klst., sem er meðallengd hámarksrennslis hlaupanna yfir 1000 m³/s sem skoðuð voru í greiningunni. Endanleg vatnsrit eru sýnd á Mynd 5.

Tafla 1. Jökulhlaup skoðuð við gerð vatnsritsstuðuls. Hámarksrennslis og tímar eru samkvæmt mælingum við Sveinstind (vatnshæðarmælir vhm 166).

Ár og mánuður	Uppruni*	Hámarksrennslis (m ³ /s)	Ris (kl.)	Hámark (kl.)	Fall (kl.)
2000 08	V	699	32	2	99
2000 08	E	1240	30	3	68
2002 07	V	720	44	4	155
2002 09	E	689	38	4	121
2005 08	V	723	46	3.5	167
2006 04	E	1370	24	6	81
2008 10	E	1350	26	5	88
2010 06	E	1283	27	7	70
2015 10	E	2000	24	4.5	56

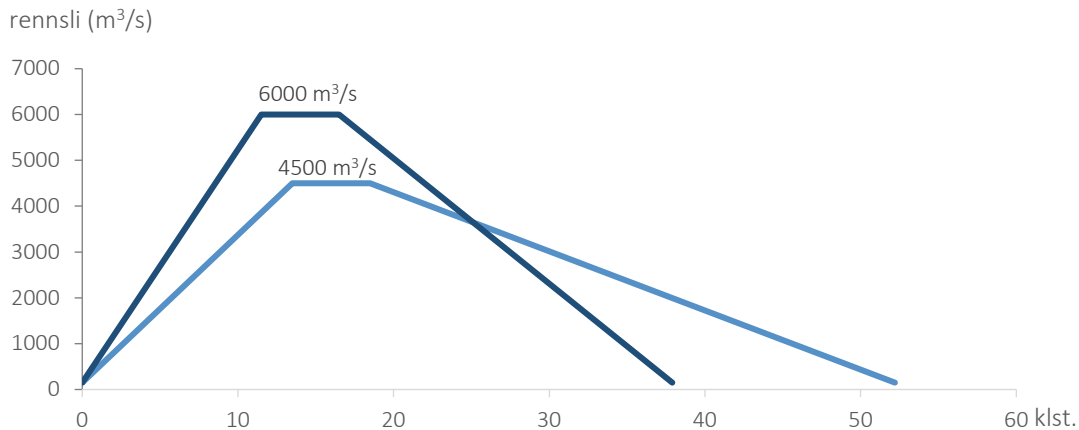
* V: Vestari-Skaftárketill; E: Eystri-Skaftárketill.



Mynd 4. Stuðull fyrir ris- og falltíma flóðasviðsmynda samkvæmt mælingum við Sveinstind (vatnshæðarmælir vhm 166).

Tafla 2. Framreikningur ris- og falltíma flóðasviðsmynda.

Sviðsmynd	Rennslistifelli	Ris	Hámark	Fall	Heild
s3	4500	13	5	34	52
s4	6000	11	5	21	37



Mynd 5. Vatnsrit sviðmynda við jaðar Skaftárjökuls.

2.3.4 Manning hrýfisstuðull

Manning stuðull er hluti af jöfnu Mannings sem tilgreinir hrýfi árfarvega og annarra yfirborða sem vatn flæðir yfir. Gildi stuðulsins fyrir margskonar yfirborð er þekkt, allt frá stáli og steinsteypu til þurra og leðjukennindra árbotna (Chow, 1959). Eftir því sem stuðullinn er lægri, því hraðar rennur vatnið yfir yfirborðið og vatnshæð er lægri.

Í hermununum var notaður Manningstuðull $0,02 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ sem er lægri en hefur verið notaður við fyrri hermanir jökulhlaupa hérlendis (Tafla 3). Við samanburð á mældri og líkanreiknaðri vatnshæð Skaftárhlaups haustið 2015 við Sveinstind, sem og með samanburði líkanreiknaðs rennslis við gildandi rennslislykil við Sveinstind (Matthías Á. Jónsson o.fl., 2018), kom fram að Manningstuðull þurfti að hafa frekar lágt gildi. Besta samræmið í hermun flóðsins haustið 2015 fékkst þegar stuðullinn var $0,02 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$. Hið sama átti við þegar hermt var eftir því hvernig flóðbylgjan barst niður eftir farveginum frá Sveinstindi að vatnshæðamælinum við Skaftárdal. Manningstuðullinn þurfti að vera $0,02 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1/3}$ til þess að flóðbylgjan næði að mælinum á tilsettum tíma.

Hér skal áréttað að það er mikil einföldun að nota aðeins eitt viðnámsgildi niður eftir farvegi frá jökli til sjávar. Nákvæmara væri að taka tillit til mismunandi gerðar farvegarins og leyfa gildinu að lækka með fjarlægð frá jökli eftir því sem íshröngl og aurburður sest til (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017) og breytast eftir því sem við á miðað við jarðgerð, farveg, botn, bakka, gróður o.s.frv.

Tafla 3. Manningstuðlar sem hafa verið notaðir við fyrri hermanir jökulhlaupa á Íslandi.

Verkefni	Manning n (s·m ^{-½})	Heimild
Grímsvötn	0,12	Nye (1976)
Grímsvötn	0,08; 0,09	Björnsson (1992)
Suðurhlíðar Eyjafjallajökuls	0,05, 0,1; 0,15	Kristín M. Hákonardóttir o.fl. (2005)
Jökulsá á Fjöllum	0,03; 0,05	Sigríður S. Gylfadóttir o.fl. (2017)
Jökulsá á Fjöllum	0,03; 0,05	Hardardóttir et al. (2015)
Jökulsá á Fjöllum	0,05	Pagneux and Þórarinsdóttir (2016)
Jökulsá á Fjöllum	0,025; 0,075	Alho et al. (2007)
Katla (Mýrdalssandur)	0,08, 0,1	Haukur Tómasson (1996)
Katla (Markarfljótsaurar)	0,1; 0,03	Sigurður L. Hólm & Snorri P. Kjaran (2005)
Múlakvísl	0,04	Gunnar P. Jónsson & Tinna Þórarinsdóttir (2011)
Skjálfandafliót	0,03; 0,05	Tómas Jóhannesson o.fl. (2014)
Sólheimajökull	0,03–0,08	Russell et al. (2010)
Svaðbælisá	0,03; 0,04; 0,1; 0,13	Magnús B. Gíslason (2012)
Öræfajökull	0,05, 0,1; 0,15	Helgadóttir et al. (2015)
Skaftá	0,02	Matthías Á. Jónsson o.fl. (2018)

2.3.5 Írennsli

Líkt og fjallað var um í §2.1.2 um takmarkanir straumfræðilíkansins þá er einungis mögulegt að herma rennsli í GeoClaw sem yfirborðsflæði. Ljóst er að talsverður hluti flóðvatns í hlaupum Skaftár flæðir ekki einungis á yfirborði heldur í gegnum hraun, t.d. í Eldhrauni (Freysteinn Sigurðsson, 1997; Verkfræðistofan Vatnaskil, 2005; Snorri Zóphóníasson, 2015). Við kvörðun á líkaninu kom í ljós að nauðsynlegt reyndist að lækka hámarksrennsli við upptök sem nemur 600 m³/s til að líkanið sýni rétta vatnshæð hlaupsins haustið 2015 í nágrenni Ásakvísla. Talið er að írennsli niður í hraunin neðan Skaftárdals eigi stóran þátt í þessari nauðsynlegu lækkun á rennsli (Matthías Á. Jónsson o.fl., 2018). Við líkanreikning rennslistifella í láglandi var því nauðsynlegt að taka tillit til þessa írennslis og var ákveðið að lækka hámarksrennsli við upptök um 600 m³/s innan allra sviðsmynda². Ástæður þessarar nálgunar eru þær að gera má ráð fyrir að þrátt fyrir mikla rýmd í hraununum muni hún vera komin að mettunarmörkum þegar hlaup eru jafn stór eða stærri en hlaupið í október 2015. Þess ber þó að geta að með tímanum þéttir hraunið sig vegna framburðar og má þá ætla að hlutfall rennslis sem flæði neðan yfirborðs fari lækkandi með endurteknum stórhlaupum.

Grunnvatnshæð í Eldhrauni var á árunum 2002–2015 vöktuð í nokkrum borholum í tengslum við hugmyndir um virkjun Skaftár. Þessum mælingum var hætt með einni undantekningu undir lok ársins 2014. Upplýsingar um breytingu á grunnvatnshæð sem komu fram við vöktunina gáfu góða hugmynd um viðbrögð geymisins við flóðum og rýmd hans.

² Hámarksrennsli var ekki lækkað við líkanreikning rennslistifella á hálendi.

Því miður var búið að leggja niður mælistöðvarnar, utan einnar vestan megin í hrauninu þegar flóðið 2015 reið yfir. Þessi skortur á mælingum á meðan flóðinu stóð gerir það að verkum að erfiðara en ella er að meta áhrif írennslis í Eldhrauni austan megin.

2.4 Greining á tjónmætti flóðvatns

Tjónmætti er flokkun á hversu miklar skemmdir/tjón geta orðið vegna náttúruváratburðar óháð hvort byggð eða mannvirki séu til staðar (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2016). Við mat á tjónmætti hlaupa var horft til þess hvort straumhraði og vatnsdýpi verði umfram það sem líklegt er að mannvirki þoli eða hvort að lífum sé ógnað. Áhrif rofs og sets á tjónmætti var ekki metið. Notaður var fjögurra stiga kvarði eftir Emmanuel Pagneux og Matthew J. Roberts (2015). Sú stærð sem notuð var til að ákvarða stig hættu er margfeldi dýpis og straumhraða (Tafla 4). Margfeldið hefur verið notað víða um heim sem viðmið til að greina tjónmætti flóðvatns (Pagneux & Roberts, 2015, auk tilvitnana sem þar eru).

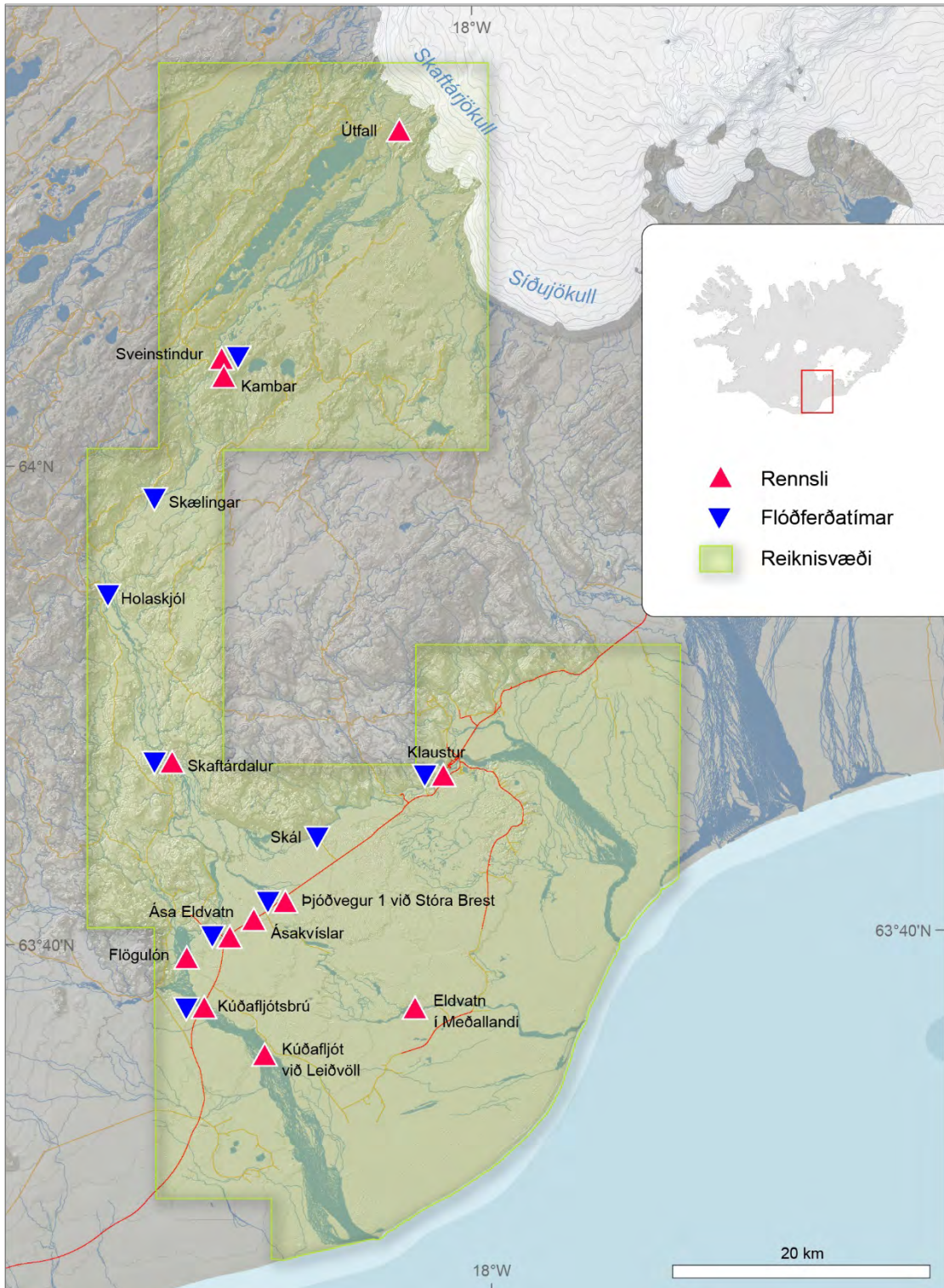
2.5 Úttaksgögn

Tölur um útbreiðslu, flóðadýpi, vatnshæðir, flóðahraða, tjónmættistuðul og staðsetningu straumfalds flóðasviðsmynda voru reiknaðar á 30 mínútna fresti og skrifaðar út á reglulegu reiknineti með 10 m upplausn. Við lok líkanreikninga hverrar sviðsmyndar voru hæstu gildi úttaka vistuð fyrir hvern stakan reit innan svæðisins. Ferðatímar flóða³, hámarksrennslis og uppsafnað rennslis voru reiknuð út á lykilstöðum (Mynd 6).

Tafla 4. Kvarði yfir tjónmætti jökulhlaupa (Pagneux & Roberts, 2015).

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

³ Reiknaðir flóðferðatímar voru skalaðir niður út frá mældum flóðferðatímum í hlaupinu 2015.



Mynd 6. Reiknistaðir rennlis og ferðatíma hlaupa. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.

3 Helstu niðurstöður

3.1 Útbreiðsla

Landslag þar sem farvegur Skaftár liggur fyrir ofan Skaftárdal er með þeim hætti að hækkun hámarksrennslis við jaðar Skaftárjökuls hefur smávægileg áhrif á útbreiðslu hlaupa á hálendinu (Mynd 7). Aukning á útbreiðslu við stærri sviðsmyndina er mest sýnileg við mót Skaftár og Skaftáreldhrauns, nálægt Stakafelli, og í farvegi Grjótár austan megin við Innra-Grjótárhöfuð.

Langstærsti hluti flóðvatns sem berst niður í Skaftárdal fer eftir farvegum Eldvatns og Ásakvísla. Hækkun hámarksrennslis við jaðar Skaftárjökuls veldur að hlaupvatn renni yfir varnargarð sem reistur var árið 1962 til að beina Ásakvíslum vestur í Eldvatn og talsverður hluti þess yfir þjóðvegakafli sem liggur í farvegi Ásakvísla (Mynd 8). Til samanburðar er rétt að geta þess að flóðvatn flæddi yfir varnargarðinn í hlaupi haustið 2015 en vatnið náði ekki að flæða yfir þjóðveginn (Emmanuel Pagneux o.fl. 2018).

Flögulón og Kúðafljót annars vegar og hins vegar Skaftá við Kirkjubæjarklaustur, virðast vera lítt viðkvæm fyrir hækkun hámarksrennslis við jaðar Skaftárjökuls. Frá Eldvatni við Ása og Ásakvíslar rennur flóðvatn til Flögulóns og þaðan til Kúðafljóts annars vegar, hins vegar til Eldvatns í Meðallandi og þaðan til sjávar. Við stærri sviðsmyndina leitar flóðvatn líka í farvegi Höfðakvíslar og flæðir þaðan yfir Meðallandsveginn nálægt Langholti.

Í byggð er helst aukning á útbreiðslu við Meðalland. Við Flögulón er hún lítil sem enginn miðað við það sem gerðist í hlaupinu haustið 2015. Sama gildir í Skaftá við Skál og Klaustur.

3.2 Vatnshæð

Búast má við talsverðri aukningu á vatnshæð á þeim svæðum þar sem flóðvatn rennur í afmörkuðum farvegi. Miðað við það sem gerðist í hlaupinu haustið 2015 er aukningin við Sveinstindsskála metinn 1,2 m fyrir 4500 m³/s og 1,7 m fyrir 6000 m³/s (Mynd 9). Við Hólaskjól er aukningin 0,7 m við lægri sviðsmyndina og 1 m við þá hærri. Við mælinn í Skaftárdal er aukin vatnshæð 2,9 og 3,4 m í hvorri sviðsmyndinni fyrir sig. Vatnsauki er metinn 1,9 m fyrir 4500 m³/s tilfellið og 2,3 m fyrir 6000 m³/s við Ása Eldvatn en við Systrastapa er hann einungis 0,4 og 0,5 m. Í grónu landi við Meðalland, þar sem einungis flæðir yfir í tilfelli 6000 m³/s, er vatnshæð <0,25 cm.

3.3 Vatnsmagn

Almennt er dreifing hlaupvatns stöðug milli sviðsmyndanna (Mynd 10) en í smáatriðum má sjá að hlutfall hlaupvatns fer hækkandi í farvegi Ásakvísla þegar hámarksrennslis er hækkað, á kostnað hlutfalls vatnsmagns við Ása Eldvatn, í Eldhrauni, og í Skaftá við Systrastapa. Ástand í Kúðafljóti er óbreytt milli sviðsmyndanna þar sem hlutfall vatnsmagns úr Ásakvíslum til Eldvatns í Meðallandi og Höfðakvíslar eykst samhliða hámarksrennslinu.

3.4 Hámarksrennsli

Fyrir 4500 m³/s tilfellið er hámarksrennsli metið ~4370 m³/s við mælinn í Skaftárdal, ~2620 m³/s við Ása Eldvatn og Ásakvíslar og ~2360 m³/s við Kúðafljótsbrú (Mynd 11). Við Systrastapa er það 280 m³/s. Á sömu stöðum er hámarksrennsli fyrir 6000 m³/s tilfellið metið 5760, 3770, 3060 og ~320 m³/s. Hækkun hámarksrennslis milli sviðsmyndanna er 44% við Ása Eldvatn og Ásakvíslar en einungis 13% við Systrastapa.

3.5 Flóðferðatímar

Það tekur hlaupin í hermunum 5,8–6,5 klst. við upphaf þeirra að renna frá úthlaupssvæði við jaðar jökuls niður til Sveinstinds (Tafla 5). Frá Sveinstindi eru flóðferðatímar metnir við upphaf hlaups 2,3–2,5 klst. við Skælinga, 3,4–3,6 klst. í farvegi Skaftár nálægt Hólaskjólí, 5,5–5,8 klst. við Skaftárdal og 8,4–9,6 klst. við Ása-Eldvatn.

3.6 Afleiðingar

Hér á eftir eru raktar í stuttu máli helstu afleiðingar sem hlaupin geta haft í för með sér, á hálendi og í byggðum. Upplýsingar um tjónmætti byggja á niðurstöðum stærstu sviðsmyndar, eða 6000 m³/s. Þann almenna fyrirvara verður að hafa að ályktanirnar eru byggðar á tilvísuðum líkanreikningum. Líkanið hermir ekki rof og við flóð af ofangreindri stærðargráðu er hugsanlegt að flóðið brjóti fyrirstöður sem getur valdið því að vatnið geti fundið sér nýjan farveg. Þetta á einkanlega við þegar komið er niður í Eldhraun.

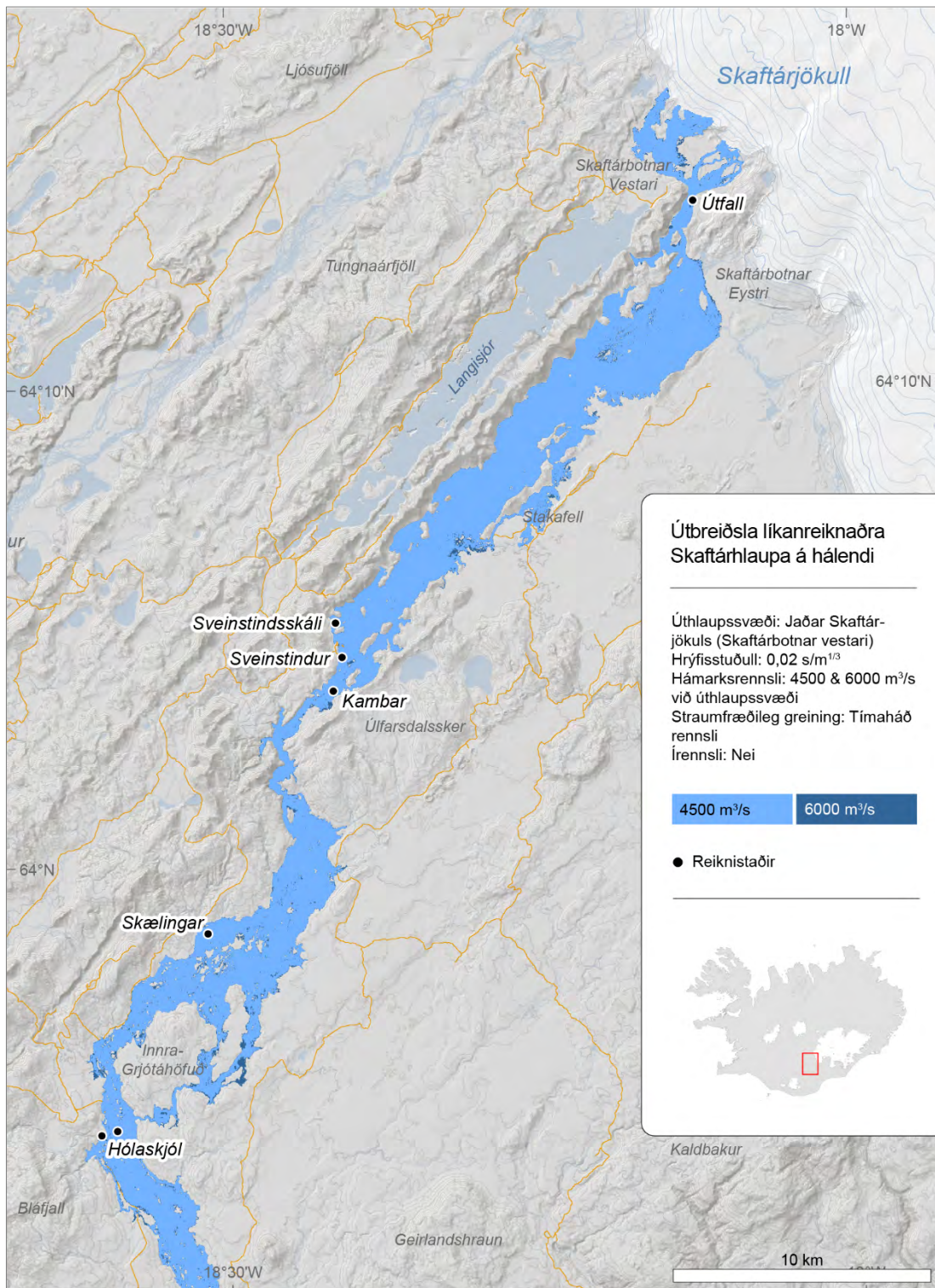
Áhrif af hlaupum á hálendinu verða í mesta lagi á um 6 km heildarlengd af eftirtöldum vegaköflum: Fjallabaksleið nyrðri við Hólaskjól og Bleikáluhraun (Tafla 6). Áhrifin af hlaupum á vegi í byggð ná til 32 km heildarlengdar. Þeir vegakaflar sem eru í mestri hættu eru hluti af hringveginum milli Kúðafljóts og Stóra-Brests, og af Meðallandsveginum meðfram Kúðafljóti. Mesta flóðdýpt á þjóðveginum er metin ~0,8 m þar sem hann þverar farveginn við Ásakvíslar.

Búast má við tjóni á byggingum við Sveinstindsskála, Hólaskjól, og Svínadal. Tjónmætti á þessum stöðum er metið mikið (Tafla 7). Flóðdýpt er metin >2 m við Sveinstindsskála og >1 m við hálendisniðstöðina Hólaskjól, það er því nokkuð ljóst að hlaupvatn flæðir inn í skálana. Í Svínadal flæðir inn í hús og útbyggingar. Við Skaftárdal má búast við talsverðum breytingum í farvegi Skaftár en bæirnir/sumarbústaðir standa í öruggri hæð og eru því ekki í hættu (Mynd 12).

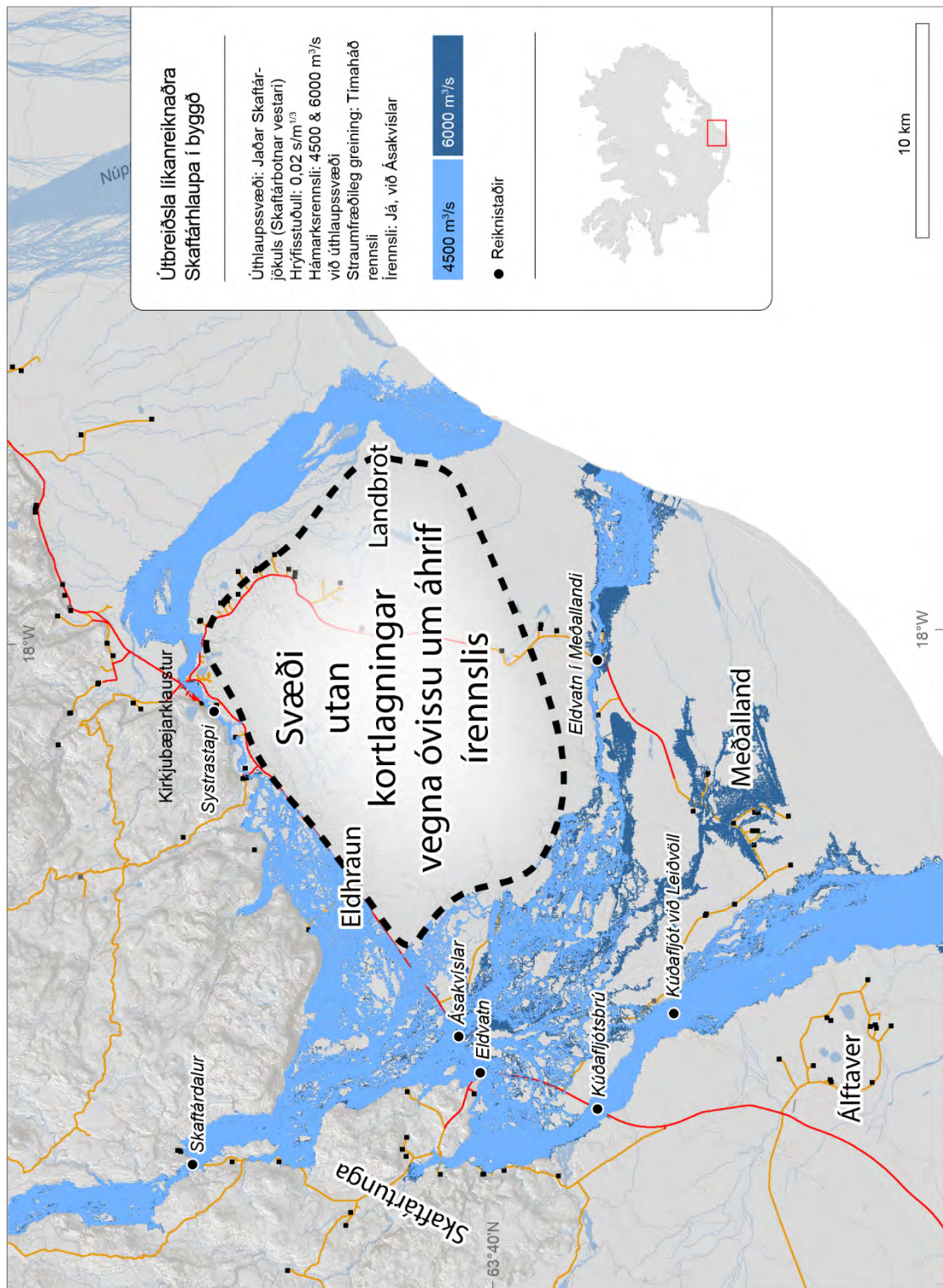
Byggðir við Flöguólón eru ekki í hættu. Mesta flóðadýpt yfir Hrífunesveginn, mæld milli Flögu 1–2 og Flögu 3, er metin vera um 1,2 m. Tjónmætti á þessu stöðum er metið lítið (Mynd 13). Við Skál verða einungis útihús fyrir áhrifum flóða og tjónmætti þar metið hóflegt.

Við Botna, Höfðakvísl og Eldvatn í Meðallandi munu byggðir einangrast í hlaupum. Vatnsdýpt yfir grónu landi og Meðallandsveginn verður innan við 25 cm. Á þessum stöðum er tjónmætti metið lítið (Mynd 14), með þeim fyrirvara að ekkert rof verði á þjóðveginum í farvegi Ásakvísla.

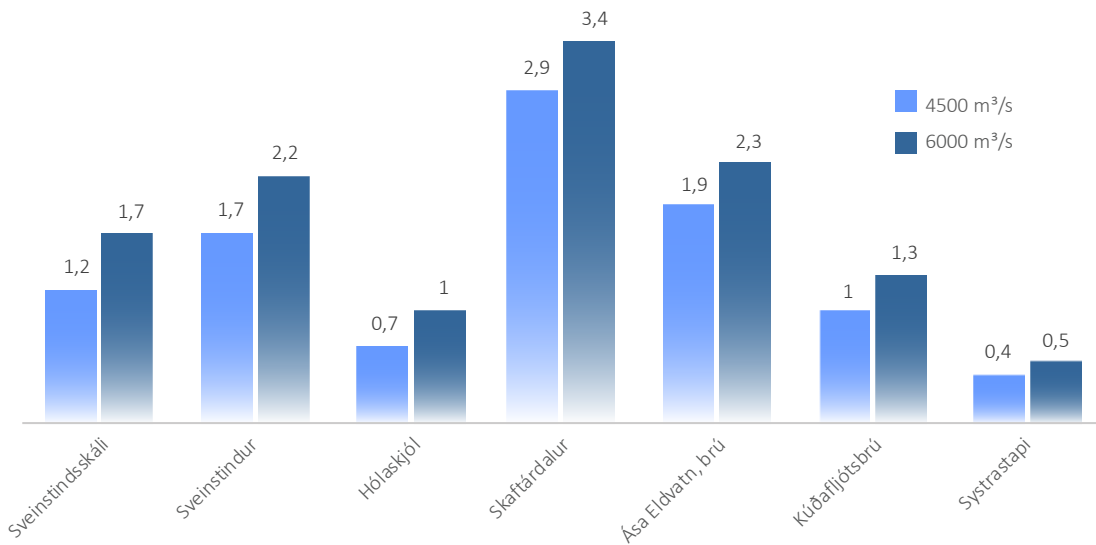
Kirkjubæjarklaustur virðist ekki vera í hættu miðað við gefnar forsendur. Nokkrir metrar af hringveginum geta farið á kaf við mót Meðallandsvegar en vatnsdýpt yfir veginn verður tæpast meiri en 10 cm. Tjónmætti við Klaustur er metið lítið (Mynd 15).



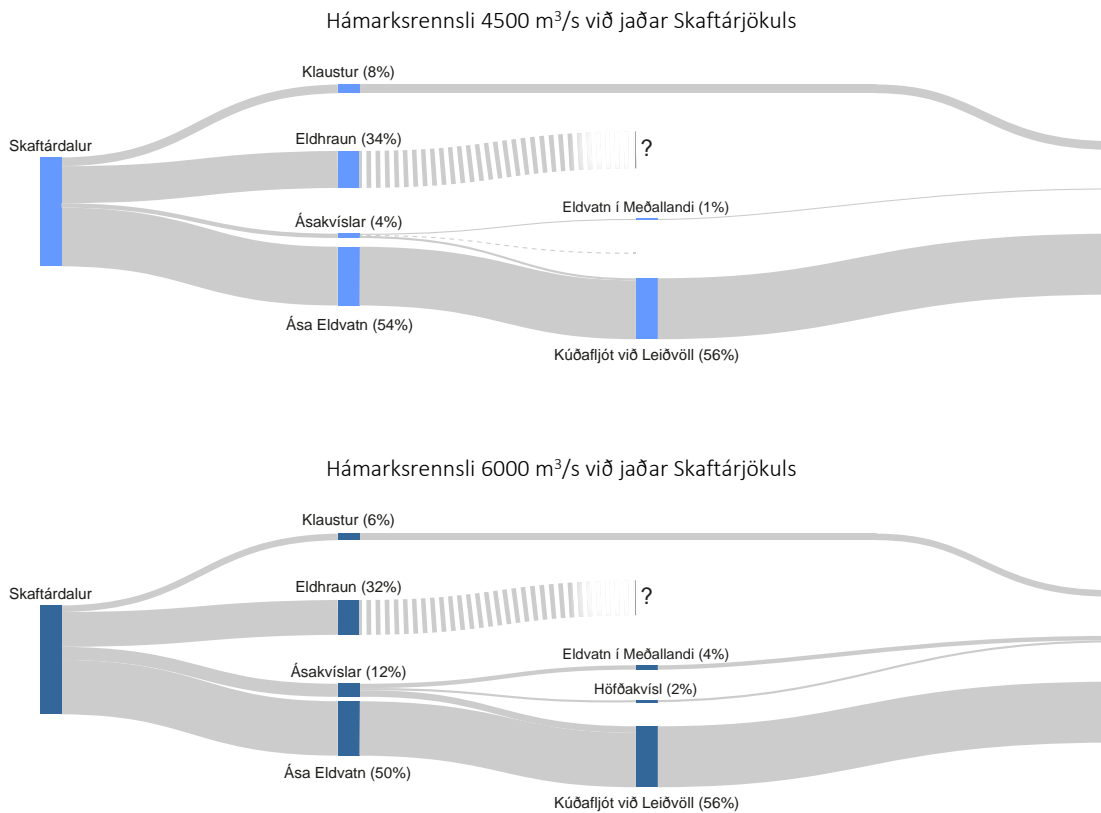
Mynd 7. Útbreiðsla hlaupvatns á hálendi (fyrir ofan Skaftárdal). Aukning útbreiðslu milli sviðsmyndanna atvikast aðallega við mót Skaftár og Skaftáreldhrauns, nálægt Stakafelli, og í farveginum Grjótár austan megin við Innra-Grjótárhöfuð. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.



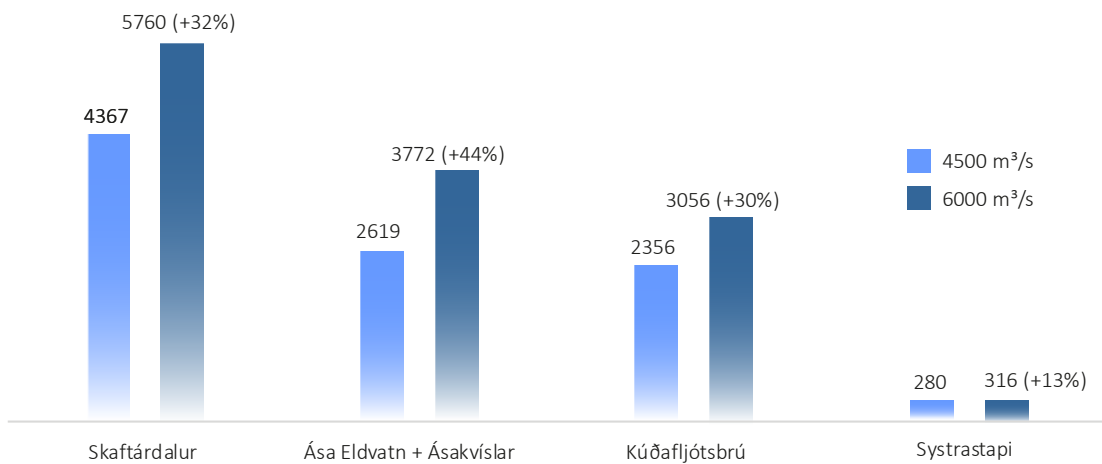
Mynd 8. Útbreiðsla hlaupvatns í byggð. Gert er ráð fyrir írennslis í nágrenni Ásakvísla. Aukning útbreiðslu milli sviðsmyndanna atvikast við Meðalland. Ekki var unnt að meta útbreiðslu hlaups á Eldhrauni, sunnan megin við hjóðveginn, í Tungulæk og Grenlæk. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.



Mynd 9. Aukin vatnshæð, í metrum, miðað við ástand í hlaupi haustið 2015. Gert er ráð fyrir írennsli í nágrenni Ásakvísla. Vatnshæð við Hólaskjól er mæld við miðstöðina. Reiknistaðir eru sýndir á Mynd 6.



Mynd 10. Dreifing hlaupvatns í % magns sem rennur fram neðan mælis við Skaftárdal. Gert er ráð fyrir írennsli í nágrenni Ásakvísla. Reiknistaðir eru sýndir á Mynd 6.



Mynd 11. Reiknað hámarksrennsli (m^3/s) frá og með Skaftárdal. Hækkun milli sviðsmyndanna er sýnd í svigum. Gert er ráð fyrir írennsli í nágrenni Ásakvísla. Reiknistaðir eru sýndir á Mynd 6.

Tafla 5. Reiknaðir flóðferðatímar (klst.) við upphaf hlaups, frá úthlaupssvæði við jaðar Skaftárjökuls og við Sveinstind. Tímar við Hólaskjól eru reiknaðar í farvegi Skaftár, 650 m frá miðstiðdinni. Allir tímar eru skalaðir niður út frá mældum flóðferðatímum í hlaupinu 2015.

	4500 m^3/s		6000 m^3/s	
	Jaðar jökuls	Sveinstindur	Jaðar jökuls	Sveinstindur
Sveinstindur	6,4		5,8	
Skælingar	9	2,5	8,1	2,3
Hólaskjól	10,1	3,6	9,2	3,4
Skaftárdalur	12,3	5,8	11,2	5,5
Ása Eldvatn (brú)	16	9,6	14,2	8,4
Kúðaflijótsbrú	18,4	12	16,1	10,3

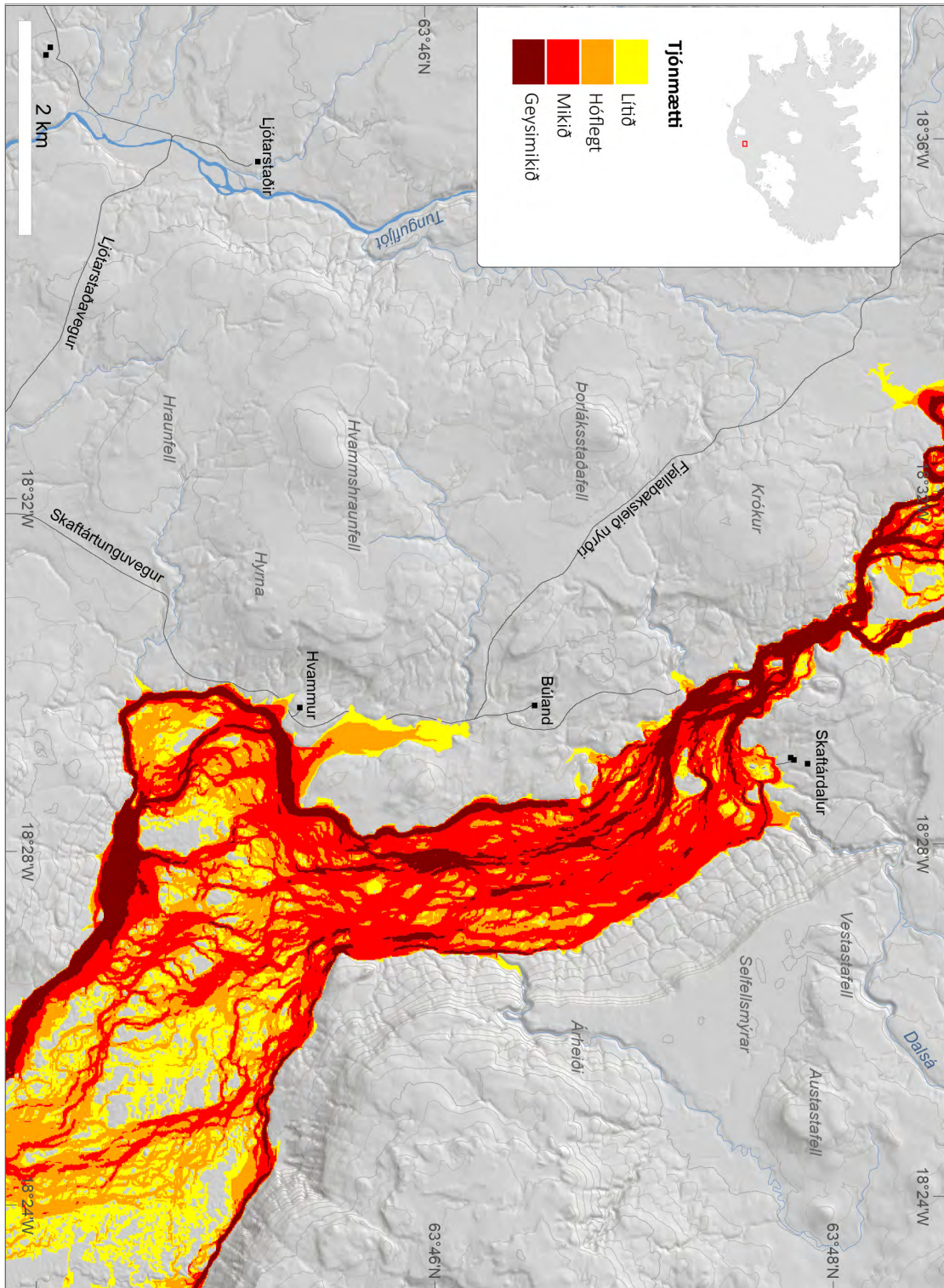
Tafla 6. Lengd vegakafli sem verða fyrir áhrifum hlaupa. Upplýsingar byggja á niðurstöðum stærstu sviðsmyndar, eða 6000 m³/s.

Svæði	Vegir	Lengdir (km)
Hálendi	Fjallabaksleið nyrðri	2,9
	Skælingar	0,9
	Hólaskjól	0,3
	Lakagígavegur	0,2
	Annað	2,1
Byggð	Hringvegur	8
	Meðallandsvegur	5,7
	Skál	4
	Skaftárdalur 2	3,3
	Skaftártunguvegur	2,9
	Svínadalur	2,3
	Hrífunesvegur	2,1
	Botnar	1,7
Annað	1,8	
Samtals		38,3

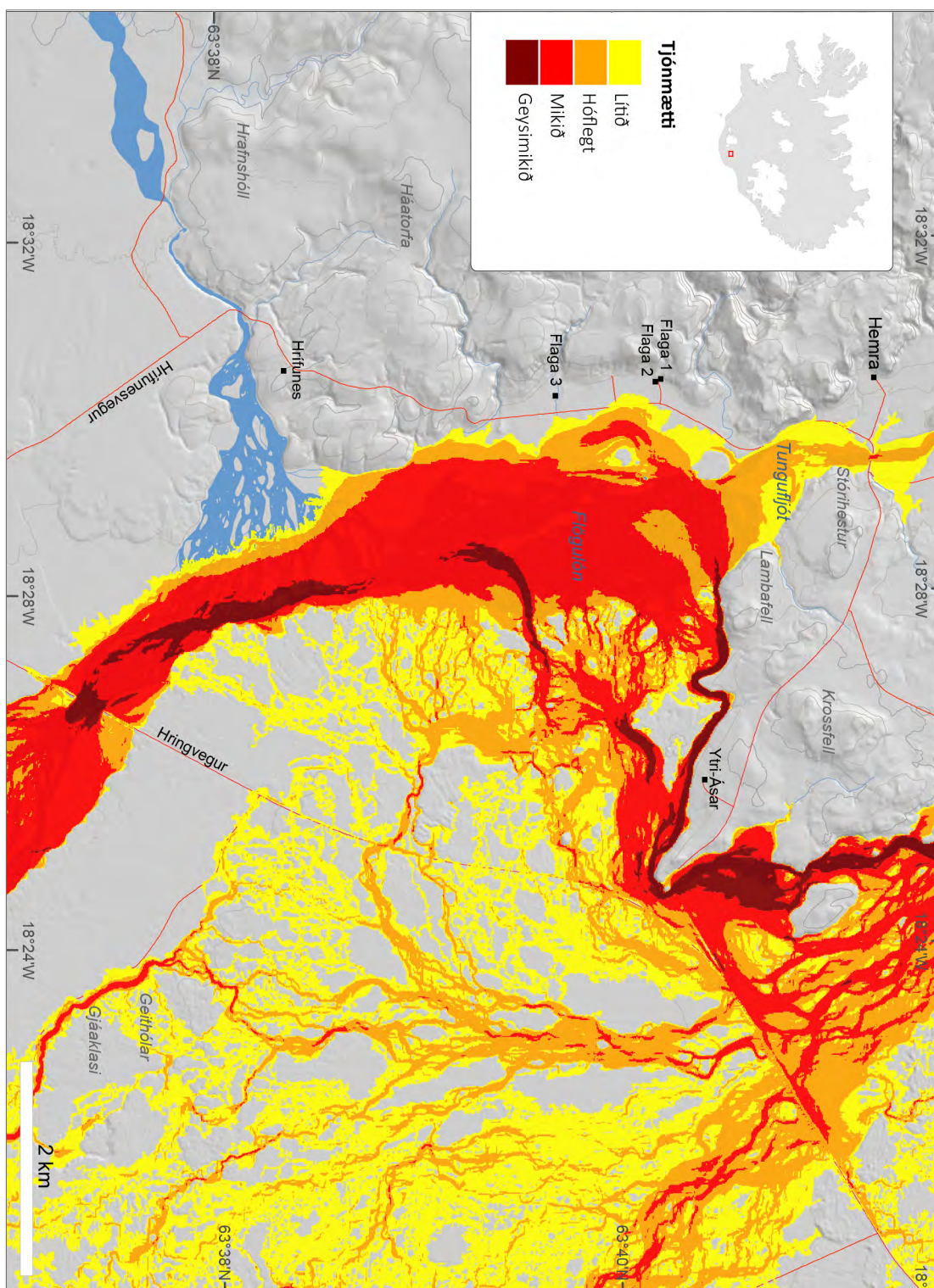
Tafla 7. Staðbundið tjónmætti. Upplýsingar byggja á niðurstöðum stærstu sviðsmyndar, eða 6000 m³/s.

Staðbundið tjónmætti	Svæði	Byggingar í hættu
Mikið	Sveinstindsskáli	Já
	Hólaskjól	Já
	Svínadalur	Já
Hóflegt	Skál	Já
Lítið	Grófararlón	Nei
	Flögulón	Nei
	Klaustur	Nei
	Botnar*	Nei
	Meðalland við Höfðakvísl*	Nei
	Meðalland við Eldvatn*	Nei

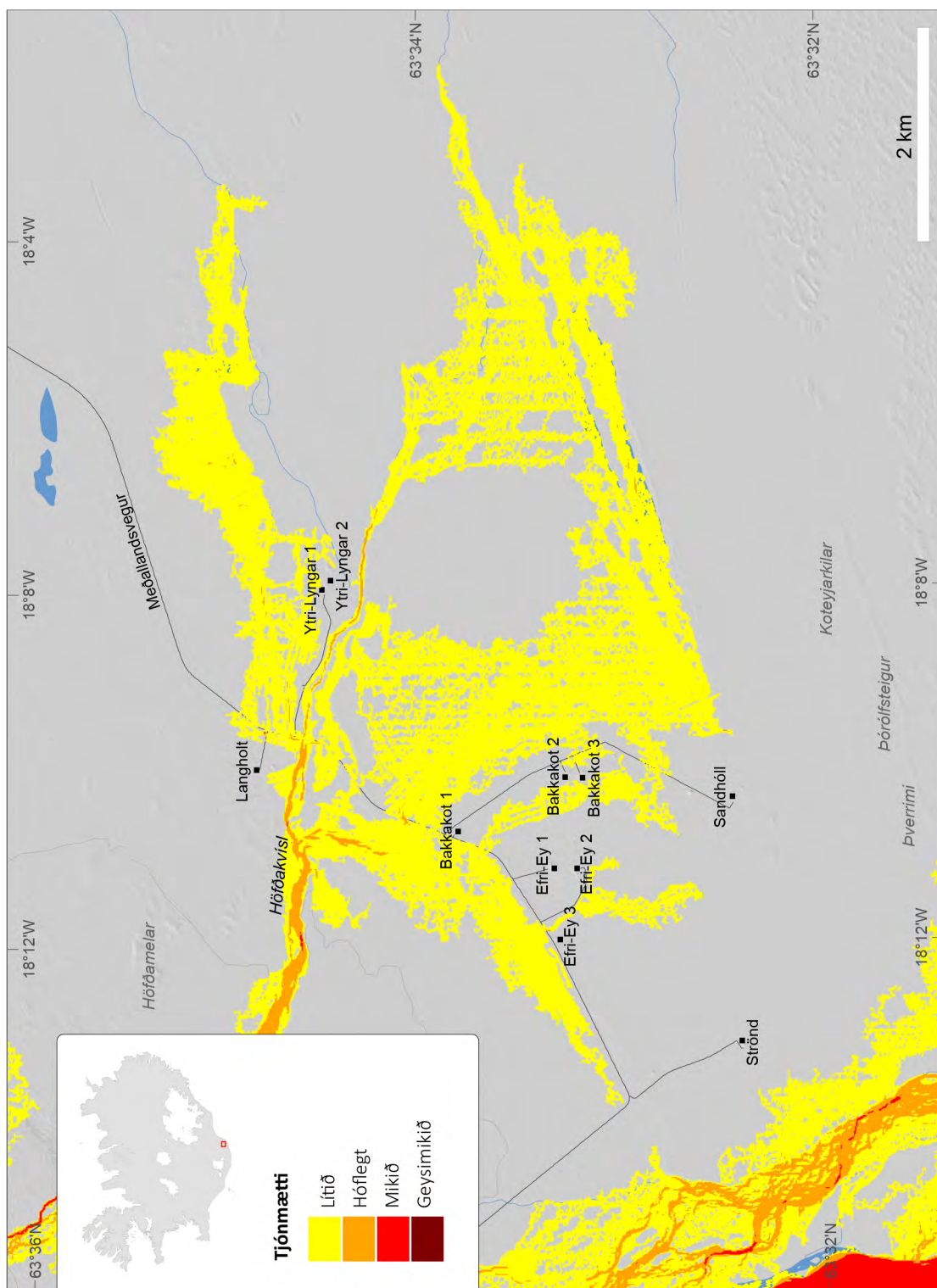
* Með þeim fyrirvara að ekkert rof verði á þjóðveginum í farvegi Ásakvísla.



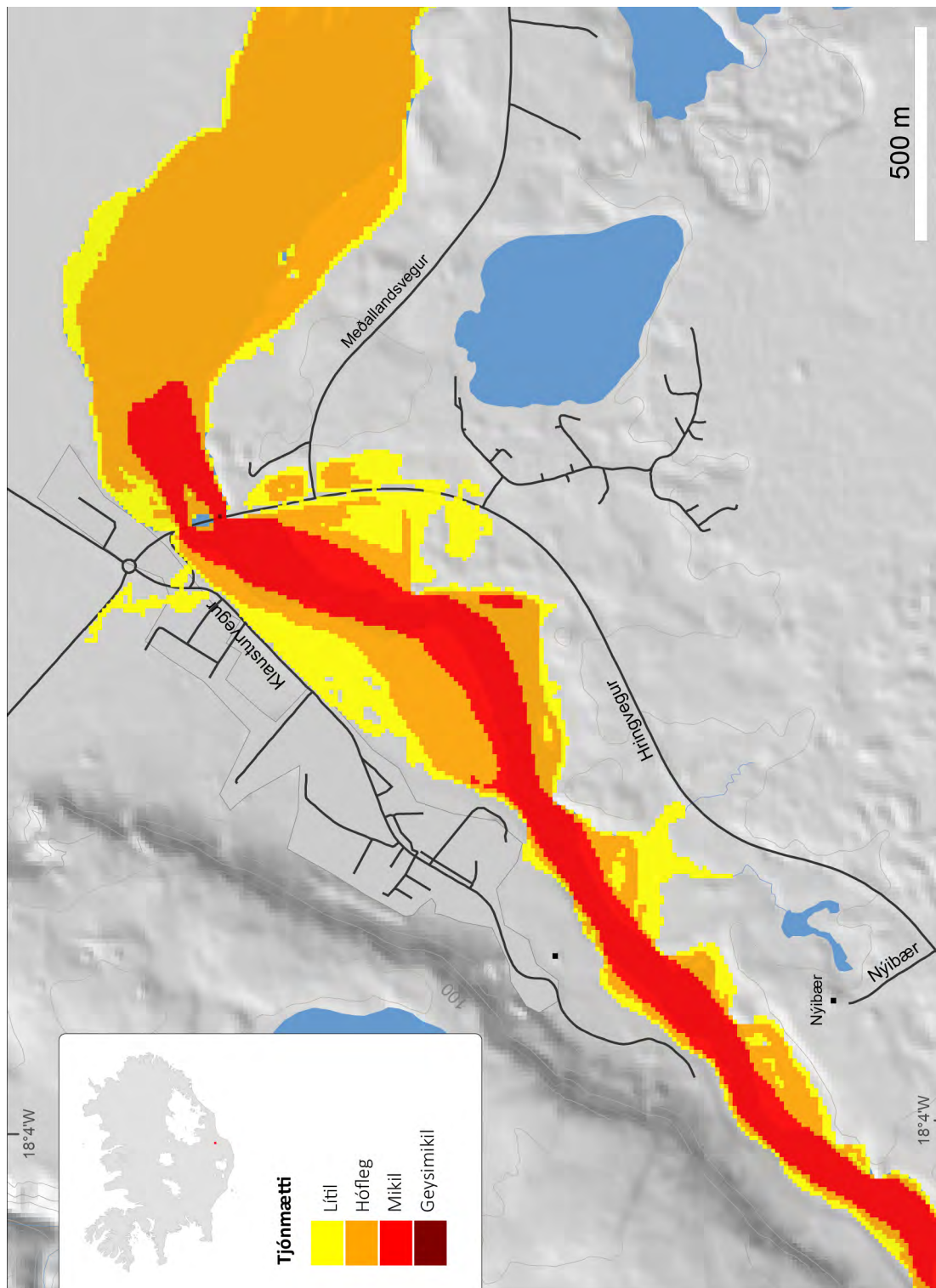
Mynd 12. Tjónmætti hlaupa við Skaftárdal. Upplýsingar byggja á niðurstöðum stærstu sviðsmyndar, eða $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.



Mynd 13. Tjónmætti hlaupa við Flöngulón. Upplýsingar byggja á niðurstöðum stærstu sviðsmyndar, eða 6000 m³/s. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.



Mynd 14. Tjónmætti hlaupa við Meðalland, með þeim fyrirvara að ekkert rof verði á þjóðveginum í farvegi Ásakvísla. Upplýsingar byggja á niðurstöðum stærstu sviðsmyndar, eða $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.



Mynd 15. Tjónmætti hlaupa við Kirkjubæjarklaustur. Upplýsingar byggja á niðurstöðum stærstu sviðsmyndar, eða $6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.

4 Lokaorð

Hermdar voru sviðsmyndir sem nema 50% og 100% hækkun hámarksrennslis hlaupsins haustið 2015 við jaðar Skaftárjökuls. Líkanreikningarnir miða við að hlaupvatn allt kæmi fram í Skaftá, undan jökli við Skaftárbotna Vestari. Gert var ráð fyrir írennslu í Eldhraunið í nágrenni Ásakvísla. Þar er útbreiðsla flóðsins 2015 vel þekkt og var unnt að meta stærðargráðu á írennslinu sem barst niður í hraunið. Hins vegar var ekki unnt að herma útbreiðslu flóðvatns í hrauninu austan við Árkvísar í flóðinu 2015, þar sem flóðvatn hvarf ofan í hraunið. Sviðsmyndirnar sýna því ekki útbreiðslu hlaups sunnan megin við Þjóðveginn, í Tungulæk og Grenlæk.

Niðurstöður gefa til kynna að:

- Í upphafi hlaups tekur það hlaupvatnið 5,8–6,5 klst. að berast frá úthlaupssvæðinu við jaðar jökuls niður til Sveinstinds. Frá Sveinstindi eru flóðferðatímar við upphaf hlaups metnir vera 2,3–2,5 klst. við Skælinga, 3,4–3,6 klst. í farvegi Skaftár nálægt Hólaskjólí, 5,5–5,8 klst. við Skaftárdal og 8,4–9,6 klst. við Ása-Eldvatn.
- Hækkun hámarksrennslis við jaðar Skaftárjökuls hefur smávægileg áhrif á útbreiðslu hlaupa á hálendi en í byggð leiðir hækkun hámarksrennslis til þess að vatn mun flæða yfir varnargarða við Ásakvísar og eftir upprunalega farveginum. Hlaupvatn flæðir þar yfir Þjóðveginn og þaðan til Eldvatns í Meðallandi og Höfðakvísla.
- Við hækkandi hámarksrennslu Skaftár eykst hlutfall hlaupvatns í farvegi Ásakvísla, á kostnað hlutfalls rennslis við Ása Eldvatn, í Eldhrauni, og í Skaftá við Klaustur. Flöglón, Kúðafljót og Skaftá við Klaustur virðast vera lítt viðkvæm fyrir hækkun hámarksrennslis við jaðar jökuls samkvæmt hermununum.
- Sviðsmyndirnar leiða í ljós að við herra rennslu en var í hlaupinu haustið 2015 má búast við talsverðri aukningu í vatnshæð umfram sem þá varð, á þeim svæðum þar sem flóðvatn rennur í afmörkuðum farvegi.
- Búast má við tjóni á byggingum við Sveinstindsskála, Hólaskjól, og Svínadal. Tjónmætti á þessum stöðum er metið mikið. Við Botna, Höfðakvísl og Eldvatn í Meðallandi munu byggðir einangrast í hlaupum. Á þessum stöðum er tjónmætti metið lítið með þeim fyrirvara að ekkert rof verði á Þjóðveginum í farvegi Ásakvísla.

Þær sviðsmyndir sem hér hafa verið settar fram gefa góða almenna yfirsýn. Hins vegar eru einkum tvö atriði sem æskilegt væri að skoða nánar:

- Áhrif rofs við hringveginn á útbreiðslu hlaupa. Við Botna, Höfðakvísl og Eldvatn í Meðallandi hefur tjónmætti verið metið lítið með þeim fyrirvara að ekkert rof verði á Þjóðveginum í farvegi Ásakvísla. Á þessum stöðum gæti tjónmætti orðið töluvert ef haft rofnar og grefur úr farveginum eins og gerðist í hlaupinu 2015.
- Áhrif írennslis í Eldhrauni á útbreiðslu hlaupa og rennslis í Tungulæk og Grenlæk. Vöktun grunnvatnsmælinga á svæðinu var hætt undir lok 2014 eins og kemur fram í kafla 2.3.5. Það dregur úr möguleikum til að meta áhrif írennslis í flóðum og leggja mat á hvort og í hve miklum mæli hafi dregið úr írennslu vegna framburðar Skaftár. Þess vegna er eindregið lagt til að vöktun á grunnvatnshæð sem fór fram á árunum 2002–2015 verði endurvakin.

5 Þakkir

Njáli F. Reynissyni og Jóni K. Helgasyni á Veðurstofu Íslands eru færðar þakkir fyrir áhugaverðar umræður og ábendingar. Vinnan er hluti af verkefninu um hættumat varðandi jökulhlaup í Skaftá sem styrkt er af Ofanflóðasjóði. ArcticDEM yfirborðslíkan sem notað var í reikningunum er byggt á gervitunglamyndum frá *DigitalGlobe, Inc.* og fjármagnað af styrkjum nr. 1043681, 1559691, og 1542736 frá *National Science Foundation* í Bandaríkjunum.

6 Heimildir

- Alho, P., Roberts, M.J. & Käyhkö, J. (2007). Estimating the inundation area of a massive, hypothetical jökulhlaup from northwest Vatnajökull, Iceland. *Natural Hazards*, 41(1), 21–42.
- Björnsson, H. (1992). Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics, and simulation. *Annals of Glaciology*, 16, 96–106.
- Chow, V.T. (1959). *Open – channel hydraulics*. McGill Hill.
- Clawpack Development Team (2017). Clawpack Version 5.4.0, <https://www.clawpack.org>, doi:org/10.5281/zenodo.262111.
- Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson & Davíð Egilson (2018). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Útbreiðsla og flóðhæð Skaftárhlaupsins haustið 2015*. Skýrsla VÍ 2018-004. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Esther Hlíðar Jensen, Davíð Egilson, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Snorri Zóphóníasson, Snorri Páll Snorrason, Ingibjörg Jónsdóttir, Ragnar H. Þrastarson, Oddur Sigurðsson & Matthew J. Roberts (2018). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Mat á setflutningi með sögulegu yfirliti*. Skýrsla VÍ 2018-005. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Finnur Pálsson, Eyjólfur Magnússon & Helgi Björnsson (2016). *Greinargerð um könnun á legu vatnaskila Skaftár og Hverfisfljóts og stöðugleika þeirra þegar jökullin hörfar*. Greinargerð RH-06-2016. Reykjavík: Jarðvísindastofnun, Háskóli Íslands.
- Freysteinn Sigurðsson (1997). *Lindir í Landbroti og Meðallandi. Uppruni lindavatsins*. Reykjavík: Orkustofnun. Sótt á <http://www.os.is/gogn/Skyrslur/OS-1997/OS-97021.pdf>.
- George, D. (2011). Adaptive finite volume methods with well-balanced Riemann solvers for modeling floods in rugged terrain: Application to the Malpasset dam-break flood (France, 1959). *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 66(8), 1000–1018.
- Gunnar Þór Jónsson & Tinna Þórarinsdóttir (2011). *Hlaup í Múlakvísl 8.-10. júlí 2011*. Greinargerð, Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Gylfadóttir, S.S., Kim, J., Helgason J.K., Brynjólfsson, S., Höskuldsson, Á., Jóhannesson, T., Bonnevie Harbitz, C. & Løvholt, F. (2017). The 2014 Lake Askja rockslide-induced tsunami: Optimization of numerical tsunami model using observed data. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 4110–4122, doi:10.1002/2016JC012496.

- Hardardóttir, J., Roberts, M.J., Pagneux, E., Einarsson, B., Thorarinsdóttir, T., Johannesson, T., ... IMO hydrological-monitoring-team (2015). *Unrest at Bárðarbunga: Preparations for possible flooding due to subglacial volcanism*. Geophysical Research Abstracts, Vol. 17, EGU2015-11501, 2015 EGU General Assembly 2015.
- Helgadóttir, Á., Pagneux, E., Roberts, M.J., Jensen, E.H. & Gíslason, E. (2015). Örafajökull Volcano: Numerical simulations of eruption-induced jökulhlaups using the SAMOS flow model. In E. Pagneux, M. T. Gudmundsson, S. Karlsdóttir & M. J. Roberts (Eds.), *Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Örafajökull and on the Markarfljót outwash plain* (pp. 73–100). Reykjavík, Iceland: IMO, IES-UI, NCIP-DCPEM.
- Kristín M. Hákonardóttir, Tómas Jóhannesson, & Peter Sampl (2005). Líkanreikningar á jökulhlaupum niður suðurhlíðar Eyjafjallajökuls. Í Magnús Tumi Guðmundsson & Ágúst Gunnar Gylfason (ritsj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*. Reykjavík: Ríkislögreglustjórinn, Háskólaútgáfan, bls. 181–196.
- Magnús B. Gíslason (2012). *Straumfræðileg hermun jökulhlaups niður suðurhlíðar Eyjafjallajökuls í apríl 2010: ákvörðun Manningsstuðla*. Reykjavík: Háskóli Íslands.
- Magnús Tumi Guðmundsson, Emmanuel Pagneux, Matthew J. Roberts, Ásdís Helgadóttir, Sigrún Karlsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Þórdís Högnadóttir & Ágúst Gunnar Gylfason (2016). *Jökulhlaup í Örafum og Markarfljóti vegna eldgosa undir jökli: Forgreining áhættumats*. Reykjavík: Jarðvísindastofnun Háskólans, Veðurstofa Íslands, Ríkislögreglustjóri.
- Mandli, K.T. & Dawson, C.N. (2014). Adaptive Mesh Refinement for Storm Surge. *Ocean Modelling*, 75, 36–50.
- Matthías Á. Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilson, Tómas Jóhannesson & Matthew J. Roberts (2018). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Kvörðun straumfræðilíkans*. Skýrsla VÍ 2018-007. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Nye, J.F. (1976). Water flow in glaciers: Jökulhlaups, tunnels and veins. *Journal of Glaciology*, 17(76), 181–207.
- Oddur Sigurðsson & Bergur Einarsson (2005). *Jökulhlaupaannáll 1989–2004*. Skýrsla OS-2005/031. Reykjavík: Orkustofnun.
- Pagneux, E. & Þórarinsdóttir, T. (2016). *Bárðarbunga 2014 CE eruption: Simulation of a hypothetical, 180,000 m³/s jökulhlaup in the river Jökulsá á Fjöllum - Early investigations into inundation extent between Dyngjujökull and Vaðalda*. Map 1:90.000. Reykjavík: Icelandic Meteorological Office. doi:10.13140/RG.2.1.1570.6486
- Pagneux, E. & Roberts, M.J. (2015). Öraefi district and Markarfljót outwash plain: Rating of flood hazards. In E. Pagneux, M.T. Gudmundsson, S. Karlsdóttir & M.J. Roberts (Eds.), *Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Örafajökull and on the Markarfljót outwash plain* (pp. 101–122). Reykjavík, Iceland: IMO, IES-UI, NCIP-DCPEM.
- Polar Geospatial Center (2016). *ArcticDEM Documentation and User Guidance*. Saint Paul, Minnesota: Polar Geospatial Center, University of Minnesota.
- Russell, A.J., Tweed, F., Roberts, M.J., Harris, T.D., Gudmundsson, M.T., Knudsen, O. & Marren, P.M. (2010). An unusual jökulhlaup resulting from subglacial volcanism, Sólheimajökull, Iceland. *Quaternary Science Review*, 1363–1381.

- Sigríður Sif Gylfadóttir, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel P. Pagneux & Bogi Brynjar Björnsson (2017). *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum með GeoClaw*. Skýrsla VÍ 2017-004. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Sigurður L. Hólm & Snorri P. Kjaran (2005). Reiknilíkan fyrir útbreiðslu hlaupa úr Entujökli (Hydraulic model of floods from Entujökull). Í Magnús Tumi Guðmundsson, og Ágúst Gunnar Gylfason (ritsj.), *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frá vestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli*. Reykjavík: Ríkislögreglustjórnin, Háskólaútgáfan, bls. 197–210.
- Snorri Zóphóníasson & Svanur Pálsson (1996). *Rennsli í Skaftárhlaupum og aur- og efnastyrkur í hlaupum 1994, 1995, og 1996*. Skýrsla OS-96066/VOD-07. Reykjavík: Orkustofnun.
- Snorri Zóphóníasson (1997). *Grunnvatnsstaða og rennsli lækja í Landbroti og Meðallandi*. Skýrsla OS-9718. Reykjavík: Orkustofnun. Sótt á <http://www.os.is/gogn/Skyrslur/OS-1997/OS-97018.pdf>
- Snorri Zóphóníasson (2015). *Vatnafar í Eldhrauni Náttúrulegar breytingar og áhrif veitumannvirkja*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Tómas Jóhannesson, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux, Philippe Crochet & Esther H. Jensen (2014). *Mat á vatnshæð í jökulhlaupi í Skjálfafljóti vegna hugsanlegs eldgoss í eða við Bárðarbungu 2014*. Minnisblað. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Tómas Jóhannesson, Ólafur Haraldsson & Bergur Einarsson (2017). *Rúmmál hlaupsins, rennsli og vatnshæð við Sveinstind*. Minnisblað. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Tómasson, H. (1996). The Jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology*, 22, 249–254.
- Verkfræðistofan Vatnaskil (2005). *Skaftá-Hverfisfljót: Rennslilíkan*. Skýrsla LV2005/051. Reykjavík: Landsvirkjun.

Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá Hermun flóðasviðsmynda

Veðurstofa Íslands
Bústaðavegi 7–9
108 Reykjavík
www.vedur.is
Sími: 522 6000

Forsíðumynd: Hlaup haustið 2015 við Skaftárdal
© Matthew J. Roberts

