

# Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá

Kvörðun straumfræðilkans





# Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá

## Kvörðun straumfræðilíkans

---

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



Lykilsíða

<b>Skýrsla nr.</b> VÍ 2018-007	<b>Dags.</b> Júlí 2018	<b>ISSN:</b> 1670-8261	<b>Opin</b> <input checked="" type="checkbox"/> <b>Lokuð</b> <input type="checkbox"/> <b>Skilmálar:</b>
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Kvörðun straumfræðilíkans		<b>Upplag:</b> 25 <b>Fjöldi síðna:</b> 51 <b>Framkvæmdastjóri sviðs:</b> Jórunn Harðardóttir	
<b>Höfundar:</b> Matthías Ásgeir Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilson, Tómas Jóhannesson og Matthew J. Roberts		<b>Verkefnisstjóri:</b> Matthew J. Roberts <b>Verknúmer:</b> 3721-0-0006	
<b>Gerð skýrslu/verkstig:</b> Lokaskýrsla		<b>Málsnúmer:</b> 2016-134	
<b>Unnið fyrir:</b> Ofanflóðasjóð			
<b>Samvinnuaðilar:</b>			
<b>Útdráttur:</b> Skaftárhlaupið á haustmánuðum 2015 náði mesta rennsli og útbreiðslu frá upphafi mælinga. Í þessu riti er lýst hvernig straumfræðilíkanið GeoClaw var kvarðað með því að endurherma hlaupið 2015 svo unnt sé að herma sviðsmyndir enn stærri Skaftárhlaupa. Notast var við ArcticDEM landlíkan í 10 m upplausn, alla leið frá Skaftárbotnum við Vatnajökul niður til sjávar. Hermunin var kvörðuð með hliðsjón af vatnshæðar-, rennslis- og útbreiðslumælingum sem gerðar voru bæði eftir og á meðan hlaupinu stóð.			
<b>Lykilorð:</b> Skaftárhlaup, jökulhlaup, hermun, GeoClaw, ArcticDEM		<b>Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs:</b> 	
		<b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b> 	
		<b>Yfirfarið af:</b> Halldór Björnsson, Guðrún Nína Petersen, Sigurlaug Gunnlaugsdóttir	



# Efnisyfirlit

Myndaskrá.....	6
Töfluskrá.....	7
Kortaskrá.....	7
Ágrip .....	9
Abstract.....	9
1 Inngangur .....	11
1.1 Uppbygging skýrslunnar .....	11
2 Skaftárhlaup .....	11
3 Straumfræðilíkon .....	15
3.1 GeoClaw .....	16
3.2 HEC-RAS .....	17
4 Landlíkon .....	19
4.1 ArcticDEM landlíkan — 2 m útgáfa.....	19
4.2 ArcticDEM landlíkan — 10 m útgáfa.....	19
5 Vatnshæðarmælar og rennslislyklar.....	21
5.1 Mælar í Skaftárdal og Eldvatni .....	21
5.2 Sveinstindur .....	21
5.2.1 Áhrif aurburðar á vatnshæðarmælingar .....	21
5.2.2 Uppfærður rennslislykill .....	23
6 Kvörðun GeoClaw .....	24
6.1 Æstæðir reikningar.....	24
6.2 Tímaháðir reikningar.....	27
6.2.1 Útbreiðsla og hámarksrennsli.....	27
6.2.2 Ferðatími flóðsins .....	31
6.3 Val á Manning stuðli.....	31
7 Jökulhlaup haustið 2015 — Niðurstöður .....	33
7.1 Eldvatn og Árkvíslar .....	36
7.2 Flögulón og Kúðafljót.....	36
7.3 Eldhraun og Kirkjubæjarklaustur.....	36
8 Samantekt.....	43
9 Þakkir .....	43
10 Heimildir .....	44

Viðauki I. Rennsli í gegnum þversnið.....	47
Viðauki II. Upptakasvæði og vatnsrit.....	48
Viðauki III. Skölun grunnrennslis .....	49

## Myndaskrá

Mynd 1. Farvegur Skaftár frá Vatnajökli að mælistöðvum í megindráttum .....	12
Mynd 2. Hámarksrennsli Skaftárhlaupa á árunum 1955–2016 .....	14
Mynd 3. Grunnvatnsstaða í borholu (SKA-7) innan vatnasviðs Skaftár .....	14
Mynd 4. Dæmigerð uppsetning GeoClaw jökulhlaups hermunar .....	17
Mynd 5. Fjöldi og skörun ArcticDEM ræma á athugunarsvæðinu .....	20
Mynd 6. Uppruni gagna, upplausn og lagfæringar á landlíkani innan athugunarsvæðisins ....	20
Mynd 7. Skipting og útbreiðsla hlaupvatns í Skaftárhlaupi 2015 .....	22
Mynd 8. Rennslislyklar fyrir vhm 166 við Sveinstind .....	23
Mynd 9. Staðsetningar HEC-RAS þversniða og GeoClaw upptakasvæða í farvegi Skaftár... 25	
Mynd 10. Niðurstöður æstæðra HEC-RAS líkanreikninga .....	26
Mynd 11. Samanburður æstæðra GeoClaw líkangreikninga og núgildandi rennslislykils .....	26
Mynd 12. Áhrif GeoClaw brúunar á árfarveginn .....	28
Mynd 13. Samanburður líkanreiknaðri og mældri vatnshæð við Sveinstind .....	29
Mynd 14. Líkanreiknaðir rennslislyklar framhjá Sveinstindi, með og án hliðarfarvega.....	29
Mynd 15. Líkanreiknaður ferðatími milli lykilmæla.....	32
Mynd 16. Mælt rennsli í september/októberhlaupi 2015 .....	32
Mynd 17. Líkanreiknað rennsli við lykilmæla .....	33
Mynd 18. Þversnið (rautt) sker netmökva undir horni $\omega$ við x-ás .....	47
Mynd 19. Landhæðarlíkan af nær umhverfi vatnshæðarmælis við Sveinstind .....	50
Mynd 20. Dæmi um leiðréttingu á rennsli í hermun með GeoClaw .....	51



## Töfluskrá

Tafla 1. Samanburður á straufræðilíkönunum HEC-RAS og GeoClaw. ....	15
---	----

## Kortaskrá

Kort 1. Líkanreiknuð útbreiðsla við Sveinstind .....	30
Kort 2. Heildarlíkanreiknuð útbreiðsla jökulhlaups 2015 .....	34
Kort 3. Nærmynd af líkanreiknaðri útbreiðsla jökulhlaups 2015 sunnan Skaftárdals .....	35
Kort 4. Líkanreiknuð útbreiðsla í Ása-Eldvatni án írennslis.....	37
Kort 5. Líkanreiknuð útbreiðsla í Ása-Eldvatn með írennslis .....	38
Kort 6. Líkanreiknuð útbreiðsla í Flögulóni án írennslis .....	39
Kort 7. Líkanreiknuð útbreiðsla í Flögulóni með írennslis.....	40
Kort 8. Líkanreiknuð útbreiðsla við Kirkjubæjarklaustur með írennslis .....	41
Kort 9. Líkanreiknuð útbreiðsla við Kirkjubæjarklaustur án írennslis.....	42



# Ágrip

Skaftárhlaupið á haustmánuðum 2015 náði mesta rennsli og útbreiðslu frá upphafi mælinga. Í þessu riti er lýst hvernig straumfræðilíkanið GeoClaw var kvarðað með því að endurherma hlaupið 2015 svo unnt sé að herma sviðsmyndir enn stærri Skaftárhlaupa. Notast var við ArcticDEM landlíkan í 10 m upplausn, alla leið frá Skaftárbotnum við Vatnajökul niður til sjávar. Hermunin var kvörðuð með hliðsjón af vatnshæðar-, rennslis- og útbreiðslumælingum sem gerðar voru bæði eftir og á meðan hlaupinu stóð.

Líkt var eftir þekktri útbreiðslu auk hámarks vatnshæðar við vatnshæðarmæli Veðurstofu Íslands við Sveinstind, með bæði æstæðum (e. steady state) og tímaháðum útreikningum. Reikningar sýna að nota þarf Mannings stuðul  $0,02 \text{ s/m}^{1/3}$  í hermunum. Hámarksrennsli í hlaupinu er reiknað rúmlega  $2800 \text{ m}^3/\text{s}$  við Sveinstind en í hámarki fór um  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  um hliðarfarvegi Skaftár við Lyngfellsgíga, sem ekki var mælt með vatnshæðarmæli.

Í láglandi sunnan Skaftárdals þarf að lækka hámarksrennsli um  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  til að líkja eftir þekktri útbreiðslu í Árkvísllum, Eldvatni austan við Ása og í Flögulóni. Lækkun hámarksrennslis er þörf vegna írennslis hlaupvatns niður hraun. Með lækkun hámarksrennslis ber líkanreiknaðri útbreiðslu vel saman við þekkta útbreiðslu við Sveinstind, í Eldvatni austan við Ása og í Flögulóni.

## Abstract

*The October 2015 outburst flood (jökulhlaup) on the Skaftá river, southern Iceland, reached a higher discharge and aerial extent than previous jökulhlaups. The flood, sourced from a subglacial lake beneath Vatnajökull, caused downstream damage to unpaved roads, bridges and a gauging station.*

*For calibration purposes, the 2015 jökulhlaup was simulated using the geophysical flow modelling software GeoClaw. The jökulhlaup was reconstructed at a catchment scale by validating modelling results to water-stage, discharge, and aerial observations made during and after the flood. At Sveinstindur, stage measurements of the flood, together with overall flood extent, were compared to steady-state and time-dependent simulations. Elevation data from the ArcticDEM were used at 10-m resolution as topographic inputs to GeoClaw.*

*A Manning's roughness coefficient of  $0.02 \text{ s/m}^{1/3}$  was required in GeoClaw for an adequate match between modelling results and empirical data. The maximum discharge was estimated at over  $2800 \text{ m}^3/\text{s}$  at Sveinstindur. However, at the height of the flood, an additional  $400 \text{ m}^3/\text{s}$  of floodwater flowed alongside the gauged cross-section at Lyngfellsgígur; this contribution was not recorded in the hydrological measurements.*

*To conform to the extent of the jökulhlaup in the lowlands, south of Skaftárdalur, the simulated maximum discharge was reduced by  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  to account for floodwater infiltration into porous sediment and lava. With the downstream reduction in discharge, it was possible to accurately fit the inundation model to key locations on the flood-path, including Sveinstindur, Eldvatn east of Ásar and Flögulón.*



# 1 Inngangur

Verk þetta er unnið í áfanga II í áætluninni Gosvá, heildaráhættumat vegna eldgosa á Íslandi. Það er hluti af heildarverkefni um hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá. Tilgangur verkhlutans er að herma jökulhlaup sem varð í Skaftá á haustmánuðum 2015, en það náði mesta rennsli og útbreiðslu síðan mælingar hófust. Hermunin miðar að því að líkja eftir þekktri útbreiðslu vatns og vatnshæð og meta rennsli árinna í flóðinu. Við líkangerðina þarf að stilla ýmsar breytur til þess að líkanið hermi útbreiðslu og vatnshæð flóðsins sem nákvæmast. Þegar afstillt líkan liggur fyrir er unnt að skilgreina sviðsmyndir sem sýna útbreiðslu og vatnshæð fyrir mismunandi rennsli í flóðum. Fjallað er um þann hluta verksins sem sýnir áhrif mismunandi sviðsmynda í skýrslunni *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Hermun flóðasviðsmynda* eftir Emmanuel Pagneux o.fl. (2018b).

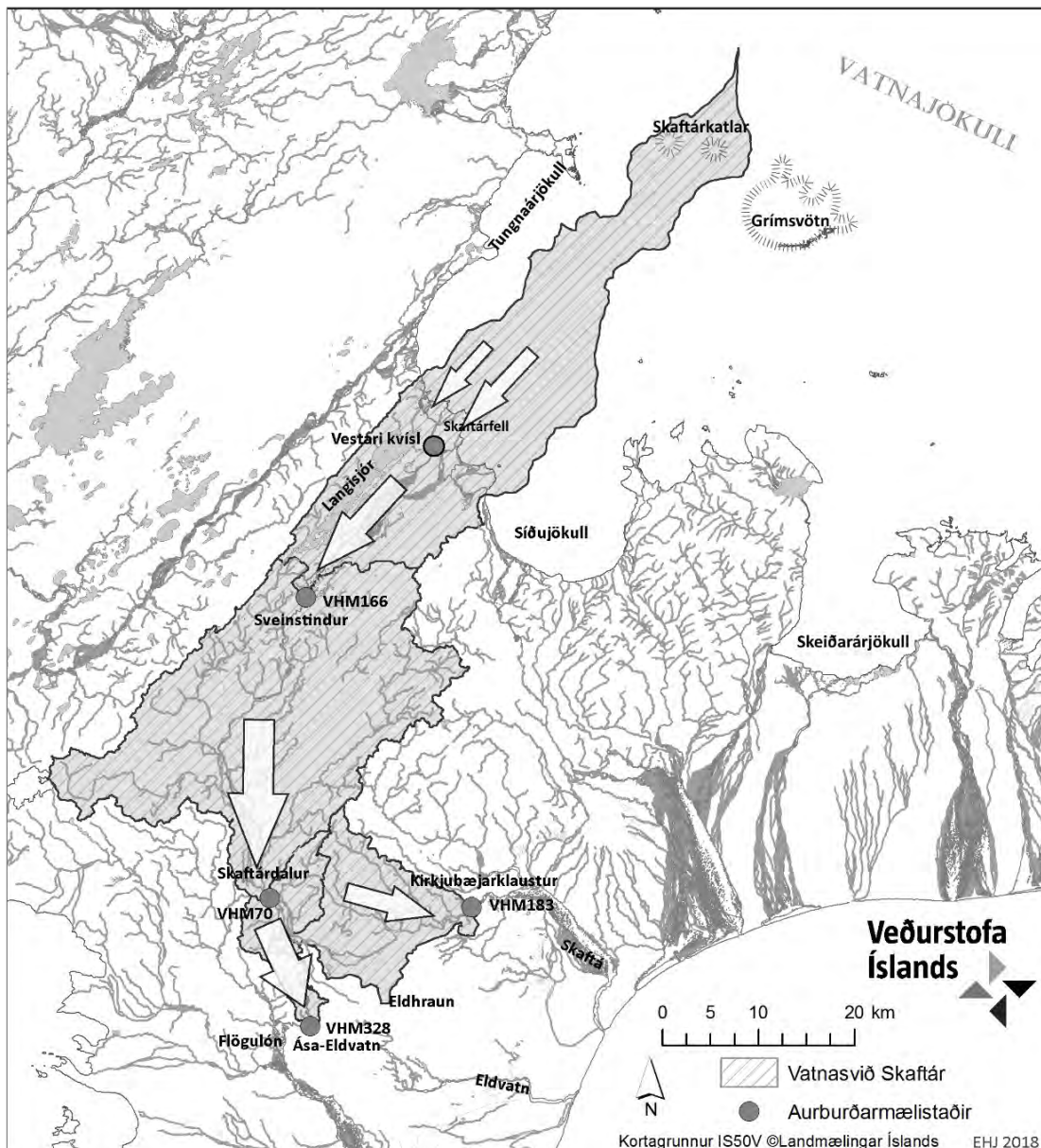
Áhrif Skaftárhlaupa eru margvísleg. Fyrir það fyrsta fer mikið land undir vatn, ræktarland og gróið land verður fyrir tjóni og innviðir eins og samgöngumannvirki skemmast. Því fylgir að einstakir bæir geta einangrast. Þá berst mikill aur yfir flóðasvæðin sem fyllir og þéttir hraunsvæði neðarlega á vatnasvið Skaftár. Vindar feykja aurnum um og eyða gróðri. Auk þess veldur fokið dýrum og fólki nokkrum ama. Loks má geta að veruleg brennisteinsmengun er við upptök Skaftár í jökulhlaupum.

## 1.1 Uppbygging skýrslunnar

Í þessu riti er fjallað um hermun Skaftárhlaupa almennt og gerð grein fyrir forsendum hennar. Annar kafli lýsir aðstæðum við Skaftá en vatnafarið þar er fremur flókið þar sem áin greinist í tvær kvíslar þegar komið er niður í Skaftárdal og umtalsvert flóðvatn rennur út á Eldhraun og hluti þess hripar þar niður. Gerð er grein fyrir mismunandi straumfræðilíkönum og notkunarmöguleikum þeirra í kafla þrjú. Grunnur góðrar hermunar er að hafa nákvæm landlíkön af umræddu svæði og er farið yfir atriði sem skipta máli við landlíkangerð í kafla fjögur. Upplýsingar um mælistaði og helstu mælingar á rennsli sem líkangerðin byggir á er að finna í kafla fimm. Aðferðafræðinni við sjálfa kvörðunina er lýst í kafla sex. Kafli sjö lýsir niðurstöðum hermunar flóðsins sem varð í september/október 2015. Loks eru meginniðurstöður dregnar saman í kafla átta. Í viðaukum er ítarlegri umfjöllun um ýmis tæknileg atriði sem snerta GeoClaw hermanir.

## 2 Skaftárhlaup

Saga Skaftárhlaupa er vel þekkt frá sjötta áratug síðustu aldar, en til eru heimildir um eldri hlaup (Björnsson, 1977). Sterk rök hníga að því að slík hlaup hafi einnig átt sér stað fyrir Skaftárelda enda vísar Jón Steingrímsson til þess með orðunum „... í hvert Skaftá hafði borið í einu af sínum vatnshlaupum.“ (Jón Steingrímsson, 1973, ritað 1788). Hlaupin koma úr Skaftárkötlum þar sem jarðhitavirkni er undir. Undanfarin 50 ár hefur áin flætt nokkuð reglulega við það að bræðsluvatn, sem safnast fyrir undir kötlum í jöklinum, hleypur fram þegar vatnsþrýstingur er orðinn svo hár að farg jökulsins nær ekki að halda aftur af því (Bergur Einarsson, 2009). Vatnið rennur þangað sem fyrirstaða er minnst, þ.e. í farveg Skaftár (Helgi Björnsson, 1977; Svanur Pálsson & Snorri Zóphóníasson, 1992; Páll Jónsson, 1993; Finnur Pálsson & Helgi Björnsson, 2002; Snorri Zóphóníasson, 2002; Finnur Pálsson o.fl., 2014).



Mynd 1. Farvegur Skaftár frá Vatnajökli að mælistöðvum í megindráttum. Stærð örvanna lýsir á myndrænan hátt mismiklu rennsli.

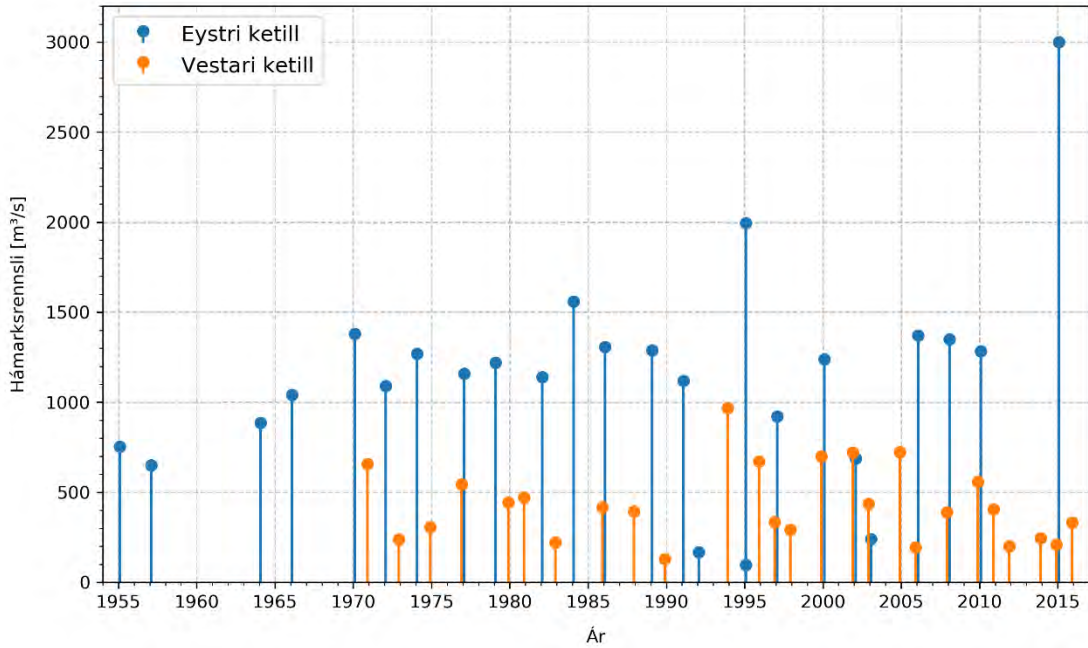
Ofan við Sveinstind flæmist Skaftá um aura. Nú á dögum rennur hún í tveimur meginkvíslum niður að Tröllhamri en í hlaupum og miklum vatnavöxtum flæmist hún um hraunið austan við meginfarveginn. Kvíslarnar sameinast á ný við Sveinstind og falla í einum farvegi niður fyrir Skafárdal. Þar skiptist hún aftur í tvær megin ár, Eldvatn að vestan og Skaftá að austan. Eldvatn sameinast síðan Tungufljóti og rennur til sjávar sem Kúðafljót. Þriðja kvíslin, Árkvíslar, rennur út á Eldhraun og hverfur þar (Mynd 1).

Skaftá flæðir yfir bakka sína í hlaupum. Við það eykst straumþungi og rofmáttur hennar til mikilla muna. Í flóðunum eykst hætta á slysum, að mannvirki flæði og skemmist, tjón og röskun verði á starfsemi, að grípa þurfi til takmarkana á umferð og rýma þurfi á ákveðnum stöðum. Skaftárhlaupum fylgir einnig gífurlegur framburður sem leggst yfir land sem hefur flætt og getur valdið gróðurskaða og dregið úr írennsli vatns niður í undirliggjandi jarðlög (Snorri Zóphóníasson & Svanur Pálsson, 1996; Svanur Pálsson o.fl., 2001; Ingibjörg Kaldal, 2002; Elín Fjóla Þórarinsdóttir o.fl., 2008; Esther Hlíðar Jensen o.fl., 2011).

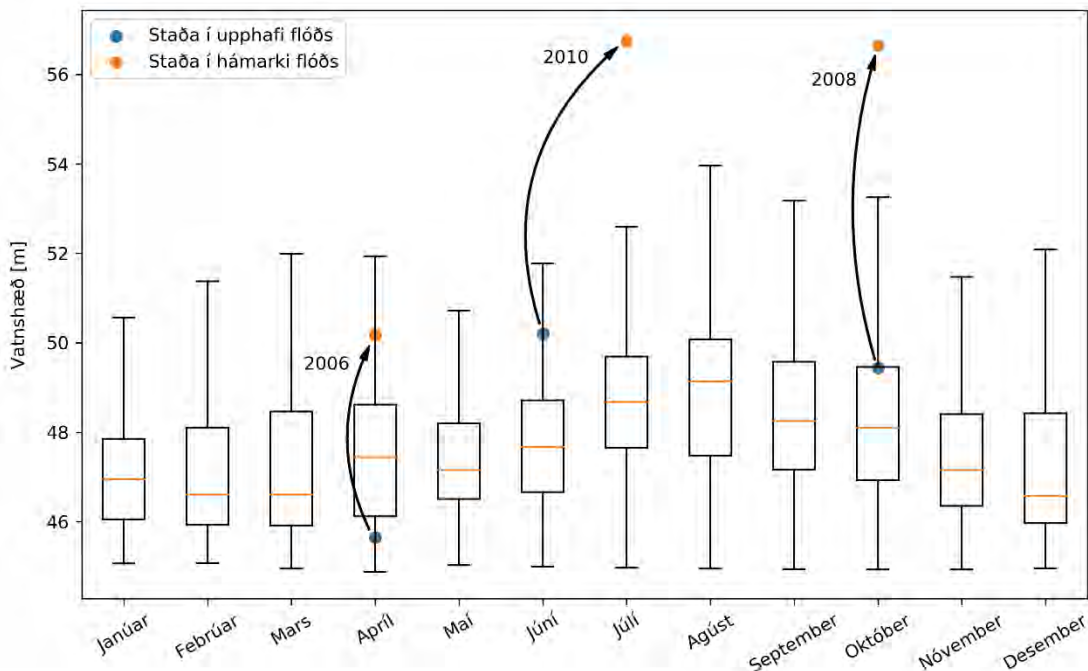
Skaftárkatlar eru tveir og eru hlaup úr eystri katlinum iðulega stærri. Hins vegar hafa hlaup úr vestari katlinum stækkað á undanförunum árum. Á árabílinu 1955–2015 hafa komið 25 hlaup úr eystri katlinum og á árabílinu 1972–2015 hafa komið 25 hlaup úr vestari katlinum. Samtals jafngildir þetta að meðaltali hlaupi einu sinni á ári (Auður Atladóttir o.fl., 2013).

Þar sem undirliggjandi jarðlög eru þétt rennur flóðvatnið á yfirborði. Flæði vatn aftur á móti yfir lek yfirborðsjarðlög, eins og er í Eldhrauni, hripar vatnið niður og verður að grunnvatni og kallast það írennsli (Davíð Egilson, 2016). Í flóðum getur það skipt sköpum fyrir umfang og áhrif flóða hvort þau renna öll fram á yfirborði eða hvort írennsli er það mikið að það dragi úr rennsli á yfirborði. Það fer eftir lekt jarðlaganna hversu hratt vatnið rennur um þau og er mælieining lektar m/s. Lekt nútímahrauna er með því mesta sem þekkist í jarðlögum, eða allt að 1 m/s, og þau hafa mikla rýmd til þess að geyma vatnið (Freysteinn Sigurðsson & Guttormur Sigbjarnarson, 1985). Miðað við að Eldhraunið sé 20–30 m þykkt að meðaltali og rýmd til að geyma vatn sé 10–15% getur hraunið geymt gríðarlegt vatnsmagn. Vatnsflæðið er einkum á lagmótum hrauna og getur lárétt lekt verið tífalt meiri en lóðrétt. Taka þarf tillit til áhrifa írennslis í líkanreikningum af útbreiðslu flóða neðarlega á vatnasviði Skaftár, þar sem vitað er að umtalsvert vatn flæðir undir yfirborði.

Að þessu sögðu er rétt að geta þess að vatnshæð og þar með útbreiðsla flóða stjórnast mikið af grunnvatnsstöðu og er því ljóst að flóð af sömu stærð getur haft mjög misjafna útbreiðslu eftir því hvort það verður við háa eða lága grunnvatnsstöðu. Þessu til útskýringar má sjá á mynd 3, vatnshæð í hverjum mánuði fyrir sig í borholu innan vatnasviðs Skaftár. Hlaupið 2006 hefur átt sér stað við lága vatnsstöðu eða vatnsstöðu undir meðalgrunnvatnshæð en hlaupin 2008 og 2010 við fremur háa grunnvatnshæð.



Mynd 2. Hámarksrennsli Skaftárhlaupa á árunum 1955–2016. Rennslið er mælt í farvegi Skaftár við Sveinstind nema í hlaupinu 1995 sem er samanlagt rennsli í Skaftá, Djúpa og Hverfisfljóti. Í hlaupinu 2015 er hámarksrennsli áætlað um 3000 m<sup>3</sup>/s út frá mælingum á vatnshæð við Sveinstind og mati á rúmmáli hlaupsins.



Mynd 3. Grunnvatnsstaða í borholu (SKA-7) innan vatnasviðs Skaftár. Helmingur mælinga hvers mánaðar er innan hvítu kassana. Appelsínugul lína sýnir miðgildi og 99,3% gagna er innan svörtu bilanna. Hlaupið 2010 varð á mánaðarmótum júní–júlí.



### 3 Straumfræðilíkön

Ýmis líkön standa til boða til straumfræðireikninga. Hérlendis hefur forritið HEC-RAS (Hydraulic Engineering Center's River Analysis System) (Brunner, 2016) verið mikið notað og undanfarin ár hefur GeoClaw (Clawpack Development Team, 2017) líkanið verið prófað með góðum árangri á Veðurstofu Íslands. Í þessum kafla verður fjallað um þessi tvö líkön sem koma bæði við sögu við líkanreikninga jökulhlaupa í Skaftá.

Við hermun er þörf átvíviðu líkani sem getur reiknað dreifingu flóðvatns á stórum svæðum sem verða umflotin. Straumfræðilíkanið GeoClaw framkvæmir tvívíða straumfræðiútreikninga en 5. útgáfa HEC-RAS getur framkvæmt bæði tvívíða og einvíða útreikninga. Helsti munurinn á einvíðum og tvívíðum líkönum er sá að einvíð líkön taka ekki tillit til straumfræðilegra áhrifa af völdum breytinga á þversniðum, t.d. vegna sveigju, eyja, fossa og öðrum þáttum í farvegum svo sem skiptingu rennsli í aðskildar kvíslar. Kostur GeoClaw felst m.a. í getu líkansins til að taka fyrrnefnd atriði með í reikninga og flytja vatn eftir alls kyns farvegum og um flatlendi. Á móti kemur að tvívíðar GeoClaw keyrslur eru að öllu jöfnu margfalt þyngri reiknilega séð og geta keyrslur yfir stór svæði með miklu vatni tekið marga sólarhringa, eftir reikniafli. Tafla 1 sýnir samanburð á líkönunum tveimur sem notuð voru. Ákveðið var að nota fyrst og fremst GeoClaw fyrir hermanir sem hér er lýst þar sem líkanið var talið gefa raunsærri nálgun á vatnshæð umflotinna svæða en forritið HEC-RAS var notað í einfaldri útgáfu til samanburðar á niðurstöðum æstæðra reikninga (e. steady state).

Tafla 1. Samanburður á straumfræðilíkönunum HEC-RAS og GeoClaw.

	Kostnaður	Notendaviðmót	Kóði	Stýrikerfi	Tölvuafi
HEC-RAS	Gjaldfrjáls	Grafískt	Lokaður	Windows	Lítið
GeoClaw	Gjaldfrjáls	Skipanalína	Opinn	Linux, Mac	Mikið

Tvær helstu breytur í flóðahermunum er svokallaður Manningsstuðull og undirliggjandi líkan þess lands sem vatn flæðir yfir. Manningsstuðullinn kemur fyrir í jöfnu Mannings (sjá kafla 3.2) og tilgreinir hrýfi árfarvegjar og annars yfirborðs sem vatn flæðir yfir. Gildi stuðulsins fyrir margskonar yfirborð er þekkt, allt frá stáli og steinsteypu til þurra og leðjukendra árbotna. Eftir því sem stuðullinn er lægri rennur vatnið hraðar og vatnshæð er lægri. Fyrir stórar ár er gildi stuðulsins oft í kringum  $0,035 \text{ s/m}^{1/3}$  en fyrir smáar, tærar, og beinar ár getur stuðullinn verið um  $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$  (Chow, 1959). Til samanburðar við niðurstöður GeoClaw var ákveðið að nota einvíða æstæða HEC-RAS líkanreikninga, þ.e. gert er ráð fyrir að rennsli vatns breytist ekki með tíma. Þessi samanburður var gerður fyrir rennsli við Sveinstind þar sem enn fremur var hægt að bera niðurstöður líkananna saman við mælt rennsli. Með því móti var ætlunin að kvarða hrýfisstuðulinn og kanna hvort niðurstöður líkananna væru sambærilegar á því svæði.

Í þessu verkefni var notast við GeoClaw útgáfu 5.4.0 og útgáfu 5 af HEC-RAS. GeoClaw hermanir voru keyrðar á IBM Flex tölvu með 56 kjarna, 256 GB vinnsluminni og Linux stýrikerfi. HEC-RAS reikningar voru keyrðir á venjulegri borðvél með Windows stýrikerfi.

### 3.1 GeoClaw

GeoClaw líkanið er hluti af forritapakkanum ClawPack (e. Conservation Laws Package) sem var upphaflega þróaður af Randall LeVeque árið 1994 en er nú í þróun af fleiri aðilum með stuðningi frá University of Washington, Boeing, norska rannsóknarráðinu (NFR) og fleirum. ClawPack er opinn hugbúnaður (e. open source software) og gjaldfrjáls undir BSD (Berkeley Software Distribution) leyfi.<sup>1</sup>

ClawPack er sérhæft til þess að leysa hyperbólískar hlutfleiðujöfnur sem lýsa t.d. varðveislu massa og skriðþunga (Mandli, 2016). Undirforritið GeoClaw (Berger, 2011) leysir tvívíðu Saint Venant jöfnurnar, betur þekktar sem grunnvatnsjöfnurnar (e. shallow water equations). Þær lýsa flæði vatns þar sem dýptin er mun minni en flæði þess yfir láréttar vegalengdir. Fyrstu tvær jöfnurnar hér að neðan lýsa varðveislu skriðþunga fyrir tvívíða hreyfingu vatns, þar sem er  $h$  vatnshæð,  $u$  og  $v$  hraði í  $x$  og  $y$  stefnur,  $B_{x/y}$  er afleiða landhæðar í  $x$  og  $y$  stefnu og  $S_{fx/y}$  núníngur. Þriðja jafnan lýsir síðan varðveislu massa. Saman mynda jöfnurnar svokallað Riemann verkefni sem GeoClaw leysir með sérhönnuðum lausnaraðferðum (LeVeque, 2002).

$$(hu)_t + (hu^2 + 1/2 gh^2)_x + (huv)_y = -ghB_x + S_{fx}.$$

$$(hv)_t + (huv)_x + (hv^2 + 1/2 gh^2)_y = -ghB_y + S_{fy}.$$

$$h_t + (hu)_x + (hv)_y = 0.$$

GeoClaw var hannað til að herma útbreiðslu flóðbylgna en það hefur einnig verið notað til að herma m.a. stíflubrot (George, 2011) og sjávarflóð (Mandli K. , 2014). Á Íslandi hefur GeoClaw verið notað við hermun á flóðbylgju sem varð í Öskjuvatni árið 2014 eftir að berghlaup gekk út í vatnið (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2016). Einnig hefur líkanið verið notað við hermun á jökulhlaupum í Jökulsá á Fjöllum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).

Mikilvægasta inntak forritsins er landlíkan en mikilvægt er að upplausn þess sé nægileg svo mannvirki svo sem skurðir, stíflur og varnargarðar komi fram. Annað inntak eru skrár sem tilgreina tímaháða eða augnabliks breytingu á landlíkaninu. Yfirleitt lýsa þær breytingum á vatnsbotni sem orsaka flóðbylgju eða breytingar í stífluvegg vegna stíflubrests. Slíkar breytingar ná hins vegar ekki að lýsa jökulhlaupum þar sem vatn brýst undan jökli. Því var sérstakt forrit skrifað fyrir GeoClaw til að herma jökulhlaup. Það gerir kleift að skilgreina upptakasvæði á formi marghyrninga og einnig vatnsrit sem stjórna magni, hraða og stefnu vatns á upptakasvæðum (sjá viðauka II).

GeoClaw nýtist einkum vel í tilfellum þar sem mikilvægt er að fylgjast með útbreiðslu flóðvatns á flatlendi þar sem ár flæmast úr farvegi sýnum en hefur þó þann annmarka að keyrsla þess á stórum svæðum getur tekið marga sólarhringa. Til að herma jökulhlaup í GeoClaw þarf þrenns konar inntaksgögn (Mynd 4). Fyrst þarf a.m.k. eitt landlíkan með jafnt bil milli netmökva þ.e. reglulegt reikninet.

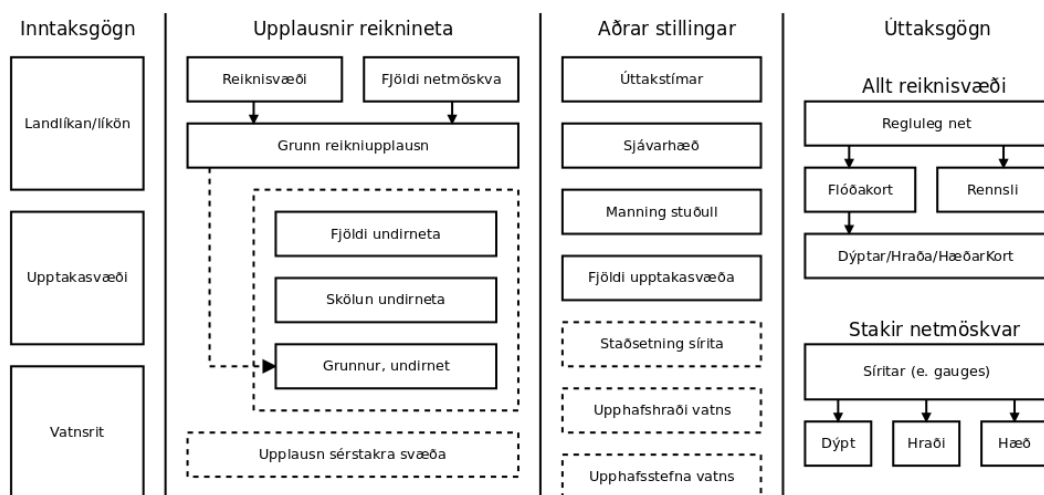
---

<sup>1</sup> Frekari upplýsingar má finna á [www.clawpack.com](http://www.clawpack.com) og kóðann má nálgast á <https://github.com/clawpack/clawpack>

Ef fleiri en eitt landlíkan er notað saumar GeoClaw þau saman í eina samfellda heild. Auk landlíkans þarf upptakasvæði sem vatni er dælt inn á sem og vatnsrit sem stýrir vatnsmagninu.

Reiknisvæði GeoClaw er það svæði landlíkans sem herma á yfir en upplausn þess er óháð upprunalegri upplausn landlíkansins. Grunnupplausn reiknisvæðis er ákvörðuð af stærð þess og fjölda netmöskva í  $x$  og  $y$  stefnu. GeoClaw býr síðan til nýtt landlíkan í stærð og upplausn reiknisvæðis upp úr upprunalega landlíkaninu (sjá kafla 6.1). Ef nota á fleiri en eina upplausn í hermun þarf að skilgreina undirnet og skala þau í hlutfalli við grunn reikniupplausn. Þá er einnig hægt að velja sérstök svæði og þvinga þau í upplausn undirneta eða á bil undirneta.

Niðurstöður GeoClaw hermana er hægt að birta myndrænt með innbyggðum myndvinnslu-aðgerðum. Niðurstöður hermana eru geymdar á tvenns konar formi: annars vegar skrár á reglulegu reiknineti, og hins vegar skrár á töflu formi. Skrárnar innihalda upplýsingar um dýpt, hraða og vatnshæð. Regluleg reikninet lýsa stöðu alls reiknisvæðis á fyrirfram skilgreindum úttaks tímum en töfluskrár lýsa stöðu staks netmöskva á sérhverju tímaskrefi hermunarinnar. Til að vinna með niðurstöður í landupplýsingaforritum, t.d. ArcGIS eða QGIS, var skrifaður kóði sem les úttaksskrár hermunar og býr til hentugri skrár á fylkjaformi til frekari vinnslu, þar sem gildi hvers staks í fylkinu er vatnsdýpt, hraði eða vatnshæð yfir sjávarmáli.



Mynd 4. Dæmigerð uppsetning GeoClaw jökulhlaups hermunar. Brotnar línur tákna valfrjálsar stillingar.

### 3.2 HEC-RAS

Straumfræðiforritið HEC-RAS er hannað til að framkvæma einvíða (1D), æstæða straumfræðireikninga; ein- og tvívíða tímaháða reikninga sem og útreikninga á setframburði, greiningu á vatnshita og líkanreikninga á vatnsgæðum. HEC-RAS hefur verið notað hérlendis um árabíl við ýmis straumfræðileg verkefni s.s. við flóðrakningu, gerð rennslislykla og rannsóknir á útbreiðslu flóða.

Líkanið var þróað af aðilum á vegum bandarísku ríkisstjórnarinnar og er til frjálsra afnota en kóðinn er hins vegar lokaður. Fyrsta útgáfa líkansins kom út árið 1995 og var líkanið upprunalega hannað til að framkvæma einvíða rennslisútreikninga í þversniðum þar sem orkulíkan er leyst í einni vídd og orkutap er metið út frá hryfi, samþjöppun og þenslu. Á síðustu árum hefur líkanið verið þróað enn frekar á þann hátt að mögulegt er að framkvæma tvívíða straumfræðireikninga í náttúrulegum og manngerðum farvegum. Fyrir tvívíða útreikninga leysir líkanið annað hvort tvívíðu Saint Venant jöfnurnar eða tvívíðu sveim-bylgju jöfnurnar (e. diffusion wave equations). Líkanreikningarnir byggja á jöfnu Mannings

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

þar sem  $V$  stendur fyrir straumhraða (m/s),  $n$  fyrir hryfisstuðul Mannings ( $\text{s/m}^{1/3}$ ),  $R$  fyrir „hydraulic radius“ (hlutfall þverskurðarflatarmáls og blauts ummáls) og  $S_f$  fyrir halla orkulínunnar þar sem  $S_f$  jafngildir orkutapi á lengdareiningu.

Nauðsynlegar inntaksstærðir fyrir einvíða HEC-RAS líkanið eru landhæð fyrir viðkomandi farveg s.s. þversnið eftir farveginum og tengsl þeirra, upplýsingar um skurði, stíflur, brýr og þess háttar. Farvegi er þannig skipt niður í þversnið og líkanið reiknar vatnsyfirborð í hverju þversniði fyrir sig. Skilgreina þarf hryfisstuðul Mannings fyrir hvert þversnið og enn fremur er nauðsynlegt að velja viðeigandi jaðarskilyrði fyrir yfirkrítískt (stríður straumur), undirkrítískt (lygn straumur) eða blandað rennsli.

Einvíðir rennslisútreikningar í HEC-RAS henta oft vel þar sem um vel skilgreindan farveg er að ræða en þeir eru ákveðnum annmörkum háðir í þeim tilfellum þar sem áin flæmist upp úr farvegi sínum um flatlendi. Einnig er ljóst að staðsetning þversniða hefur mikil áhrif á niðurstöður líkana og því oft og tíðum óvíst hvort að valin þversnið lýsi landlíkaninu nægilega vel eða hvort skyndileg breyting í landhæð sé e.t.v. á milli þversniða og því ósýnileg straumfræðireikningunum. Með notkun á jöfnu Mannings getur reynst erfitt að ákvarða hryfisstuðulinn  $n$  þar sem ýmsir þættir t.d. farvegshryfi, gróður, vatnsdýpi, rof, setmyndun, rennsli o.fl. getur haft áhrif á stærð hans (Chow, 1964). Þó hafa verið sett fram viðmiðunargildi sem styðjast má við í mörgum tilfellum (Crowe, 2005). Niðurstöður líkansins gefa upplýsingar sem má t.d. birta sem myndir af hverju þversniði, langsníð af farveginum, rennslislykil og sem vatnsrit (ef um tímaháða reikninga er að ræða). Innan hvers þversniðs má fá upplýsingar um til dæmis vatnshæð, hraða, orkulínuhalla, blautt ummál o.fl.

## 4 Landlíkön

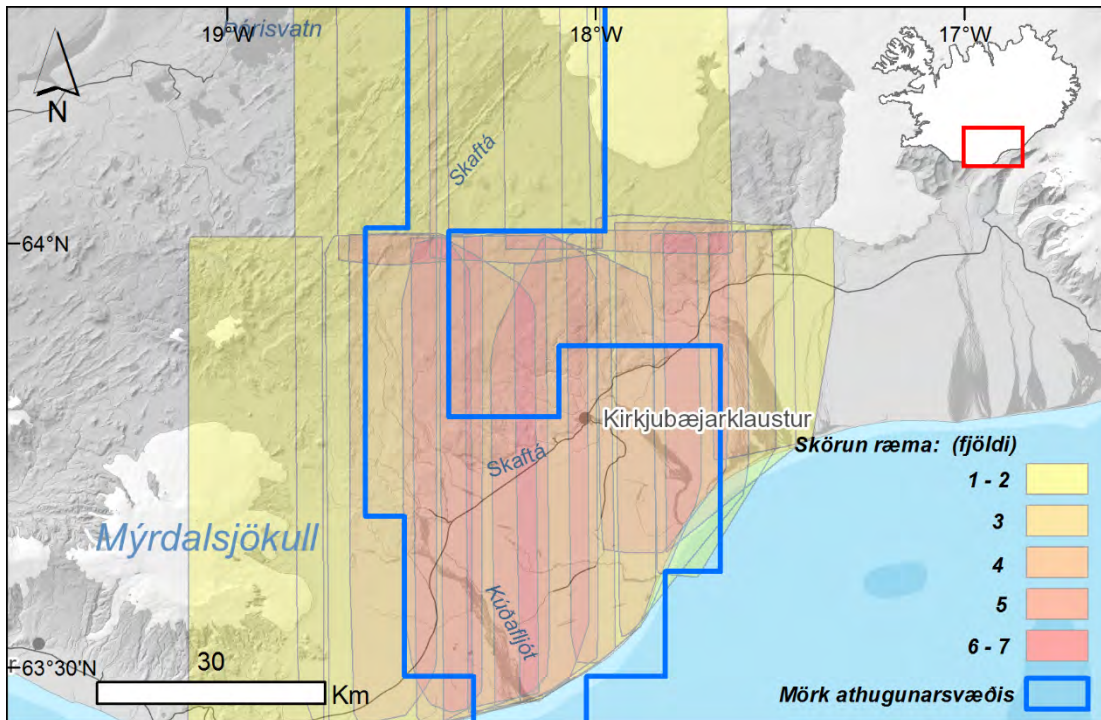
Landlíkönin sem notuð voru undir hermanir byggjast á ArcticDEM landlíkaninu (Polar Geospatial Center, 2017) og leysimælingum á þrífæti (e. terrestrial laser scanning, skammstafað TLS), gerðar þann 17. ágúst 2015. Um er að ræða bestu hæðargögn sem völ er á af farvegi Skaftár. Gerður var samanburður á ArcticDEM landlíkaninu og landlíkönum frá Loftmyndum ehf. sem unnin voru fyrir Vegagerð Ríkisins. Niðurstaðan var sú að gæði og nákvæmni þessara líkana voru sambærileg, en yfirgrip ArcticDEM meira og náði yfir allt athugunarsvæðið. Nánari umfjöllun um gerð ArcticDEM landlíkansins má finna í grein Emmanuel Pagneux (2018a) um útbreiðslu hlaupsins haustið 2015.

### 4.1 ArcticDEM landlíkan — 2 m útgáfa

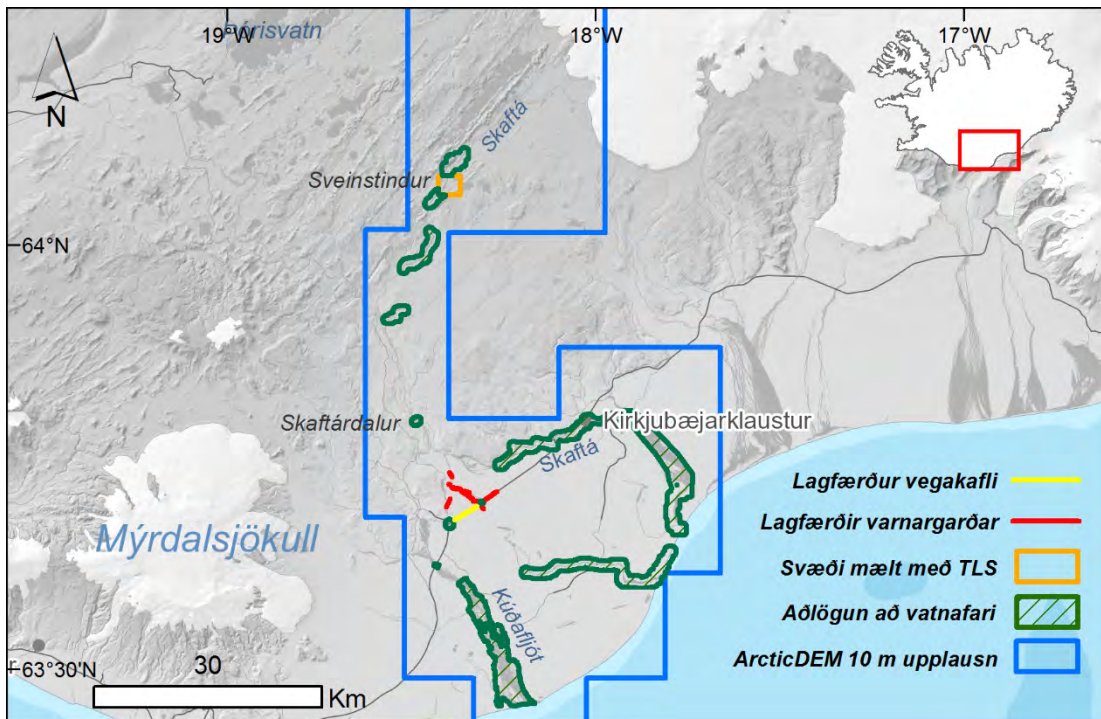
ArcticDEM landlíkanið nær til alls Norðurheimskautssvæðisins í 2x2 m upplausn, unnið upp úr WorldView gervitunglamyndum í samstarfi nokkurra bandarískra aðila. Líkanið er aðgengilegt til niðurrhals í misstórum ræmum fyrir ákveðnar dagsetningar. Hver ræma er byggð á þörum gervitunglamynda en flestar myndirnar sem notaðar voru fyrir Ísland eru frá árunum 2009 til 2015. Allar aðgengilegar ræmur sem skarast við athugunarsvæði verkefnisins voru skoðaðar og gæðametnar sjónrænt með tilliti til snjóalaga, yfirgríps og ýmissa annarra villna og annmarka. Niðurstaðan var að samtals 20 ræmur úr útgáfu 3.0 af ArcticDEM voru settar saman í eitt samfellt landlíkan (Mynd 5). Fyrir samsetningu var hver ræma leiðrétt hvað varðar staðsetningu og hæð. Staðsetningar- og hæðarnákvæmni gagnanna eftir leiðréttingu er um 1m að jafnaði samkvæmt samanburði við nákvæm TLS hæðargögn við jaðar Vatnajökuls. Landlíkanið var loks umreiknað yfir í Landshæðarkerfið 2004 með því að draga frá lágflatarfrávik reiknað af Landmælingum Íslands (2011).

### 4.2 ArcticDEM landlíkan — 10 m útgáfa

Til þess að hægt væri að herma rennsli yfir allt landlíkanið með GeoClaw á raunhæfum tíma, var nauðsynlegt að minnka upplausn þess úr 2 m niður í 10 m. Aðlögun að vatnafari fólst einkum í að fjarlægja fyrirstöður í farvegi Skaftár s.s. brýr og lagfæra villur í farveginum svo sem pytti og/eða hæðir til að tryggja réttan vatnshalla. Sama aðferðafræði var notuð við aðlögun vatnafars hér og fyrir hermun á flóði í Jökulsá á Fjöllum (Sigríður Sif Gylfadóttir, 2017). Sums staðar var líkanið ekki nægilega gott, t.d. þannig að varnargarða vantaði og/eða í þeim voru skörð sem ekki voru raunveruleg. Sérstaklega átti það við um varnargarða í Árkvísulum og í Eldvatni við Ása en reynt var að lagfæra og fella þá inn í landlíkanið eftir fremsta megni. Einnig voru lagfærð sambærileg skörð í kafla á þjóðvegi 1 sem liggur yfir upprunalegan farveg Ásakvísla (Mynd 6).



Mynd 5. Fjöldi og skörun ArcticDEM ræma á athugunarsvæðinu. Grunnmynd: Landmælingar Íslands.



Mynd 6. Uppruni gagna, upplausn og lagfæringar á landlíkani innan athugunarsvæðisins. Grunnmynd: Landmælingar Íslands.

## 5 Vatnshæðarmælar og rennslislyklar

Fjórir vatnshæðarmælar VÍ eru í farvegi Skaftár frá upptökum til ósa; við Sveinstind, í Skaftárdal, í Eldvatni austan við Ása og á Kirkjubæjarklaustri. Rennslislyklar á hverjum stað eru byggðir á fjölda mælinga á rennsli, m.a. í jökulhlaupum og vatnshæð er mæld í staðbundnu kerfi (yfirleitt í cm). Ef til er GPS-mæling á fastmerki fyrir mælistöð er unnt að varpa vatnshæðarmælingum úr staðbundinni hæð yfir í metra yfir sjávarmáli (m.y.s.) sem nýtist betur í samanburði við líkanreikninga.

### 5.1 Mælar í Skaftárdal og Eldvatni

Í hlaupinu í september/október 2015 rofnuðu undirstöður vatnshæðarmælis í Skaftárdal (VMH70) með þeim afleiðingum að mælirinn féll í ána. Mælingar sýna því aðeins upphaf flóðsins og eru að öðru leiti ónothæfar í sambandi við líkanreikningana sem hér er lýst. Í Eldvatni er hámarksrennsli hlaups óþekkt þar sem mæld vatnshæð fór út fyrir gildandi rennslislykil auk þess sem rof varð á gilveggjum neðan mælis sem olli bakvatnsáhrifum (Rennslisskýrsla vatnsárið 2014/2015, 2016). Til viðbótar eru engin GPS fastmerki við mælinn í Eldvatni sem tengja saman mælda vatnshæð og landhæð í metrum yfir sjávarmáli.

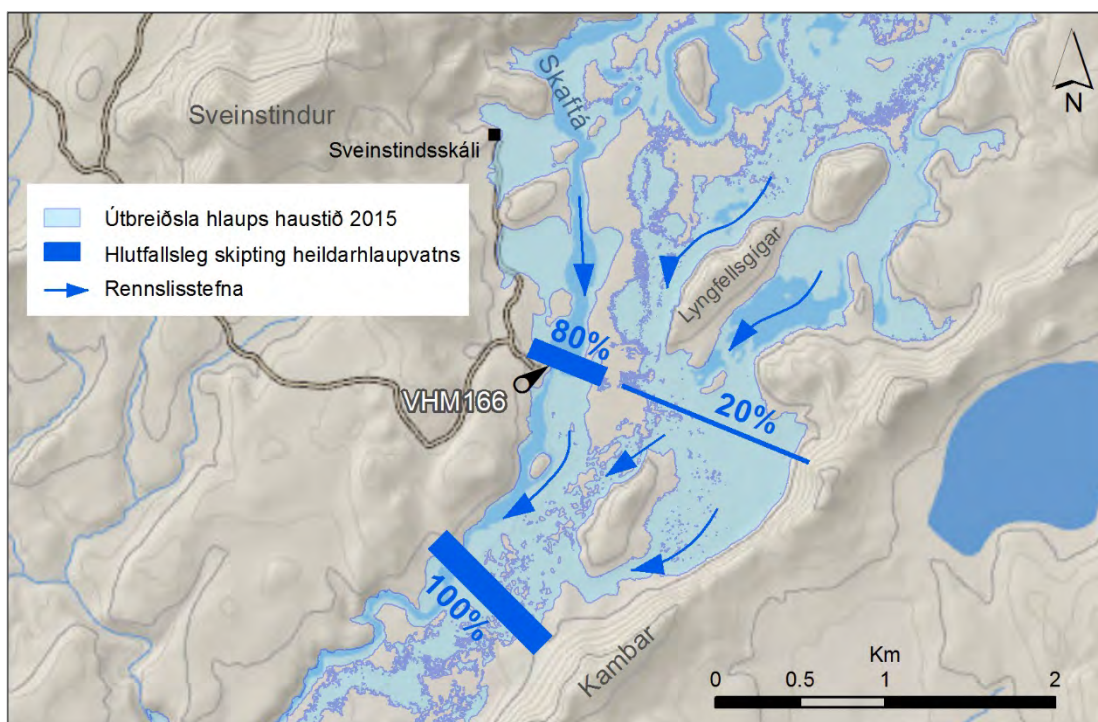
### 5.2 Sveinstindur

Vatnshæðarmælir í Skaftá við Sveinstind, vhm 166, hefur verið í rekstri frá árinu 1972. Nú er í notkun rennslislykill númer 8 sem gildir frá 31. ágúst 2006. Lykillinn er byggður á fjölda rennslismælinga sem hafa m.a. verið gerðar í fyrri jökulhlaupum. Heilt yfir er rennslislykillinn talinn frekar stöðugur á því bili sem rennslismælingar hafa verið gerðar eða upp að um 1300 m<sup>3</sup>/s. Það er þekkt að við hæstu mælingar (> 1000 m<sup>3</sup>/s) rennur Skaftá ekki einungis í meginfarveginum við Sveinstind heldur flæmist til austurs og leitar í farveg við Lyngfellsgíga sem sameinast síðan meginfarvegi við Kamba (Mynd 7). Áætlað er að við 1500 m<sup>3</sup>/s rennsli í gegnum þversniðið við mælinn fari allt að 300–400 m<sup>3</sup>/s aukalega um farveginn við Lyngfellsgíga (Snorri Zóphóniásson, pers. uppl., 2018). Fjöldi GPS-mælinga voru gerðar bæði meðan á hlaupi stóð og eftir það. Jafnframt eru til vel kvörðuð GPS fastmerki fyrir mælinn og því hægt að áætla vatnshæð í metrum yfir sjávarmáli fyrir samsvarandi vatnshæð í hæðakerfi mælis. Við straumfræðilega kvörðun líkanreikninga var því að mestu notast við mælinn við Sveinstind.

#### 5.2.1 Áhrif aurburðar á vatnshæðarmælingar

Vatnshæð í Skaftá við Sveinstind er mæld með þrýstingsmæli og þrýstingi breytt í vatnshæð á þeirri forsendu að eðlisþyngd vatns sé 1 g/cm<sup>3</sup>. Flóðmörk við hámark októberhlaups 2015 voru mæld víða á svæðinu við Sveinstind og sýna mælingarnar hæðina 587,1–587,2 m y.s. á allstóru svæði við skála Útivistar við Sveinstind. Ofan við rennslismælingastað Vatnamælinga VÍ mældust flóðmörk 585,6–585,7 m y.s. og ein mæling sýnir 585,36 m y.s. skammt neðan vatnshæðarmælis (Emmanuel Pagneux o.fl., 2018a).

Leiðréttu þarf vatnshæðarmælingar með þrýstiskynjara við Sveinstind fyrir eðlisþyngdaraukningu jökulhlaupavatns af völdum framburðar til þess að vatnshæðarmælingar við vhm 166 verði sambærilegar við mælingar á flóðförum.



Mynd 7. Skipting og útbreiðsla hlaupvatns í Skaftárhlaupti 2015. Samkvæmt líkanreikningum fer um 20% af heildarvatni um hliðarfarvegi framhjá Lyngfellsgígum. Grunnmynd: Landmælingar Íslands.

Mælingar á aurburði meðan á jökulhlaupinu 2015 stóð, sýna að styrkur svifaurs var um 22 g/l þegar rennsli við Sveinstind náði hámarki skömmu eftir miðnætti 2. október (Esther Hlíðar Jensen o.fl., 2018). Styrkurinn var stundum hærri, allt að 53 g/l, á öðrum tímum meðan á hlaupinu stóð en það hefur ekki áhrif á túlkun vatnsborðsmælinga í hámarki hlaupsins. Styrkur svifaurs í hámarki leiðir til um 1,2% aukningar á eðlisþyngd hlaupvatnsins sem samsvarar um 8 cm aukningu í rennslishámarki.

GPS-mælingar á fastmerkjum og vatnsborði við Sveinstind 2016 og 2017 sýna að vatnshæð í staðarkerfi mælis er núllstillt í 577,84 m hæð yfir sjávarmáli Landshæðarkerfið 2004 (Bogi Brynjar Björnsson, 2017). Það þýðir t.d. að 300 cm mæld vatnshæð samsvarar 580,84 m yfir sjávarmáli fyrir leiðréttingu vegna svifaurs.

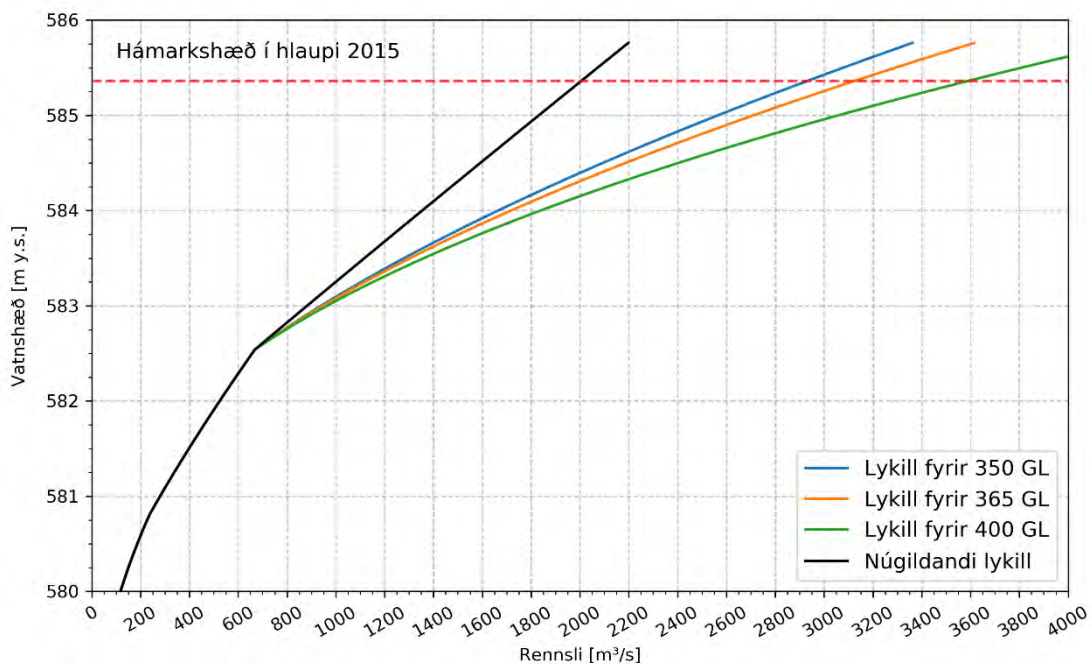
Í hámarki jökulhlaupsins 2015 þarf s.s. að draga 8 cm frá hámarksvatnshæð til þess að reikna hæð vatnsborðs yfir sjó vegna aukinnar eðlisþyngdar af völdum svifaurs. Þá samsvarar vatnshæðin sem mæld var með þrýstiskynjara í hámarki hlaupsins, 760 cm, hæðinni 585,36 m y.s. sem er hið sama og hæð mældra flóðfara skammt neðan mælisins. Þetta góða samræmi er að sjálfsgöðu tilviljun. Gera má ráð fyrir að í raun lækki raunveruleg vatnshæð um nokkra cm frá vatnshæðarmæli að flóðfarinu sem mælt var og GPS- og þrýstingmælingarnar hvorar um sig hafa jafnframt óvissu upp á nokkra cm. Hvað sem því líður er gott samræmi milli þessara mælinga og má ætla að nákvæmni þeirra sé um eða innan við 5 cm sem er nægilega gott fyrir reikninga á rennsli og aðra vatnafræðilega túlkun.



## 5.2.2 Uppfærður rennslislykill

Núgildandi rennslislykill við Sveinstind tekur einungis tillit til vatns sem rennur um meginfarveg Skaftár (merkt 80% á mynd 7). Austan farvegarins við Lyngfellsgíga er talið að rennsli nemi nokkur hundruð  $\text{m}^3/\text{s}$  þegar rennsli í meginfarveginum er komið vel yfir  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Þetta viðbótar- eða framhjärennsli vex eftir því sem hækkar í ánni og hefur ekki verið mælt.

Brugðið var á það ráð að meta rennsli Skaftár í hlaupinu 2015 sem fall af tíma með því að styðjast við mælingu á heildarrúmmáli hlaupsins, 365 milljónir  $\text{m}^3$ , á grundvelli kortlagningar á lækku Eystri-Skaftárketils í hlaupinu (Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2015; Tómas Jóhannesson o.fl., 2018). Miðað var við rennslislykil meginfarvegarins fyrir vatnshæð við Sveinstind undir um 478 cm í staðbundni vatnshæð, eða 582,54 m y.s. í landhæð. Þar fyrir ofan var rennslislyklinum breytt þannig að rennsli sem fall af vatnshæð var aukið stigvaxandi en formi rennslislykilsins var haldið svipuðu (Mynd 8). Stuðlar breytta rennslislykilsins voru valdir þannig að rúmmál hlaupvatns sem rann framhjá Sveinstindi, í öllum farveginum austur að Lyngfellsgígum, reiknaðist jafnt hlauprúmmálinu sem metið hafði verið út frá lækku Eystri-Skaftárketils. Aukning rennslisins skv. breyttum lyklinum er um  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  þegar rennsli meginfarvegarins er um  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ , aukningin er  $300\text{--}400 \text{ m}^3/\text{s}$  við rennsli á bilinu  $1200\text{--}1400 \text{ m}^3/\text{s}$  eins og mælt var í hlaupunum 1989 og 1995, og aukningin er um  $1120 \text{ m}^3/\text{s}$  í hámarki hlaupsins 2015 þegar upprunalegi rennslislykillinn gefur  $2005 \text{ m}^3/\text{s}$  en sá breytti  $3123 \text{ m}^3/\text{s}$  fyrir  $365$  milljón  $\text{m}^3$ .



Mynd 8. Rennslislyklar fyrir vhm 166 við Sveinstind. Sýndur er núgildandi rennslislykill mælisins við Sveinstind (svartur ferill) sem ekki tekur tillit til rennslis utan meginfarvegarins og þrjár rennslislyklar sem metnir eru með því að gera ráð fyrir að heildarrúmmál jökulhlaupsins í október 2015 hafi verið 350, 365 og 400 milljón  $\text{m}^3$ .

## 6 Kvörðun GeoClaw

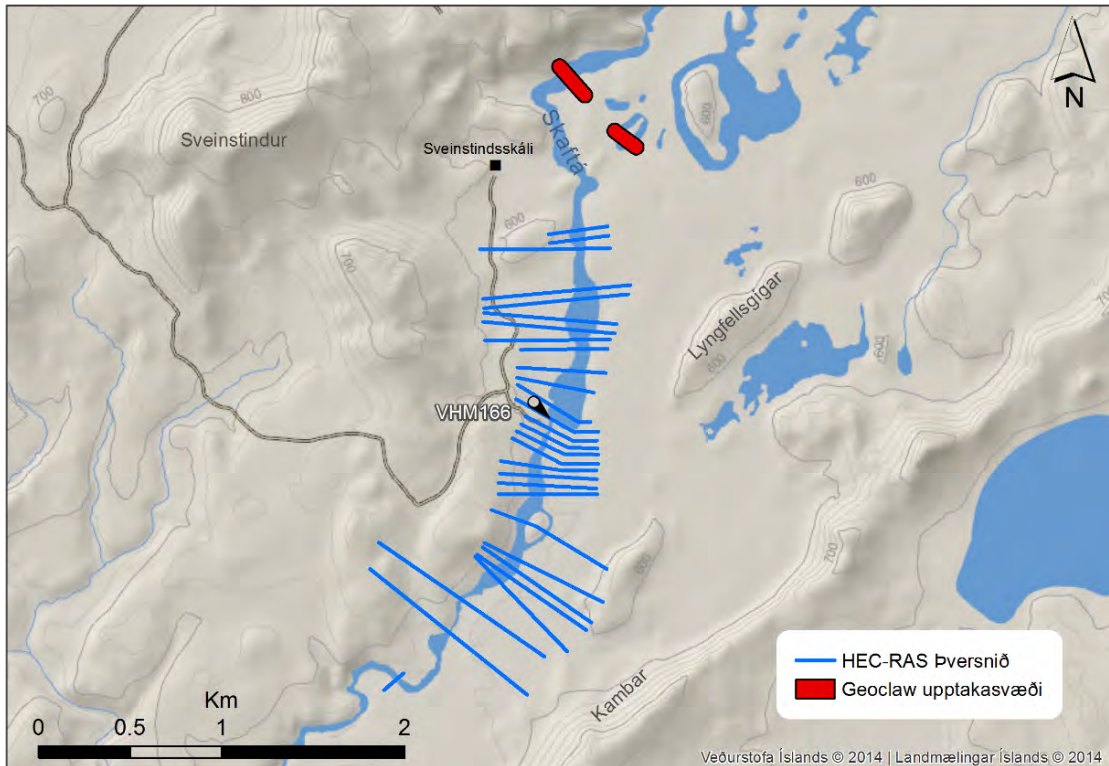
Til þess að kvarða straumfræðiforritið GeoClaw voru hermanir bornar saman við Skaftárhlaupið í september og október 2015. Kvörðunin er metin út frá fjórum meginþáttum: útbreiðslu, vatnshæð við Sveinstind, rennsli við Sveintind, og ferðatíma hlaups milli Sveinstinds og Skaftárdals. Líkanið er kvarðað með bæði æstæðum reikningum í meginfarvegi Skaftár við vatnshæðarmæli við Sveinstind og tímaháðum reikningum með upptök við Stakafell, tæpa 9 km norðaustan vatnshæðarmælis.

### 6.1 Æstæðir reikningar

Einfaldir æstæðir reikningar voru settir upp í GeoClaw og einnig í HEC-RAS til samanburðar. Einvíðir HEC-RAS reikningar henta vel hér í þröngum, beinum farvegi Skaftár við vatnshæðarmæli, en nýtast illa annars staðar í farveginum þar sem áin flæmist um. Markmið æstæðra reikninga er að líkja eftir rennslislykli Veðurstofu Íslands við Sveinstind á því vatnshæðarbili þar sem hann er talinn nákvæmur og fá þannig upplýsingar um hryfisstuðul Mannings. Til að hægt sé að framlengja núverandi rennslislykil, þarf vatn að geta flætt um hliðarfarvegi, líkt og sýnt er á Mynd 7. Það má gera með því færa upptaksvæði ofar í farveginn. Hér er aðeins skoðaður nügildandi rennslislykill sem tekur bara tillit til vatns sem fer framhjá vatnshæðarmæli í meginfarvegi (Mynd 9). Út frá greiningu á rennslismælingum við Sveinstind, var hryfisstuðull Mannings áætlaður sem  $0,034 \text{ s/m}^{1/3}$  í venjulegu rennsli en  $0,04 \text{ s/m}^{1/3}$  í jökulhlaupum undan eystri katli (Davíð Egilson, 2016). Fyrirfram var því búist við að niðurstöður æstæðra líkanreikninga gæfu svipaðar niðurstöður hvað varðar hryfisstuðul Mannings, þ.e. á bilinu  $0,03\text{--}0,04 \text{ s/m}^{1/3}$ .

Æstæðu rennsli er náð í GeoClaw með því að dæla föstu magni vatns inn á upptaksvæðið þangað til bæði vatnshæð og rennsli í farveginum ná jafnvægi, þ.e. breytast ekki með tíma. Upptaksvæði í GeoClaw eru staðsett um 2 km ofan við vatnshæðarmæli og vatnið látið renna niður farveginn um Lyngfellsgíga framhjá Kömbum (Mynd 8 og mynd 9). Upplýsingar um vatnsdýpi, vatnshraða og vatnshæð eru teknar úr GeoClaw úti í straumnum við vatnshæðarmæli vhm 166 við Sveinstind. Æstæðir reikningar voru settir upp á sama svæði í HEC-RAS með þversniðum sem spönnuðu um 2,5 km farvegarins. Eitt þversniðanna var við vatnshæðarmælinn til þess að fá samanburð við GeoClaw. Sjá má staðsetningu HEC-RAS þversniða og GeoClaw upptaksvæða á mynd 9.

Samanburður líkanreikninga og rennslislykils gekk heldur treglega en snemma varð ljóst að nauðsynlegt yrði að nota lægri hryfisstuðul en búist var við miðað við fyrri líkanreikninga og áður nefnda skoðun á stuðli Mannings út frá rennslismælingum. Hluti landlíkans við vatnshæðarmæli við Sveinstind er byggt á TLS-leysimælingum. Mælingarnar voru gerðar þann 17. ágúst 2015 frá u.þ.b kl. 10 til 12 á hádegi. Meðalrennsli í Skaftá meðan á mælingum stóð var um  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  og meðalvatnshæð um 250 cm í hæðarkerfi vatnshæðarmælis. Taka þarf tillit til þessa rennslis þegar TLS-mælingin fór fram í landlíkanreikningunum.

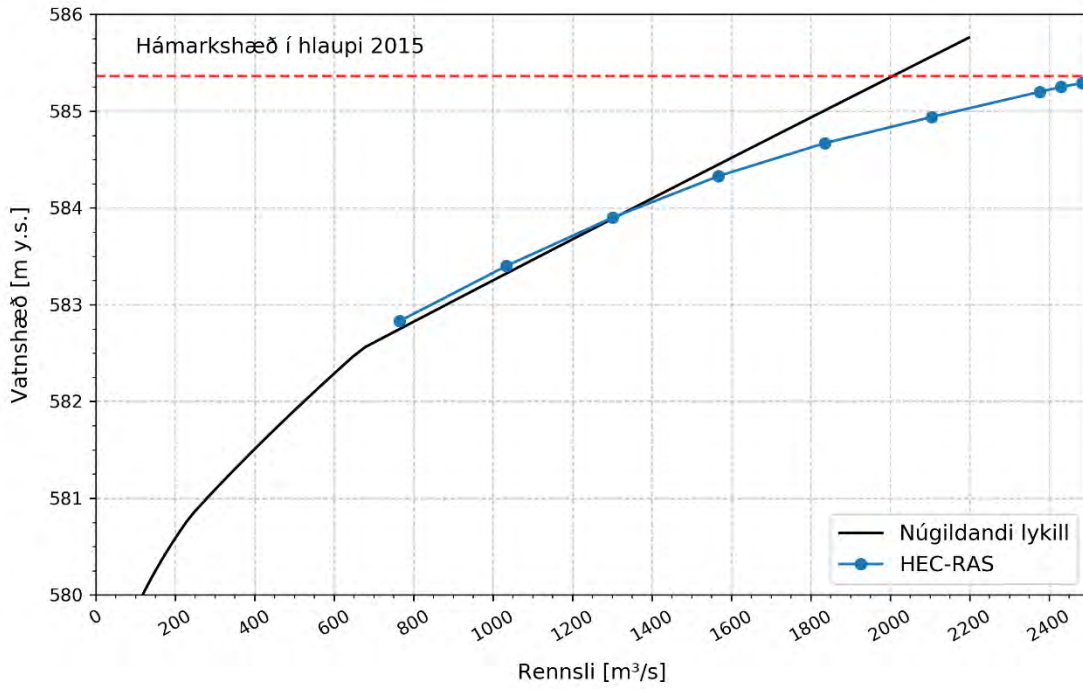


Mynd 9. Staðsetningar HEC-RAS þversniða og GeoClaw upptakasvæða í farvegi Skaftár. Vatnshæðarmælir vhm 166 er einnig merktur inn. Grunnmynd: Landmælingar Íslands.

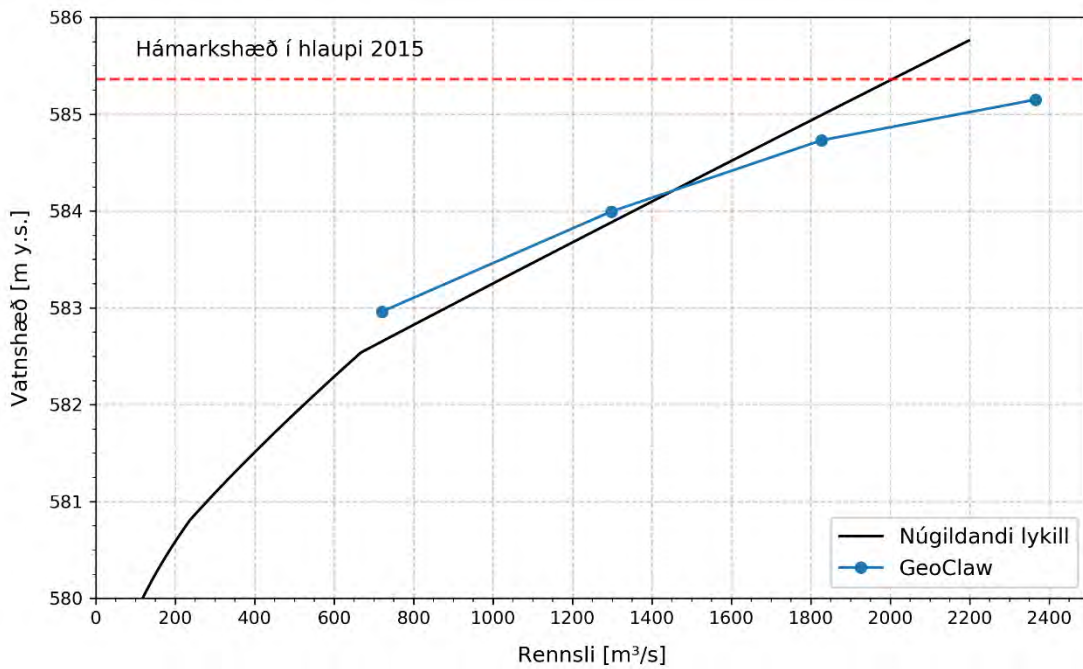
Straumfræðilíkonin ganga út frá því að vatnsflöturinn við 150 m<sup>3</sup>/s rennsli í landlíkaninu sé botn árfarvegarins. Þetta 150 m<sup>3</sup>/s rennsli samsvarar ákveðnu flatarmáli í þversniðum farvegarins sem er ekki fyrir hendi í líkaninu þar sem árbotninn er ekki þekktur. Þegar líkt er eftir t.d. 1000 m<sup>3</sup>/s rennsli er ekki rétt að bæta 150 m<sup>3</sup>/s við 850 m<sup>3</sup>/s og telja að heildarrennslið sé 1000 m<sup>3</sup>/s., heldur þarf að skala rennslið. Nánari umfjöllun um grunnrennsli og skölun þess er að finna í viðauka III.

Við aukið rennsli verður straumhraðinn í gengum hinn óþekkta hluta þversniðsins meiri en meðan á TLS-mælingunni stóð, og rennslið sem fer um það eðlilega meira. Á mynd 10 má sjá nógildandi rennslislykil og niðurstöður líkanreikninga úr HEC-RAS með þeim hryfisstuðul Mannings sem gaf besta raun (0,03 s/m<sup>1/3</sup>) með fyrrnefndri skölun á rennsli sem fyrir var í farveginum við landmælingu.

Sjá má að þokkalegt samræmi er á milli líkanreiknaðs rennslis og rennslislykils á bilinu 750–1300 m<sup>3</sup>/s. Þess ber að geta að skölun á rennslinu veldur óvissu sem er einna mest fyrir lág líkanreiknuð rennslisgildi og eru því niðurstöður eingöngu sýndar frá u.þ.b. 750 m<sup>3</sup>/s. Núverandi rennslislykill byggist á rennslismælingum sem ná upp að rúmlega 1300 m<sup>3</sup>/s og má því segja að HEC-RAS niðurstöðurnar gefi þokkalegt samræmi við rennslislykilinn upp að þeim mörkum sem talin eru nokkuð örugg vegna tiltækra rennslismælinga. Mynd 11 sýnir sambærilegar niðurstöður úr GeoClaw fyrir þann hryfisstuðul Mannings sem gaf besta raun í því tilviki (0,02 s/m<sup>1/3</sup>).



Mynd 10. Niðurstöður æstæðra HEC-RAS líkanreikninga með Manning stuðli  $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$  samanborið við núgildandi rennslislykil.



Mynd 11. Samanburður æstæðra GeoClaw líkanreikninga og núgildandi rennslislykils, með Manning stuðli  $0,02 \text{ s/m}^{1/3}$ .

Niðurstöður æstæðra GeoClaw reikninga sýna að velja þarf mun lægri Manning stuðul en fyrir HEC-RAS. Skölun grunnrennslis í GeoClaw er mun erfiðari en í HEC-RAS, þar sem gera þarf sérstaka útreikninga til þess að áætla flatarmál þversniðs og hraða í gegn um það. GeoClaw hermanir eru jafnframt tímafrekar svo aðeins rennslitilfelli 500, 1000, 1500 og 2000 m<sup>3</sup>/s voru sköluð (sjá viðauka I fyrir líkanrennslis og viðauka III fyrir skölun). Líkanreiknuð vatnshæð á bilinu 750–1300 m<sup>3</sup>/s er hærri en núgildandi lykill og er þar að auki hærri en niðurstöður úr HEC-RAS þrátt fyrir lægri Manning stuðul. Ástæðu þessa má að hluta til rekja til brúunar sem GeoClaw gerir á landhæðargögnum. GeoClaw endurvinnur upprunalega landlíkanið með því að reikna meðalgildi hvers netmöskva út frá umliggjandi möskvum með tvílnulegri brúun, sem er nauðsynlegt svo straumfræðilíkanið geti beitt lausnaraðferðum sínum. Þetta veldur hins vegar breytingu á landlíkaninu.

Breytingar á landlíkani eru mestar þegar mikill hæðarmunur er milli netmöskva líkt og við árbakka. Þar getur munað tugum cm milli upprunalegs líkans og þess endurunna. Þetta sést greinilega á mynd 12, hæðarbreyting er meiri við árbakka en minni í miðjum farveginum þar sem hann er sléttur. Með 10 m landlíkaninu sem notað var við, skiptist t.d. 100 m breiður farvegur niður á 10 netmöskva. Miklar hæðarbreytingar á fáum netmöskvum geta því valdið talsverðum breytingum á farveginum.

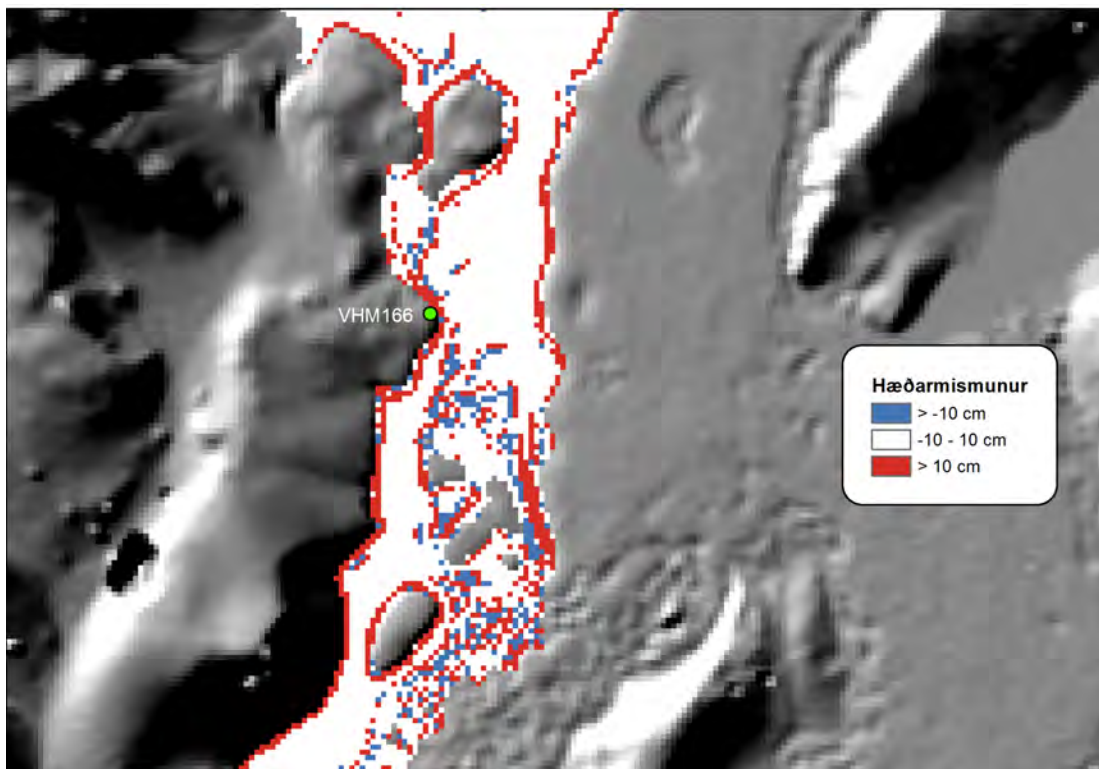
Heildaráhrif þessa þáttar eru þó ekki nægileg til þess að skýra muninn á kvörðun á stuðli Mannings milli líkananna. Þar skiptir meira máli að stuðull Mannings er ekki eingöngu eðlisfræðileg stærð sem lýsir hrjúfleika farvegarins heldur er hann einnig háður líkaninu þar sem honum er beitt. Þannig fást mismunandi niðurstöður um rennslis eftir því hvort reiknað er með jöfnu dýpi á öllu þversniðinu eins og gert er í einvíðum HEC-RAS reikningum eða rennslis reiknað á mörgum stöðum með mismunandi dýpi í hverju þversniði. Straumhraði skv. jöfnu Mannings vex í hlutfalli við vatnsdýpi í veldinu 2/3 sem veldur því að heildarrennslis er talsvert meira um þversnið með jöfnu vatnsdýpi samanborið við þversnið með saman flatarmáli með breytilegu dýpi fyrir sömu gildi á stuðli Mannings og halla yfirborðs. Áhrif þessa þáttar eru heldur ekki nægileg til þess að skýra muninn í kvörðun líkananna en þau skýra nokkurn hluta hans.

## 6.2 Tímaháðir reikningar

Með tímaháðum líkanreikningum var reynt að ákvarða betur hvaða Manning stuðul skyldi nota með því að líkja sem best eftir þekktri útbreiðslu, vatnshæð, áætluðu hámarksrennslis, og ferðatíma flóðsins milli Sveinstinds og Skaftárdals. Nýtt upptakasvæði var staðsett í farvegi Skaftár við Fögrufjöll, um 8 km ofan við Sveinstind. Hlaupvatninu var gefinn 2 m/s upphafshraði til að líkja eftir þeim hraða sem það kynni að hafa ef það kæmi alla leið frá jökli. Hlaupvatn gat þá flætt um hliðarfarvegi svo hægt var að gera tilraun til að framlengja núgildandi rennslislykil.

### 6.2.1 Útbreiðsla og hámarksrennslis

Af uppréttum ljósmyndum, klasagreiningu og landhæðargögnum er útbreiðsla 2015 hlaupsins vel þekkt á nokkrum stöðum í farvegi Skaftár, þar á meðal við Sveinstind. Rúmmálsmælingar á Skaftárkötlum benda til þess að hámarksrennslis undan jökli hafi verið í kringum 3000 m<sup>3</sup>/s. Með gögn um útbreiðslu, þekkta vatnshæð og áætlað rennslis í hámarki hlaups gefst gott tækifæri til þess að kvarða líkanreikninga við Sveinstind.

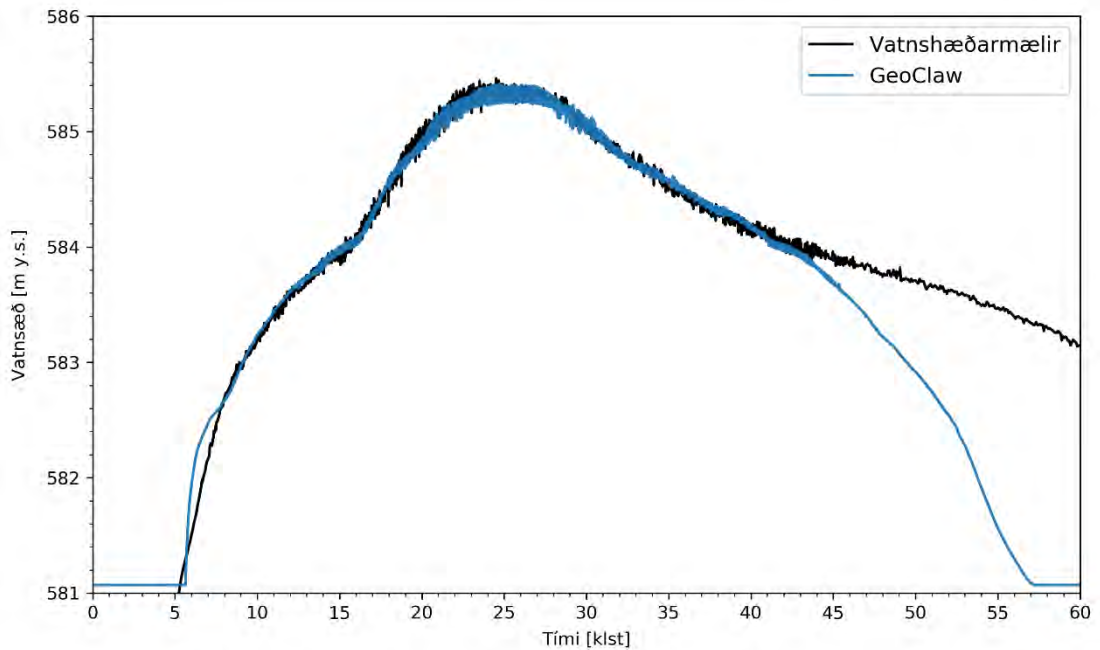


Mynd 12. Áhrif GeoClaw brúunar á árfarveginn. Myndin sýnir mismun á landlíkani fyrir og eftir hermun, þ.e. landlíkan (vatnshæð — vatnsdýpt). Hækkun er mest við árbakka en minni í miðjum farveginum; þetta veldur hækkun á farveginum.

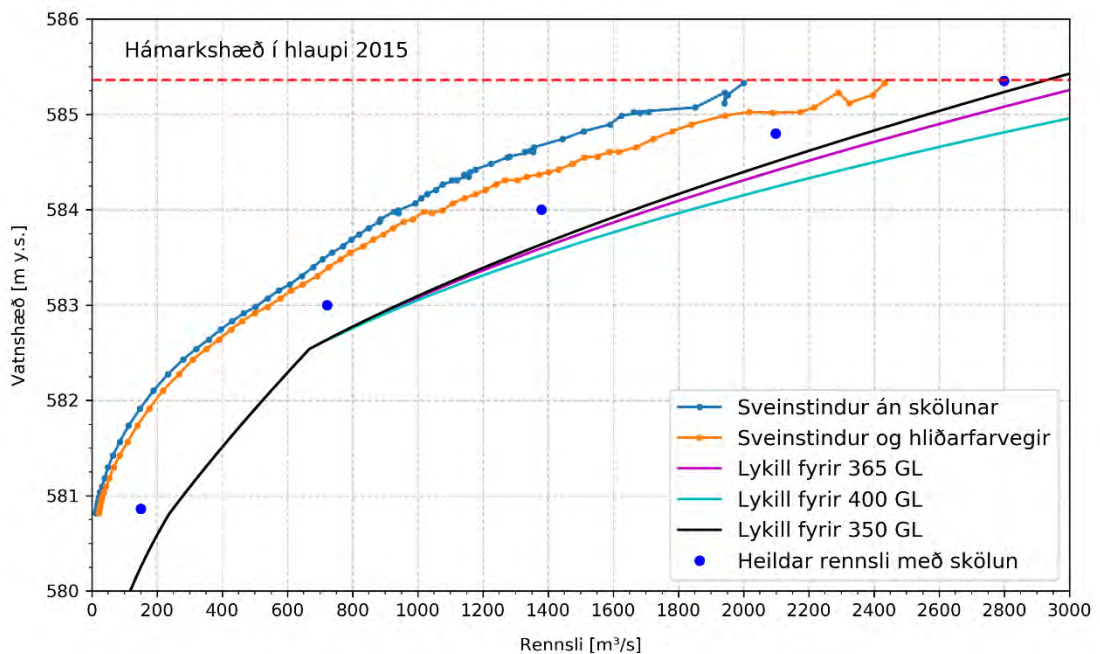
Til þess að meta vatnshæð við Sveinstind var vatnsrit rennslis frá upptakasvæðinu stillt af með ítrun þangað til líkanreiknaður vatnshæðarferill líktist mældum ferli (Mynd 13). Ekki var nauðsynlegt að líkja eftir öllum mældu vatnshæðarferlinum þar sem hámarksútbreiðslu er náð í hámarki sem varir í 5 til 6 klukkustundir og skiptir því litlu máli fyrir líkangerð hvernig flóðið fjarar út. Því næst var rennslíð í gegnum þversnið við vatnshæðarmælinn reiknað auk rennslis sem fer um hliðarfarvegi við Lyngfellsgrá. Niðurstöður voru að Manning stuðull  $0,02 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  gaf bestan samanburð við þekkta útbreiðslu og var næst hinu áætlaða rennslí í hámarki sem var um  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  eins og fyrr segir. Líkanreiknuðu útbreiðsluna í hámarki má sjá á korti 1 og ber henni vel saman við þekkta útbreiðslu.

Hámarksrennslí gegnum þversnið við mælinn reyndist vera um  $2060 \text{ m}^3/\text{s}$  og um hliðvarfarveg var hámarkið um  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ , samtals  $2460 \text{ m}^3/\text{s}$ . Skölun á grunnrennslí framhjá vatnshæðarmæli við  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$  (sjá kafla 6.1) hækkar síðan rennslíð um  $366 \text{ m}^3/\text{s}$  (væri ögn hærra fyrir  $2060 \text{ m}^3/\text{s}$ ), sem samanlagt eru  $2826 \text{ m}^3/\text{s}$  (Mynd 14).

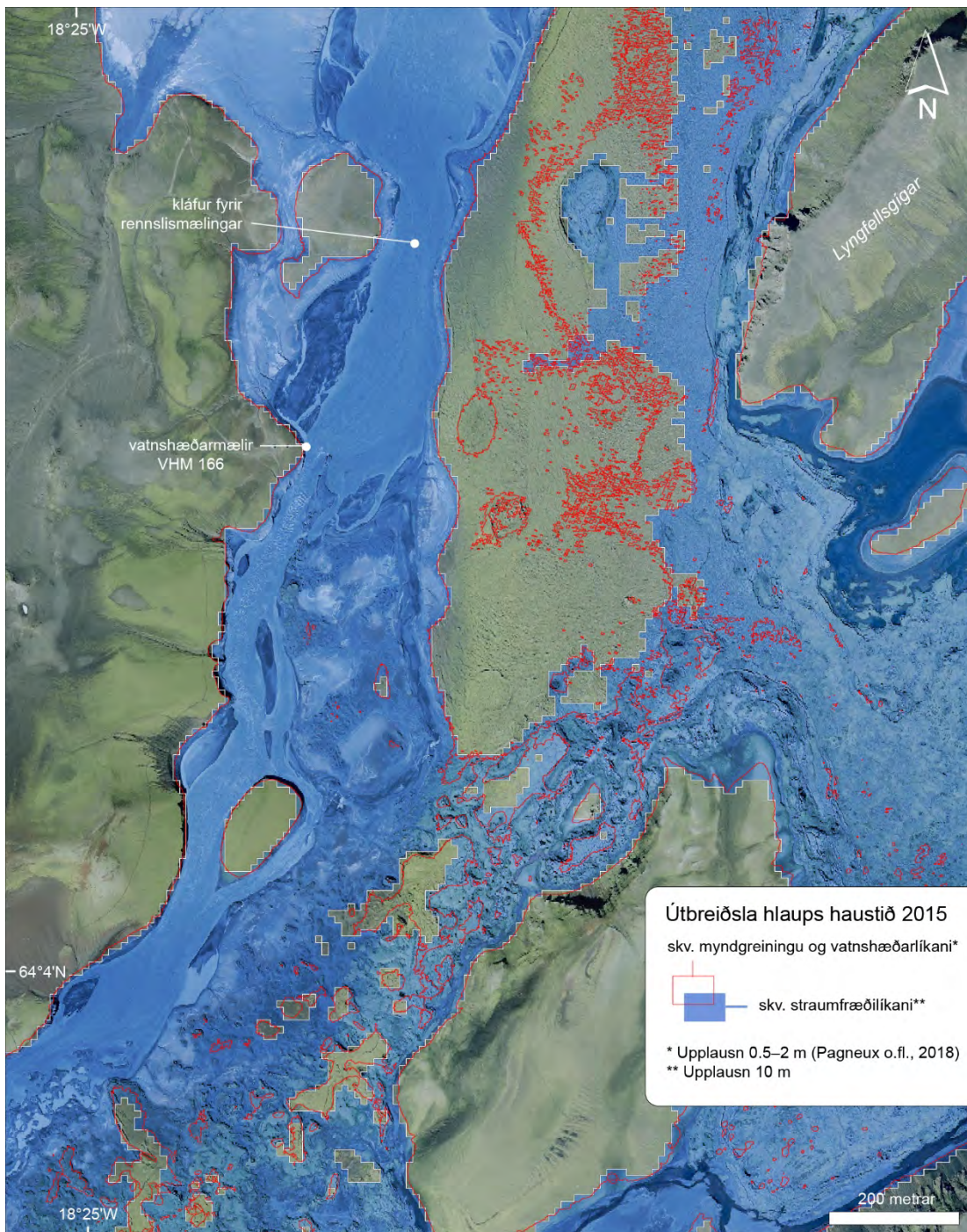
Vegna áhrifa brúunar GeoClaw á 10 m upplausn farvegarins þarf að bæta við  $65 \text{ m}^3/\text{s}$  viðbótarrennslí svo líkanið sé rétt núllstillt á rennslislyklinum. Því má segja að hámarksrennslíð skv. líkaninu sé hærra en  $2826 \text{ m}^3/\text{s}$ , líklega nær  $2900 \text{ m}^3/\text{s}$ , við vatnshæðina sem mældist í hámarki hlaupsins.



Mynd 13. Samanburður líkanreiknaðri og mældri vatnshæð við Sveinstind í Skaftárhlaupi október 2015. Vatnsrit rennslis af upptakasvæði er stillt til að líkja sem best eftir mældum vatnshæðarferli.



Mynd 14. Líkanreiknaðir rennslislyklar framhjá Sveinstindi, með og án hliðarfarvega. Heildarrennsli með skölun og uppfærðir rennslislyklar út frá heildarrúmmáli hlaups. Líkanrennsli er hér skoðað í rénun hlaups.



Kort 1. Líkanreiknuð útbreiðsla við Sveinstind. Loftmynd: Loftmyndir ehf.



### 6.2.2 Ferðatími flóðsins

Vatnshæð og rennsli við Sveinstind eru vöktuð í rauntíma. Ferðatími flóðsins milli Sveinstinds og Skaftárdals í hlaupinu haustið 2015 var u.þ.b. 5 klst. samkvæmt vatnshæðarmælingum og um 6 klst. samkvæmt leiðnimælingum (Veðurstofa Íslands, óbirt gögn). Þessar tölur eru ekki nákvæmar vegna þess að bæði vatnshæðin og leiðnin vaxa hægt í upphafi. Þær gefa þó góða hugmynd um ferðatíma flóðsins og sýna að flóðbylgjan berst hraðar áfram en vatnið sem myndar hana eins og vænta má, vegna þess að bylgjan þrýstir á undan sér vatni sem fyrir er í farveginum. Leiðnin ferðast hins vegar á sama hraða og vatnið.

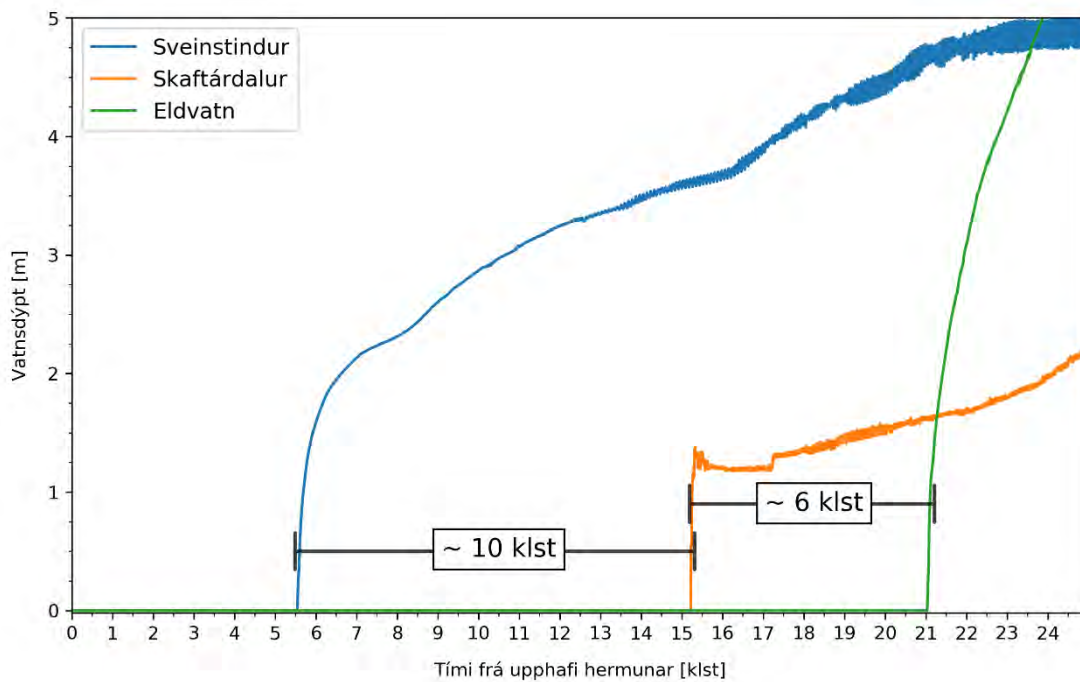
Gerð var tilraun til þess að reikna framrás jökulhlaupsins haustið 2015 alla leið frá Sveinstindi niður á láglandi neðan Skaftárdals, sem er um 40 km vegalend. Í reikningunum sem lýst er í þessum undirkafla er reiknisvæðið látið ná frá Fögrufjöllum (um 8 km ofan við Sveinstind) að Skaftárdal með sama vatnsriti og upphafsskilyrðum og notað var í kafla 6.2.1. Í ljós kom að flóðvatn sem lagði leið sína um Grjótá, sunnan Skaftárgljúfra, komst ekki í gegnum þröngan farveginn vegna galla í landlíkaninu og staðnæmdist þar; myndaði eins konar lón. Grjótá sameinast Skaftá neðar í farveginum fyrir austan tjaldsvæðið við Hólaskjól og allt vatn sem rennur þar í gegn myndi því á endanum renna aftur um Skaftá neðan ármóta þessara vatnsfalla. Því var brugðið á það ráð að setja upp vegg í landlíkaninu til þess að hindra för vatns um Grjótá til að tryggja að ekkert vatn safnaðist þar fyrir heldur færi beint til Skaftárdals.

Niðurstöður reiknaðra ferðatíma (Mynd 15) sýna að GeoClaw líkanreikningar milli Sveinstinds og Skaftárdals, henta ekki til þess að meta framrásarhraða fyrsta flóðfaldsins vegna þess að farvegur árinna er þurr í upphafi reikninganna og þá hefur óvissa og skekkjur í landlíkaninu svo mikil áhrif á rennslið að framrásarhraðinn verður ómarktækur. Reiknaður ferðatími milli Sveinstinds og Skaftárdals er um 5 klukkutímum lengri en mælt var í raun (Mynd 16). Reikningarnir lýsa hins vegar nokkuð vel þróun rennslis með tíma og hámarksrennsli á hverjum stað sem m.a. ræðst af því hvernig flóðbylgjan dreifir úr sér niður eftir farveginum þannig að hámarksrennslið lækkar eftir því sem kemur neðar í farveginum.

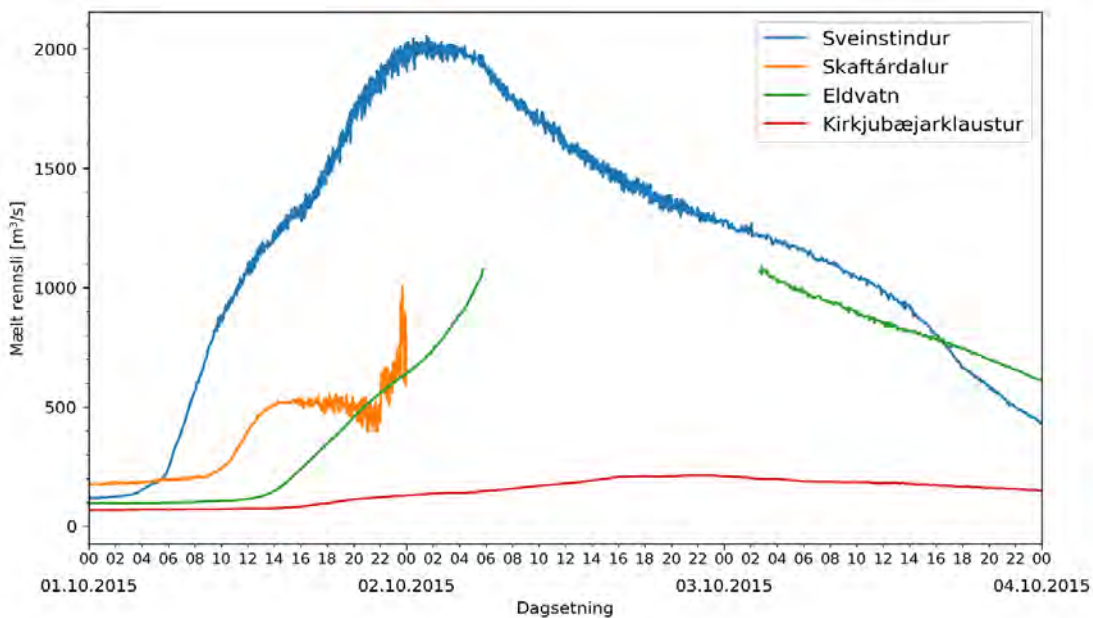
Mynd 17 sýnir líkanreiknað rennsli sem fall af tíma við Sveinstind (vhm166), í Skaftárdal (vhm 70), í Eldvatni austan við Ása (vhm 328) og á Kirkjubæjarklaustri (vhm 183). Sjá má að hámarksrennsli lækkar um 120 m<sup>3</sup>/s frá Sveinstindi niður í Skaftárdal, frá 2450 m<sup>3</sup>/s til á 2330 m<sup>3</sup>/s. Milli Skaftárdals og Eldvatns austan við Ása lækkar rennslið enn frekar um 770 m<sup>3</sup>/s úr 2230 m<sup>3</sup>/s niður í 1560 m<sup>3</sup>/s. Hámarksrennsli á Kirkjubæjarklaustri reynist síðan aðeins vera um 200 m<sup>3</sup>/s. Í skýrslu Estherar Hlíðar Jensen (2018), eru niðurstöður GeoClaw hermana notaðar til að búa til leiðrétt rennslisferla, sem eru sýndir óleiðréttir á mynd 15.

### 6.3 Val á Manning stuðli

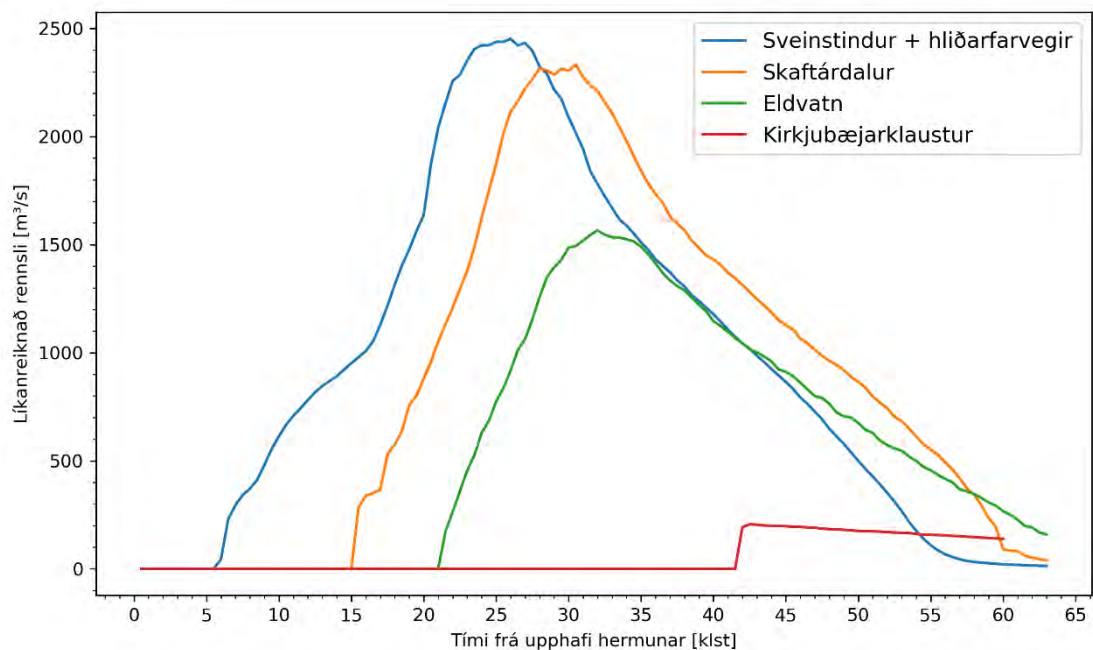
Af ofangreindum niðurstöðum er ljóst að velja þarf lágan hrýfisstuðul Mannings í GeoClaw, eða 0,02 s/m<sup>1/3</sup>. Við það gildi er líkanreiknuð útbreiðsla sambærileg þekktri útbreiðslu við Sveinstind, og líkanreiknað hámarksrennsli kemst nálægt áætluðu hámarki samkvæmt rúm-málsútreikningum á Eystri-Skaftárkatli. Ef stuðull Mannings er valinn lægri en 0,02 s/m<sup>1/3</sup> verður mikill tölulegur óstöðugleiki í líkaninu og reikningar ekki marktækir. Fyrir hermanir sviðsmynda í skýrslu Emmanuel Pagneux o.fl. (2018b) er notaður Manning stuðull 0,02 s/m<sup>1/3</sup>. Að lokum ber að nefna, að í GeoClaw hefur Manning stuðullinn sama gildi yfir allt reiknisvæðið og ekki er hægt að nota mismunandi gildi fyrir mismunandi svæði með mismunandi eiginleika, þó það væri æskilegt fyrir farveg Skaftár.



Mynd 15. Líkanreiknaður ferðatími milli lykilmæla (Sveinstindur, Skaftárdalur og Eldvatn austan við Ása).



Mynd 16. Mælt rennsli í september/októberhlaupi 2015. Í Skaftárdal skemmdist vatns-hæðarmælir og í Eldvatni austan við Ása fór rennsli út fyrir þekkt mörk.

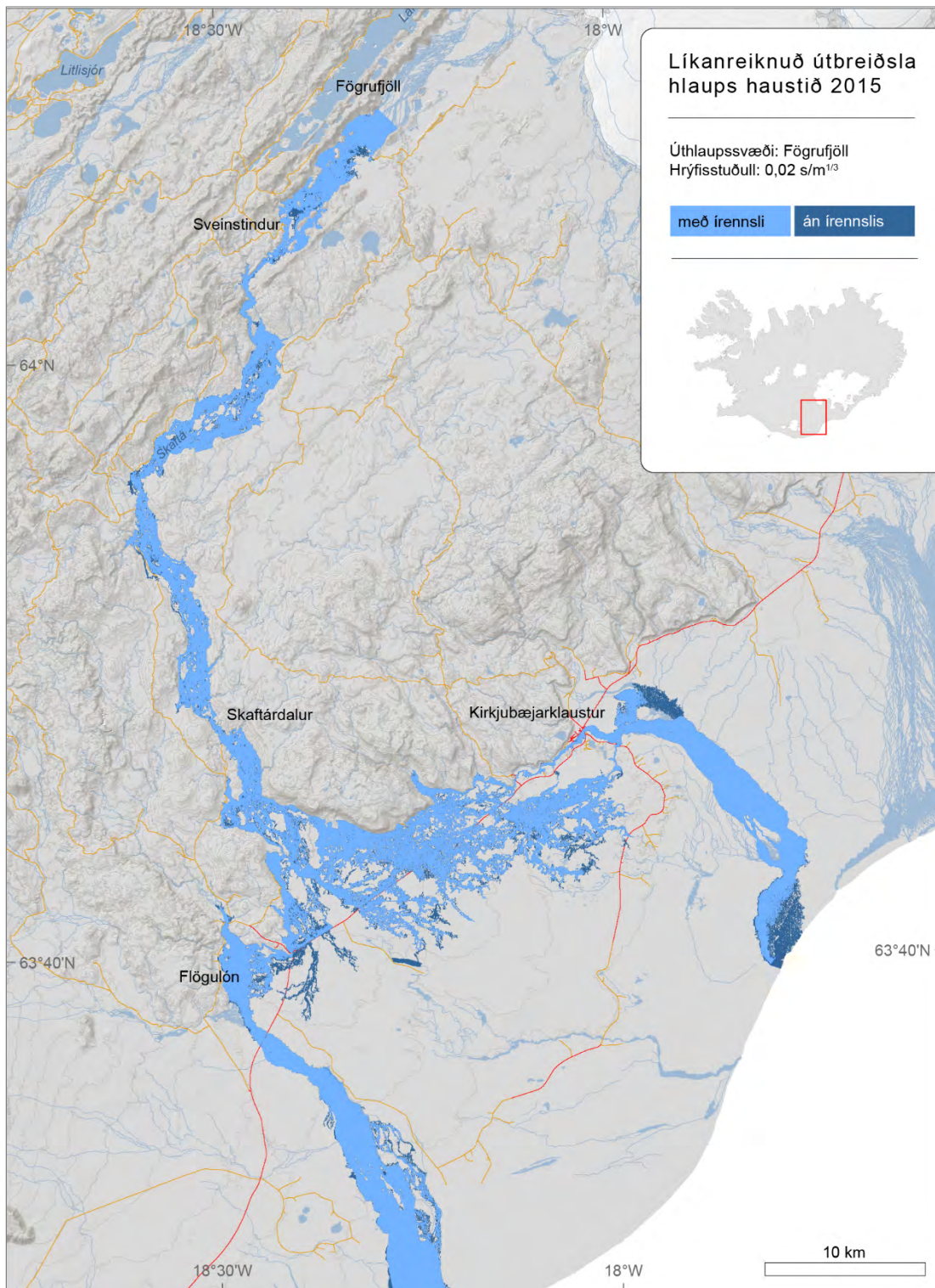


Mynd 17. Líkanreiknað rennsli við lykilmæla (Sveinstindur, Skaftárdalur, Eldvatn austan Ása og Kirkjubæjarklaustur). Ekki tekið tillit til grunnrennslis og írennslis.

## 7 Jökulhlaup haustið 2015 — Niðurstöður

Skaftárhlaupið á haustmánuðum 2015 náði mesta rennsli og útbreiðslu árinna frá upphafi mælinga. Helstu takmarkanir GeoClaw við hermun Skaftárhlaupa, og raun flestra straumfræðilíkana, eru að ekki er hægt að herma rof á farvegi, írennsli vatns um hraun, og aurburð. Undirstöður brúarstæðis Skaftártunguvegs við Eldvatn skuluðust m.a. í burtu í hlaupinu svo brúin laskaðist, mikið magn aurs barst á tún og þekkt er að hlaupvatn getur flætt milli hraunlaga og jafnvel sprengt sér leið í gegnum þau. Af þessum þremur þáttum er einungis reynt að taka tillit til írennslis vatns í hermunum.

Gerð var 60 klukkustunda hermun í 10 m upplausn alla leið frá Fögrufjöllum, um 8 km ofan Sveinstinds, til sjávar (Kort 2 og 3). Manning stuðull  $0,02 \text{ s/m}^{1/3}$  var valinn fyrir allt svæðið. Hermd útbreiðsla í láglandi neðan Skaftárdal fyrir valdar staðsetningar með vel þekkta útbreiðslu (Kort 4–9), eru ræddar hér að neðan.



Kort 2. Heildarlíkanreiknuð útbreiðsla jökulhlaups 2015 með (ljósblár) og án (dökkblár) írennslis. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.



Kort 3. Nærmynd af líkanreiknaðri útbreiðslu jökulhlaups 2015 sunnan Skaftárdals, með (ljósblár) og án (dökkblár) írennslis. Kortagrunnur: Landmælingar Íslands.

## 7.1 Eldvatn og Árkvísar

Sunnan Skaftárdals í Eldvatni er útbreiðsla samkvæmt líkanreikningum (Kort 4), meiri en var í raun. Líkanreikningar sýnda að vatn flæðir í miklum mæli yfir varnargarða við Árkvísar og í Eldvatni, jafnvel þó varnargarðarnir hafi sérstaklega verið felldir inn í landlíkanið. Mikið vatn flæðir yfir þjóðveg 1 milli Eldvatns og Stóra-Brests í líkaninu, en í raun fór ekkert vatn þar yfir í hlaupinu 2015.

Eins og tekið var fram í kafla 2, getur hlaupvatn hripað ofan í hraun og runnið þar undir yfirborðinu milli hraunlaga. Þar sem GeoClaw reiknar allt vatn sem yfirborðsvatn þarf því taka tillit til írennslisins með einhverjum hætti. Það var gert með því að lækka hámarksrennsli í líkanreikningum þangað til að sambærileg útbreiðsla fékkst við Eldvatn, þ.e. þangað til lítið sem ekkert vatn flæddi yfir þjóðveg 1. Lækka þurfti hámarksrennslið um  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  úr  $2400 \text{ m}^3/\text{s}$  niður í  $1800 \text{ m}^3/\text{s}$  (Kort 5). Jafnvel með þessari lækkun fór meira hlaupvatn í líkanreikningum yfir varnargarðana en gerðist í raun.

## 7.2 Flögulón og Kúðafljót

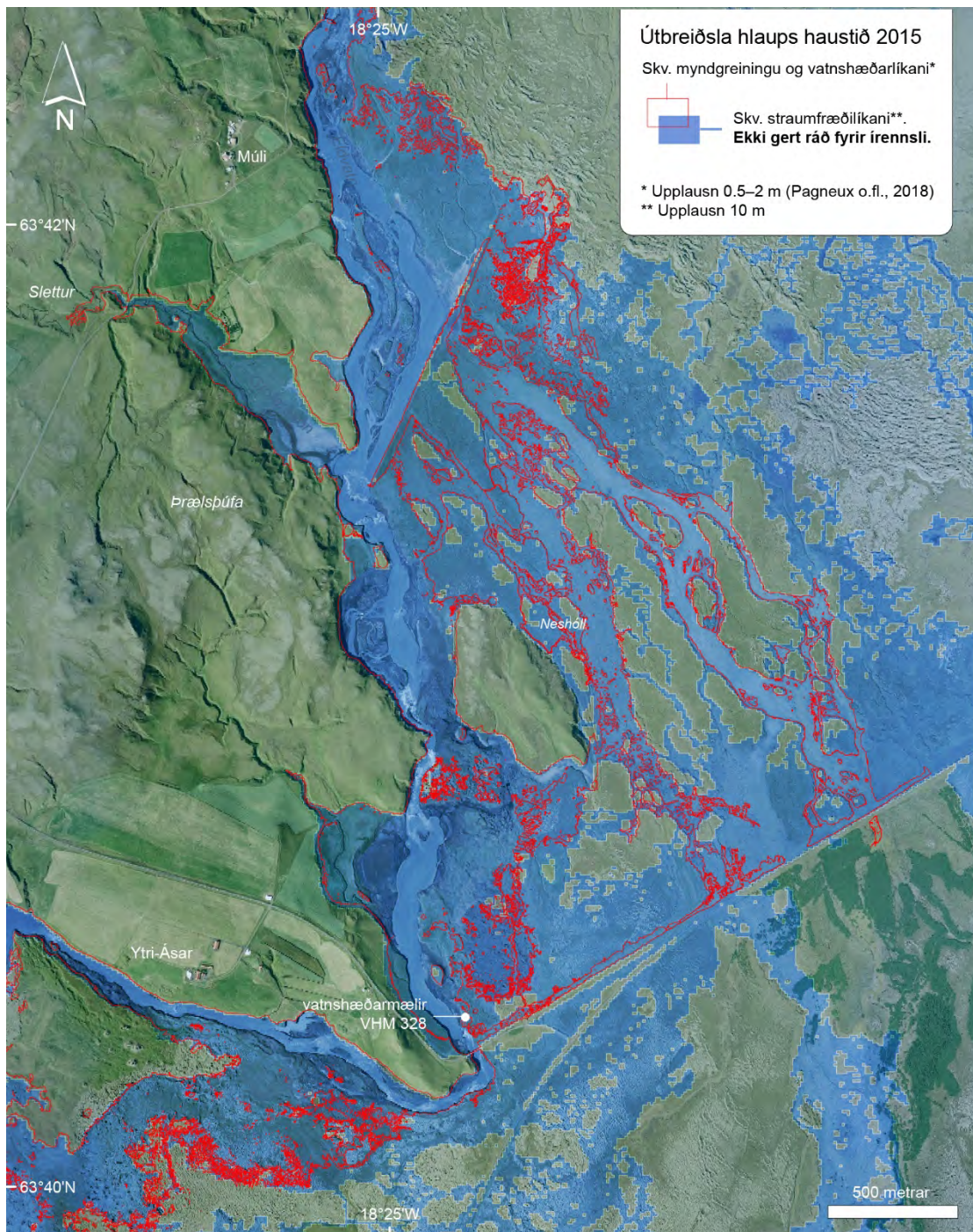
Líkanreiknaðri útbreiðslu í Flögulóni ber vel saman við mælda útbreiðslu hvort sem gert er ráð fyrir írennsli eða ekki, sjá kort 6 og kort 7. Útbreiðslan er þó nákvæmari þegar ekki er gert ráð fyrir írennsli. Þetta bendir til þess að útbreiðsla í Flögulóni sé nokkuð stöðug, þ.e. breytingar á hámarksrennsli valda ekki miklum breytingum á heildarútbreiðslu.

Í hlaupinu 2015 rofnuðu gilveggir við brúnna yfir Ása-Eldvatn svo hún laskaðist. Við það víkkaði farvegurinn og vatnshæð lækkaði. Ekki er hægt að herma slíkt rof í GeoClaw sem veldur því að vatnshæðin við brúnna er hærri en ella, og á auðveldara með því að flæða yfir bakka sína þar.

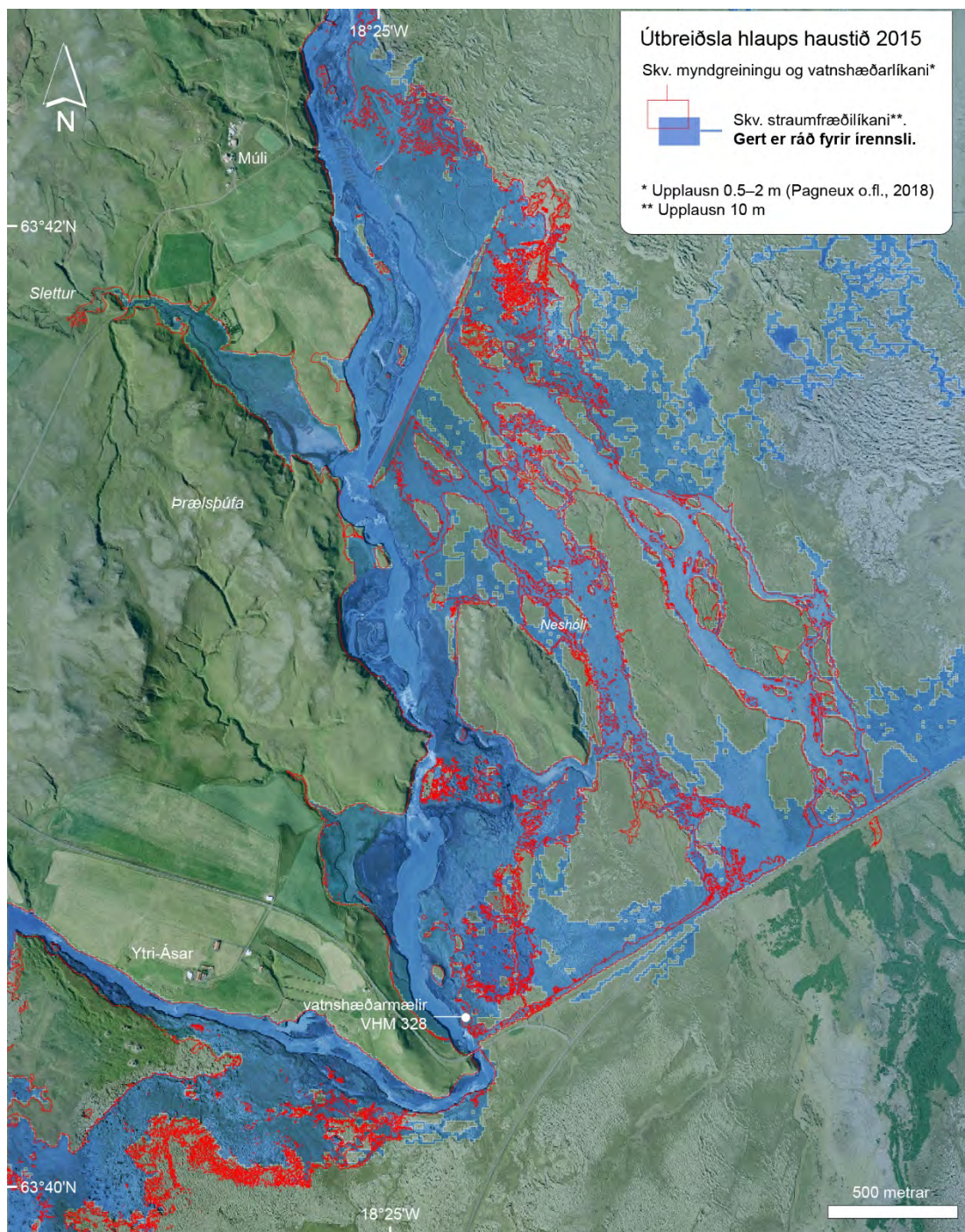
## 7.3 Eldhraun og Kirkjubæjarklaustur

Stærsti óvissuþáttur líkanhermana Skaftárhlaupa í GeoClaw er áhrif írennslis hlaupvatns niður í hraun, þá sérstaklega í Eldhrauni. Nánast ógerlegt er að fá rétta mynd af útbreiðslu í Eldhrauni þar sem allt vatn í GeoClaw rennur á yfirborðinu. Jafnframt ætti hraunið að hafa mun hærri Manning stuðul en þann sem notast var við, þar sem ekki er hægt að nota breytilega stuðul í hermun. Því er ekki hægt að treysta niðurstöðum GeoClaw í Eldhrauni.

Á Kirkjubæjarklaustri er líkanreiknuð útbreiðsla meiri en mælt var. Hins vegar er lítil munur á útbreiðslu með og án írennslis, sjá kort 8 og kort 9. Það gefur til kynna að aukið hámarksrennsli hafi ekki mikil áhrif útbreiðslu við Kirkjubæjarklaustur en við aukið hámarksrennsli leitar hlaupvatn undan Skaftárdal frekar beint suður í Eldvatn og Árkvísar.

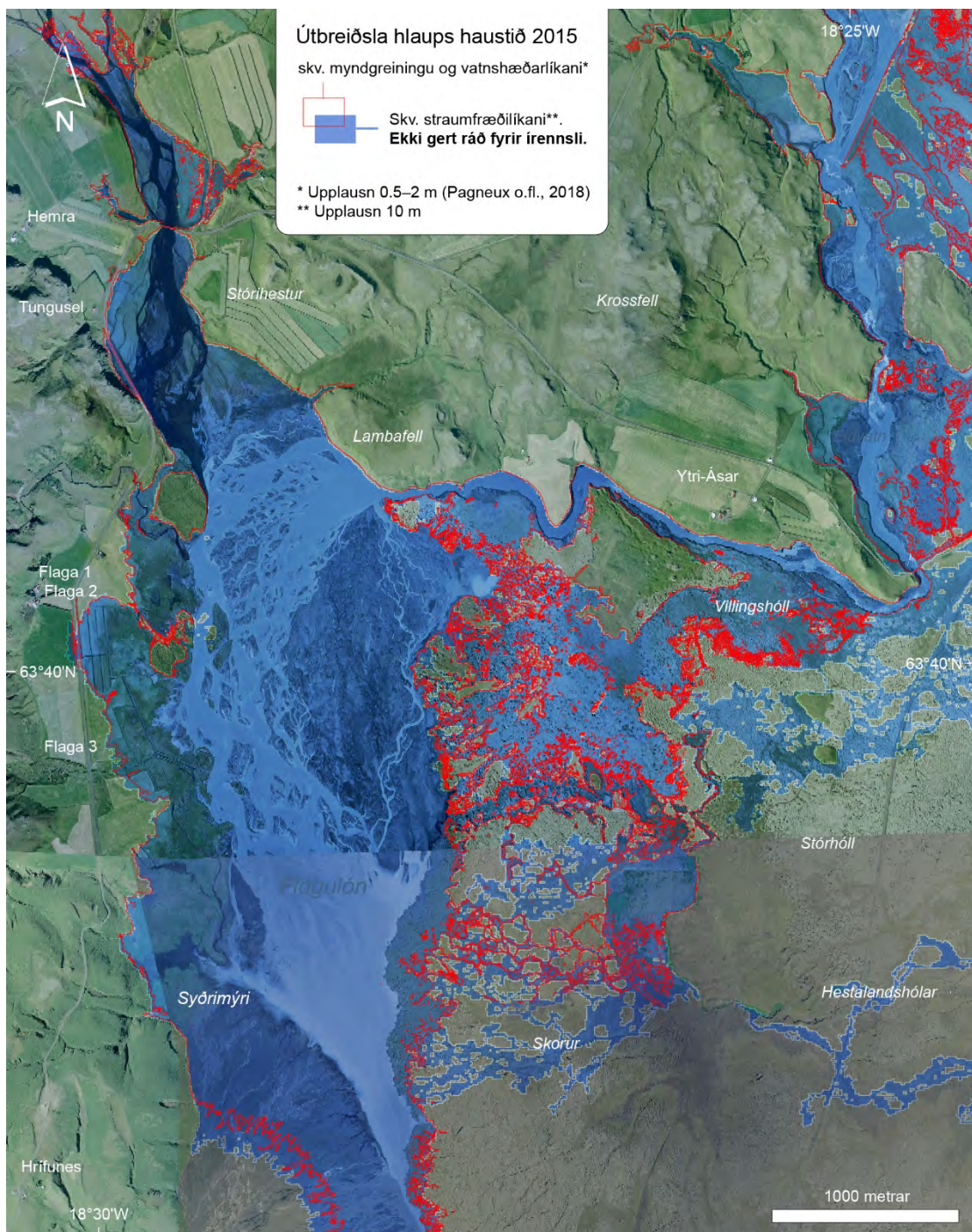


Kort 4. Líkanreiknuð útbreiðsla í Ása-Eldvatni án írennslis (blár) og þekkt útbreiðsla (rauðar útlínur). Loftmynd: Loftmyndir ehf.

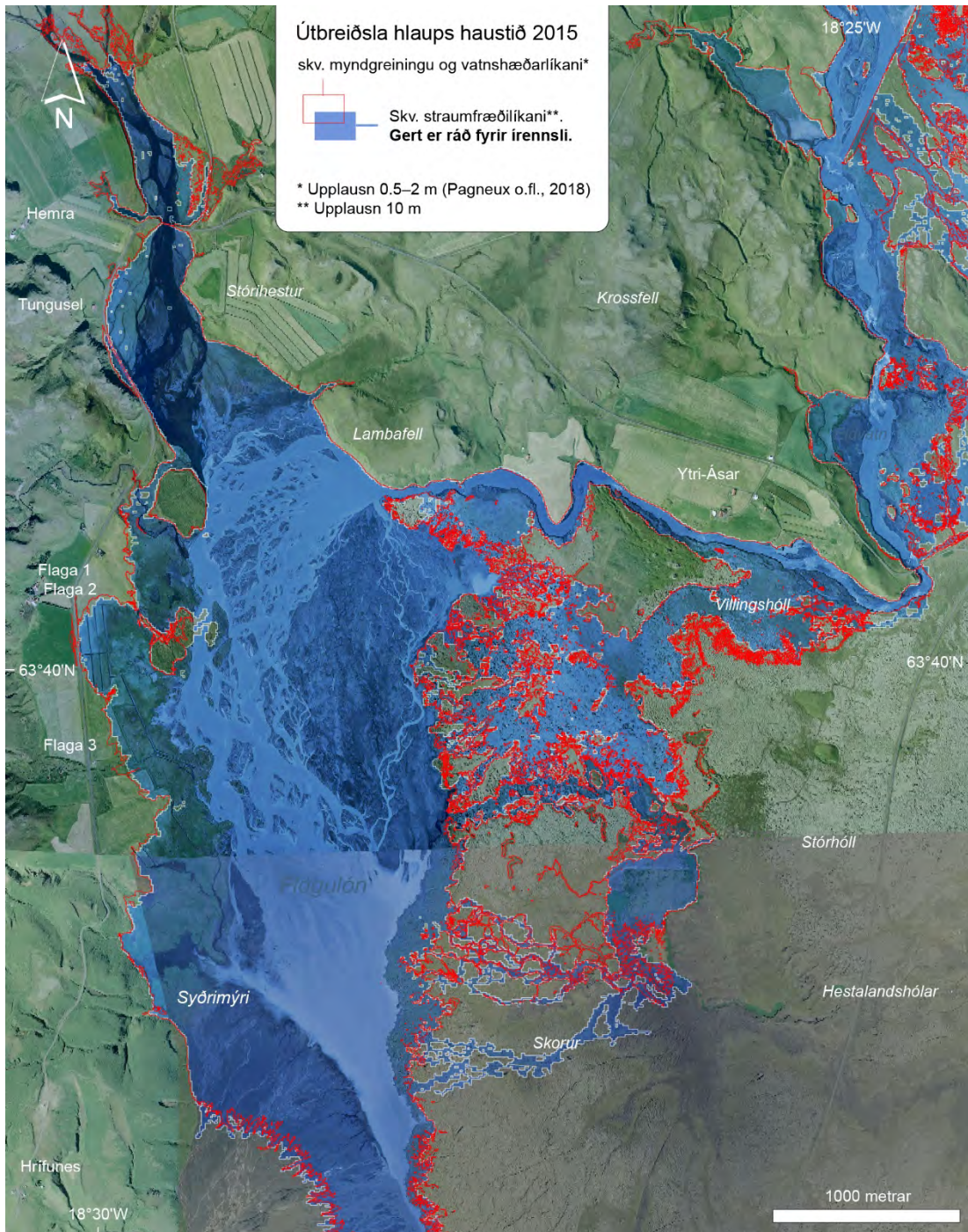


Kort 5. Líkanreiknuð útbreiðsla í Ása-Eldvatn með írennsli (blár) og þekkt útbreiðsla (rauðar útlínur). Loftmynd: Loftmyndir ehf.

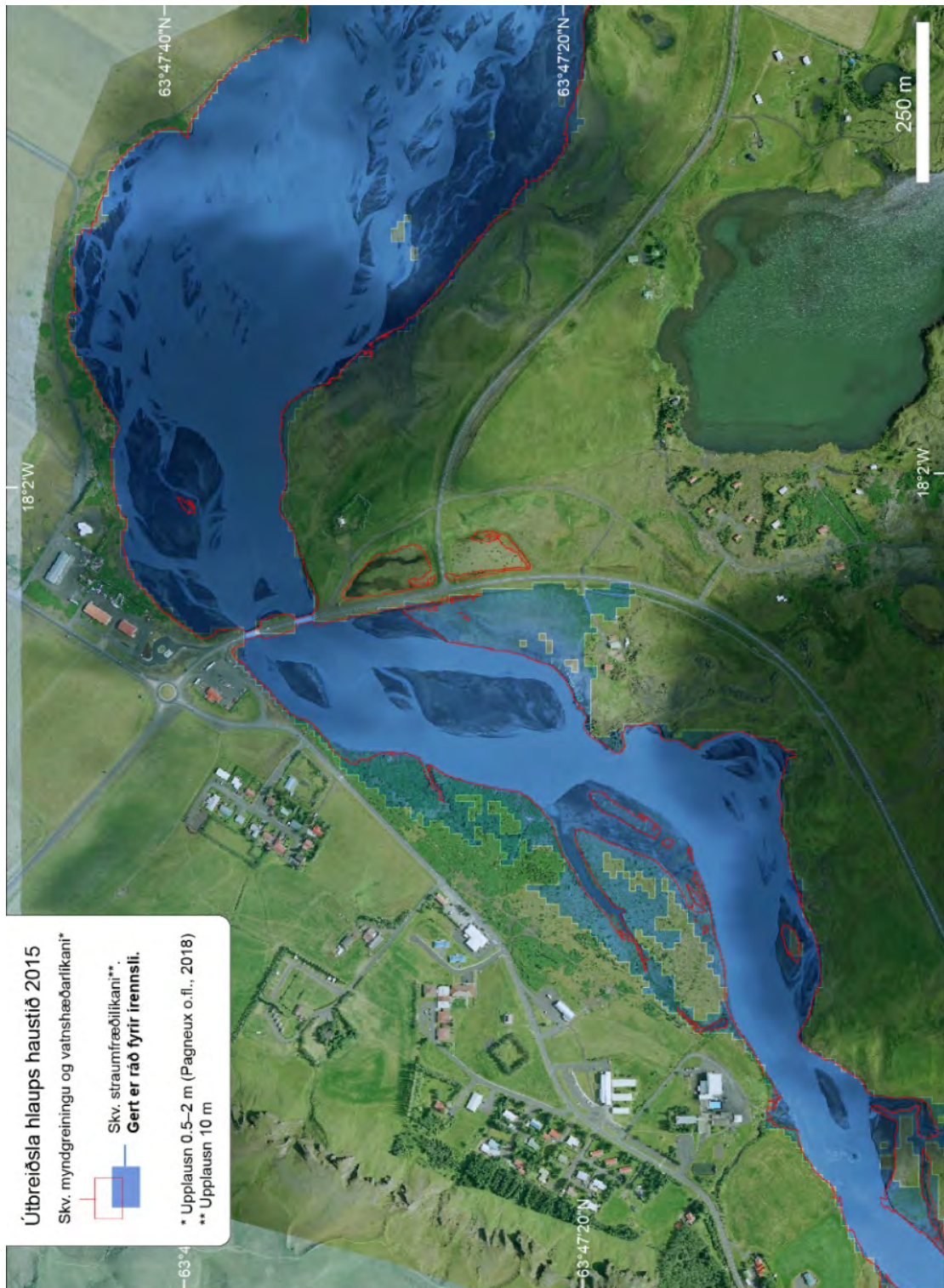




Kort 6. Líkanreiknuð útbreiðsla í Flögulóni án írennslis (blár) og þekkt útbreiðsla (rauðar útlínur). Loftmynd: Loftmyndir ehf.



Kort 7. Líkanreiknuð útbreiðsla í Flögulóni með írennsli (blár) og þekkt útbreiðsla (rauðar útlínur). Loftmynd: Loftmyndir ehf.



Kort 8. Líkanreiknuð útbreiðsla við Kirkjubæjarklaustur með írennsli (blár) og þekkt útbreiðsla (rauðar línur). Loftmynd: Loftmyndir ehf.



Kort 9. Líkanreiknuð útbreiðsla við Kirkjubæjarklaustur án írennslis (blár) og þekkt útbreiðsla (rauðar línur). Loftmynd: Loftmyndir ehf.

## 8 Samantekt

Megintilgangur þessa verks var að líkja eftir Skaftárhlaupi í októbermánuði árið 2015, svo unnt væri að líkanreikna sviðsmyndir sem gefa hugmynd um útbreiðslu og áhrif Skaftárhlaupa sem kynnu að vera enn stærri en hlaupið 2015. Annar þáttur var að áætla hámarksrennsli í hlaupinu og athuga hvort líkanreikningar samræmdust áætluðu hámarksrennsli út frá rannsóknum á rúmmálsbreytingu Eystri-Skaftárketils. Til viðbótar var reynt að framlengja nógildandi rennslið Skaftár við Sveinstind, og áætla rennsli og skiptingu um hliðarfarvegi.

Rennslismælingar við Sveinstind bentu í upphafi til þess að Manning stuðull í straumfræðilíkönunum ætti að vera á bilinu  $0,034 \text{ s/m}^{1/3}$  til  $0,04 \text{ s/m}^{1/3}$ . Niðurstöður æstæðra HEC-RAS og GeoClaw reikninga leiddu hins vegar í ljós að velja þurfti lægri stuðla. Í GeoClaw gaf Manning stuðullinn  $0,02 \text{ m}^{-1/3}$ s bestu raun, sem er lágt gildi þegar miðað er við aðrar sambærilegar flóðahermanir.

Hámarksrennsli í Skaftárhlaupi 2015 samkvæmt líkanreikningum er áætlað um  $2900 \text{ m}^3/\text{s}$  við Sveinstind. Þær sýna að hámarksrennsli hafi verið um  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$  undan jökli, og um  $3123 \text{ m}^3/\text{s}$  með grunnrennsli við Sveinstind. Talsverð óvissa er þó á líkanreiknuðum niðurstöðum vegna grunnrennslis sem vantar, vatnshæð í metrum í sjávarmáli og brúun GeoClaw á farveginum. Líkanreikningar GeoClaw ásamt mælingum á heildarrúmmáli hlaups gefa hugmynd um hvernig framlengdur rennslið líkur lítur út, og hvernig rennsli skiptist milli meginfarvegs og hliðarfarvega. Samkvæmt líkanreikningum fór 80% af heildarhlaupvatni um meginfarveg Skaftár en 20% um hliðarfarvegi. Hámarksrennsli um hliðarfarveg var  $400 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Vel tókst að líkja eftir útbreiðslu í Flögulóni sem og í Ása-Eldvatni þegar tekið var tillit til írennslis. Í Eldhrauni og nágrenni er ekki hægt að treysta niðurstöðum sökum hraunsins og írennslis í gegnum það. Við Kirkjubæjarklaustur er lítill munur á útbreiðslu þegar hámarksrennsli er lækkað um  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  vegna írennslis. Fyrir flóðasviðsmyndir er lagt upp með að nota Manning stuðul  $0,02 \text{ s/m}^{1/3}$  og að lækka hámarksrennsli sviðsmynda um  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  til taka tillit til írennslis.

## 9 Þakkir

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 og færur við þeim þakkir fyrir afnot af myndum og landlíkani. Höfundar þakka Suðurorku fyrir að góðfúslega gefa not á grunnvatnsgögnum. Arnór Tumi Jóhannsson fær þakkir fyrir að fljúga með einn höfunda yfir svæðið. Höfundar þakka einnig Sigríði Sif Gylfadóttur fyrir afnot á forritum hennar sem gerir hermanir á jökulhlaupum með GeoClaw mögulegar.

## 10 Heimildir

- Auður Atladóttir, Emmanuel Pagneux, Matthew J. Roberts, Snorri Zóphóníasson, Oddur Sigurðsson, Bergur Einarsson, Gunnar Sigurðsson & Jórunn Harðardóttir (2013). *Handbók um Skaftárhlaup: Viðbragðsáætlun*. Skýrsla VÍ 2013-003. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Berger, M.J., George, D.L., LeVeque, R.J. & Mandli, K.T. (2011). The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Advanced water resources*, 34(9), 1195-1206. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2011.02.016>.
- Bergur Einarsson (2009). *Jökulhlaups in Skaftá: A study of jökulhlaup from the Western Skaftá cauldron in the Vatnajökull ice cap, Iceland*. Ms. thesis. Reykjavík: University of Iceland.
- Bogi Brynjar Björnsson (2017). *Samanburður á GPS mældu vatnsborði og vatnsborði skv. vatnshæðarmæli við Sveinstind*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 31. ágúst 2017.
- Brunner, G.W. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Davis, CA USA: USACE Hydrologic Engineering Center, HEC.
- Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGill Hill.
- Chow, V.T. (1964). *Handbook of Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- Clawpack Development Team (2017). Clawpack Version 5.4.0, <https://www.clawpack.org>, [doi.org/10.5281/zenodo.262111](https://doi.org/10.5281/zenodo.262111).
- Crowe, C.T., Elger, D.F. & Roberson, J.A. (2005). *Engineering fluid mechanics*. 8th edition. Hoboken, NJ: Wiley.
- George, D.L. (2011). Adaptive finite volume methods with well-balanced Riemann solvers for modeling floods in rugged terrain: Application to the Malpasset dam-break flood. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 66(8), 1000–1018. <https://doi.org/10.1002/flid.2298>.
- Davíð Egilson (2016). *Yfirferð yfir rennismælingar við Skaftá og Manning reikningar*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 29 ágúst 2016.
- Elín Fjóra Þórarinsdóttir, Gústav M. Ásbjörnsson & Sveinn Runólfsson (2008). *Yfirlit yfir sandsvæði og landbrot við Skaftá*. Gunnarsholt: Landgræðsla ríkisins.
- Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson & Davíð Egilson (2018a). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Útbreiðsla og flóðhæð Skaftárhlaupsins haustið 2015*. Skýrsla VÍ 2018-004. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Emmanuel Pagneux, Matthías Á. Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilson & Matthew J. Roberts (2018b). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Hermun flóðasviðs-mynda*. Skýrsla VÍ 2018-008. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Esther Hlíðar Jensen, Jórunn Harðardóttir, Svava Björk Þorlákisdóttir & Snorri Zóphóníasson (2011). *Heildarframburður Skaftár við Sveinstind árin 2001–2008*. Reykjavík: Landsvirkjun.
- Esther Hlíðar Jensen, Davíð Egilson, Svava Björk Þorlákisdóttir, Ingibjörg Jónsdóttir, Snorri Zóphóníasson, Matthías Á. Jónsson, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson og Matthew J. Roberts. (2018). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá: Set í hlaupi haustið 2015*. Skýrsla VÍ 2018-006. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.

- Finnur Pálsson & Helgi Björnsson (2002). *Athugun á afkomu Skaftárkatla og vatnsrennsli frá vatnasviði þeirra*. Unnið fyrir Landsvirkjun. Reykjavík: Raunvísindastofnun Háskólans, Jarðeðlisfræðistofa.
- Finnur Pálsson, Andri Gunnarsson, Þorsteinn Jónsson, Sveinbjörn Steinþórsson & Hlynur Skagfjörð Pálsson (2014). *Vatnajökull: Mass blance, meltwater drainage and surface velocity of the glacial year 2012–2013*. Skýrsla LV-2014-068. Reykjavík: Landsvirkjun.
- Freysteinn Sigurðsson & Guttormur Sigbjarnarson (1985). *Groundwater in Iceland*. Skýrsla OS-85038/VOD-02. Reykjavík: Orkustofnun.
- Helgi Björnsson (1977). The cause of jökulhlaups in the Skaftá river. *Jökull*, 27, 71–78.
- Ingibjörg Kaldal (2002). *Skaftá — Athugun á áfoki: Útbreiðsla Skaftárhlaupsins 1995*. Skýrsla OS-2002/022. Reykjavík: Orkustofnun.
- Jón Steingrímsson (1973, ritað 1788). *Æfisagan og önnur rit*. Reykjavík: Helgafell.
- Mandli, K.T. & Dawson, C.N. (2014). Adaptive Mesh Refinement for Storm Surge. *Ocean Modelling*, 75, 36–50.
- Mandli, K.T., Ahmadi, A.J., Berger, M., Calhoun, D., George, D.L., Hadjimichael, Y., Ketcheson, D.I., Lemoine, G.I. & LeVeque, R.J. (2016). Clawpack: building an open source ecosystem for solving hyperbolic PDEs. *PeerJ Computer Science* 2:e68. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.68>.
- Landmælingar Íslands (2011). Ný geoíða fyrir Ísland [Fréttir]. Sótt 24.07.2017 á lmi.is: <http://www.lmi.is/um-landmaelingar/landshaedakerfi-temp/ny-geoida-fyrir-island/>
- Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir & Finnur Pálsson (2015). *Eystri Skaftárketill: Bráðabirgðaniðurstöður mælinga úr TF-FMS á stærð og rúmmáli*. Jarðvísindastofnun Háskólans, minnisblað dags. 2. nóvember 2015.
- Páll Jónsson (1993). *Stór Skaftárhlaup 1970–1991*. Skýrsla OS-93056/VOD-09 B. Reykjavík. Orkustofnun.
- Polar Geospatial Center (2017). *ArcticDEM Documentation and User Guidance*. Version 1.3 – February 13, 2017. Saint Paul, Minnesota: Polar Geospatial Center, University of Minnesota.
- LeVeque, R.J. (2002). *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason & Tómas Jóhannesson (2016). *Hættumat vegna berghlaupa í Öskju*. Skýrsla VÍ 2016-007. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux & Bogi B. Björnsson (2017). *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum með GeoClaw*. Skýrsla VÍ 2017-004. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Snorri Zóphóníasson (2002). *Rennsli í Skaftárhlaupum 1955–2002*. Greinargerð SZ-2002-01. Reykjavík: Orkustofnun Vatnamælingar.
- 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.
- Svanur Pálsson & Snorri Zóphóníasson. (1992). *Skaftárhlaupið 1991 — Sérkenni í aur- og efnastyrk*. Skýrsla OS-92014/VOD-02. Reykjavík: Orkustofnun.

- Svanur Pálsson, Guðmundur H. Vigfússon & Jórunn Harðardóttir (2001). *Framburður svifaurs í Skaftá*. Skýrsla OS-2001/068. Reykjavík: Orkustofnun.
- Tómas Jóhannesson, Ólafur Haraldsson & Bergur Einarsson (2018). *Skaftárhlaup í október 2015. Rúmmál hlaupsins, rennsli og vatnshæð við Sveinstind*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 24.3.2018, málsnr. 2016-134.
- Veðurstofa Íslands (2016). *Renntisskýrsla vatnsárið 2014/2015, V328, Eldvatn; Eystri-Ásar*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.



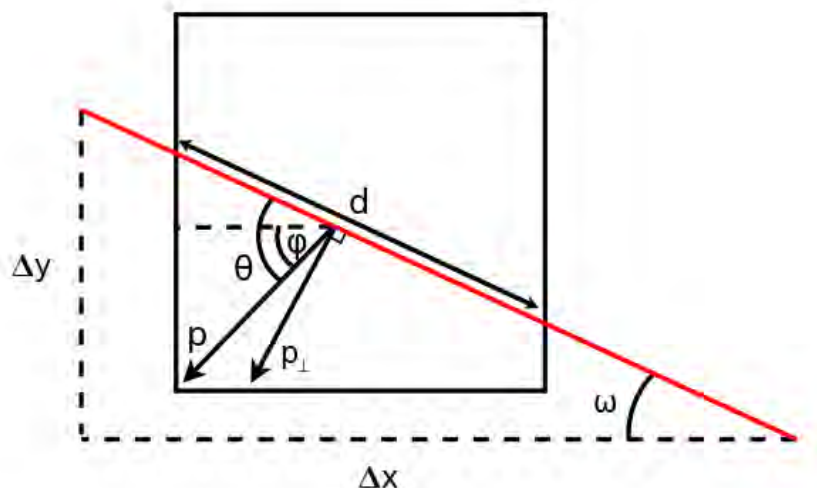
## Viðauki I. Rennsli í gegnum þversnið

GeoClaw er ekki sérstaklega hannað til að herma eftir vatni í árfarvegum líkt og HEC-RAS og notar því ekki þversnið. Þar af leiðandi er engin innbyggð leið til að ákvarða rennsli um farvegi og bera saman niðurstöður GeoClaw við HEC-RAS. Því var forrituð aðferð til að ákvarða rennsli gegnum þversnið í GeoClaw. Aðferðin byggist á því að leggja saman skriðþunga hvers netmökva hornrétt í gegnum þversnið (Mynd 18). Horn þversniðs og skriðþungavigurs við  $x$ -ás eru hvor um sig  $\omega = \tan^{-1}(\Delta y/\Delta x)$  og  $\varphi = \tan^{-1}(hv/hu)$ , þar sem  $hv$  og  $hu$  er skriðþungi vatns í  $x$  og  $y$  stefnur (sjá kafla 3.1). Af því leiðir að horn skriðþungavigurs við þversniðið er  $\theta = \omega - \varphi$ . Fyrir stakan netmökva er hornréttur skriðþungi því gefinn með

$$|p_{\perp}| = |p| \cdot d \cdot \sin(\theta),$$

þar sem  $d$  er skurðlengd þversniðs við netmökva.

Heildarflæði gegnum þversnið er að lokum summa allra netmökva sem þversniðið sker. Þar sem flæði vatns í GeoClaw ræðst ekki af þversniðum eru rennslisútreikningar gerðir að hermum lokinni en ekki á hverju tímaskrefi.



Mynd 18. Þversnið (rautt) sker netmökva undir horni  $\omega$  við  $x$ -ás. Skriðþungavigur  $p$  myndar hornið  $\varphi$  við  $x$ -ás og hornið  $\theta$  við þversniðið.

## Viðauki II. Upptakasvæði og vatnsrit

Fyrir hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017) var skrifað forrit sem hermir eftir uppsprettu vatns undan jökli. Sá kóði var endurnýttur hér með þeirri viðbót að hægt er að tiltaka fleiri en eitt upptakasvæði. Aðferðin er sú að vatni er dælt inn á upptakasvæði sem skilgreind eru sem marghyrningar. Í hverjum möskva reikninetsins innan upptakasvæðis hækkar vatnsyfirborðið um

$$h(t + dt) = h(t) + c_i \cdot R(t) \cdot dt,$$

þar sem  $R$  er viðbætt vatnsdýpt,  $h$  er vatnsdýpt fyrir og  $c_i$  er hlutfall af heildarvatni sem dælt er inn á stakt upptakasvæði. Einnig þarf að taka tillit til skriðþunga vatnsins,  $hu$ , sem fyrir  $x$  stefnu er

$$hu(t + dt) = hu(t) + c_i \cdot R(t) \cdot dt \cdot u_0,$$

þar sem  $u_0$  er upphafshraði. Sambærileg jafna gildir fyrir  $y$  stefnu. Í ofangreindum jöfnum er viðbætt vatnsdýpt,  $R$ , reiknuð á eftirfarandi hátt:

$$R(t) = \frac{Q(t)}{\sum A_i},$$

þar sem  $A_i$  er flatarmál hvers upptakasvæðis og  $Q(t)$  er rúmmál vatns samkvæmt vatnsriti.

## Viðauki III. Skölun grunnrennslis

Líkanreikningar HEC-RAS og GeoClaw byggja á landhæðarlíkani sem inniheldur upplýsingar um staðsetningu og hæð í hverjum punkti. Þessara upplýsinga er yfirleitt aflað annað hvort með greiningu á loft- eða gervitunglamyndum eða leysimælingum. Landhæðarlíkon sýna yfirborð vatns sem sléttan flöt.

Þegar leysimælingar á þrífæti voru gerðar á vettvangi í Skaftá hinn 17. ágúst 2015 var meðalrennslí í ánni um  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ . Í landlíkaninu verður því vatnshæðin við þessa  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  að sléttum botni farvegarins eins og sést á mynd 19. Yfirleitt þegar verið er að líkja eftir rennslinu er dýpi fallvatna mælt sérstaklega eftir nokkrum þversniðum og botn þeirra settur í stað yfirborðs vatnsins inn í landlíkanið. Það var talið ákaflega erfitt að kanna dýpi Skaftár við Sveinstind vegna straumþunga og eins hitt að farvegurinn er síbreytilegur vegna framburðar. Þess vegna var valið að keyra landhæðarlíkanið beint, án þess að reyna að líkja eftir undirliggjandi botni Skaftár.

Við hermun á t.d.  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  rennslis ofan á óleiðréttu landlíkani þarf því að taka tillit til þess að það vantar a.m.k.  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  í líkanreikningana sem voru til staðar þegar landlíkanið var gert. Það sem meira er, við aukna vatnshæð eykst hraðinn um það flatarmál sem  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  grunnrennslíð fór um svo ljóst er að rennslíð í gegnum það þversnið eykst.

Til að áætla skölun grunnrennslis þar að ítra að lausn. Fyrst var gerð sú nálgun að líkanreiknað  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  rennslí hafi u.þ.b. sama þverskurðarflatarmál og hið raunverulega mælda  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  rennslí. Án þverskurðarmælinga á árfarvegi er erfitt að áætla hið raunverulega flatarmál, en fyrir svo lágt rennslí í Skaftá er þessi nálgun ekki fjarri lagi.

Heildarrennslí er metið með því að leggja saman rennslíð sem sett er inn í líkanið og grunnrennslíð sem var fyrir. Grunnrennslíð er margfeldi upprunalega flatarmálsins og meðalhraðans í því (Mynd 20).

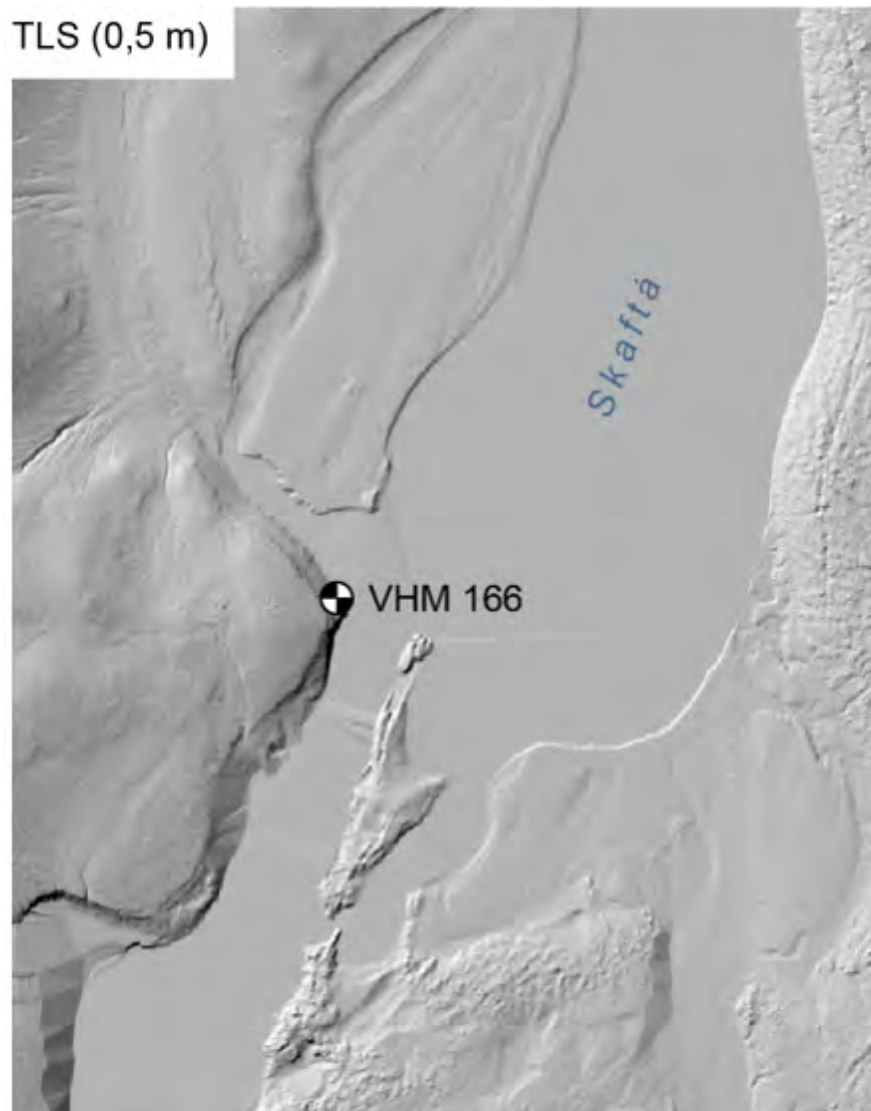
Ef t.d.  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  er sett inn líkanið, grunnrennslisflatarmál er áætlað  $100 \text{ m}^2$ , og meðalstraumhraði grunnrennslis er  $1,5 \text{ m/s}$ , verður rennslíð:

$$300 \text{ m}^3/\text{s} + (100 \text{ m}^2 \cdot 1,5 \text{ m/s}) = 450 \text{ m}^3/\text{s}.$$

Meðalstraumhraðinn sem kemur út úr líkaninu miðað við  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  ofan á grunnrennslíð er  $1,8 \text{ m/s}$  en er áætlaður  $1,5 \text{ m/s}$  fyrir grunnrennslíð. Það gengur ekki upp því gera verður ráð fyrir því að meðalstraumhraðinn í gegnum allt þversniðið sé mikið til sá sami, enda eykst vatnshalli við hækkunina sem knýr meira vatn í gegnum sama þversnið. Þess vegna er eðlilegt að ítra aftur að réttari heildarrennslí með því að nota líkanreiknaðan meðalstraumhraða við  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ , þá fengist t.d.

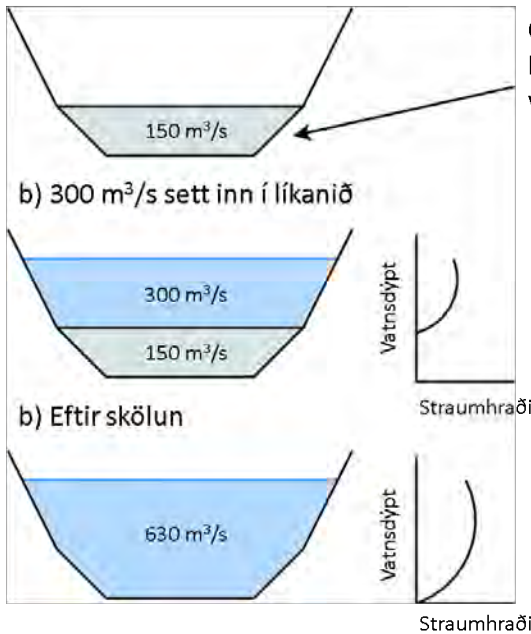
$$450 \text{ m}^3/\text{s} + (100 \text{ m}^2 \cdot 1,8 \text{ m/s}) = 630 \text{ m}^3/\text{s},$$

sem er hið áætlaða heildarrennslí.



*Mynd 19. Landhæðarlíkan af nær umhverfi vatnshæðarmælis við Sveinstind. Landlíkanið sýnir vatnsyfirborðið sem sléttan flöt.*

a) Yfirborð líkans



Óþekkt flatarmál, Rennsli  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Ef miðað er við  $100 \text{ m}^2$   
væri straumhraðinn  $1,5 \text{ m/s}$ .

b)  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  sett inn í líkanið

Upphafleg nálgun líkansins.  
Lágmarksrennsli er  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ .  
Rennslið í grúa þversniðinu er í raun meira  
þar sem meira vatn fer um það eftir því sem  
rennsli í farveginum öllum eykst.

b) Eftir skölnun

Rennsli eins og það væri í raun.  
Skalað rennsli  $630 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Mynd 20. Dæmi um leiðréttingu á rennsli í hermun með GeoClaw með ítrun, þar sem grunnrennsli árinna er hluti af landlíkaninu.

a) Líkanið gerir ráð fyrir því að árbotninn sé við vatnshæð sem stafar af  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  rennsli þegar landlíkanið var gert. Það tekur ekki tillit til þess að  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  renna þegar í farveginum.

b) Heildarrennslið í gegnum þversniðið er ekki samanlagt grunnrennsli  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  og viðbótarrennslið  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Vatnshraðinn á blálitaða svæðinu reynist vera  $1,8 \text{ m/s}$ . Vatnshraðinn á grálitaða svæðinu er ekki stöðugur heldur eykst hann við aukið rennsli og vatnshæð. Fyrir þessu þarf að leiðrétta með ítrun.

c) Vatnshraðinn sem fæst út úr líkankeyrslu á  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  í lið b er fundinn og hann er  $1,8 \text{ m/s}$ . Heildarrennslið er fundið með því að leggja saman lágmarksrennsli ( $450 \text{ m}^3/\text{s}$ ) við margfeldi flatarmáls grunnrennslisins ( $100 \text{ m}^2$ ) og vatnshraðans ( $1,8 \text{ m/s}$ ) sem fæst í úr líkaninu fyrir viðbótarrennslið í lið b). Leiðrétt heildarrennsli við sömu vatnshæð reynist vera  $630 \text{ m}^3/\text{s}$  í stað  $450 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá Kvörðun straumfræðilíkans

Veðurstofa Íslands  
Bústaðavegi 7–9  
108 Reykjavík  
[www.vedur.is](http://www.vedur.is)  
Sími: 522 6000

Forsíðumynd: Hlaup haustið 2015 við Kamba  
© Benedikt G. Ófeigsson