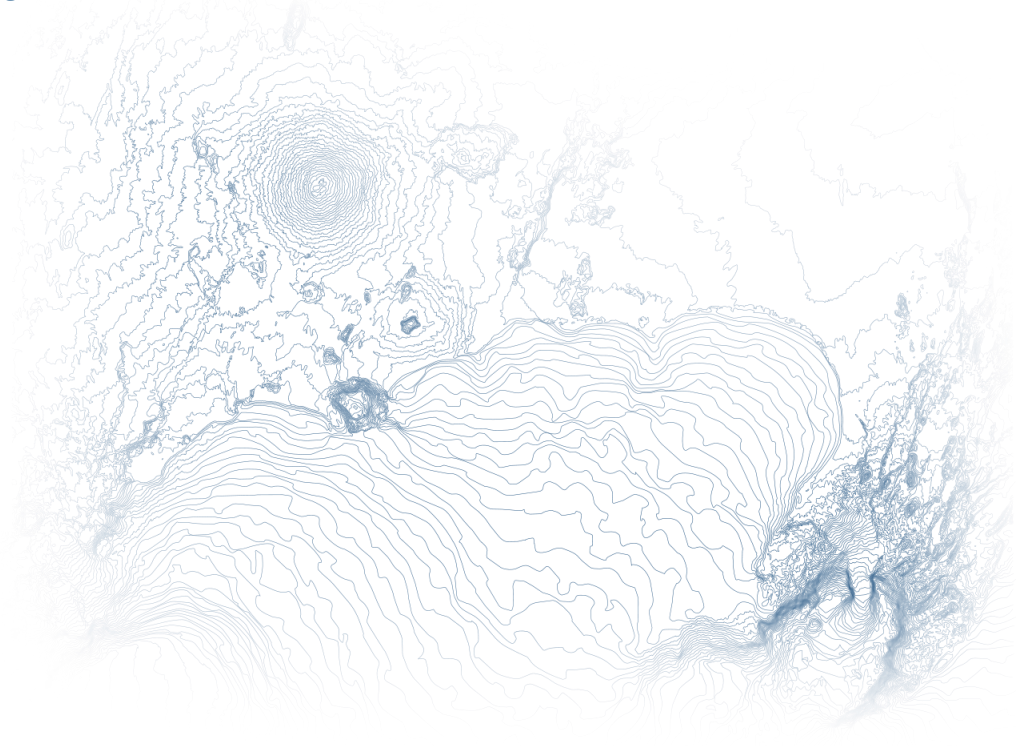


Hættumat fyrir svæðið neðan Svínafellsjökuls vegna berghlaups úr Svínafellsheiði

Sigríður Sif Gylfadóttir
Jón Kristinn Helgason
Þorsteinn Sæmundsson
Tómas Jóhannesson
Ragnar Heiðar Þrastarson
Bergur Einarsson



Skýrsla

VÍ 2025-002

Hættumat fyrir svæðið neðan Svínafellsjökuls vegna berghlaups úr Svínafellsheiði

Höfundar	Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Þorsteinn Sæmundsson Tómas Jóhannesson, Ragnar Heiðar Þrastarson og Bergur Einarsson
Samvinnuaðilar	Háskóli Íslands
Verkefnisstjóri	Magni Hreinn Jónsson
Yfirfarið af	Magni Hreinn Jónsson
Samþykkt af	Harpa Grímsdóttir, deildarstjóri snjóflóð og skriður

Veðurstofa Íslands / Icelandic Meteorological Office

Númer	VÍ 2025-002
ISSN	1670-8261
Dagsetning	júní 2025
Dreifing	Opin
Fjöldi síðna	90
Upplag	Rafræn útgáfa
Verknúmer	2733-0-0002
Málsnúmer	2018-0234
DOI númer	

Ágrip

Sprungur hafa opnast í norðanverðri hlíðinni í ofanverðri Svínafellsheiði hátt yfir Svínafellsjökli. Þar er hætta á stóru berghlaupi niður á jökulinn sem kann að ná niður að jökuljaðri og getur valdið jökulhlaupi úr lónum við jökuljaðarinn. Svæðið sem er á hreyfingu neðan sprungunnar er um 1.7 km að lengd og um 1 km² flatarmáli og gróft mat gefur til kynna að rúmmál efnisins sem hreyfist sé um eða yfir 60 milljón rúmmetra. Komið hefur verið fyrir mælibúnaði til vöktunar á sprungunum og hreyfingu svæðisins til þess að unnt sé að vara íbúa á svæðinu neðan við Svínafellsjökul við yfirvofandi hættu ef vísbendingar eru um slíkt. Aðstæður við Svínafellsjökul hafa verið bornar saman við innlendar og erlendar hliðstæður og hætta af völdum berghlaups úr Svínafellsheiði og jökulhlaups í tengslum við það metin með reiknilíkönunum. Niðurstaða hættumatsins er að líklegast sé að berghlaupið stöðvist á jöklinum án þess að ógna byggðinni neðan hans. Hugsanlegt er þó að berghlaup nái allt niður að jökuljaðri og valdi jökulhlaupi í Svínafellsá og Skaftafellsá, og hugsanlega einnig um skarð í jökulgarðinum þar á milli. Hörfun jökulsins og þróun sprungunnar þegar fram í sækir kalla á að hættumatið sé endurskoðað reglulega. Á þessu er tekið að vissu marki með því að leggja annars vegar fram hættumat til skamms tíma, til viðmiðunar um nýtingu svæðisins á næstu árum, og hins vegar varfærnara hættumat þegar til lengri tíma er litið, til þess að hafa til hliðsjónar við skipulag svæðisins. Samkvæmt hættumatinu til skamms tíma eru hótelið að Freysnesi og starfsmannaaðstaða austan þess á A-svæði, svo og byggingar ofan vegar vestan Freysness. Frístundabyggðin (Freysnesbyggð) lendir að mestu á A-svæði en lítill hluti hennar á B- og C-svæði. Vestustu tvö húsin að Svínafelli lenda á C-svæði og næstu hús innan við eru á A-svæði sem og vélageymsla vestan við tjaldstæðið. Til skemmri tíma skapa jökulhlaup ekki mikla hættu á flugvallarsvæðinu en þar er þó ein bygging á A-svæði. Þegar til lengri tíma er litið lendir svæðið við hótelið að Freysnesi á C-svæði, söluskálinn og íbúðarhús við Freysnes 2 á B-svæði en íbúðarhúsið undir Stóröldu á A-svæði. Frístundabyggðin lendir öll á C-svæði. Vestustu tvö húsin að Svínafelli eru eftir sem áður á C-svæði en húsin þar innan við ásamt vélageymslunni vestan tjaldsvæðisins færast á B-svæði. Þjónustuhús við tjaldsvæðið ásamt gistiskálum lenda á A-svæði en önnur bæjarhús eru utan hættusvæða. Hætta á flugvallarsvæðinu eykst þegar horft er lengra fram í tímann.

Lykilorð: Berghlaup, jökulhlaup, hættumat, Svínafellsjökull

Abstract

A fracture has formed on the northern slope in the upper part of Svínafellsheiði, high above Svínafellsjökull glacier. There is a danger of a large rockslide down onto the glacier, which could reach down to the glacial lagoons and potentially cause a glacial outburst. The area that is moving below the crack is about 1.7 km long and around 1 km² in area, and rough estimates indicate that the volume of material in motion is might be over 60 million cubic meters.

Monitoring equipment has been installed to observe the fractures and movements in the area so that residents below Svínafellsjökull can be warned in case of imminent danger. The conditions at Svínafellsjökull have been compared with similar domestic and international cases, and the risk of landslides from Svínafellsheiði and associated glacial outburst floods has been assessed using computational models.

The conclusion of the hazard assessment is that the most likely scenario is that the landslide will stop on the glacier without threatening the settlements below. However, it is possible that the landslide could trigger a glacial outburst flood in the Svínafellsá and Skaftafellsá rivers, and potentially also through a gap in the glacial moraine between them.

The retreat of the glacier and the development of the fractures over time call for regular reassessment of the hazard. This is partly addressed by presenting both a short-term hazard assessment, to guide land use in the coming years, and a more cautious long-term hazard assessment for spatial planning purposes.

According to the short-term hazard assessment the hotel at Freysnes and the employee facilities to its east are located in Zone A, as are buildings above the road west of Freysnes. The recreational housing area (Freysnesbyggð) falls mostly in Zone A, with a small part in Zones B and C. The two westernmost houses at Svínafell are in Zone C, while the next houses inwards are in Zone A, as is the equipment storage west of the campsite. In the short term, glacial outburst floods do not pose a significant threat to the airfield area, though one building there is in Zone A. According to the long-term hazard assessment the area around the hotel at Freysnes falls into Zone C. The shop and the residential house at Freysnes 2 are in Zone B, and the house beneath Stóralda is in Zone A. The entire recreational housing area falls into Zone C. The two westernmost houses at Svínafell remain in Zone C, but the other houses and the equipment storage west of the campsite move into Zone B. The service building at the campsite and the guest lodges fall into Zone A, while other town buildings lie outside the hazard zones. The risk at the airfield area increases in the longer term.

Key words: Rockslide, glacial outburst, hazard assessment, risk assessment, Svínafellsjökull

Efnisyfirlit

Efnisyfirlit.....	2
Ágrip	2
Abstract	3
1 Inngangur	6
2 Jarðfræði	8
2.1 Eldvirkni í Örfajökli	9
2.2 Jarðlagaskipan Svínafellsheiðar.....	9
2.3 Jöklunarsaga og áhrif hops jökulsins á myndun sprungunnar	12
2.4 Sögulegar skriður á jökla á Íslandi	14
2.5 Svæðið sem er á hreyfingu.....	16
3 Vettvangsferðir og mælingar	20
3.1 Bandmælingar	20
3.2 Gögn úr togmælum	21
3.3 GNSS mælingar.....	21
3.4 Bylgjuvíxmælingar	22
3.5 Samantekt	25
4 Alþjóðlegt gagnasafn berghlaupa sem fallið hafa á jökla	26
5 Greining áhættu.....	30
6 Líkanreikningar.....	35
6.1 Líkanið r.avaflow	35
6.2 Líkanreikningar á þekktum berghlaupum á Íslandi	35
6.2.1Bergflóðið á Morsárjökul 2007.....	36
6.2.2Steinsholtshlaupið 1967	36
6.2.3Berghlaupið í Öskju 2014.....	44
6.3 Líkanreikningar á berghlaupi úr Svínafellsheiði	45
6.3.1Gögn og úrvinnsla	45
6.3.2Líkanreikningar með Voellmy líkani.....	53
6.3.3Líkanreikningar með r.avaflow	56
6.3.4Líkanreikningar með OpenFOAM.....	62
7 Hættumat.....	65
7.1 Áhætta í byggð	65
7.2 Áhætta ferðafólks	68
8 Niðurstaða.....	71

9 Þakkir.....	73
Heimildir	74
Viðauki I. Listi yfir berghlaup.....	82
Viðauki II. Kvörðun líkanstíka í Voellmy líkani	85
Viðauki III. Hættumatskort	86

1 Inngangur

Haustið 2014 fundu bændur á Svínafelli sprungu ofan Svínafellsjökuls, í norðanverðri hlíðinni milli Skarðatinds og Svarthamra á ofanverðri Svínafellsheiði (Þorsteinn Sæmundsson 2017). Hlíðin á þessum stað er brött og rís um 400 m yfir jökulinn. Vorið 2018 uppgötvaðist framhald þessarar sprungu skáhallt niður vesturhlíð Svínafellsheiðar langleiðina að jökuljaðri. Flatarmál svæðisins sem er á hreyfingu norðan sprungunnar er um 1 km² og gróft mat gefur til kynna að rúmmál efnisins sem hreyfist sé um eða yfir 60 milljón rúmmetra. Aldur sprungnanna er óþekktur, þær sjást ekki á loftmynd frá 2003 eða á SPOT5 gervihnattamynd frá 2005, en eru greinilegar á mynd frá 2009 og landlíkani frá 2011. Þó má sjá ummerki um niðurföll í hlíðinni allt aftur til ársins 1980 en þó nokkuð utan við megin sprunguna (Ben-Yehoshua o.fl. 2023). Talið er að megin sprungan hafi líklega myndast og orðið sýnilegar á yfirborði á tímabilinu frá 2003 til 2009 og hafa opnast um nokkra tugi cm síðan þær mynduðust.

Hætta er á því að ef sprungurnar haldi áfram að gliðna, geti innan nokkurra áratuga stórt berghlaup fallið á Svínafellsjökul. Þá er möguleiki á því að úthlaupslengd þess verði það mikil að það nái ofan í lónið við jökulsporðinn, þótt litlar líkur séu á því að sjálft berghlaupið skapi hættu í byggð í dag þá myndi hugsanlegt jökulhlaup í kjölfar berghlaups geta gert það. Við núverandi aðstæður er hættan fremur lítil nema í næsta nágrenni við lónið við Hafrafell og í farvegi Skaftafellsár. Á næstu áratugum er fyrirsjáanlegt að lónið stækki umtalsvert þannig að hætta af völdum jökulhlaups fari vaxandi.

Meginefni skýrslunnar var unnið á árunum 2018–2020. Af ýmsum ástæðum var skýrslan ekki gefin út þrátt fyrir að hættumatið lægi fyrir. Nýjar upplýsingar hafa komið fram á síðustu árum. Töluverðar rannsóknir hafa farið fram á vegum háskóla Íslands á svæðinu (Daniel Ben-Yehoshua o.fl. 2023 og 2025). Þá hafa mælingar á svæðinu haldið áfram. Hreyfingar hafa verið mjög litlar frá því að mælitæki voru sett upp. Greining á stöðugleika hlíðarinnar sýna hvernig litlar hreyfingar síðustu ár tengjast hægri þynningu jökulsins og fargi af skriðu frá 2013. Sama greining sýnir hvernig hreyfingin gæti byrjað aftur þegar fargið af skriðunni hefur færst niður fyrir svæðið sem er óstöðugt. Í nýrri greiningum hefur einnig verið skoðaður sá möguleiki sprungur teygji sig dýpra og að enn meira efni sé á ferðinni en gert er ráð fyrir í þessari skýrslu (Daniel Ben-Yehoshua 2025). Ekki hefur verið tekið tilliti til þessara nýju upplýsinga heldur byggir hættumatið á þeim líkanreikningum sem gerðir voru á árunum 2018–2020. Í niðurstöðum er þó fjallað um möguleg áhrif þessara nýju upplýsinga á hættumatið. Við hættumatið var notast við eftirfarandi aðferðafræði:

- Alþjóðleg gögn um berghlaup á jökla hafa verið skoðuð með það í huga að öðlast hugmynd um hver úthlaupslengd berghlaupa gæti orðið við þær aðstæður sem eru við Svínafellsjökul.
- Hættumatið byggir að langmestu leyti á fjölbættum líkanreikningum. Litlar líkur eru á að berghlaupið sjálft skapi hættu neðan jökuls, þar er hættan bundin við að hlaupið nái í lón við sporð jökulsins og valdi flóðum. Því reyndist nauðsynlegt að beita líkaninu

r.avaflow, sem lýsir berghlaupinu og víxlverkun þess við vatn þegar það lendir í lóninu. Lítil reynsla er af slíkum reikningum og því var líkaninu einnig beitt á þekkt dæmi um berghlaup sem fallið hafa á jökla eða í lón til að styrkja val á inntaksstikum. Einnig var keyrt hefðbundið skriðulíkan, svokallað Voellmy líkan, sem hefur verið beitt víða um heim á söguleg framhlaup. Í sumum tilfellum reyndist nákvæmnin í útreikningum r.avaflow á vatnsflæði ekki nægileg og var þá stuðst við hermanir með líkönunum GeoClaw annars vegar og HEC-RAS hins vegar, en þó nokkur reynsla er af notkun þeirra við hermun vatnsflóða og flóðbylgna.

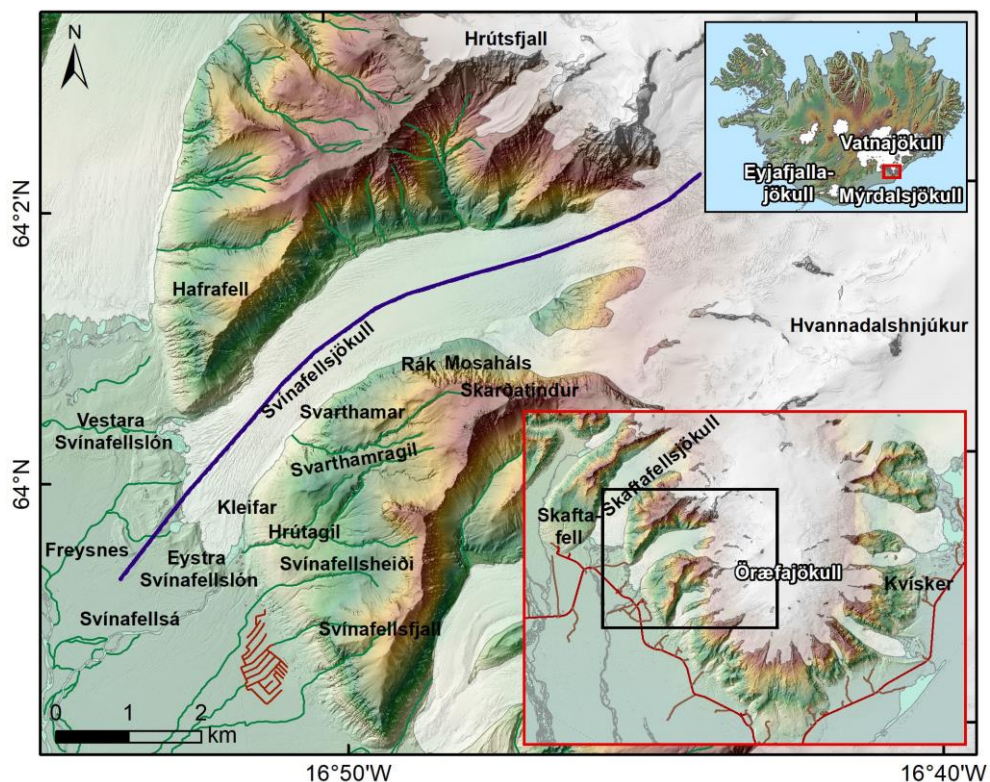
- Áhættugreining skv. ofanflóðahættumati var gerð og tekur hún mið af aðferðafræði flóðahættumats. Þannig fæst samsvörun milli svokallaðra tjónmættisflokka sem líkanið reiknar fyrir vatnsflóðið og áhættuflokka ofanflóðahættumats.

Skýrslan hefst á umfjöllun um jarðfræði svæðisins í kafla 2 og þær vettvangsferðir sem farnar hafa verið til að rannsaka og kortleggja sprunguna og koma fyrir mælitækjum í kafla 3. Kafla 4 fjallar um alþjóðlegt gagnasafn um berghlaup sem fallið hafa á jökla og í kafla 5 er áhættugreiningu samkvæmt ofanflóðahættumati lýst. Kafla 6 lýsir líkanreikningum sem gerðir hafa verið til grundvallar hættumatinu og í kafla 7 er hættumatinu sjálfu lýst. Þá eru niðurstöður hættumatsins dregnar saman í kafla 8. Skýrslunni fylgja þrír viðaukar. Í viðauka I er að finna töflu yfir alþjóðlegt gagnasafn um berghlaup sem fallið hafa á jökla og í viðauka II eru dregnar saman heimildir um kvörðun Voellmy skriðulíkans fyrir þekkt berghlaup. Í viðauka III er hættumatskort af svæðinu.

2 Jarðfræði

Svæðið sem er hér til umfjöllunar kallast Svínafellsheiði, Heiðin eða Svarthamrar eins og svæðið er oft nefnd af heimamönnum, og er í vestanverðum Örfæfajökli, sjá mynd 1. Í þessar i umfjöllun verður notast við nafnið Svínafellsheiði. Heiðin afmarkast að sunnan- og suðaustanverðu af Svínafellsfjalli (846 m), að austanverðu af Skarðatindi (1084 m) og að vestan og norðanverðu af Svínafellsjökli. Hlíðin hækkar frá um 200 m h.y.s. við Hrútagil í suðri upp í um 8–900 m h.y.s. neðan við Skarðatind í norðri. Neðri hluti hlíðarinnar nefnist Kleifar frá Hrútagili upp að Skerhól og Svarthamragili, en Svarthamrar norðan og ofan gilsins, en þar er hlíðin brött og um 250 m há. Nokkru norðar, eða um 3.6 km frá núverandi jökulsporði, á svæði sem nefnt er Rák og Mosaháls, vísar hlíðin meira til norðurs. Þar er hún brött með allt að 4–500 m háum klettabeltum efst og bröttum skriðum neðar. Svarthamragil er um 2.5 km langur gilskorningur sem er grafinn í heiðina og nær langleiðina upp að Skarðatindi (mynd 1).

Svínafellsjökull er um 7.5 km langur skriðjökull sem gengur úr vestanverðum Örfæfajökli milli Hrútsfjalls og Hrútsfjallstinda (1875 m) að norðanverðu og Hvannadalshnjúks (2110 m) að sunnanverðu. Efsti hluti jökulsins er um 3.6 km breiður, mjög sprunginn og brattur ísfoss með vestlæga skriðstefnu. Neðar sveigir jökullinn til suðvesturs og er um 1 km breiður. Fyrir framan jökulsporðinn hafa myndast tvö jökullón, að vestanverðu við Hafrafell og að austanverðu við Svínafell (mynd 1).



Mynd 1. Yfirlitsmynd af Svínafellsjökli og Svínafellsheiði. Bláa línan eftir jöklinum sýnir legu langsniðs sem sýnt er á mynd 5.

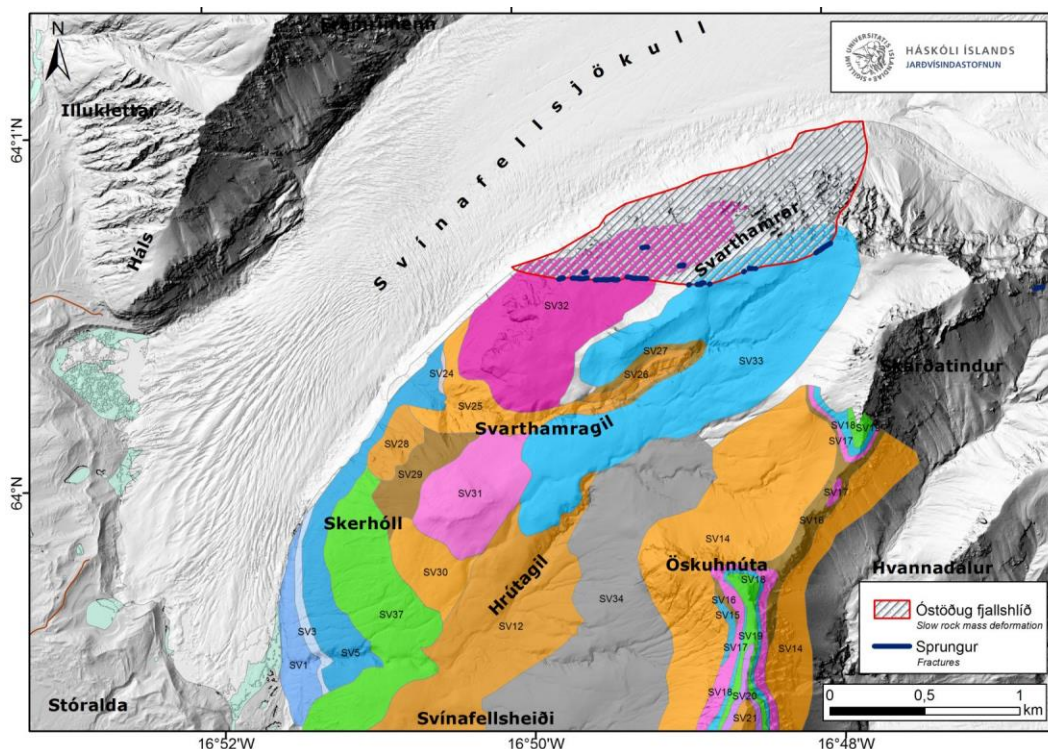
2.1 Eldvirkni í Öræfajökli

Öræfajökull er stór eldkeila sem rís suður af meginjökli Vatnajökuls. Á fjallinu hvílir jökulhetta og ganga margir skriðjökla niður hlíðar þess frá austri til vesturs. Hæsti tindur landsins, Hvannadalshnjúkur, rís tignarlega í norðanverðu fjallinu (mynd 1). Eldstöðin er um 20 km í þvermál og er askjan í hátindi hennar um 3 x 4 km að flatarmáli og ísfyllt. Eldstöðvakerfi Öræfajökuls er lítt rannsakað og liggur utan megingosbelta landsins. Jarðfræði og gossaga á nútíma er því ekki þekkt að fullu. Eldvirkni í Öræfajökli á sögulegum tíma er hins vegar nokkuð vel þekkt (Hjalte J. Guðmundsson, 1998) og er vitað um tvö gos í eldstöðinni. Fyrra gosið var öflugt sprengigos árið 1362 og það síðara árið 1727 var þónokkuð minna (Sigurður Þórarinnsson, 1958). Gosið 1362 var eitt stærsta sprengigos sem hefur orðið á Íslandi á sögulegum tíma og eru sagnir um að það hafi lagt í eyði svæði sem kallað var Litla-Hérað eða Hérað. Frásögn af gosinu er m.a. að finna í Oddverjaannál, sem ritaður var árið 1580 og þar kemur fram að „lifði enginn kvik kind eftir utan ein öldruð kona og kapall“ (Sigurður Björnsson, 1982). Báðum þessum gosum fylgdu mikil jökulhlaup, gusthlaup, eðjuflóð og gjóskufall (sjá t.d. Ármann Höskuldsson & Þorvaldur Þórðarson, 2006, 2007; Magnús Tumi Guðmundsson o.fl., 2008; Kirti Sharma o.fl., 2008).

Jarðskjálftamælir var settur upp á Kvískerjum árið 1976 en lítið er vitað um skjálftavirkni í jöklinum fyrir þann tíma. Frá uppsetningu mælisins og fram til 2016 mældist lítil jarðskjálftavirkni í Öræfajökli. Breyting varð á því í árslok 2016 en þá fór að bera á aukinni virkni í eldstöðinni og í árslok 2017 var hún orðin veruleg. Í kjölfarið fundust merki um gas í Kvía og þann 17. ágúst 2017 varð vart við myndun hringlaga ketils á yfirborði jökulsins í öskju eldfjallsins. Í kjölfarið lýsti almannavarnadeild ríkislögreglustjóra yfir óvissustigi og vöktun var eflid. Jarðskjálftavirkni hélst mikil árið 2018 og eldstöðin þandist út, aðallega að sunnanverðu. Þessi aukna virkni í jöklinum var útskýrð með því að kvikuinnskot hafi troðist inn í eldstöðvarkerfið (Halldór Geirsson o.fl., 2018; Kristín Jónsdóttir o.fl., 2018).

2.2 Jarðlagaskipan Svínafellsheiðar

Nokkuð hefur verið ritað um jarðfræði Skaftafells og nærliggjandi svæða og er lýsing sú sem hér fer á eftir byggð á kortlagningu Jóhanns Helgasonar og Roberts A. Duncan (Jóhann Helgason, 2007; Jóhann Helgason & Robert A. Duncan, 2001, 2013) og síðar nákvæmari kortlagning á Svínafellsheiði (Ben-Yehoshua o.fl. 2021, 2023 og 2025). Berggrunnur svæðisins er talinn vera myndaður á síðastliðnum 5 milljónum ára og inniheldur fjölbreytt jarðlög, svo sem hraunlög sem runnið hafa á hlýskeyðum og setlög og móbergsmýndanir frá jökulskeyðum. Berggrunnurinn endurspeglar glögglega þær miklu umhverfisbreytingar sem orðið hafa á upphleðslutímanum og þar af leiðandi mismunandi myndunarumhverfi. Einfaldað jarðfræðikort af svæðinu er sýnt á mynd 2.

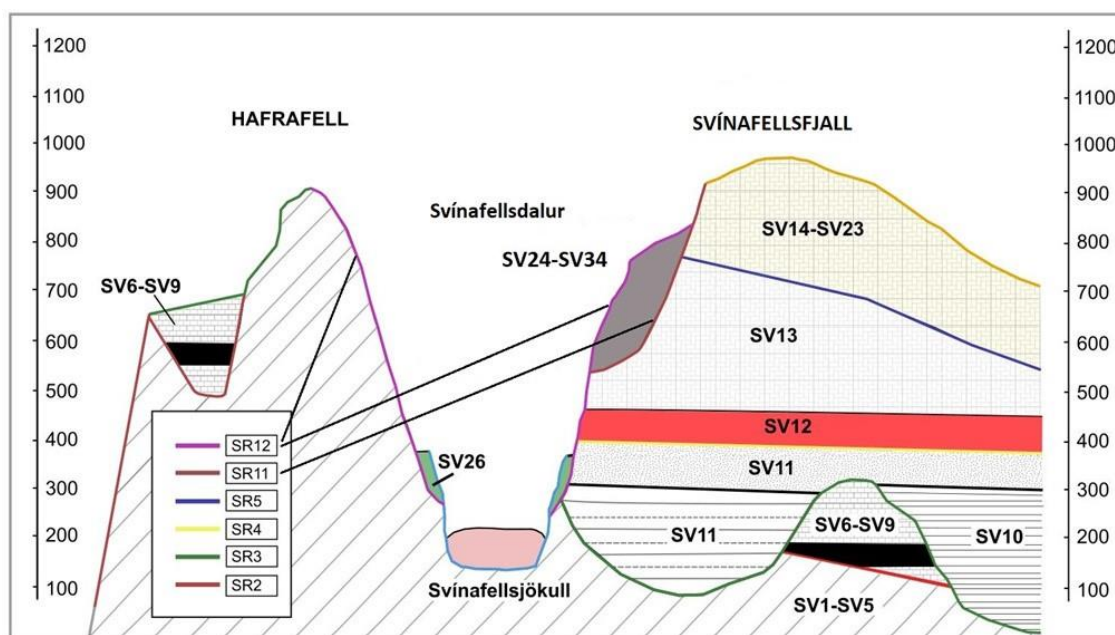


Mynd 2. Einfaldað jarðfræðikort af Svínafelli og Svínafellsheiði. Rauða línan ofarlega á myndinni sýnir einfaldaða legu meginsprungunnar (einfaldað frá Jóhanni Helgasyni og Robert A. Duncan, 2013). Grunnmynd er lidar mæling frá 2011. Útlínur jökla, vatna, áa og vega eru fengnar úr IS50V gagnagrunni Landmælinga Íslands.

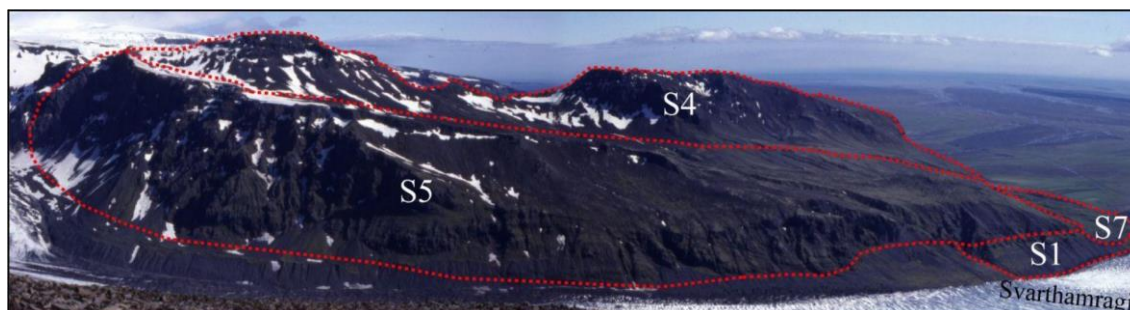
Jarðlagaskipan Svínafells er nokkuð ítarlega lýst í grein Jóhanns Helgasonar og Roberts A. Duncan (2013) og nær sú lýsing inn að efri hluta Svínafellsheiðar, en í raun ekki nema að litlu leiti inn á svæðið þar sem sprungukerfið hefur myndast. Á jarðfræðikortinu má meðal annars finna jarðlagasnið (SVH) sem tekið er af neðri hluta Svarthamragils og endurspeglar jarðlagaskipan á neðri hluta heiðarinnar sem sprungan liggur um. Þar kemur fram að neðsta og jafnframt elsta hluta berggrunnins á efri hluta Svínafellsheiðar er að finna neðst í Svarthamragili. Hann er samsettur úr hraunlögum af tertíerum aldri sem eru auðkennd sem myndun SV5. Hraunlögum í þessari myndun hallar að jafnaði um 4° til VNV og eru þau greinanleg alla leið niður að Hrútagili. Þessi tertíer myndun hefur orðið fyrir umtalsverðu rofi eins og sést á mynd 3.

Jóhann Helgason og Robert Duncan leiða líkur að því að jökull hafi rofið dal á svipuðum stað þar sem núverandi Svínafellsjökull liggur. Talið er að það rof hafi átt sér stað fyrir meira en 2 milljónum ára. Síðar lögðust gosmyndanir SV24 til SV34 yfir brattar hlíðar dalsins og nefnast þær Svarthamrabunki (syrpa 5). Heildarþykkt syrpu 5 er áætluð um 350 m og samanstendur hún af jökulbergi, jökulgosbergi, kubbabergi og andesískum basalhraunlögum (sjá mynd 2). Þykkt einstakra myndana er breytileg frá 10–50 m og þeim hallar upp undir 40° til VSV. Ekki hefur verið gerð tilraun til að tengja aldur þessara laga við ákveðin kuldaskið eða hlýindaskið en þó er þau talin vera yngri en 0.78 milljónir ára. Jarðlagaskipan Svarthamrabunkans (syrpu 5) sést hvað best í Svarthamragili (sjá mynd 2). Neðsta myndunin er SV24 í henni er völuþing sem kemur fyrir neðst í gilinu. Ofan

á þeirri myndun liggur myndun SV25 sem er hægt að rekja upp allt Svarthamragil og er samsett úr jökulgosbergi, kubbabergi og breksíu. Efst í því gili koma síðan myndanir SV26, sem er einnig jökulgosberg, og SV27, sem er jökulberg. Myndun SV32 er ísúrt kubbaberg og má rekja hana frá Svarthamragili inn hlíðina til norðausturs að Mosahálsi. Ofan á þeirri myndun liggur myndun SV33, sem er dreifdílótt hraunlag. Yfirborðssprungurnar sem fundist hafa eru staðsettar í jarðlagaeiningum SV32 og SV33. Eftir myndun syrpu 5, sem hlóðst upp í þessum forna dal og er lýst sem dalfyllu, hefur orðið umtalsvert rof sem hefur grafið niður núverandi dal Svínafellsjökuls milli Hafrafells og Svínafells. Sá hluti hlíðarinnar sem sprungan liggur um er rofleif af dalfyllunni og sést lega og útbreiðsla hennar á myndum 3 og 4 (Jóhann Helgason & Robert A. Duncan 2013).



Mynd 3. Einfölduð sviðsmynd af uppbyggingu Svínafellsfjalls. Mismunandi myndanir eru einkenndar með SV og númeri. Sprungan á Svínafellsheiði liggur í myndun sem einkennd er með SV24–34, einnig nefnd syrpu 5. Hún er talin hafa myndast í allt að 3–400 m djúpum dal sem rofinn var af jökli (rofflötur SR11), löngu áður en núverandi dalur myndaðist (frá Jóhann Helgason og Robert A. Duncan, 2013).



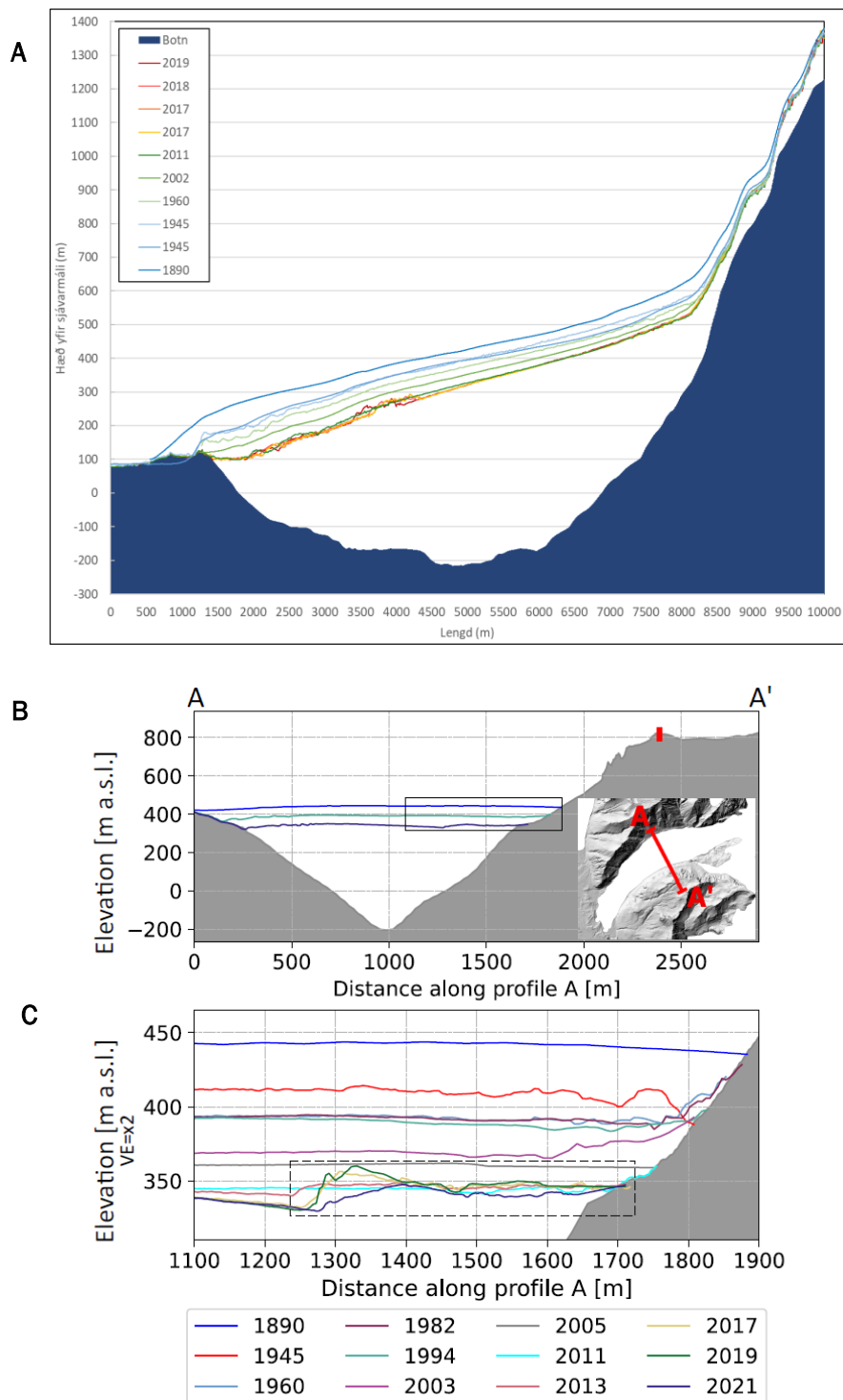
Mynd 4. Lega og útbreiðsla syrpu 5 í hlíðum Svínafellsheiðar. Afmörkun eininga er einkennd með rauðri punktalínu (frá Jóhann Helgason og Robert A. Duncan, 2013).

Mun nákvæmarki kortlagning en hér er lýst hefur verið gerð af jarðlagastafla Svínafellsheiðar eða Svarthamra sem hefur nýlega verið birt (sjá Ben-Yehoshua o.fl. 2025).

2.3 Jöklunarsaga og áhrif hops jökulsins á myndun sprungunnar

Frá aldamótum 1900 hafa jöklar landsins hopað nánast samfelld, að undanskildu köldu tímabili frá u.þ.b. 1970 til 1995 (Guðfinna Aðalgeirsdóttir o.fl. 2020). Þessi hörfun er í samræmi við veðurfarsbreytingar sem áttu sér stað á Íslandi og víðar við N-Atlantshafið á þessum tíma. Mikið hefur verið skrifað um hörfunarsögu jökla og hámarksútbreiðslu þeirra á nútíma (Holocene) og á því skeiði sem kallast *litla ísöldin* (Little Ice Age, LIA, 1450–1900). Á því tímabili einkenndist veðurfar af köldu en þó breytilegu veðurfari (sjá meðal annars Hrafnhildur Hannesdóttir o.fl., 2015a,b). Þá stækkuðu jöklar á landinu og skriðjöklar þeirra gengu fram. Víða má finna forna jökulgarða sem marka mestu útbreiðslu jökla á þessum tíma og eru sumir þeirra umfangsmiklir og áberandi í landslaginu. Talið er að flestir skriðjöklar landsins hafi náð hámarksútbreiðslu sinni á átjándu og níttjándu öldinni (t.d. Sigurður Þórarinnsson, 1943; Hjalti J. Guðmundsson, 1997; Evans o.fl., 1999; Oddur Sigurðsson, 2005; Kirkbride & Dugmore, 2008; Helgi Björnsson, 2009; Áslaug Geirsdóttir o.fl., 2009; Guðrún Larsen o.fl., 2011; Hrafnhildur Hannesdóttir o.fl., 2015a,b). Árið 1930 hófust skipulegar mælingar á hörfun jökla á landinu, eða svokallaðar sporðamælingar, á vegum Jöklarannsóknafélags Íslands. Sýna þessar mælingar að skriðjöklar hafa hopað mikið frá því að jöklarnir náðu hámarksútbreiðslu. Samfara þessari miklu hörfun hefur orðið mikil breyting á rúmmáli og þykkt skriðjökla. Samkvæmt nýlegri rannsókn kemur fram að á tímabilinu frá 1890 til 2010 hafi skriðjöklar við sunnanverðan Vatnajökul lækkað um 150–270 m við jaðrana og tapað um 22% af rúmmáli sínu að meðaltali, en nokkur breytileiki er á milli jökla. Það vekur athygli í þessari rannsókn er að ofan við 1500–1700 m hæð eru breytingar á þykkt jökla hverfandi. Mesta rúmmálsbreytingin varð á árunum 1930–1945 og eftir 1995 en rýrnun jöklanna var minni á öðrum tímabilum (Hrafnhildur Hannesdóttir o.fl., 2015b).

Frá því að Svínafellsjökull náði hámarksútbreiðslu í lok litlu ísaldar um 1890 og fram undir 1940 var vesturhluti hans samtengdur Skaftafellsjökli framan við Hafrafell, sem skilur jöklana tvo að (Helgi Björnsson, 2009). Frá þeim tíma hefur jökullinn haldið áfram að hörfa og tvö lón myndast við sporð hans að vestan- og austanverðu. Vestara lónið við Hafrafell tók að myndast í kringum síðustu aldamót. Árið 2018 voru lónin samtals um 0.4 km² flatarmáli og eru aðskilin af þunnri ístungu (Snævarr Guðmundsson o.fl., 2019). Mælingar sem gerðar voru á vestara jökullóninu árið 2016 sýndu að dýpi rétt framan við páverandi jökulsporð var um og yfir 60 m og einnig að lónið er mjög aðdjúpt (Þorsteinn Sæmundsson & Guðbjörn Margeirsson, 2016).



Mynd 5. A) Langsnið (SV-NA) af jökulsorfna dalnum undir Svínafellsjökli sýnir landslagið undir jöklinum frá frambrún hans og um 9.5 km inn á jökulinn. Línurnar sýna útbreiðslu og þykkt jökulsins á mismunandi tímum, allt frá ~1890 til 2019. Lega langsniðsins er sýnd á mynd 1. Byggt á gögnum frá ýmsum aðilum. B) Þversnið A-A' sem sýnir yfirborð jökulsins 1890, 1994 og 2021 ásamt jökulbotni og staðsetningu á sniði fjallshlíðarinnar í gráu. Rauði punkturinn sýnir staðsetningu meginprungunnar og kassinn umfang myndar 8b. C) Styttri hluti af sama sniði A-A'. Teiknaðar eru upp 12 jökulþykktir sem sýna þróunina á 131 árs tímabili. Áhrif skriðufallsins 2013 á hæðarsnið árána 2013, 2017, 2019 og 2021 sést greinilega (kassi afmarkaður með svartri brotalínu). Mynd b) hefur lóðréttar ýkjur (VE) 2 til að sýna betur lóðréttu jöklabreytingarnar. (myndir B og C er frá Ben-Yehoshua o.fl. 2023).

Íssjármælingar á Svínafellsjökli voru gerðar sem hluti af mælingum á ísþykkt á Öræfajökli á árunum 1991–2012 og aftur árið 2022. Þær sýna að Svínafellsjökull hefur grafið um 6 km langan dal sem nær 200 m niður fyrir núverandi sjávarmál. Þykkt jökulsins er nokkuð mismunandi í dalnum en neðan við Svarthamra er hún allt að 500 m (Helgi Björnsson, 2009; Eyjólfur Magnússon o.fl., 2012, Ben-Yehoshua o.fl. 2025). Vatnshæð jökullónanna fyrir framan jökulsporðinn er í dag um 80 m h.y.s. þannig að við áframhaldandi hörfun jökulsins og stækkun lónsins getur dýpi þess orðið allt að 300 m. Botnlandslag og staða jökulsins á mismunandi tímum er sýnd á mynd 5.

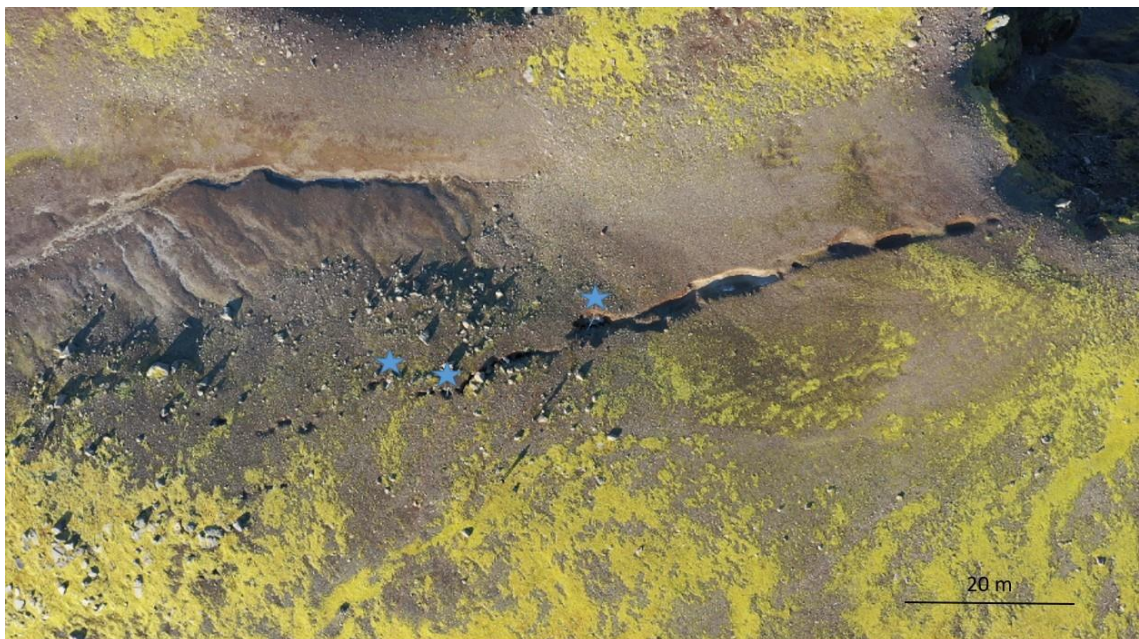
Framan við lón Svínafellsjökuls eru stórir og miklir jökulgarðar sem eru áberandi í landslaginu. Þessir garðar eru taldir marka hámarksútbreiðslu jökulsins í lok litlu ísaldar um 1890 (sjá til dæmis Hrafnhildur Hannesdóttir o.fl., 2015b). Þó er talið að ysti hluti garðanna, sem nefnist Stóralda, gæti verið eldri og jafnvel allt að 2500 ára gamall (Sigurður Þórarinnsson, 1958). Jökulgarðarnir eru nokkuð misháir, en hæst rísa þeir að austanverðu í um 150 m h.y.s. eða um 50 m yfir umhverfið. Að austanverðu hefur Svínafellsá rofið sér farveg og er það eina útfall lónsins nú, í um 80 m h.y.s.

Á undanförunum árum og áratugum hafa mörg stór berghlaup fallið á skriðjökla víðs vegar um heiminn svo sem í Bandaríkjunum (Post, 1965; Shreve, 1966; Crandell & Fahnestock, 1965), Himalaja fjöllum (Hewitt, 1988) og Nýja Sjálandi (Chinn & McSaveney, 1992). Það einkennir mörg þessara berghlaupa að þau hafa langa úthlaupslengd samanborið við stór berghlaup sem ekki falla á jökla (Deline o.fl., 2015). Samkvæmt niðurstöðum t.d. McSaveney (2002), Geertsema o.fl. (2006) og Hewitt o.fl. (2011) þá er tíðni stórra berghlaupa jafn mikil eða meiri við jökla en í öðru fjalllendi utan jökla. Orsakir slíkra berghlaupa geta verið flóknar og stýrast af fjölda samverkandi þátta svo sem innri gerð jarðlaga (lagskipting, halli, veðrun, spennubreytingar í bergi vegna fargléttingar og breytingar í veðurfari, sjá t.d. Pacione, 1999). Sýnt hefur verið fram á að undangröftur hlíða vegna jökulrofs og farglétting samfara jökulhörfun geta valdið skriðuföllum við skriðjökla (Holm o.fl., 2004, Stoffel & Huggel, 2012). Sprungumyndun á Svínafellsheiði má rekja til hörfunar Svínafellsjökuls (Ben-Yehoshua 2023, 2025), líkt og við Steinsholtjökul 1967 (Guðmundur Kjartansson 1968) og Morsárjökul 2007 (Þorsteinn Sæmundsson o.fl., 2011). Líklegt má telja að við áframhaldandi hörfun og þynningu Svínafellsjökuls haldi sprungan áfram að víkka. Í grein Daniels Ben-Yehoshua (2025) er sýnt fram á þessi tengsl milli hörfun jökulsins og stöðugleika hlíðarinnar. En þróun mála næstu ár eða áratugi er óhjákvæmilega óviss.

2.4 Sögulegar skriður á jökla á Íslandi

Á undanförunum árum hefur verið leitað eftir ummerkjum um skriður sem fallið hafa á jökla landsins til þess að greina hversu oft slíkar skriður hafa fallið og eins hvort einhver breyting hefur orðið á tíðni þeirra (Þorsteinn Sæmundsson o.fl., 2018). Elsta skriðan sem fundist hefur féll á Morsárjökul um 1920, en upplýsingar um hana eru af skörum skammti. Þekktum skriðuföllum má skipta niður á tvö tímabil, annars vegar í kringum

1970 og hins vegar eftir 2000. Þessi skriðuföll eru misjöfn að stærð og gerð en meðal þeirra stærstu er berghlaup sem féll í janúar 1967 á Steinsholtsjökul. Berghlaupið, sem er áætlað hafi verið um 15 milljónir rúmmetra, féll úr Innstahaus og þar sem brotflöturinn náði inn undir jökulinn var hlaupið mjög blandað jökulís. Það gekk niður jökulinn og féll í lón við sporð hans og ruddi fram miklu vatnsflóði blönduðu jökulís og stórgrýti niður Steinsholtsdal (Guðmundur Kjartansson 1968). Haustið 1972 féll berghlaup á Jökulsárgilsjökul í sunnanverðum Mýrdalsjökli, um 2 km vestur af Sólheimajökli. Talið er að það hafi fallið á tímabilinu 9. september til 9. október 1972. Berghlaupið er um 1.5 km breitt og úthlaupslengd um 0.5 km. Ekki er vitað um orsakir hrunsins en mikil úrkoma, annars vegar 20. september og hins vegar 6. október, renna stoðum undir að skriðan hafi getað fallið vegna mikillar úrkomu annan hvorn daginn (Oddur Sigurðsson & Richard S. Williams, 1991). Árið 2007 féll berghlaup á Morsárjökul í sunnanverðum Vatnajökli. Flóðið, sem er áætlað um 4.5 milljónir rúmmetra, féll á ofanverðan jökulinn og þakti urðin um fimmtung af yfirborði hans (Þorsteinn Sæmundsson o.fl., 2011). Á tímabilinu frá 24. – 27. febrúar árið 2013 féll stór skriða á Svínafellsjökul í miklum rigningum. Skriðan féll úr hlíðinni neðan við Skarðatind og þakti um 1.7 km². Rúmmál skriðunnar er um 5,3 milljónir rúmmetra, en hún flæddi um 4 km niður suðurhlíð jökulsins og náði vel út á miðjan jökulinn þar sem hann er breiðastur (Daniel Ben-Yehoshua o.fl. 2022).



Mynd 6. Efri hluti sprungunnar á Svínafellsheiði. Sprungan er greinileg á yfirborði á um 100 m kafla frá norðausturbrún heiðarinnar, en að suðvestanverðu er meira um jarðföll. Bláu stjörnurnar sýna staðsetningu togmæla sem settir voru upp árið 2018 (Ljósmynd: Þorsteinn Sæmundsson, 2019.)

2.5 Svæðið sem er á hreyfingu

Haustið 2014 gengu smalamenn frá Svínafellsbæjunum fram á sprungu í ofanverðri Svínafellsheiði í um 850 m hæð (sjá mynd 6). Sprungan var talin vera um 100 m löng og var þá orðin nokkuð greinileg á yfirborði. Ljósmynd sem Ármann Guðmundsson tók af sprungunni barst til Háskóla Íslands síðla árs 2015. Árið 2016 var farin könnunarferð upp að sprungunni og í þeirri ferð var hún kortlögð auk þess sem koparboltum var komið fyrir á börmum hennar og fjarlægð milli þeirra mæld (Þorsteinn Sæmundsson, 2017). Vorið 2018 birtu Loftmyndir ehf. nýja mynd af Svínafellsheiði sem tekin var árið 2017 og merktu á henni sprungulaga fyrirbæri sem liggur nokkru neðar í hlíðinni en meginsprungan. Við nánari athugun hefur komið í ljós að rekja má sprungu frá um 750 m hæð skáhallt niður hlíð Svarthamra og langleiðina að yfirborði Svínafellsjökuls þar sem hún hverfur undir skriðuvænginn í rúmlega 350 m hæð (sjá mynd 7). Eftir kortlagningu árið 2018 var ljóst að sprungurnar tvær má rekja saman og mynda sprungukerfi sem hefur heildarlengd um 1.7 km frá efri sprungunni í um 850 m h.y.s. langleiðina niður að núverandi yfirborði jökulsins í um 350 m h.y.s. Við áframhaldandi kortlagningu hlíðarinnar á undanförunum árum hafa enn fremur fundist ummerki um að fleiri sprungur sé að finna í hlíðinni neðan við efstu sprunguna og á hverju ári hafa uppgötvast ný jarðföll (Þorsteinn Sæmundsson, 2017, 2018, Ben-Yehoshua o.fl. 2023, 2025). Mynd 8 sýnir kortlagningu sprungunnar og jarðfalla í stykkinu sem er á hreyfingu.

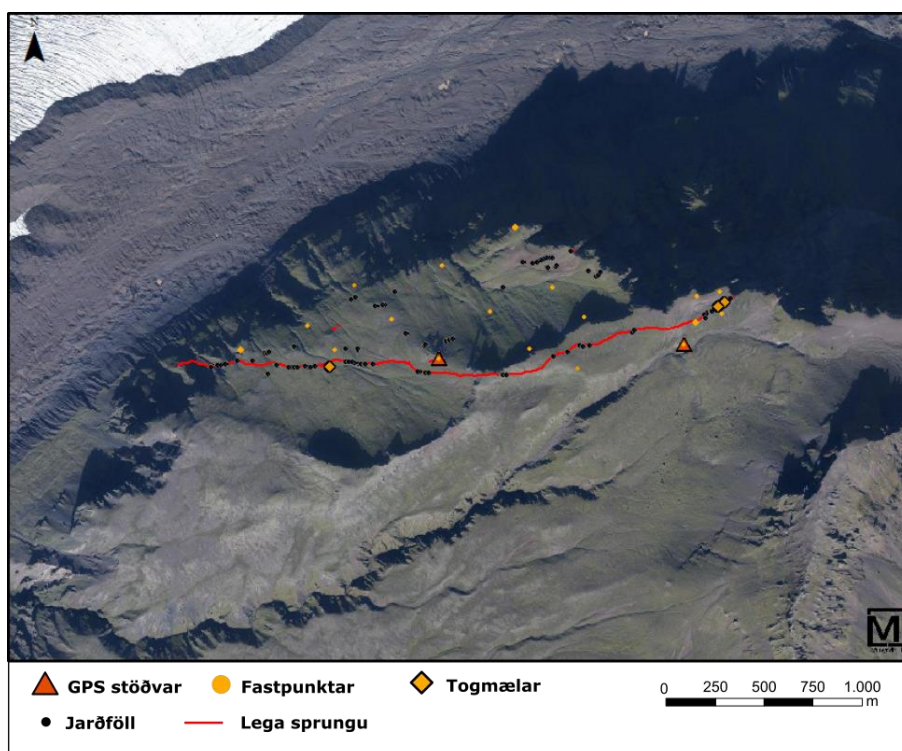


Mynd 7. Svínafellsheiði horft upp til Svarthamra. Hægt er að rekja sprunguna skáhallt upp hlíðina frá skriðuvængnum ofan við jökulinn í 300 m hæð og upp í klettabeltið í um 750 m hæð þar sem hún mætir efsta hlutanum sem fyrst uppgötvaðist. (Ljósmynd: Þorsteinn Sæmundsson, 2019.)

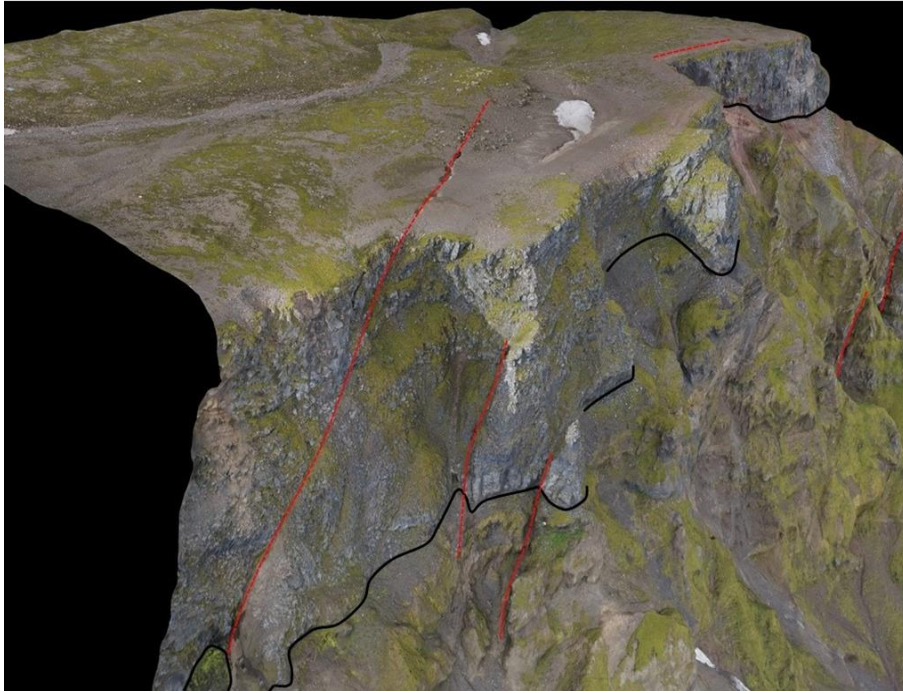
Sprungan liggur í NNA–SSV (201–30°), nokkurn veginn samsíða brún hlíðarinnar efst á heiðinni. Efst að norðaustanverðu er sprungan vel sýnileg á yfirborði en að

suðvestanverðu er meira um jarðföll, en þar er jarðvegur þykkari. Árið 2016 var dýpi sprungunnar mælt með lóði og reyndist það um 7 m en gera má ráð fyrir að sprungan sé mun dýpri, þó lóðið hafi ekki komist neðar. Norðausturendi sprungunnar, sem er sýnilegur á yfirborði, er í um 6 m fjarlægð frá brún klettabeltisins á norðurhluta heiðarinnar (mynd 6). Á landlíkani sem gert var af hlíðinni árið 2016 (Daniel Ben-Yehoshua, 2016) er hægt að rekja sprunguna lóðrétt niður klettabeltið frá um 850 m hæð niður í móbergið fyrir neðan, en þar er hún hulin af skriðuefni, sjá mynd 9.

Jarðföll og sprungur sem fundist hafa utan meginsprungunnar sýna að stykkið sem er á hreyfingu er brotið upp í nokkra hluta. Frekari gögn um færslu þarf til að fá yfirsýn um innbyrðis hreyfingu stykkjanna.



Mynd 8. Loftmynd af svæðinu sem er á hreyfingu á Svínafellsheiði. Lega meginsprungunnar er sýnd ásamt minni sprungum í hlíðinni. Staðsetning jarðfalla er einnig merkt inn á myndinni ásamt helstu mælitækjum sem komið hefur verið fyrir á svæðinu.



Mynd 9. Efsti hluti sprungunnar á Svínafellsheiði liggur í NA–SV stefnu nánast samsíða brúninni. Sprunguna er hægt að rekja niður norðurhlíðina og í móbergssmyndunina fyrir neðan, þar sem hún hverfur undir skriðuvænginn. Rauðar línur tákna sprungur og svartar línur eru lagmót milli myndanna SV32 og SV33. (Landlíkan Ben-Yehoshua 2016).

Óvissa ríkir um aldur sprungunnar. Á loftmyndum frá Landmælingum Íslands sem teknar voru árið 1986 og frá Loftmyndum ehf. árið 2003 er sprungan ekki sýnileg. Hún kemur heldur ekki fram á SPOT-5 gervitunglamynd frá árinu 2004. Á lidar landlíkani frá árinu 2011 má hins vegar greina sprunguna og eins kemur hún fram á loftmyndum frá árunum 2013 og 2017. Það má því gera ráð fyrir að sprungan hafi birst á yfirborði á árabílinu 2004 til 2010 og hún sé því 15 til 20 ára gömul.

Nýlegar athuganir hafa hins vegar leitt í ljós að niðurföll voru byrjuð að myndast meðal annars við Rák fyrir árið 1980, og eru sýnileg á loftmynd frá 1980 en ekki á mynd frá 1968. Á loftmynd frá 1994 eru fleiri niðurföll sýnileg og svipað má sjá á loftmynd frá árinu 2003. Á gögnum frá 2009 (QuickBird2 panchromatic imagery) og örðum yngri gögnum birtast fleiri og fleiri niðurföll sem marka legu sprungukerfisins í hlíðinni (Ben-Yehoshua o.fl. 2023).



Mynd 10. Tveimur GPS stöðvum og togmælum var komið fyrir á sprungunni árin 2018 og 2019. A: GPS stöð á efri hluta sprungunnar, staðsett SSV af sprungunni í um 850m hæð. B: Togmælir staðsettur á efri hluta sprungunnar í um 850m hæð, komið fyrir árið 2018. C: Togmælir á efri hluta sprungunnar, komið fyrir árið 2019. D: Togmælir á neðri hluta sprungunnar, komið fyrir árið 2019. Munurinn á þykkt lausra jarðlaga á efri og neðri hluta sprungunnar sést vel á myndum C og D. (Ljósmyndir A og B: Þorsteinn Sæmundsson, 2018, C og D: Ragnar Heiðar Þrastarson, 2019.)

3 Vettvangsferðir og mælingar

Frá árinu 2016 til 2019 voru farnar 14 vettvangsferðir á Svínafellsheiði á vegum Veðurstofunnar og Háskóla Íslands. Þrjár ferðir voru farnar 2016, þrjár ferðir árið 2017, fimm ferðir árið 2018 og þrjár ferðir árið 2019. Á árunum 2016–2017 var megináhersla lögð á að kortleggja hlíðina, útbúa landlíkön af svæðinu með ljósmyndun úr flygildum og koma fyrir mælipunktum á efri hluta sprungunnar, neðri hlutinn var ófundinn á þeim tíma.

Þegar sprungur í neðri hluta hlíðarinnar uppgötvuðust vorið 2018 var ráðist í rannsóknir, kortlagningu og síritandi mælitækjum til vöktunar og gagnasöfnunar komið fyrir. Með dyggri aðstoð frá Landhelgisgæslunni var búnaður fluttur og settur upp á heiðinni, tveimur GPS stöðvum, vindmyllum til rafmagnsöflunar, rafgeymum og fjarskiptabúnaði. Að auki var settur upp fjórfótur á Hafrafell til TLS mælinga. Síðla um sumarið 2018 var togmælum komið fyrir á efri hluta sprungunnar. Árið 2019 var 15 fastpunktum komið fyrir á svæðinu og tveimur togmælum til viðbótar. Auk þess var rafkerfið endurbætt, bæði efri og neðri hluti sprungunnar ljósmyndaðir með drónum og hæðarlíkön útbúin. Fjölmargar ferðir hafa síðan verið farnar frá því að mælakerfið var sett upp til að viðhalda mælitækjum en rekstur þeirra hefur gengið brösulega þar sem erfitt er að reka mælitæki á snjóþungu svæði í mikilli hæð þar sem ísing og hvassviðri geta hæglega skemmt tækin. Á árunum 2020 til 2024 hefur rafkerfið og samskiptabúnaður verið uppfærður. Á síðustu árum hefur Daniel Ben-Yehoshua rannsakað og kortlagt svæðið mjög ítarlega í tengslum við doktorsrannsóknir sínar (Ben-Yehoshua o.fl. 2023 og 2025).

3.1 Bandmælingar

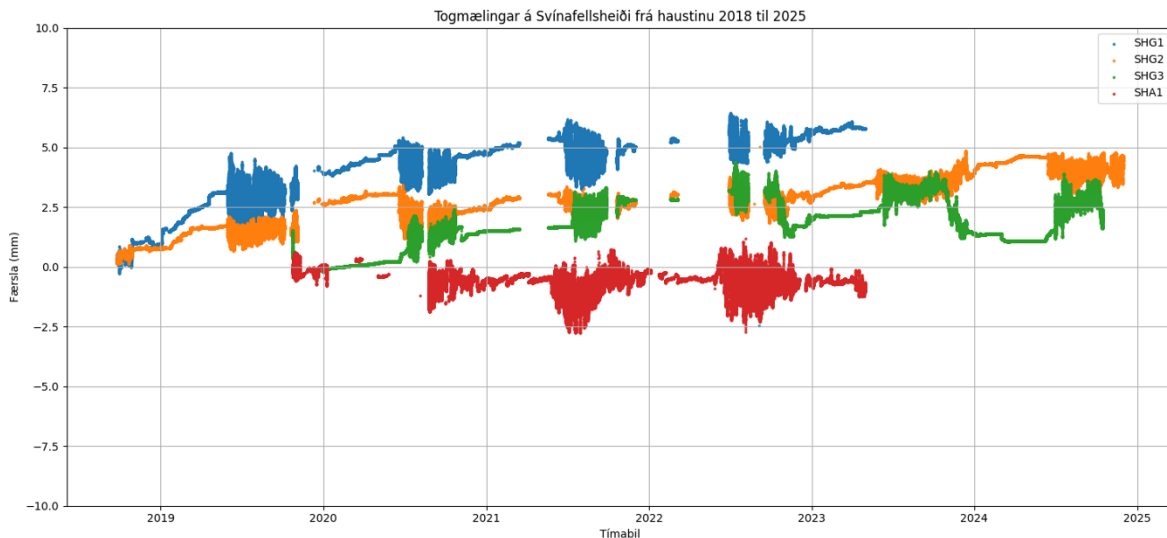
Í september árið 2016 var komið fyrir koparboltum sitt hvorum megin við efri hluta sprungunnar í um 850 m hæð. Þrjár mælinir voru settar yfir sprunguna og hafa þær verið mældar með reglulega. Gliðnunin mældist mest á árunum 2016 til 2018 á mælistað 1 og 3. Frá 2018 til 2019 dró úr gliðnuninni (tafla 1). Litlar breytingar hafa verið á síðustu árum en heildarfærsla á mælipunktinum sem gliðnaði mest á tímabilinu 2019 til 2024 er undir 1 cm. Mesta gliðnun á milli bolta á tímabilinu 2018 til 2023 mældist 6 mm (Daniel Ben-Yehoshua og fl 2023).

Tafla 1. Niðurstöður bandmælinga á koparboltum [cm]. Mælingar á koparboltunum hófust árið 2016 (Breytt frá Ben-Yehoshua o.fl. 2023).

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	96,3	96,7	97,9	98,3	98,2	-	98,4
2	62,3	63,5	63,7	-	-	-	-
3	76	77,3	76,5	76,6	76,5	76,6	76,6

3.2 Gögn úr togmælum

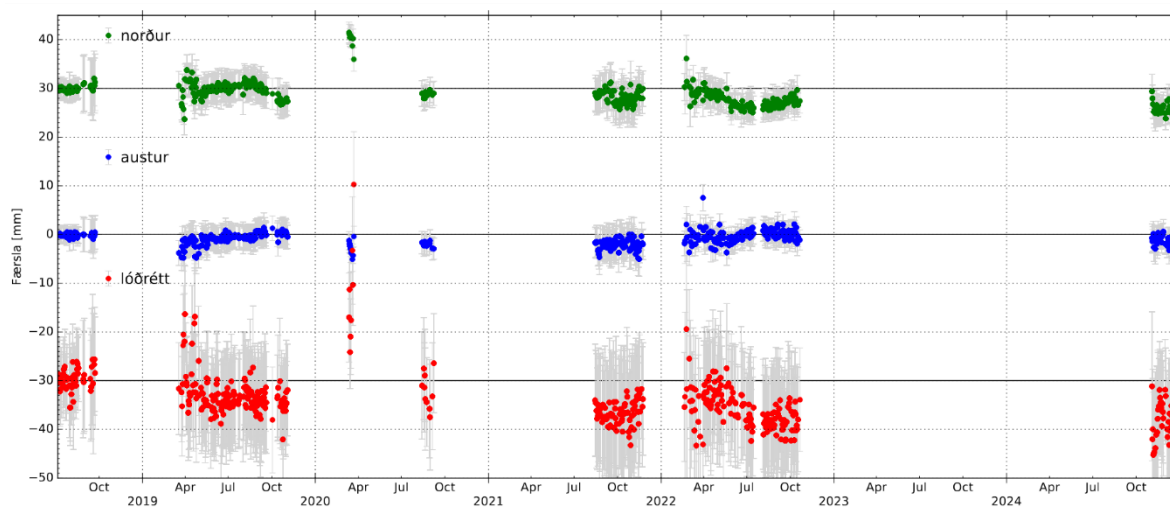
Árið 2018 var komið fyrir tveimur togmælum á efri hluta sprungunnar rétt sunnan við koparboltana (mynd 8). Haustið 2019 var tveimur nýjum togmælum komið fyrir á svæðinu, einum á neðra svæðið, þar sem engin mælitæki höfðu verið, og einum var bætt við á efra svæðinu. Rekstur togmæla gekk vel framan af en sumarið 2023 hættu tveir mælar að virka, einn á efra svæðinu og eini mælirinn á neðra svæðinu. Í lok árs 2024 hættu svo hinir tveir að virka líka. Til stendur að skipta út mælum sumarið 2025. Niðurstöður mælinga fram til haustsins 2024 sýna að heildarfærsla allra mælanna er undir 1 cm (mynd 11).



Mynd 11. Láréttar breytingar á togmælunum þremur sem eru staðsettir á efra svæðinu (SHG-1, SHG-2 og SHG-3) og eina mælinum sem er á neðra svæðinu (SHA-1). Mælingar ná frá september 2018 til desember 2024. Heildarfærsla á SHG-1 er í kringum 6 mm en aðrir mælar sýna minni færslu. Notast er við hitamæli til að leiðrétta mælingar en sjá má miklar sveiflur á sumrin vegna hitabreytinga í lofti en á veturna liggja mælitækin undir snjó og hitinn helst stöðugur og sveiflurnar eru minni.

3.3 GNSS mælingar

Tveimur GNSS stöðvum var komið fyrir á svæðinu árið 2018. Efri stöðinni var valinn staður ofan og sunnan við efri hluta sprungunnar og þeirri neðri neðan við sprunguna (mynd 8). Þannig er hægt að mæla innbyrðis hreyfingar á milli þessa tveggja stöðva og greina hvort hreyfing sé um meginsprunguna. Rekstur stöðvanna hefur reynst erfiður en stöðvarnar eru orkufrekar og hefur rafmagnsframleiðsla reynst áskorun vegna sterkra hviða og ísingar á svæðinu. Síðustu ár hefur reksturinn gengið betur eftir að raforkukerfið var endurbætt og meira stuðst við sólarcellur en vindmyllur. Það er engu að síður áskorun yfir vetratímam þegar að sólin er lágt á loft. Einnig hafa bilanir á búnaði valdið vandræðum í rekstri mælitækja á svæðinu. Eins og áður hefur verið nefnt hafa fundist minni sprungur neðan meginsprungunnar, sem bendir til þess að stykkið sé að öllum líkindum brotið upp í minni einingar. Það er því alls óvíst að neðri stöðin endurspegli heildarhreyfingar hliðarinnar en hún gefur engu síður gagnlegar upplýsingar um staðbundna færslu hliðarinnar í nágrenni stöðvarinnar.



Mynd 12. Þrjú gröf þar sem mismunur á milli stöðva SVIN og SVIE er birt. Þar má sjá að afar litlar sem engar breytingar eru í láréttri stefnu en sig virðist koma fram á neðri stöðinni (SVIN) sem gæti tengst jökulfargsbreytingum eða verið staðbundið sig.

Þar sem mælitækin eru staðsett í grennd við jökulinn gætir áhrifa landris vegna hörfunnar jökla en einnig landreks sem taka þarf tillit til en sambærilegar lóðréttar og láréttar hreyfingar má sjá á stöðvum sem eru reknar í Fagurhólsmýri, Sléttubjörgum og Skaftafelli. Einnig þarf að taka tillit til jökulfargsbreytinga sem eru árstíðarbundnar. Úrvinnsla gagna byggir á sólarhringsmeðaltali frá stöðvunum sem minnkar áhrif skammvinnra truflana sem geta komið út frá veðri, rafsegultruflunum og öðrum tímabundnum þáttum.

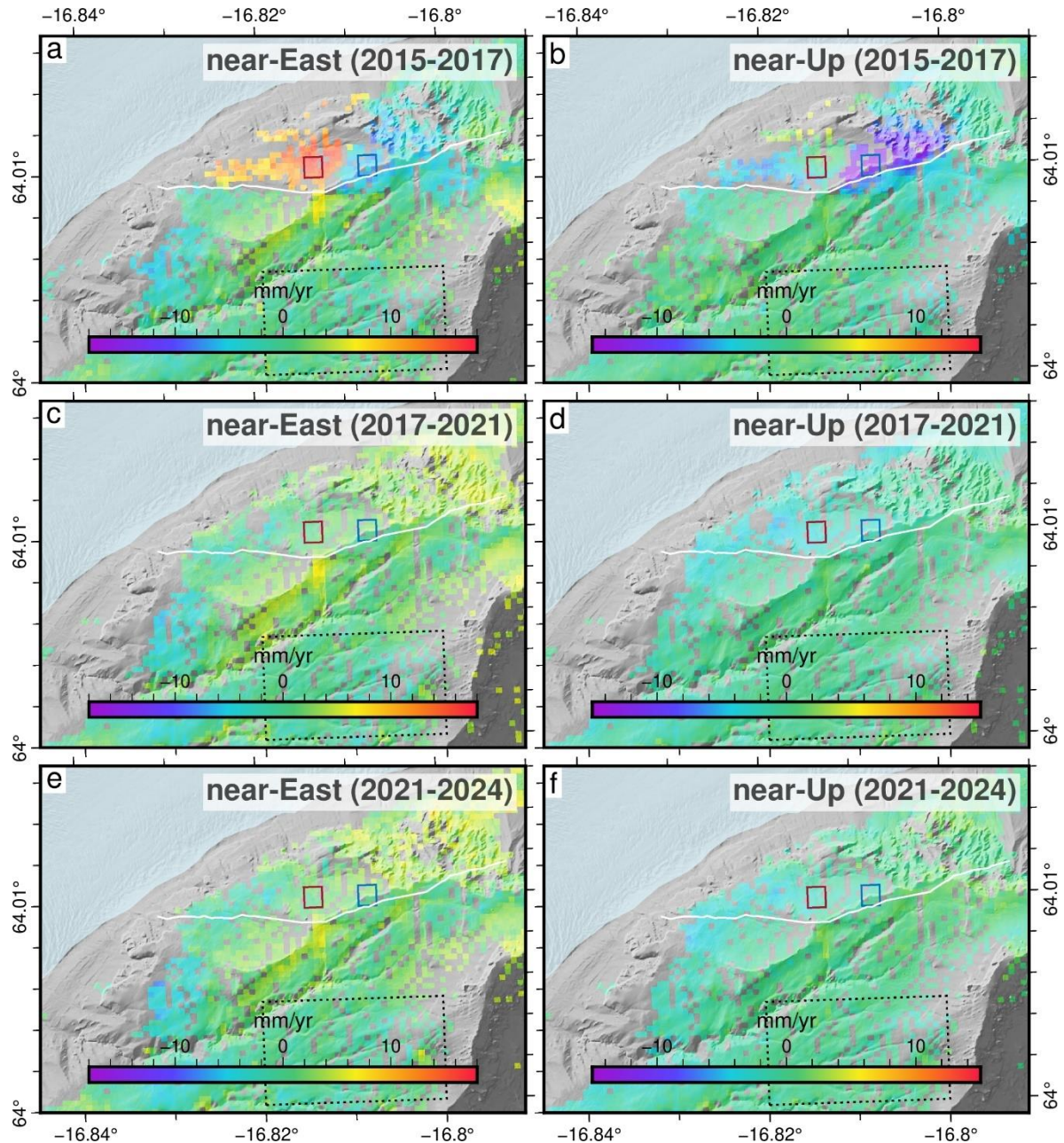
Á mynd 12 sést að afar litlar breytingar eru í láréttu plani á milli stöðvanna tveggja en lítilsháttar sig kemur fram í lóðréttu þættinum á neðri stöðinni (SVIN). Þessar lárétu hreyfingar eru í ágætu samræmi við togmælingar þar sem heildarfærsla frá upphafi mælinga er undir 1 cm. Lóðrétti þátturinn gefur aðeins aðra mynd en samkvæmt mælingum eru 1–2 cm sig á neðri stöðinni frá því að rekstur hófst en hann gæti skýrst af jökulfargsbreytingum sem geta haft staðbundin áhrif en einnig gætu þetta verið staðbundið sig í grennd við stöðina. Lóðrétt færsla er enga síður mjög lítil.

Stálteinar voru reknir niður víða á svæðinu haustið 2019. Staðsetning þeirra var mæld nákvæmlega með landmælingatæki. Þar sem litlar hreyfingar hafa komið fram á togmælum á síðustu árum hefur ekki verið ráðist í endurmælingu en það verður gert ef það herðir á hreyfingu á svæðinu.

3.4 Bylgjuvíxl-mælingar

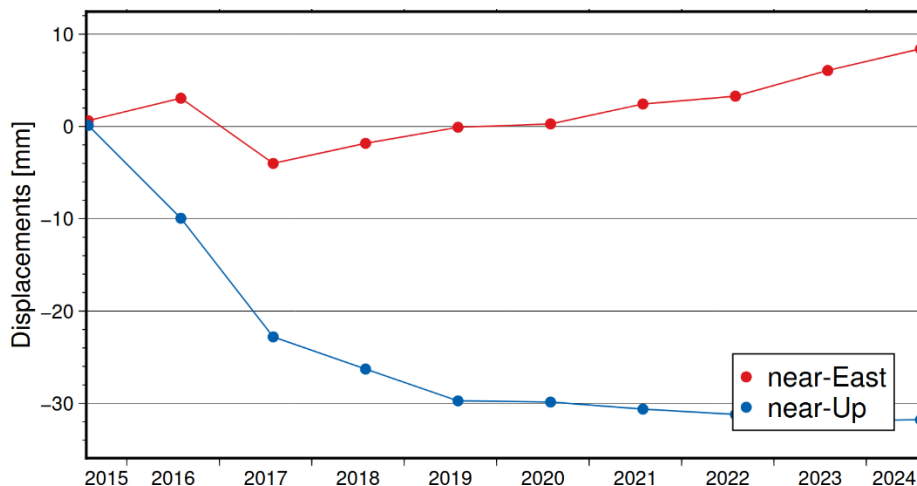
Radargögn frá Svínarfellsheiði úr Sentinel-1 gervitunglum Evrópsku geimferðastofnunarinnar (ESA) hafa verið greind með InSAR eða bylgjuvíxltækni. Þessi aðferðarfræði er tegund af fjarkönnunarmælingum sem gerir það kleyft að greina litlar hreyfingar eða aflögun á yfirborði á stórum landsvæðum. Slíkri aðferðafræði er nú beitt um allan heim til að vakta óstöðugar fjallshlíðar og hafa Norðmenn meðal annars komið upp öflugum kerfi til þess að vakta allar helstu óstöðugar hlíðar Noregs (sjá

<https://insar.ngu.no/>). Þessi tækni var meðal annars beitt við rannsóknir á framhlaupinu í Hítardal, þar sem í ljós kom að hlíðin hafði aflagast í a.m.k. tvö ár og skriðið fram um nokkra tugi cm áður en framhlaup varð þar þann 7. júlí 2019 (Jón Kristinn Helgason o.fl., 2019). Þessi tækni hefur mikið verið beitt við mælingar á aflögun yfirborðs vegna eldsumbrota á Reykjanesskaga.

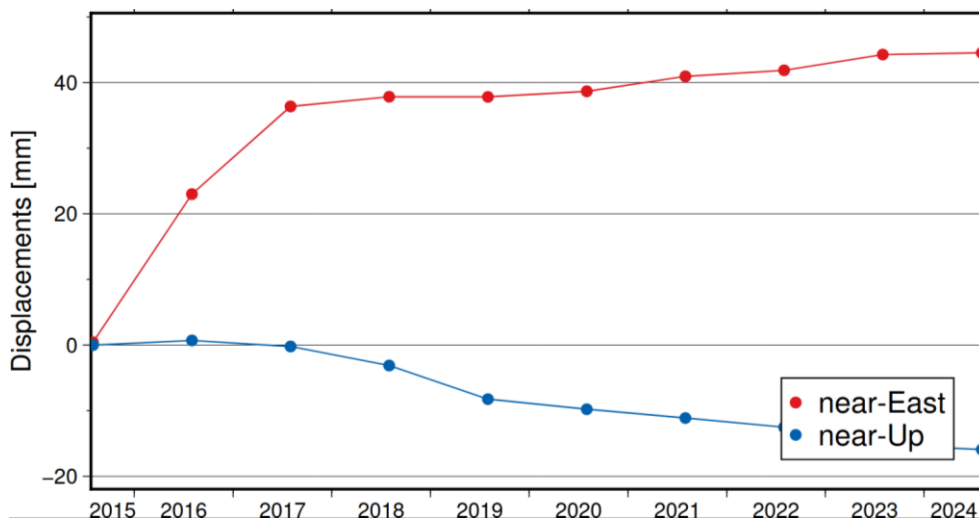


Mynd 13. Hreyfingar í austurátt ásamt lóðréttum hreyfingum á Svínafellsheiði fyrir þrjú tímabil, 2015–2017, 2017–2021 og 2021–2024. Bakgrunnur sýnir skyggt landslag, aðalsprungu þvert yfir Svínafellsheiði (hvít lína), viðmiðunarsvæði fyrir greiningu á breytingum (punktalína), svæði A (blár kassi) og svæði B (dökkrauður kassi).

Samfelld InSAR greining var gerð á Svínafellsheiði með gögnum úr fyrrgreindum gervitunglum frá 2015 til 2024. Aðeins er hægt að nýta myndir sem teknar eru að sumri þegar að snjór hylur ekki yfirborð svæðisins. Niðurstöður sýna að aflögun yfirborðs mældist á Svínafellsheiði milli sumarsins 2015 og 2017. Þó færslurnar sýni flókið mynstur voru þær innan við 2 cm á ári (mynd 13). Eftir 2017 hægði mjög á þessum hreyfingum og lítil breyting hefur mælst, sjá myndir 14–15.



Mynd 14. Hreyfingar í austurátt ásamt lóðréttum breytingum fyrir svæði A. Blái kassinn á mynd 13.



Mynd 15. Hreyfingar í austurátt ásamt lóðréttum breytingum fyrir svæði B. Dökkrauði kassinn á mynd 13.

3.5 Samantekt

Niðurstöður mælinga á Svínafellsheiði sýna að yfirborðshreyfingar á svæðinu hafa verið mjög litlar síðustu ár. InSAR-greining á Sentinel-1 radargögnum frá 2015 til 2024 leiddi í ljós að aflögun yfirborðs mældist mest á árunum 2015 til 2017, en var þá innan við 2 cm á ári sem er í ágætu samræmi við bandmælingarnar. Eftir 2018 dró mjög úr hreyfingum og virðist svæðið nú vera fremur stöðugt samkvæmt bæði gervitunglamælingum og öðrum mæliaðferðum.

Til að fylgjast með staðbundnum hreyfingum voru GNSS-mælistöðvar settar upp á svæðinu árið 2018. Rekstur stöðvanna reyndist erfiður fyrst vegna orkuframleiðslu og tækjabilana en hefur gengið betur síðustu ár. GNSS-mælingar sýna litlar breytingar á milli stöðvanna tveggja og færslur eru innan við 1 cm frá upphafi mælinga. Einnig gefa togmælar og bandmælingar svipaðar niðurstöður, þar sem heildarfærsla síðustu ár er almennt innan við 1 cm.

Þessar niðurstöður benda til þess að yfirborðsfærslur á Svínafellsheiði hafi verið mjög litlar og engin merki eru um aukna hreyfingu eða óstöðugleika á undanförunum árum. Samkvæmt öllum mælingum er svæðið fremur stöðugt þessa stundina en aðstæður gætu breyst á næstu árum þar sem jökulinn heldur áfram að hopa.

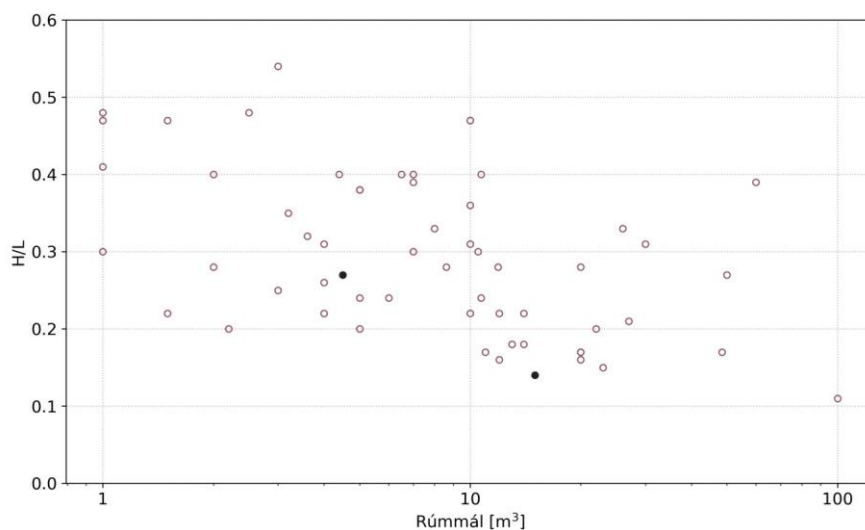
4 Alþjóðlegt gagnasafn berghlaupa sem fallið hafa á jökla

Frá því um miðja síðustu öld hefur fjöldi berghlaupa fallið á jökla víðsvegar um heiminn. Alþjóðlegt gagnasafn yfir tugir berghlaupa á jökla má meðal annars finna í Schneider o.fl. (2011) og Deline o.fl. (2015). Meðal þess sem gögnin hafa að geyma eru upplýsingar um úthlaup, þ.e. hlutfallið á milli fallhæðar og vegalengdar frá upptökum að stöðvunarstað framhluta berghlaupsins. Berghlaup sem hafa lágt úthlaupshlutfall hafa ferðast hlutfallslega lengra fyrir gefna fallhæð en þau sem hafa hátt úthlaupshlutfall. Lista yfir berghlaup á jökla úr þessum heimildum er að finna í töflu 6 í viðauka I.

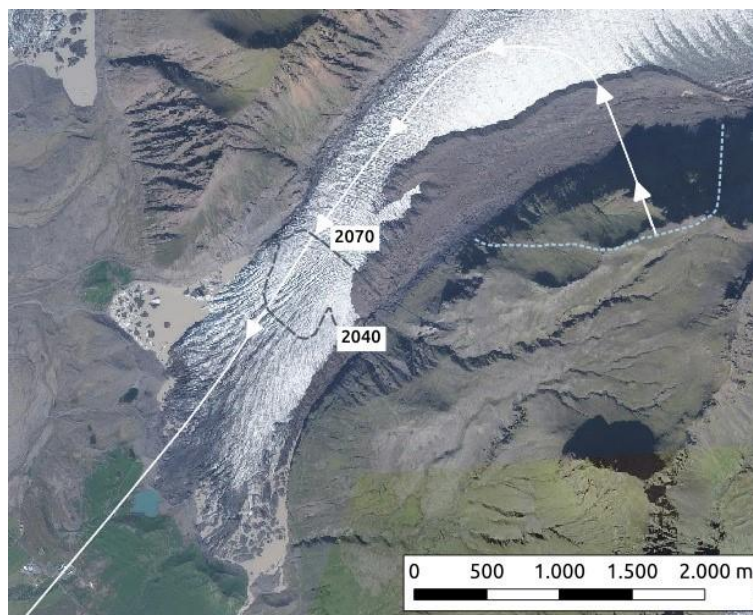
Stór berghlaup hafa tilhneigingu til þess að ná lengri úthlaupslengd í hlutfalli við fallhæð en minni berghlaup. Þessi tengsl hafa lengi verið þekkt (Heim, 1932) og tilraunir verið gerðar til þess að þróa einföld líkön sem lýsa úthlaupslengd eða úthlaupshlutfalli sem falli af rúmmáli (Scheidegger, 1973; Hsü, 1975). Úthlaupshlutfall berghlaupa á jökla úr listanum í töflu 6 er sýnt á mynd 16 sem fall af rúmmáli. Með auknu rúmmáli fer úthlaupshlutfallið heldur lækkandi (lengra úthlaup) en dreifing í gögnunum er mikil og berghlaup af svipaðri stærð virðast geta haft mjög misjafna úthlaupslengd. Einnig hefur verið sýnt að berghlaup sem falla á jökul hafa gjarnan lengra úthlaup en sambærileg berghlaup á landi (Evans & Clague, 1988, 1999). Ýmsar tilgátur hafa komið fram um ástæður þess, til að nefna dæmi er núningur á milli berghlaups og yfirborðs jökuls talinn minni en við jökullaust land auk þess sem berghlaupin rífa með sér og blandast snjó og jökulís, sem getur virkað sem smurning og aukið hreyfanleika. Einnig eru dæmi þess að berghlaup hafi fallið á jökla án þess að rjúfa yfirborð þeirra s.s. á Morsárjökli 2007 (Sæmundsson o.fl 2011)

Upplýsingar um úthlaupslengd berghlaupa á jökla má yfirfæra á Svínafellsjökul til þess að meta hversu langt þau hefðu náð á jöklinum. Mynd 17 sýnir sniðlínu teiknaða eftir líklegum farvegi berghlaups og mynd 18 sýnir snið frá efri sprungunni á Svínafellsheiði niður miðjan jökulinn, um Freysnes og niður á sandana þar fyrir neðan. Á sniðið er merkt úthlaupslengd stórra framhlaupa sem fallið hafa á jökla víða um heim miðað við legu jökuljaðarins í dag, miðað við legu hans eins og hún er talin verða eftir u.þ.b. 20 ár og eftir um hálfa öld að gefnum ákveðnum forsendum um hörfun og lækkun jökulsins á næstu áratugum. Gögnin sýna að við núverandi aðstæður hefur mikill meirihluti framhlaupa úthlutfall sem svarar til þess að þau hefðu stöðvast á jöklinum ofan núverandi lóna við jökulsporðinn. Einungis 3 af 26, eða 11%, fara lengra. Þau tvö berghlaup sem lengst hafa farið, Steinsholtshlaupið 1967 og Kolka–Karmadon hlaupið í rússnesku Kákasusfjöllunum árið 2002 eru nokkuð sérstök og því auðkennd sérstaklega með rauðum örvum á mynd 18. Berghlaupið úr Innstahaus, sem féll á Steinsholtshlaupið í janúar 1967, hreif með sér lón við sporð jökulsins og olli miklu vatnsflóði (Guðmundur Kjartansson,

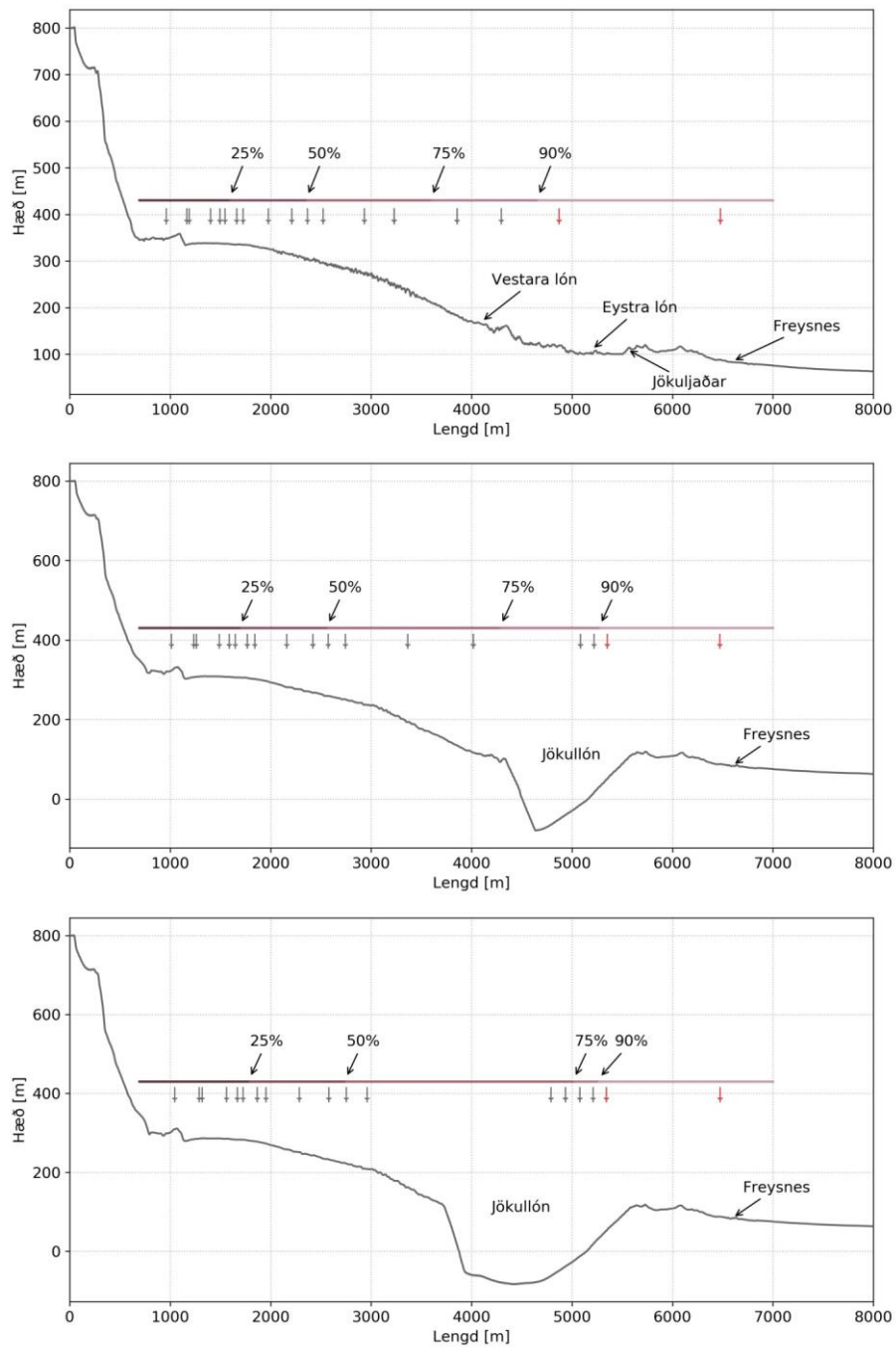
1968). Það hefur haft áhrif á úthlaup hlaupsins. Í Kolka–Karmadon féll berghlaupið á Kolka jökul og hreif hann nánast allan með sér og þróaðist síðan yfir í aurflóð sem ferðaðist langa vegalengd í mjög afmörkuðum farvegi (Huggel o.fl., 2005).



Mynd 16. Úthlaupshlutfall (H/L) berghlaupa á jökla sem fall af rúmmáli. Steinsholtshlaupið (1967) og bergflóðið á Morsárjökul (2007) eru auðkennd með svörtum, fylltum hringjum.



Mynd 17. Líklegur ferill berghlaups sem fellur úr Svínafellsheiði á Svínafellsjökul. Loftmynd frá Loftmyndum ehf.



Mynd 18. Úthlaupslengd stórra berghlaupa á jökla yfirfærð á Svínafellsjökul árið 2020 (efst), ~2040 (miðja) og ~2070 (neðst). Aðeins berghlaup með rúmmál umfram 10 milljónir rúmmetra eru sýnd. Heildregin lína sýnir snið frá efri sprungu á Svínafellsheiði niður jökulinn og út á sandana neðan Freysness. Örvar með prósentutölu sýna úthlaup sem tiltekið hlutfall sögulegra hlaupa lendir ofan við. Rauðu örvarnar auðkenna Steinsholtshlaup og Kolka – Karmadon hlaupið. Hver ör getur táknað fleira en eitt berghlaup.

Eins og er lýst hér á undan þá hafa örar breytingar átt sér stað á Svínafellsjökli vegna hlýnunar loftslags. Á síðustu 10 árum hefur hann hopað og lón tekið að myndast við sporð hans, sem fer sístækkandi með ári hverju (Snævarr Guðmundsson o.fl., 2019). Íssjármælingar á botnlandslagi undir jöklinum (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2012) sýna að hann hefur grafið djúpan dal svo eftir því sem jökullinn þynnist og hopar er ljóst að mikið og djúpt stöðuvatn kemur til með að myndast. Dýpið gæti á næstu áratugum orðið allt að 200 metrar og rúmmál vatns aukist úr u.þ.b. 10 milljónum rúmmetra árið 2020 í 100 – 200 milljónir rúmmetra. Á mynd 18 er staðan eins og hún gæti verið eftir u.þ.b. 20 ár (~2040) og 50 ár (~2070) sýnd. Þá hefur Svínafellsjökull þynnst og hopað svo að berghlaup þarf að ferðast styttri vegalengd til að ná í lónið við sporð hans. Fjallað er nánar um hvernig þessar sviðsmyndir eru settar upp í kafla 6. Árið 2040 reiknast úthlaup þekktra berghlaupa þannig að fimm (19%) gætu náð lóninu sem þá verður orðið, en árið 2070 ellefu (42%). Ef berghlaup fellur úr Svínafellsheiði á næstu árum er hættan sem lífi fólks á svæðum utan jökuls er búin fremur lítil. Hættan eykst jafnt og þétt eftir því sem lónið stækkar. Ef fram heldur sem horfir benda gögnin um úthlaup berghlaupa á jökla víða um heim til þess að líkur á að berghlaup úr Svínafellsheiði nái í lónið verði orðnar umtalsverðar að hálfri öld liðinni.

5 Greining áhættu

Hættumat vegna ofanflóða á Íslandi miðast við *einstaklingsbundna áhættu* (Umhverfissráðuneytið, 2000; Kristján Jónasson o.fl., 1999). Hún er skilgreind sem árlegar líkur á því að einstaklingur sem býr á tilteknum stað farist í ofanflóði. Stjórnvöld hafa ákveðið að áhættan $0.2 \cdot 10^{-4}$ á ári eða minni sé viðunandi. Með því er átt við að áhættan sé svo lítil að ekki sé ástæða til að grípa til neinna aðgerða til þess að auka öryggi. Ekki hafa verið settar sambærilegar viðmiðunarreglur vegna annarrar náttúruvár og því eðlilegt að hafa hliðsjón af aðferðum við ofanflóðahættumat þegar hugað er að hættu af völdum annarra náttúruhamfara.

Þörf fyrir hættumat og framsetning þess ræðst annars vegar af hættunni sem fengist er við og hins vegar af þörf fyrir viðbúnað og aðgerðir sem nauðsynlegar eða æskilegar eru til þess að bregðast við hættunni. Þar sem hætta steðjar að byggð eða svæðum þar sem reistir hafa verið mikilvægir innviðir samgöngu-, raforku- eða fjarskiptakerfa þarf að greina tíðni hættulegra atburða, áhættu, og ýmsa aðra þætti. Í slíkum tilvikum þarf að oft að afmarka hættusvæði af nokkrum mismunandi gerðum og setja reglur um hagnýtingu þeirra eins og gert er í ofanflóðahættumati. Þar sem hagsmunir eru minni er unnt að komast af með einfaldara hættumat. Hættan af völdum berghlaups á Svínafellsjökul kallar á hvort tveggja. Annars vegar er um að ræða hættu sem byggð neðan jökulsins og innviðum stafar af flóði sem berghlaupið gæti valdið úr öðru eða báðum jökullónum. Hins vegar þarf að meta slysaþættu sem ferðamönnum á svæðinu er búin vegna veru sinnar í nágrenni lónanna og ef til vill á jöklinum sjálfum.

Niðurstöður líkanreikninga á berghlaupi úr Svínafellsheiði benda til þess að óveruleg hætta sé á því að sjálft berghlaupið hafi áhrif utan jökuls. Hættan þar er því að mestu bundin við að berghlaup falli í annað eða bæði lónin við sporð jökulsins og valdi flóðum. Við flóðahættumat sem gert var vegna jökulhlaupa í tengslum við eldgos í Örfæfjökli (Pagneux & Roberts, 2015) voru skilgreindir fjórir flokkar *tjónmættis* (þ.e. geta flóða til að valda tjóni), og lýsa þeir áhrifum flóðs á umhverfi og fólk. Þeir eru skilgreindir með hliðsjón af hraða og dýpt flóðvatns, tilvist braks í flóðvatni sem kann að vera lífshættulegt fólk og auka skemmdir á byggingum, auk þess að taka tillit til hita flóðvatns (ef það er ískalt eða sjóðheitt eykst hættan fyrir fólk). Bæði hraði og dýpt vatns hafa áhrif á hættuna fyrir fólk sem lendir í flóði. Ef flóðvatn er nógu djúpt er hætta á því að fólk missi fótanna vegna þess að það flýtur upp, burt séð frá því hvort hraði vatnsins er mikill eða lítill. Hið gagnstæða á svo við, að flóðvatn á miklum hraða getur hrifið fólk með sér þó það sé grunnt. Til þess að taka á þessu tvennu er tjónmætti gjarnan flokkað eftir margfeldi hraða og dýptar flóðvatns, $h \cdot v$ (m^2/s), sjá töflu 2. Flóð úr Svínafellslóni gæti flutt með sér stóra ísjaka og björg auk þess sem vatnshitinn yrði mjög lágur, sem eykur líkur á lífshættulegri ofkælingu ef fólk sem flóðið hrífur með sér drukknar ekki eða lætur lífið af áverkum. Áhrif braks og hita koma inn þannig að svæði færast úr flokknum *hófleg hætta* í *mikil hætta* ef annað hvort á við. Frekari upplýsingar má finna í Pagneux & Roberts (2015).

Eins og fyrr var nefnt hafa ekki verið settar reglur um skilgreiningu hættusvæða hér á landi nema fyrir ofanflóð. Þó hættan sem við er að eiga í byggð vegna hugsanlegs berghlaups

úr Svínafellsheiði sé fyrst og fremst vegna jökulhlaups, sem berghlaupið getur valdið, er hér talið eðlilegt að nota sams konar hættusvæði og skilgreind eru í reglugerð um ofanflóðahættumat frá árinu 2000. Það helgast af því að þær náttúruhamfarir sem hér er um að ræða stafa af berghlaupi og koma skyndilega fram á áhrifasvæðinu, einnig flóðið sem berghlaupið kann að hrinda fram. Áhrif skyndiflóða eða asaflóða (e. *flashflood*) af þessari gerð eru mjög frábrugðin öðrum vatnsflóðum sem oft rísa á allöngum tíma og færa í kaf stór svæði þar sem straumhraði verður ekki mjög mikill nema í grennd við sjálfan farveg viðkomandi vatnsfalls. Slík vatnsflóð eru ekki mikil ógn lífi fólks en geta valdið miklu efnahagslegu tjóni sem þörf er á að taka tillit til við skilgreiningu hættusvæða. Rétt er að taka fram að þó hér séu af þessum sökum notuð hættusvæði eins og í ofanflóðahættumati við mat á hættu vegna jökulhlaups úr Svínafellslóni þá hefur það ekki fordæmisgildi fyrir hættumat vegna annarra vatnsflóða og þarf að huga að hentugri skilgreiningu hættusvæða í hverju tilviki fyrir sig eins og hér er gert.

Tafla 2. Flokkar tjónmættis við flóðahættumat vegna jökulhlaupa í tengslum við eldgos í Öræfajökli (sjá Pagneux & Roberts, 2015).

Hætta	hv [m ² /s]	Litur	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 innan- og utandyra.
Mikil	1.3–7		Eyðilegging léttbyggðra bygginga.	Allir sem verða fyrir flóðinu eru í lífshættu, bæði innan- og utandyra.
Geysimikil	≥ 7		Alger eyðilegging allra húsa nema þeirra sem eru sérstaklega styrkt. Steinsteipt, járnbent hús er ónýtt eftir.	Allir sem verða fyrir flóðinu eru í lífshættu bæði innan- og utandyra.

Til þess að yfirfæra hættuflokkana í töflu 2 á viðmiðin sem gefin eru í reglugerð um ofanflóðahættumat verður að gera sér hugmynd um dánarlíkur einstaklinga verði þeir fyrir flóði sem fellur í tiltekinn flokk. Dánarlíkur hafa verið metnar fyrir snjóflóð og skriðuföll og má hafa hliðsjón af því hér.

- Dánarlíkur fólks sem dvelst í húsi sem verður fyrir snjóflóði hafa verið reiknaðar út frá dánartölum í snjóflóðunum í Súðavík og á Flateyri árið 1995. Þær eru háðar því á hvaða hraða flóðið er þegar það lendir á viðkomandi húsi, en liggja gjarnan á bilinu 10–30%.

- Dánarlíkur fólks í skriðum, sem ná langt niður á jafnsléttu en eru fremur þunnar og ekki grjótríkar, má á grundvelli ýmissa vísbendinga ætla að séu einu til tveimur stærðarþrepum lægri en í snjóflóðum, eða e.t.v. um 1%.
- Dánarlíkur fólks í þykkum, stórgrýttum skriðum kunna að vera um 10%.
- Dánarlíkur fólks í húsi sem verður fyrir berghlaupi eru metnar á bilinu 50–100%.

Stór, hraðfara jökulhlaup eru að því leyti svipuð berghlaupum að þau eira engu sem fyrir þeim verður. Fyrir flokkinn *geysimikil hætta* er því lagt til að dánarlíkur séu metnar yfir 50%. Fyrir flokkinn *mikil hætta* gætu dánarlíkur verið sambærilegar við stór snjóflóð, eða á bilinu 10–30%.

Flokkurinn *hófleg hætta* gæti svarað til hættuminni skriðufalla en slagað upp í hættuna sem fólki er búin vegna grjótríkra skriðna, og dánarlíkur verið á bilinu 1–10%. Flokkurinn *lítil hætta* er metinn sambærilegur við minniháttar aurskriður þar sem líkur á dauða eru undir 1%.

Til þess að reikna einstaklingsáhættu þarf auk dánarlíka að gera sér hugmynd um árlegar líkur á því að hættan komi upp. Í tilfelli flóða úr lónunum neðan Svínafellsjökuls er matið tvíþætt: *hverjar eru árlegar líkur á því að berghlaupið falli?* og *ef berghlaup fer af stað, hverjar eru líkurnar á því að það nái í lónin?* Matið er mikilli óvissu undirorpið. Við höfum dæmi um Steinsholtshlaupið þar sem innan við áratugur leið frá því að bændur í fjárleitum tóku eftir sprungu á Innstahaus þar til að berghlaupið féll. Á hinn bóginn uppgötvaðist nýlega að mikill efnismassi í hlíðinni ofan Tungnakvísjarjökuls hefur verið á hægfara hreyfingu í a.m.k. 70 ár ef marka má loftmyndir (Þorsteinn Sæmundsson o.fl., 2020). Árlegar líkur á stóru berghlaupi á Svínafellsjökul eru hér metnar á bilinu 0.1 til 0.01. Ekki er talin ástæða til að gera ráð fyrir að berghlaupið falli innan fárra ára því hreyfingin hefur mælst mjög lítil frá því að nákvæmum mælitækjum var komið fyrir í sprungum á Svínafellsheiði árið 2018. Rétt er að nefna að hugsanlegt er að berghlaup úr Svínafellsheiði falli aðeins úr hluta svæðisins sem þar er á hreyfingu og jafnvel að allt svæðið falli niður á jökulinn í mörgum aðskildum hlaupum sem hvert um sig yrði þá miklu minna en ef allt svæðið hrynur fram í einu. Árlegu líkurnar sem hér er miðað við eiga við svo stórt hlaup að það sé sambærilegt við berghlaupin á jökla í alþjóðlega gagnasafninu sem hér hefur verið rætt. Litið er framhjá endurteknum, minni hlaupum enda hætta af þeirra völdum óveruleg neðan jökulsins miðað við hættu sem stafar af stóru hlaupi.

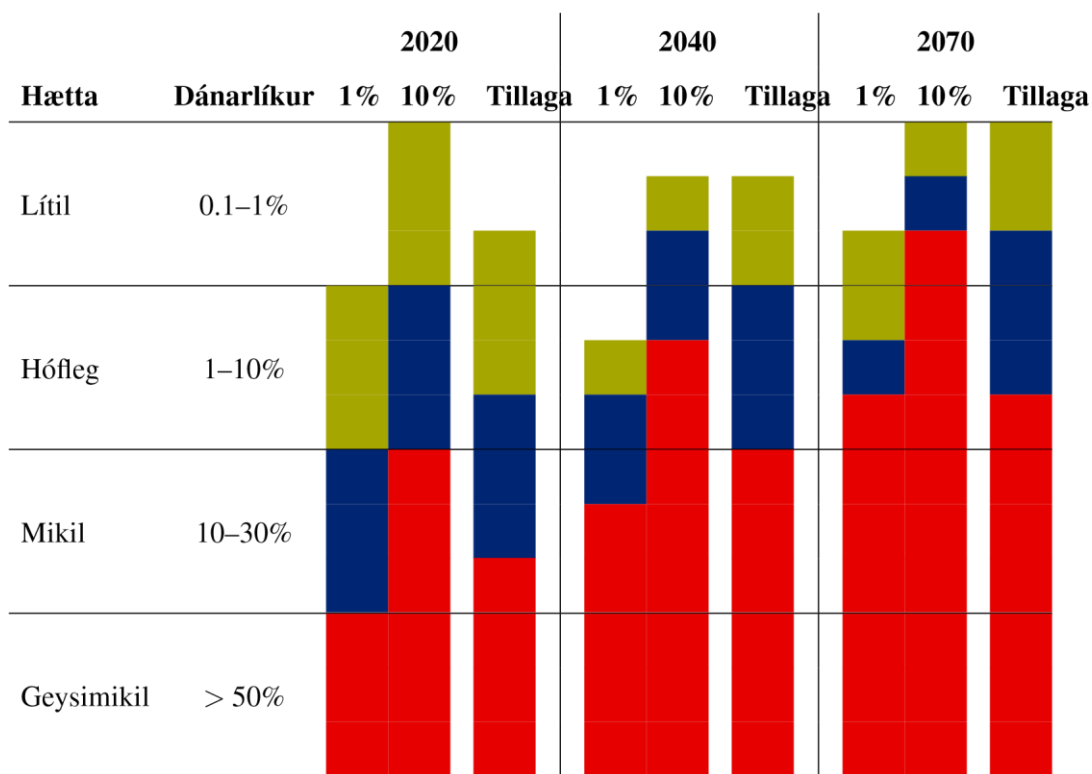
Til þess að meta líkurnar á því að berghlaupið nái í lónin má miða við alþjóðlega gagnasafnið um berghlaup á jökla sem lýst var hér að framan. Þegar búið er að yfirfæra úthlaup þeirra á aðstæður á Svínafellsjökli má sjá að 11% þeirra hafa úthlaup sem svarar til þess að þau næðu í vestara lónið, en einungis eitt þeirra nær niður í eystra lónið en það er svo sérstakt að teljast verður mjög ólíklegt að slíkt gæti gerst á Svínafellsjökli. Yfirgnæfandi líkur eru á að berghlaup sem fellur úr Svínafellsheiði stöðvist ofan eystra lónsins og því verður áhættan eingöngu metin fyrir vestara lónið og lónið í heild þegar þau hafa sameinast. Til þess að reikna árlegar dánarlíkur tókum við nú dæmi, annars vegar miðað við 1% árlegar líkur á stóru berghlaupi og hins vegar 10% líkur. Þannig reiknast

áhætta á svæði þar sem talðar eru 1% dánarlíkur af völdum jökulhlaups sem þar flæðir um, miðað við 1% líkur á berghlaupi og 10% líkur á að hlaupið nái í vestara lónið

$$0.01 \times 0.01 \times 0.10 = 0.1 \cdot 10^{-4} \text{ á ári}$$

sem er aðeins undir þeim mörkum sem talin eru ásættanleg í reglugerð um ofanflóðahættumat. Ef miðað er við 10% árlegar líkur á stóru berghlaupi reiknast áhættan $1 \cdot 10^{-4}$ á ári sem er yfir mörkum um ásættanlega áhættu. Fyrir svæði með hærri dánarlíkum er áhættan reiknuð á sambærilegan hátt.

Tafla 3. Dreifing hættusvæða sem skilgreind eru í reglugerð um ofanflóðahættumat á tjónmættisflokka flóðahættumats. Tvö gildi á árlegum líkum á berghlaupi eru reiknuð, 1% og 10%. Mismunur milli ára skýrist af því að líkur á að berghlaup nái í lónið aukast með tímanum.



Þegar tekið er tillit til viðveru fólks í húsum á hættusvæðum eru í ofanflóðahættumati skilgreind þrjú svæði með hækkandi áhættu. A-svæði þar sem áhættan er á bilinu $0.3 - 1 \cdot 10^{-4}$ á ári, B-svæði þar sem áhættan er á bilinu $1 - 3 \cdot 10^{-4}$ á ári og C-svæði þar sem áhættan er yfir $3 \cdot 10^{-4}$ á ári. Línurnar sem afmarka hættusvæðin eru auðkenndar með gulum (A), bláum (B) og rauðum (C) lit. Tafla 3 sýnir hvernig hættusvæði ofanflóðahættumats dreifast á tjónmættisflokka skv. töflu 2 eins og þeir eru metnir með líkanreikningum á berghlaupi að gefnum tilteknum forsendum um stöðu jökulsins og stærð lónsins. Niðurstöður fyrir 1% og 10% árlegar líkur á berghlaupi eru sýndar og þær bræddar saman í tillögu að hættuflokkun. Þannig fæst að fyrir flóð úr vestara lóninu við núverandi aðstæður lendir stærsti hluti svæða sem reiknast með *lítilli hættu* utan hættusvæða en efsti hlutinn til A-svæðis, *hófleg hætta* svarar til A- og B-svæðis, *mikil*

hætta til B- og C-svæðis en flokkurinn *geysimikil hætta* svarar til C-svæðis. Sambærilegir reikningar eru gerðir fyrir framtíðarsviðsmyndirnar tvær. Fyrir árið 2040 er gert ráð fyrir 20% líkum á að berghlaup nái í lón en fyrir árið 2070 er gert ráð fyrir 40% líkum.

Áhættumatið sem hér er sett fram vegna berghlaups úr Svínafellsheiði er að því leyti frábrugðið hefðbundnu ofanflóðahættumati að um er að ræða ákveðinn atburð sem á sér stað aðeins einu sinni en ekki aðstæður sem geta komið upp á hverjum vetri eða hverju ári með ákveðnum líkum. Eftir að berghlaupið hefur fallið eru aðstæður breyttar og hættan er liðin hjá. Einnig flækir málið að hörfun jökulsins og stækkun lónsins breyta aðstæðum þegar fram í sækir þannig að ef berghlaupið verður ekki fyrr en eftir marga áratugi eru meiri líkur á alvarlegum afleiðingum en ef það á sér stað á næstu árum. Við þessu er brugðist með því að greina núverandi hættu og setja fram hættumat sem ætlað er til þess að stýra starfsemi sem þegar er á svæðinu við Svínafellsjökul og nýtist fyrir byggðina sem þar er risin. Einnig er sett fram hættumat sem miðast við stöðuna eftir nokkra áratugi sem hugsað er til þess að stýra skipulagsákvörðunum á svæðinu til lengri framtíðar, eins og nánar er rætt í kafla 7. Þegar fram í sækir er unnt að breyta skipulagi svæðisins ef berghlaup á sér stað úr heiðinni og talið er að hætta af þess völdum sé liðin hjá.

6 Líkanreikningar

6.1 Líkanið *r.avaflow*

Flest líkön sem notuð eru til að herma flæði snjóflóða og skriðna eru einfasa og byggja á dýpiseilduðum hreyfijöfnum. Þau geta fæst hermt víxlverkun skriðna við vatnsmassa, en það er forsenda þess að geta sett fram hættumat vegna berghlaups úr Svínafellsheiði. GeoClaw (Berger o.fl., 2011), sem hannað er til að lýsa flóðbylgjum í vötnum og sjó, hefur verið notað til að herma flóðbylgju vegna berghlaups sem féll í Öskjuvatn árið 2014, en þar er skriðunni lýst með mikilli einföldun (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017). Slík aðferðafræði er ófullnægjandi í þessu tilfelli.

Líkanið *r.avaflow* (Mergili o.fl., 2017) reiknar hreyfingu skriðuefnis frá upptakasvæðum og yfir landslag farvegjar þar til skriðan stöðvast. Jöfnurnar sem líkanið leysir eru dýpiseildaðar og lýsa tveggja-fasa flæði. Þær voru leiddar út af Shiva Pudasaini (2012). Jöfnurnar lýsa varðveislu massa og skriðþunga og eru sex talsins, þrjár fyrir hvorn fasa (fast efni og vatn). Þannig getur líkanið reiknað hreyfingu skriðna sem eru vatnsblandaðar auk þess að geta hermt víxlverkun skriðna við vatnsmassa. Frekari upplýsingar um líkanið er að finna í Mergili o.fl. (2017) og Pudasaini (2012).

Líkanið er keyrt í GRASS umhverfi og inntaksgögnin eru landupplýsingar. Hlaða þarf inn landlíkani þar sem upptakasvæði berghlaupsefnis hefur verið fjarlæggt og útbúa rasta sem lýsir þessari efnisdreifingu í upptakasvæði. Ef stöðuvötn eða lón eru á svæðinu þarf að útbúa annan rasta sem lýsir vatnsdýpi á því svæði sem vatnið þekur. Þá eru gildi viðnámsstíka tilgreind, þ.e. botnviðnámshorn og innra viðnámshorn, en þau geta hvort sem er verið föst gildi fyrir allt reikninetið eða haft svæðisdreifingu sem lýst er með rasta. Þetta má nota til þess að stilla líkanið þannig að viðnám á jökli sé minna en á jökullausu landi. Þar sem að lítill reynsla er af notkun líkansins í hættumati og vali á viðnámsstikum hefur verið lögð töluverð vinna í að beita því á þekkt dæmi, og keyra önnur líkön til samanburðar, þ.m.t. GeoClaw, HEC-RAS og OpenFOAM. Um þetta verður fjallað síðar í kaflanum.

6.2 Líkanreikningar á þekktum berghlaupum á Íslandi

Vegna þess hversu illa ákvarðaðir líkanstuðlar eru getur verið gagnlegt að beita líkönum á þekkt dæmi áður en þau eru notuð við hættumat. Steinsholtshlaup árið 1967 og berghlaupið á Morsárjökul árið 2007 eru einu hérlandu dæmin um stór berghlaup á jökla þar sem til er nægilega mikið af gögnum til þess að kvarða berghlaupslíkan. Þessi hlaup eru nokkuð ólík, hluti upptakasvæðis Steinsholtshlaupsins var á jökli svo berghlaupið var mjög blandað jökulís en bergflóðið á Morsárjökul átti sér upptök alfarið utan og ofan jökuls og flóðið virðist hafa runnið yfir jökulinn án þess að rífa með sér nokkurn ís enda var urðin sem eftir sat íslaus með öllu (Þorsteinn Sæmundsson o.fl., 2011).

6.2.1 Bergflóðið á Morsárjökul 2007

Þann 20. mars 2007 féll 3.5–4.5 milljón rúmmetra bergflóð á Morsárjökul (Þorsteinn Sæmundsson o.fl., 2011). Bergflóðið féll inn á jökulinn frá hlið en sveigði niður undan halla um 90° og stöðvaðist tungan þegar hún náði niður á miðjan jökul eftir að hafa ferðast um 2.2 km frá upptökum.

Bergflóðið tók ekki upp jökulís að neinu ráði og urðin sem eftir sat var íslaus á yfirborði.

Fyrir líkankeyrslurnar voru fengin landlíkön frá Doris Hermle (2015) unnin upp úr loftmyndum frá árunum 2003 og 2007 (Loftmyndir ehf.) auk lidar gagna frá árinu 2011. Samanburður á líkönunum frá 2003 og 2007 gaf upplýsingar um þynningu Morsárjökuls á tímabilinu sem nýttust til að lækka hæð jökulsins í líkaninu frá 2003. Jökullinn var lækkaður um 20 m og honum síðan skeytt inn í lidar landlíkanið. Ógjörningur reyndist að skilgreina upptakasvæðið nákvæmlega þar sem skuggi var á loftmyndunum. Það var því teiknað gróflega upp eftir korti á mynd 1 í grein Þorsteins Sæmundssonar o.fl. (2011) en haft nokkuð stærra en þar er sýnt til þess að einfalda líkanreikningana. Í upphafi var skriðuefni komið fyrir á upptakasvæðinu með því dreifa 4 milljónum rúmmetra jafnt yfir flatarmálið. Þetta er nokkuð gróf nálgun en ásættanleg í þessu tilfelli þar sem herma átti hlaupið gróflega til þess að fá mat á líklegt gildi á botnviðnámsstuðli. Frekari vinna við hermun bergflóðsins bíður seinni tíma.

Verulegum vandkvæðum reyndist bundið að herma bergflóðið. Hraðinn reiknast svo mikill þegar skriðan kemur niður að jöklinum að líkanið sendir hana langa leið inn á jökulinn áður en hún sveigir undan halla. Annars vegar þurfti að auka hraðaháð viðnám til þess að draga úr hraða nærri upptökum og hins vegar að skilgreina svæði á jöklinum sjálfum þar sem viðnámsstuðlar höfðu misjöfn gildi. Eins og gjarnan í líkanreikningum sem þessum er hægt að ná góðu samræmi við úthlaupsvegalengd á fleiri en einn hátt. Niðurstöður tveggja líkankeyrslna með mismunandi botnviðnámi eru sýndar á mynd 19. Í fyrra tilfellinu er botnviðnámshorn í upptakasvæði 30° , á jökli 8.25° en á urðarrananum á miðjum jökli var það 30° ofarlega og 20° neðar. Viðnámið á urðarrananum þarf að vera hátt til að bremsa hlaupið af og sveigja það niður undan halla jökulsins. Í seinna tilfellinu er skilgreint stærra viðnámssvæði ofarlega á jöklinum þar sem skriðan kemur inn á hann. Þetta er gert til þess að draga úr hraðanum og hindra að skriðan hlaupi yfir miðjan jökulinn áður en hún sveigir niður á við. Á því svæði er viðnámshornið 13° . Urðarraninn neðan við hefur 8° viðnámshorn en annars staðar á jökli er það 7.5° .

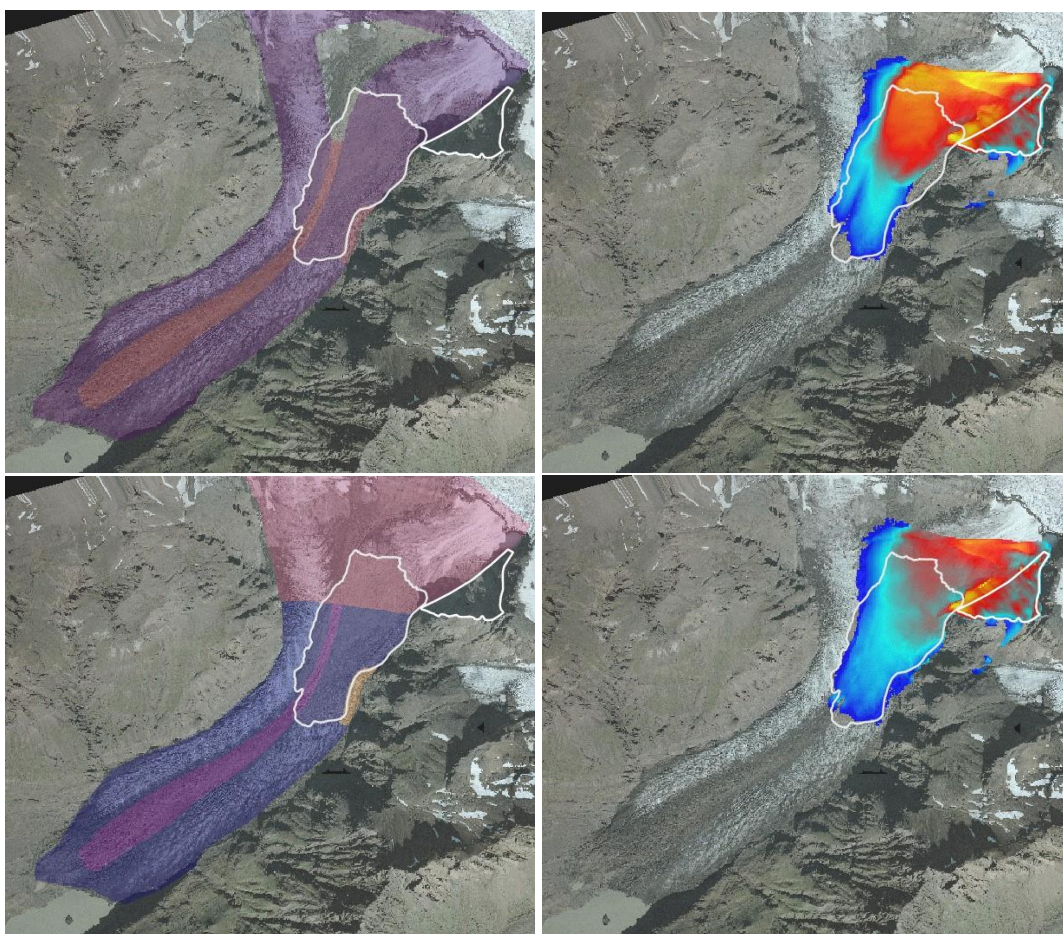
Frekari gögn og skoðun þarf til þess að átta sig betur á því hvernig best er að herma bergflóðið á Morsárjökul, en það verður ekki gert hér. Megintilgangurinn var endá að skoða hvaða gildi á botnviðnámi í r.avaflow leiða til raunhæfrar hermunar. Í þessu tilfelli þarf botnviðnámið á jökli að vera á bilinu $7.5\text{--}8.5^\circ$ en hærra á urðarrananum.

6.2.2 Steinsholtshlaupið 1967

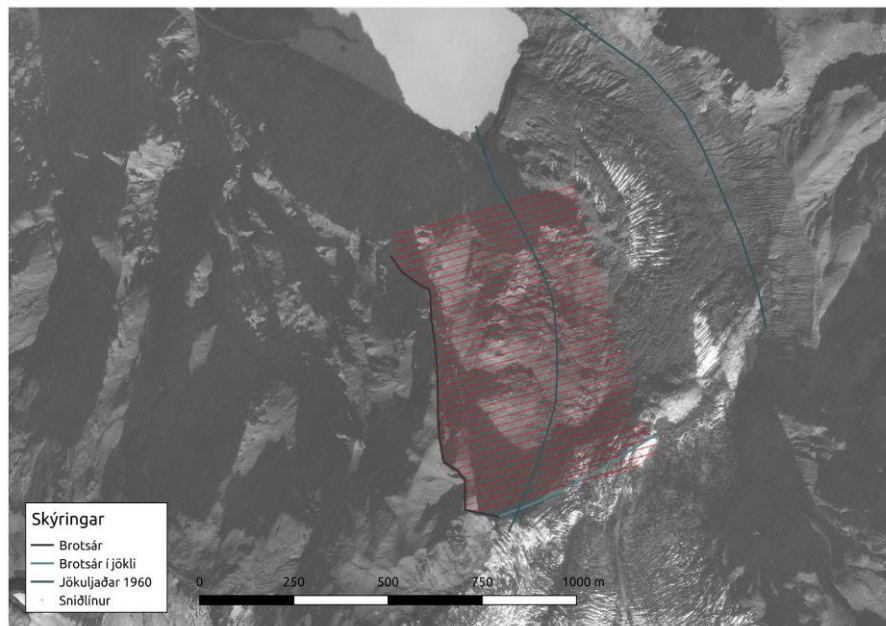
Þann 15. janúar 1967 féll stórt berghlaup úr Innstahaus ofan Steinsholtsjökuls, skriðjökuls sem gengur til norðurs úr Eyjafjallajökli. Brotflöturinn náði undir jökulinn og

var berghlaupið því mjög blandað ís. Það ruddist yfir jökulinn, sveigði niður með honum og gekk ofan í jökullónið við sporðinn með þeim afleiðingum að lónið tæmdist. Mikil flóðbylgja ferðaðist niður Steinholtssdalinn og í Markarfljót, sem bar hana til sjávar. Guðmundur Kjartansson jarðfræðingur rannsakaði afleiðingar hlaupsins og um rannsóknir hans og túlkun ummerkja má lesa í grein í Náttúrufræðingnum (Guðmundur Kjartansson, 1968). Kortlagningu landforma í Steinholtssdal eftir berghlaupið má finna í B.S. ritgerð Guðbjarnar Margeirssonar (2014).

Aðstæðum við Innstahaus svipar um margt til Svínafellsheiðar. Þar féll berghlaup úr brattri hlíð ofan jökuls. Hlíðin hafði áður stuðning af Steinholtssjökli, sem um aldamótin 1900 fyllti dalinn en hafði árið 1967 þynnst mikið og hopað. Bændur við fjárleitir urðu varir við sprungu sjö eða átta árum áður, sem stækkaði ár frá ári. Lítil breyting varð þó milli 1965 og 1966, en þá um haustið var hún orðin svo víð að óárennilegt var að stökkva yfir. Sprungan sést greinilega á flugmynd Landmælinga frá 1960 og er þar um 100m löng (Guðmundur Kjartansson, 1968). Vegna þess hversu mikil líkindi eru með aðstæðum við Svínafellsjökul var töluverð vinna lögð í líkanreikninga af Steinholtshlaupi til þess að fá hugmynd um líkleg gildi á líkanstuðlum og meta hvort líkanið gæfi raunhæfa mynd af hlaupinu.



Mynd 19. Tvær hermanir á berghlaupi á Morsárjökul í mars 2007 fyrir mismunandi viðnámsstuðla. Vinstra megin er sýnd skilgreining viðnámssvæða en hægra megin er reiknaður hámarkshraði. Grunnmynd er loftmynd Loftmynda ehf frá árinu 2007.

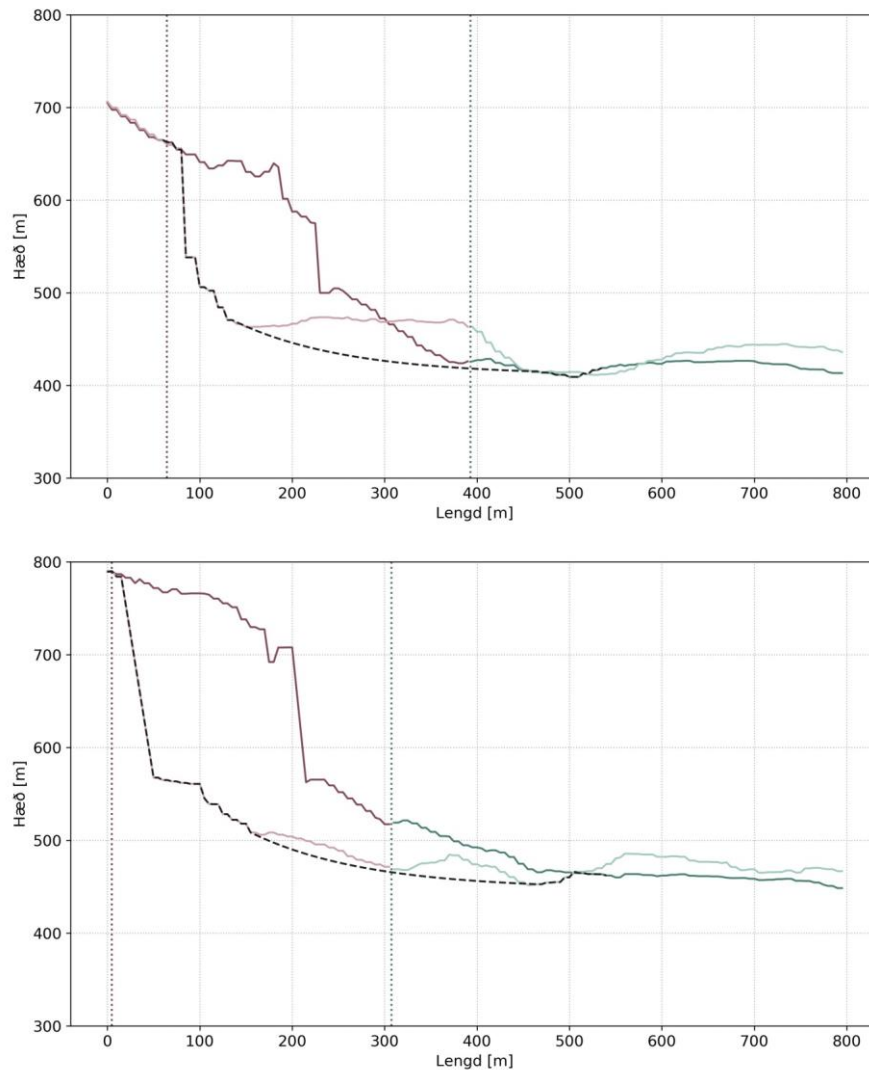


Mynd 20. Sniðlínur í gegnum upptakasvæði berghlaupsins úr Innstahaus. Grunnmynd er loftmynd LMÍ frá því í september 1967.

Landlíkön frá því fyrir og eftir berghlaupið voru fengin frá Joaquín M. C. Belart hjá Landmælingum Íslands. Þau eru gerð út frá loftmyndum sem teknar voru 13. ágúst 1960 og 27. september 1967. Lóðrétt nákvæmni þeirra er metin 1–2 m fyrir það fyrra en um 1m fyrir það seinna. Fjallað er um aðferðafræðina við gerð landlíkananna í Belart o.fl. (2019). Með því að bera saman landlíkönin frá því fyrir og eftir hrún var reynt að draga upp brotflötinn sem hlaupið rann á. Tekin voru 38 snið í gegnum upptakasvæðið (sjá mynd 20) og landhæð líkananna borin saman. Þar sem brotflöturinn er „óhreyfður“ (þ.e. urð hefur ekki lagst yfir) er hann vel þekktur en annars staðar er líkleg lega hans metin. Tvö dæmi um snið og túlkaðan brotflöt eru sýnd á mynd 21.

Brotflöturinn var loks brúaður yfir á möskva og með samanburði við landlíkanið frá 1960 mátti þannig skilgreina hlaupmassann bæði á landi og á jökli og reikna heildarrúmmál, sjá mynd 22. Heildarrúmmál bergs á upptakasvæði reynist vera 20–21 milljón rúmmetrar, sem er heldur meira en Guðmundur Kjartansson áætlaði á sínum tíma (15 milljónir rúmmetra). Heildarrúmmál jökulíss reiknast 2.2 milljónir rúmmetra en Guðmundur áætlaði 1–2 milljónir rúmmetra. Þegar tekið er tillit til óvissu verður að segjast að tölurnar stemmi nokkuð vel.

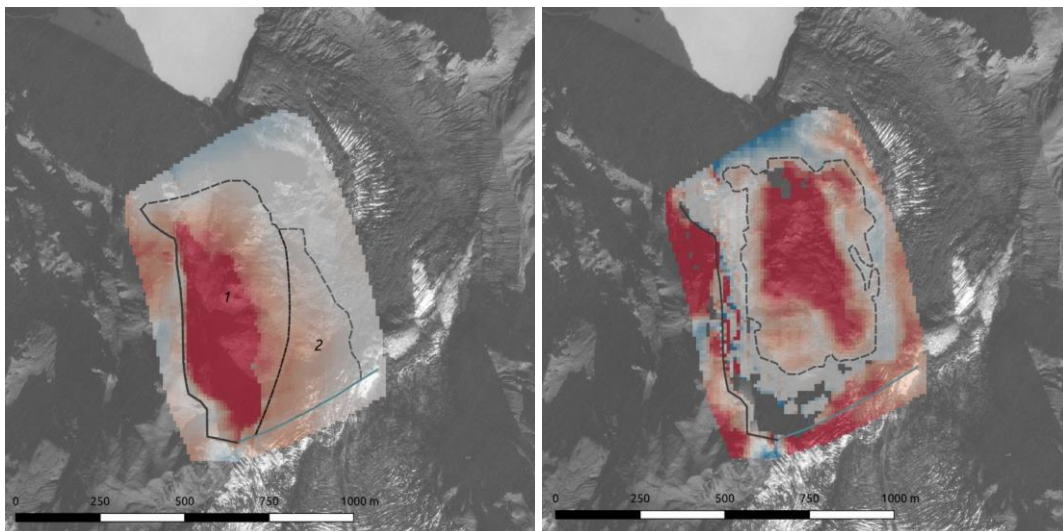
Rúmmál bergsins sem staðnæmdist undir brotsárinu er hægt að meta með því að draga hæð brotflatar frá hæð skv. landlíkaninu frá 1967, sjá mynd 22. Það reynist töluvert minna en Guðmundur áætlaði, eða tæpar 5 milljónir rúmmetra. Guðmundur taldi að meirihluti bergs sem losnaði hefði stöðvast en einungis nokkrar milljónir rúmmetra haldið áfram yfir jökulinn. Ef rúmmálsmatið sem hér hefur verið gert er rétt þá var bergmassinn í hlaupinu sem ferðaðist yfir jökulinn og ruddi fram Steinsholtslóni um 15 milljónir rúmmetra.



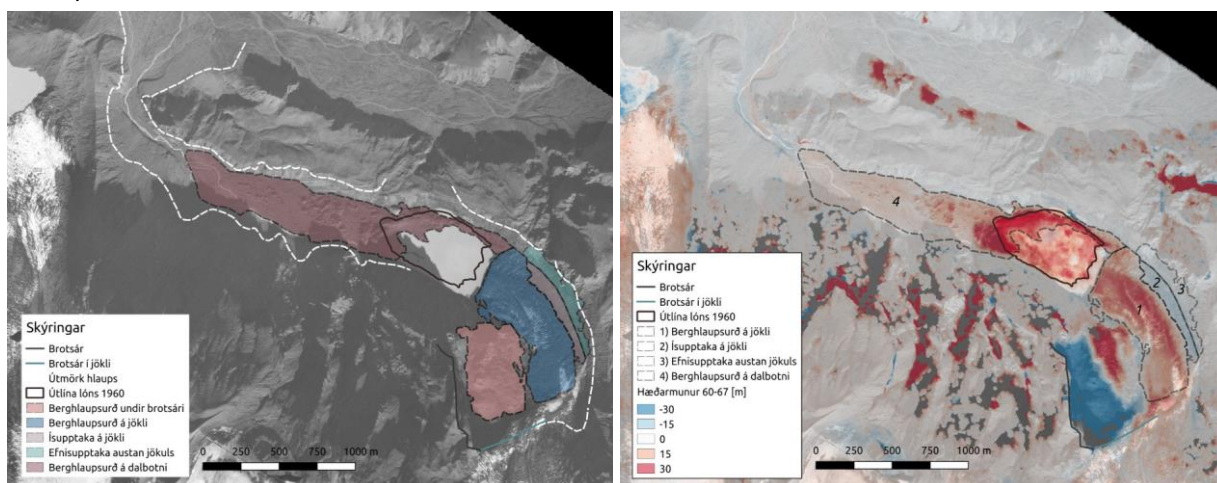
Mynd 21. Landhæð á tveimur sniðum í gegnum upptakasvæði berghlaupsins úr Innstahaus. Efri: snið í gegnum meginmassann sem stöðvaðist undir brotsárinu. Neðri: snið ofarlega á jöklinum þar sem brotflöturinn liggur undir yfirborði jökulsins. Litir lína skiptast við jaðar jökulsins eins og hann var árið 1960, bleikir ferlar eru utan jökuls en grænir á jökli. Dekkri litir sýna yfirborð fyrir berghlaup en ljósari eftir. Slitin svört lína sýnir túlkaðan brotflöt.

Rúmmál skriðuefnis eftir að hlaupið stöðvaðist og rúmmál efnis sem hlaupið reif með sér má reikna með samanburði landlíkananna tveggja frá því fyrir og eftir hlaup og með því að styðjast við mat Guðmundar Kjartanssonar. Mynd 23 sýnir svæðin sem skilgreind voru í samanburðinum og hæðarmismuninn. Urðin sem liggur eftir í Steinsholtsdal reynist tæpar 6 milljónir rúmmetra. Rúmmálsbreyting á jökli reiknast jákvæð um 4.7 milljónir rúmmetra en sú tala hefur raunar litla þýðingu vegna breytinga sem urðu á jöklinum á milli 1960 og 1967. Í grein Guðmundar kemur fram að sporður Steinsholtsjökuls hafi verið 20 m þykkari árið 1967 og það styður samanburður á landlíkönum þar sem töluverður hæðarmunur sést á svæðum þar sem ber jökulís stendur upp úr, jafnvel allt að 10 m. Til að meta rúmmál efnis sem sat eftir á jökli er því betra að styðjast við grein Guðmundar,

en hann taldi að skriðukápan á jöklinum hafi verið 2–5 m þykk. Með hliðsjón af flatarmáli jökulsins má þannig meta rúmmálið um eina milljón rúmmetra (0.6–1.6 milljón rúmmetra). Samanburður hæðarlíkananna bendir loks til þess að hlaupið hafi rifið með sér efni í austurjaðri jökulsins, sem gæti numið um 0.3 milljón rúmmetrum af ís og 0.2 rúmmetrum af lausu efni úr hlíðinni ofan við. Þessar rúmmálstölur eru dregnar saman í töflu 4.



Mynd 22. Vinstra megin er upptakasvæði hlaupsins, annars vegar á landi (1) og hins vegar á jökli (2). Hægra megin er bergmassinn sem staðnæmdist undir brotsárinu. Hæð yfir brotfleti er auðkennd með litum. Grunnmynd er loftmynd LMÍ frá því í september 1967.



Mynd 23. Vinstra megin: Svæði sem notuð eru í mati á rúmmáli hlaupurðar. Útmörk berg/íshlaups og vatnsflóðs skv. lýsingu Guðmundar Kjartanssonar (1968) og loftmyndum eru sýnd með hvíttri brotalínu. Útlína lóns eins og það var árið 1960 er sýnd með þykkri svartri línu. Brotsár á Innstahaus og í jökli eru einnig sýnd. Hægra megin: Hæðarmunur á landi milli 1967 og 1960 byggt á landlíkönum. Á rananum sem liggur yfir farveginn þar sem Steinsholtslón var áður (sjá útlínu með þykkri svartri línu) er hæðarmunurinn miðaður við vatnsborð lónsins. Grunnmynd er loftmynd LMÍ frá því í september 1967.

Tafla 4. Niðurstöður rúmmáls mats á Steinsholtshlaupi.

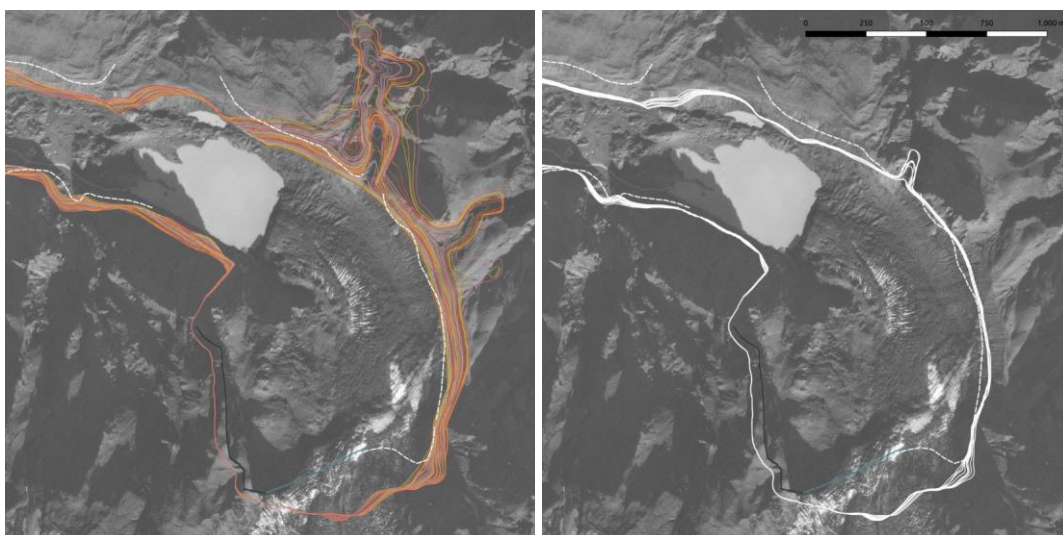
Svæði	Rúmmál (Mm ³)
Berg í upptakasvæði	20–21
Jökulís í upptakasvæði	2.2
Berghlaupsmassi undir brotsári	4.7
Rúmmálsbreyting á jökli (ekki marktæk v/breytinga)	+4.7
Rúmmálsmat GK á skriðukápu á jökli	0.6–1.6
Rúmmálsbreyting í austurjaðri jökuls	–0.3
Rúmmálsbreyting austan jökuls	–0.2
Rúmmálsbreyting á dalbotni	+5.7
Berg í upptakasvæði	20–21

Í rúmmálstölunum er ótalið það efni sem liggur á lónbotni. Dýpt lónsins fyrir hlaupið (og raunar eftir) er óþekkt en með því að gefa sér 10 m meðaldýpi reiknaðist Guðmundi til að vatnsmagnið gæti hafa numið 2 milljónum rúmmetra. Þetta rímaði vel við mat Sigurjóns Rist á heildarmagni flóðvatns sem rann niður Markarfljót (1.5–2.5 milljónir rúmmetra) út frá líklegum rennslisferli reiknuðum með hliðsjón af flóðfari við Markarfljótsbrú. Erfitt er að áætla rúmmál efnis sem lá eftir á botni lónsins með nokkurri nákvæmni. Ekki er ósennilegt að það gæti verið á bilinu 1–2 milljónir rúmmetra, þ.e. að það hafi fyllt að miklu leyti upp í gamla lónsstæðið. Vitað er að lónið tæmdist, en hafði fyllst af vatni þegar 2 sólarhringum síðar og var vatnsborðið þá 7 m hærra.

Þegar tölurnar eru teknar saman er summa þess efnis sem liggur eftir þegar hlaupið stöðvast og ís hefur að mestu bráðnað á bilinu 12–14 milljónir rúmmetra, sem er töluvert minna en áætlað rúmmál bergs sem losnaði frá Innstahaus (20–21 milljónir rúmmetra) en svipar til mats Guðmundar á heildarmagni bergs sem losnaði. Rúmmálsmatið bendir til þess að berghlaupið sem ferðaðist niður jökulinn hafi verið stærra en áður var talið.

Í líkanreikningum á Steinsholtshlaupi með r.avaflow var nýttur sá möguleiki að skilgreina þrjá flokka efnis. Þannig voru tvö upptakasvæði skilgreind (auk „upptakasvæðis“ vatns, sem er lónið), annars vegar upptakasvæði bergs með eðlismassann 2700 kg/m³ og hins vegar upptakasvæði íss með eðlismassann 1000 kg/m³ (af tæknilegum ástæðum er ekki hægt að hafa eðlismassann 900 kg/m³, sem er nær raunverulegu gildi). Upptakasvæðin eru sýnd á mynd 22. Botn Steinholtslóns í landlíkaninu var útbúinn með því að teikna ágiskaðar dýptarlínur og brúa þær yfir á reikninetið. Nokkrar útgáfur voru gerðar þar sem dýpi var stillt af til að ná mismunandi heildarrúmmáli vatns á bilinu 1.5–5 milljónir rúmmetra. Í umfjölluninni hér verður þætti vatnsflóðsins ekki gerð ítarleg skil heldur megináhersla lögð á að skilgreina viðnámsgildi sem gefa besta niðurstöðu fyrir útmörk berg/íshlaupsins. Í grófum dráttum nær líkanið flóðbylgjunni úr Steinholtslóni ágætlega en frekari rannsóknir þarf til að ljúka þeim þætti svo vel sé.

Viðnámsstuðlar líkansins eru þrír, innra viðnám bergs, innra viðnám íss og botnviðnám, sem gert er ráð fyrir að sé hið sama fyrir berg og ís. Innra viðnámshorn íss hefur fast gildi $\phi_s = 35^\circ$ en innra viðnámshorn bergs er sett $\phi_s = 75^\circ$ á upptakasvæði en 35° utan þess. Þetta á að líkja eftir því að berghlaupið ferðist meira eða minna í heilu lagi til að byrja með en taki svo að brotna upp. Þetta reynist ekki hafa umtalsverð áhrif á niðurstöður borið saman við reikninga með 35° föstu innra viðnámshorni. Botnviðnámið hefur tvö gildi, eitt á jökli og annað á jökullausu landi. Líkanið var keyrt fyrir margar mismunandi samsetningar botnviðnámsgilda og niðurstöðurnar bornar saman við útmörkin sem lýst er í grein Guðmundar Kjartanssonar. Botnviðnámshorn á jökli var valið á bilinu $4-10^\circ$ en á landi frá $11-20^\circ$. Vegna óvissunnar um rúmmál berghlaupsins voru líkanreikningarnir gerðir fyrir tvö tilfelli, annars vegar var öllu upptakaberginu hleypt af stað og hins vegar einungis helmingi þess. Þegar öllu efninu er hleypt af stað reynist mjög örðugt að stilla viðnámsstuðla til að ná úthlaupi berghlaupsins austan jökuls. Hér eru því einungis sýndar niðurstöður hermana fyrir hitt tilfellið. Þá hlaupa um 7.4 milljónir rúmmetra bergs og 2.2 milljónir rúmmetra jökulíss yfir jökul en 2.8 milljónir rúmmetra bergs sitja eftir undir brotsárinu.



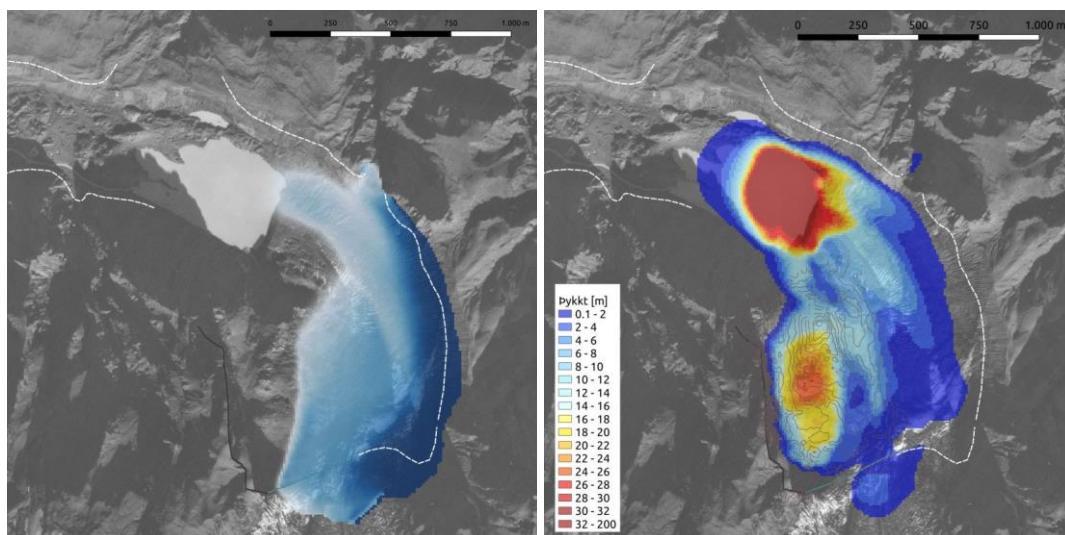
Mynd 24. Niðurstöður hermana á Steinsholtshlaupi fyrir botnviðnámshorn á jökullausu landi á bilinu $11-20^\circ$ en á bilinu $4-10^\circ$ á jökli. Heildarrúmmál bergs sem losnar er 10.2 milljón rúmmetra og hrífur hlaupið með sér 2.2 milljónir rúmmetra af jökulís. Í hermunum sitja 2.8 milljónir rúmmetra bergs eftir undir brotsárinu en 7.4 milljónir rúmmetra ferðast yfir jökulinn. Litaðar línur á vinstri mynd sýna útmörk í líkanreikningum en hvít brotalína sýnir mæld útmörk byggð á lýsingu Guðmundar Kjartanssonar (1968) og athugun á loftmyndum. Svört og grænblá lína sýna brotsár á landi og í jökli. Myndin hægra megin sýnir þær niðurstöður sem best falla að mælingum. Grunnmynd er loftmynd LMÍ frá því í september 1967.

Mynd 24 sýnir reiknuð og mæld útmörk berghlaupsins. Í grein Guðmundar er því lýst að í skarðinu við Rjúpnafell, sem leiðir ofan í nafnlaust þvergil Stakkholtsgjár, hafi legið mikil jakahrönn og að úr henni hafi bersýnilega hrunið jakaurð niður bratta brekku í átt til

Stakkholtsgjár. Ólíklegt er að ísinn hafi gert annað en að staðnæmast þegar í þvergilið var komið og má nota þær upplýsingar til að afmarka betur stuðla líkansins. Þeim líkanniðurstöðum sem sýna mikið flæði niður í Stakkholtsgjá er hafnað og sömuleiðis þeim sem ekki sýna nokkuð yfirkast yfir skarðið við Rjúpnafell. Úthlaup berghlaupsins austan jökuls og yfirkastið í gilið við Rjúpnafell kemur best út ef viðnámshorn á jökli er á bilinu 7–10° og viðnámshorn á landi 14–20° (hærra fyrir lægra viðnám á jökli og öfugt). Ekki er mikill munur á niðurstöðum en hér er valið að skoða nánar tilvikið þegar viðnám á jökli er 7° en viðnám á landi 19°.

Fram kemur í grein Guðmundar að:

Það sem haldi jökulísinn reyndist víðast hvar vera grjóturð fremur en jakahrönn, en þó alls staðar blönduð ísmolum. Sú íblöndun íss í hlaupurðinni óx mjög eftir því sem fjær dró urðarbingnum mikla, hrunurðinni, svo að á austurjaðri jökulsins, fram með Skaratungum, var ís orðinn aðalefnið og stórgrýti aðeins á stangli.

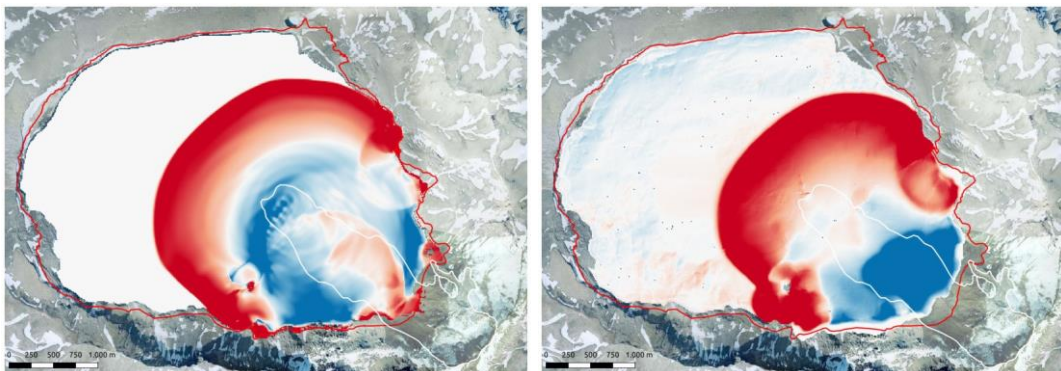


Mynd 25. Vinstri: Hlutfall íss af hámarksdýpt Steinsholtshlaups fyrir 7° viðnám á jökli og 19° viðnám á jökullausu landi. Hvítur litur táknar gildi nálægt núlli en dökkblár sýnir svæði þar sem ís er meginhluti hlaupsins. Hægri: Flóðdýpt bergs í lokaskrefi hermunarinnar. Dökkar línur sýna 10m hæðarlínur berghlaupsmassans sem sat eftir undir brotsárinu. Grunnmynd er loftmynd LMÍ frá því í september 1967.

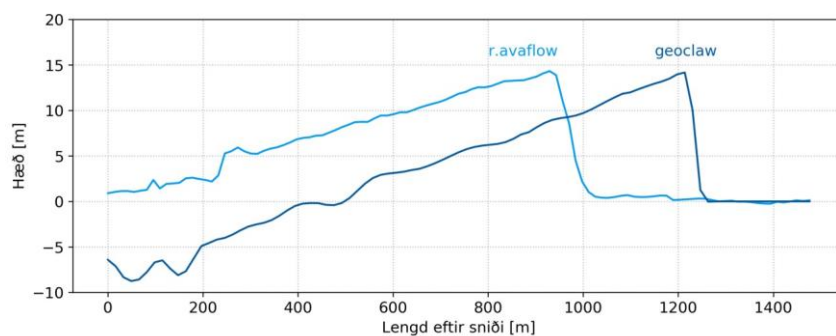
Mynd 25 sýnir hlutfall jökulíss í hámarksdýpt hlaupsins eins og hún reiknast í r.avaflow. Hermunin nær nokkuð vel því sem Guðmundur lýsir, þ.e. að hlaupið var að meginhluta ís í hlíðinni austan jökulsins. Á mynd 25 er einnig sýnd flóðdýpt bergs í lokaskrefi hermunarinnar. Þar má sjá hvernig hermunin nær ágætlega forminu á hrunurðinni sem sat eftir undir brotsárinu. Hún situr þó eftir ofar í landi og er minni að rúmmáli í hermuni en í raun.

6.2.3 Berghlaupið í Öskju 2014

Til þess að meta hversu vel r.avaflow hermir skriðu sem fellur í vatn og flóðbylgju af hennar völdum var líkaninu beitt á berghlaupið sem féll í Öskjuvatn í júlí 2014. Flóðbylgjan hefur áður verið reiknuð með líkaninu GeoClaw (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2016), sem er sérhæft til þess að herma vatnsbylgjur en þá með einfaldaðri mynd af berghlaupinu. r.avaflow hermir hins vegar berghlaupið á raunsærri hátt, en víxlverkun vatns og berghlaups í r.avaflow getur að öllum líkindum aðeins náð fyrstu bylgjunni sem berghlaupið ryður upp þegar það rennur út í vatn. Líkanið er dýpiseildað og þar með tvívítt, sem þýðir að í stað þess að skriðan renni ofan í og undir vatnsmassann verður árekstur við alla vatnssúluna og berghlaup og vatn taka að blandast saman. Berghlaupið hægir því mjög hratt á sér þegar út í vatnið er komið en mælingar á berghlaupinu á botni Öskjuvatns sýna að það ferðaðist um 2km eftir botninum áður en það nam staðar.



Mynd 26. Útbreiðsla flóðbylgjunnar á Öskjuvatni í Geoclaw (vinstri) og r.avaflow (hægri) rúmri mínútu eftir að berghlaupið gengur út í vatnið. Ekki var hægt að ná nákvæmlega sama tímapunktinum í líkönunum tveimur, bylgjan hefur gengið lengra út á vatnið í Geoclaw reikningunum. Grunnmynd er loftmynd Loftmynda ehf.



Mynd 27. Formið á bylgjufaldinum í Geoclaw samanborið við niðurstöður r.avaflow. Ekki var hægt að ná nákvæmlega sama tímapunktinum í líkönunum tveimur, bylgjan hefur gengið lengra út á vatnið í Geoclaw reikningunum.

Mynd 26 sýnir niðurstöður hermana á útbreiðslu flóðbylgjunnar á Öskjuvatni rúmri mínútu eftir að berghlaupið gengur í vatnið í líkönunum tveimur. Samræmið í hermun á bylgjufrontinum verður að teljast nokkuð gott, eins og sjá má á mynd 27 er formið og hæðin á bylgjunni nánast eins. Samræmið á milli niðurstaðna líkananna á hæð

flóðbylgjunnar á landi í kringum vatnið er víða nokkuð gott en sumstaðar nær r.avaflow ekki fullri hæð. Þetta skýrist væntanlega af því að í GeoClaw ganga endurköst bylgjunnar hærra á land en fyrsta bylgjan, en þeim getur r.avaflow síður náð.

6.3 Líkanreikningar á berghlaupi úr Svínafellsheiði

6.3.1 Gögn og úrvinnsla

6.3.1.1 Kortlagning sprungu og skilgreining upptakasvæðis

Mynd 8 sýnir kortlagningu sprungna og jarðfalla á Svínafellsheiði. Með hliðsjón af þeim voru tvö upptakasvæði skilgreind, annars vegar stórt svæði sem markast af efstu sprungunni og nær niður að yfirborði jökulsins en hins vegar minna svæði sem markast af jarðföllum sem fundist hafa neðar í hlíðinni. Lega sprunguflatarins neðan yfirborðs er ágiskað, gert er ráð fyrir að efst sé hann mjög brattur en neðar dragi jafnt og þétt úr halla niður að yfirborði jökulsins. Út frá þessu reiknast rúmmál berghlaups úr stærra upptakasvæðinu um 65 milljón rúmmetra en hlaups úr því minna um 20 milljón rúmmetra. Upptakasvæðin má sjá á mynd 33.

6.3.1.2 Landlíkan og botn lónsins

Landlíkan af Svínafellsjökli og nágrenni var samsett úr líkani Loftmynda ehf. frá 2017, lidar mælingu á vegum Veðurstofu Íslands frá 2011 og líkani frá Landmælingum Íslands frá 2012 syðst við ströndina. Hið síðastnefnda hefur áður verið nýtt til flóðaútreikninga vegna hugsanlegra jökulhlaupa úr Öræfajökli. Á mörkum líkans Loftmynda ehf. og lidar líkans var útbúið 100m breytt skörunarsvæði til að fella út alla þröskulda sem gætu myndast á milli líkananna, en aðgerðin tryggir að vatn í líkankeyrslum verði ekki fyrir áhrifum misræmis í hæð þeirra.

Lögun á botni vestara jökullónsins var byggð á mælingum frá Þorsteini Sæmundssyni og Guðbirni Margeirssyni frá árinu 2016, en botn eystra lónsins á íssjármælingum á Svínafellsjökli (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2012). Í báðum tilfellum var lögun botnsins brúuð handvirk til þess að fá betri samfellu á milli stakra mælipunkta. Útlínur beggja lóna byggja á loftmynd Loftmynda ehf. frá 2017 og miðað var við að vatnshæð væri 99 m yfir sjó. Þar sem jaðar Svínafellsjökuls stendur í lóni myndast brattur kantur í jökulísnum. Þar sem að skörp skil geta myndað óstöðuleika í líkanreikningum var þessi bratti kantur jafnaður út þannig að á skilum jökuls og lóns væri samfelld brekka. Þetta leiðir til þess að hegðun skriðunnar í líkaninu verður líkari því sem gerist við raunverulegar aðstæður. Í dýpishelduðum líkönum þar sem skriða lendir á vatni hefur skriðan umsvifalaust áhrif á vatnið alla leið frá yfirborði niður á botn. Þar sem vatnsdýpi er mikið er þetta óraunhæft, því skriða með þykkt upp á e.t.v. nokkra tugir metra sem lendir í vatni sem er allt að þrefalt dýpra þarf að ferðast nokkra vegalengd út í vatnið áður en hún nær að ryðja á undan sér vatni allt niður í botn. Þetta staðfesta nákvæmir reikningar með OpenFOAM, sjá kafla 6.3.4.

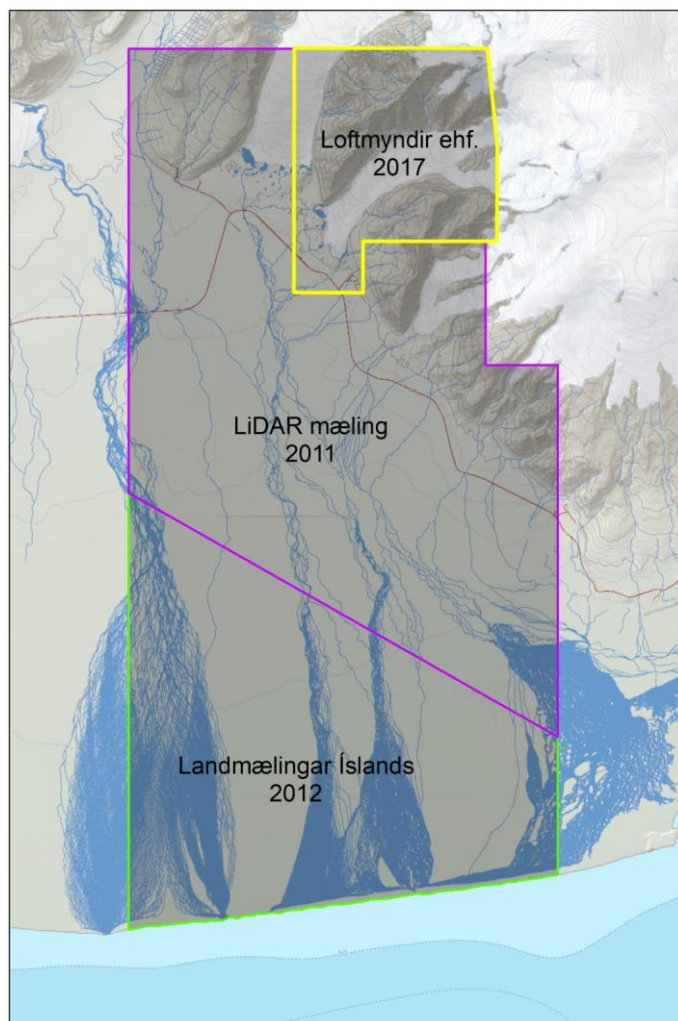
Að lokum var hið sameinaða landlíkan yfirfarið og aðlagð þannig að vatn í líkanumhverfinu yrði ekki fyrir áhrifum af óeðlilegum köntum og stöllum. Meðal annars

voru brýr yfir Svínafellsá og Neskvísl fjarlægðar þannig að þær virki ekki sem stíflur. Upplausn hins sameinaða landlíkans er 5 x 5 metrar, og er landfræðilega afmörkun þess sýnd á mynd 25 ásamt afmörkun landlíkanna þriggja sem byggt er á.

6.3.1.3 Sviðsmyndir um framtíðarstærð lóns við jaðar Svínafellsjökuls

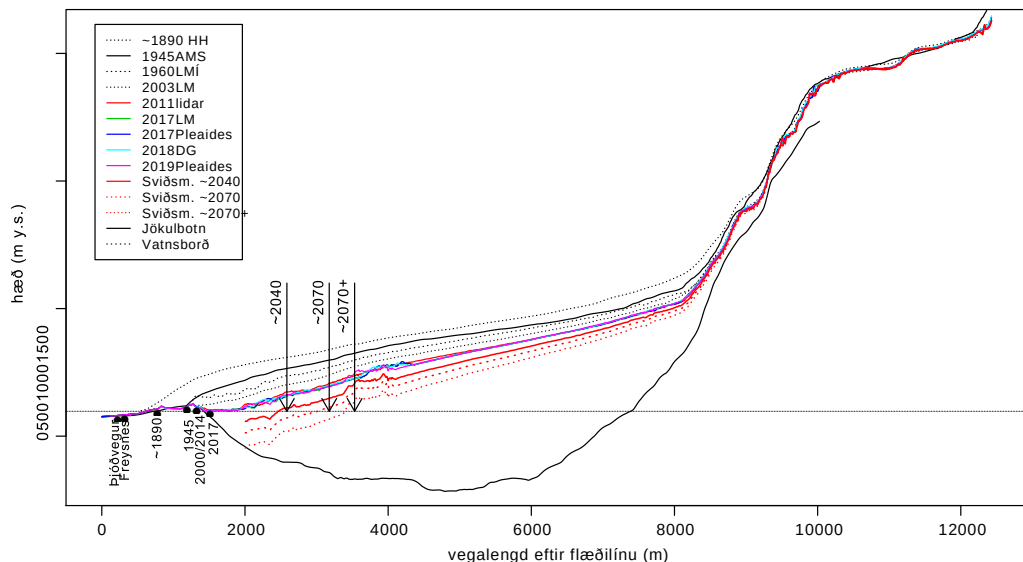
Umfang og eyðileggingarmáttur flóðs af völdum berghlaups niður Svínafellsjökul og í lónið við jökulsporðinn ræðst að miklu leyti af stærð lónsins. Núverandi lón við norðan- og sunnanverðan jökulsporðinn byrjuðu að myndast um aldamótin 2000 þegar sporðurinn hóf að hörfa hratt frá jökulgörðum sem hann hafði staðið nærri frá því á áttunda áratug 20. aldar (Snævarr Guðmundsson o.fl., 2019). Lónin voru um 0.4 km² að flatarmáli árið 2018, og það nyrðra er 60–70m djúpt þar sem það er dýpst. Íssjármælingar (Eyjólfur Magnússon o.fl., 2012) sýna að jökullinn liggur í um 6km löngum dal sem nær niður fyrir sjávarmál. Ef jökullinn hörfar frá láglendinu og upp í hlíðar Öræfajökuls, sem búast má við að hann geri á endanum vegna hlýnandi loftslags, myndast allt að 300 m djúpt stöðuvatn sem verður um ~5 km² að flatarmáli. Hættumat vegna flóða sem berghlaup getur hrundið af stað þarf því að byggja á sviðsmyndum um stærð lónsins fyrir þau tímabil sem matið á að ná til.

Svínafellsjökull hefur tekið miklum breytingum síðan hann náði hámarki í lok litlu ísaldar skömmu fyrir aldamótin 1900 (Hrafnhildur Hannesdóttir o.fl., 2015b) eins og sjá má á mynd 29. Myndin sýnir langsnið upp jökulinn á mismunandi tímum eftir straumlínu sem liggur u.þ.b. í miðjum dalnum þar sem íspykktin er mest (sjá kort á mynd 1). Langsniðin byggja á landlíkönum frá ýmsum aðilum eins og fram kemur í töflu 5. Jökullinn neðanverður hefur þynnst um u.þ.b. 175 m á rúmri öld síðan í lok 19. aldar en lækkun yfirborðsins minnkar jafnt og þétt eftir því sem ofar dregur og er tæplega 100 m þegar komið er upp í um 500 m hæð yfir sjó.



Mynd 28. Samsetning landlíkans sem útbúið var til líkanreikninga á berghlaupi úr Svínafellsheiði.

Lón við jökuljaðra stækka þegar jöklar hopa og stækkuðu lón við sunnanverðan Vatnajökul úr tæplega 30 km² samtals í um 60 km² frá 2000 til 2018 vegna hörfunar skriðjöklanna (Snævarr Guðmundsson o.fl., 2019). Þessi þróun heldur væntanlega áfram á næstu áratugum en hörfunarhraðinn ræðst af hlýnun loftslagsins. Til þess að gera sér grein fyrir breytileika loftslags hér á landi og áhrif þess á jökla er hentugt að skoða sumarhita í Stykkishólmi sem sjá má á mynd 30 frá því um miðja 19. öld. Sjá má að það skiptast á hlý og köld tímabil sem standa í nokkra áratugi en jafnframt sýnir hitaferillinn hlýnun frá síðari hluta 19. aldar til fyrstu tveggja áratuga 21. aldarinnar sem nemur rúmlega 1°C. Þessi hlýnun hefur valdið rýrnun jökla sem sjá má á mynd 29 fyrir Svínafellsjökul. Þess er að vænta að loftslag haldi áfram að hlýna næstu öldina og að meðalhiti verði e.t.v. um 2.4 – 4.1°C hærri undir lok aldarinnar en um síðustu aldamót (Halldór Björnsson o.fl., 2018) (hlýnum frá 1986–2005 til 2091–2100 skv. sviðsmyndum RCP4.5 til RCP8.5, ekki er hér miðað við RCP2.6).

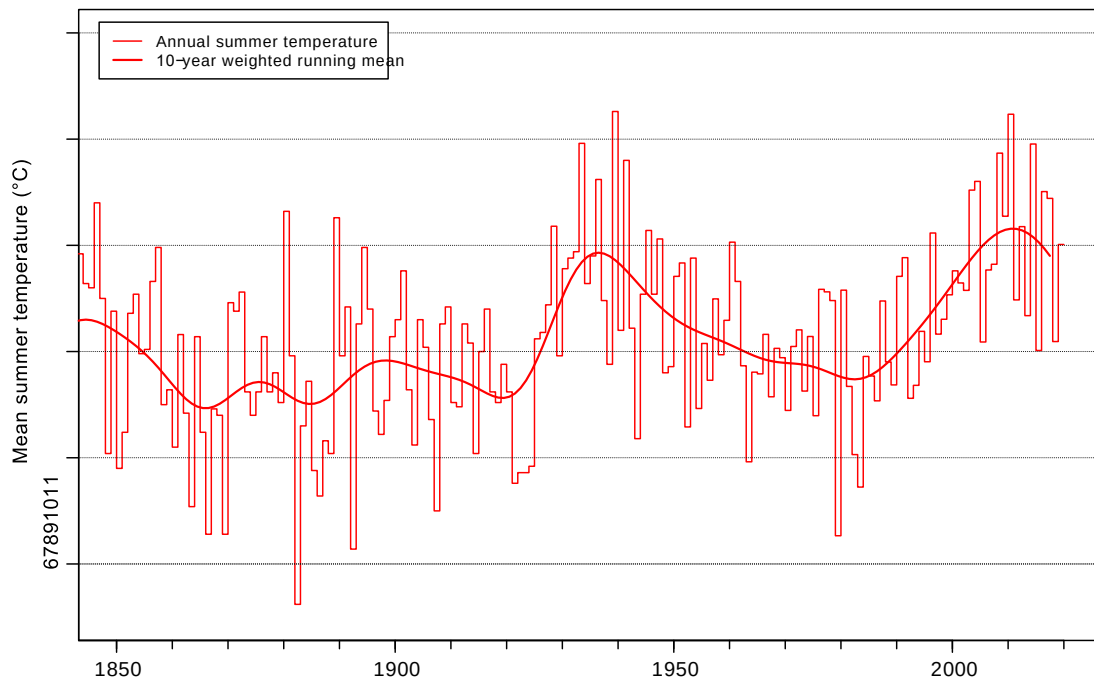


Mynd 29. Langsnið upp Svínafellsjökul nærri miðlínu dalsins sem jökullinn skríður fram (sjá staðsetningu á mynd 1). Sýnt er yfirborð jökulsins á mismunandi tímum síðan í lok litlu ísaldar og þrjár sviðsmyndir um lækkun jökulsins á 21. öld. Jökulbotninn er skv. íssjármælingu Eyjólf Magnússonar o.fl. (2012). Yfirborðið byggir á gögnum frá ýmsum aðilum (sjá nánar í töflu 5). Myndin sýnir jafnframt hugsanlega lækkun jökulyfirborðins á næstu áratugum, sjá umfjöllun í texta.

Hörfun Svínafellsjökuls á næstu 20 til 50 árum mun hins vegar að talsverðu leyti ráðast af því hvort næstu áratugir verða áfram hlýir eða hvort í vændum er hlé á hlýnuninni eða jafnvel tímabundin kólnun eins og dæmi eru um í loftslagssögu síðustu aldar. Því er ekki unnt að horfa beint til líklegar meðalhlýnunar á áratug næstu öldina þegar leggja þarf mat á hörfun Svínafellsjökuls á næstu áratugum heldur þarf að leggja að nokkru leyti huglægt mat á ýmis fyrirbyggjandi gögn, svo og spár um hlýnun loftslags.

Tafla 5. Landlíkön sem notuð voru við greiningu á breytingu yfirborðshæðar á Svínafellsjökli á næstu 20 til 50 árum.

Landlíkan	Dagsetning	Heimild/uppruni
Lok litlu ísaldar	~1890	Hrafnhildur Hannesdóttir o.fl. (2015a)
AMS/1945	ág./sept. 1945	US Army Map Service
Myndasafn LMÍ/1960	1960	Gögn frá Joaquín M. C. Belart
Loftmyndir LM/2003	2003	Gögn frá Loftmyndum ehf.
Leysimæling/2011 (lidar)	26/27.8.2011	Tómas Jóhannesson o.fl. (2013)
Pléiades/2017	9.8.2017	Gögn frá Joaquín M. C. Belart
Loftmyndir LM/2017	30.8.2017	Gögn frá Loftmyndum ehf.
DG/2018, WV01/02	3/23.3.2018	Digital Globe, unnið f. VÍ
Pléiades/2017	1/2.9.2019	Gögn frá Joaquín M. C. Belart

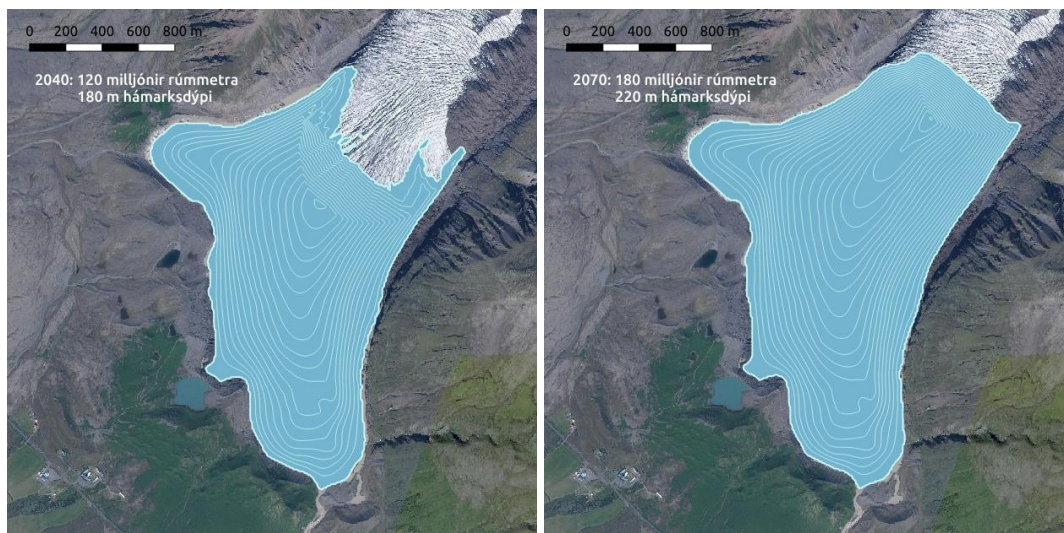


Mynd 30. Sumarhiti í Stykkishólmi (maí til september) frá því skömmu fyrir 1850 til 2019.

Hop skriðjökla sem kelfa í jökullón virðist ekki eins háð loftslagi og annarra jökla og hörfa sumir þeirra nokkuð jafnt og þétt tiltölulega óháð breytingum í loftslagi milli áratuga, t.d. Breiðamerkurjökull sem kelfir í Jökulsárlón á Breiðamersand (sjá spordamælingar Jöklarannsóknafélags Íslands á spordakost.jorfi.is). Þynning jökulsins og hörfun jökulsporðsins ræðst að hluta til af ís sem kelfir í lónið og bráðnar þar. Jökullón stækka nokkuð hratt þegar jökullinn hefur þynnst svo mikið til sporðsins að hann fer að fljóta og þá getur jökulsporðurinn brotnað upp og flotið fram í lónið sem jakadreif og bráðnað. Þannig hafa lón við Heinabergsjökul og Hoffellsjökul stækkað hratt á síðustu árum eftir að sporðar þessara jökla þynntust svo mikið að þeir fóru að fljóta og brotnuðu upp (Snævarr Guðmundsson o.fl., 2019). Sjá má á mynd 29 að þynning Svínafellsjökuls síðustu rúma öldina hefur haldið svipuðu formi þannig að lækkun jökulyfirborðsins er mest neðst og minnkar eftir því sem ofar dregur. Ef gert er ráð fyrir því að lækkun yfirborðsins á næstu áratugum verði með svipuðum hraða og síðustu áratugi, má nýta sér þessa svipuðu lögun lækkunarinnar til þess að spá fyrir um staðinn þar sem jökulyfirborðið lækkar niður undir vatnsborð lónsins og jökullinn flýtur upp. Þar má gera ráð fyrir að sporðurinn þar sem jökullinn kelfir fram í lónið verði á hverjum tíma.

Breytingar sumarhita í Stykkishólmi síðustu áratugi á mynd 30 bera með sér að ekki er auðvelt að geta sér til um þróun loftslags og þar með jöklabreytinga hér á landi næstu áratugi þó unnt sé að segja með nokkurri vissu að vænta megi hlýrra loftslags þegar litið er til næstu aldar. Á móti óvissunni um þróun loftslagsins kemur að líklegt má telja að jökull sem kelfir í lón haldi áfram að hörfa með svipuðum hraða og verið hefur um nokkurt árabíl vegna þess að kelfingarþátturinn í rýrnun jökulsins er ekki nema að litlu leyti háður loftslagi. Hér verður farin sú einfalda leið að meta lækkun yfirborðs Svínafellsjökuls á næstu 20 og 50 árum með hliðsjón af hæðarbreytingum jökulsins á tímabilunum 2003 til

frá 2019 þegar staða jökulsporðsins 2070 er ákvörðuð vegna þess að hreyfing jökulsins mun hafa borið skriðuna niður í lónið fyrir árið 2070. Staða sporðsins er ákvörðuð þar sem yfirborð jökulsins er svolítið fyrir ofan vatnsborðið en þó ekki alveg sem nemur 1/10 af ísþykktinni. Það er vegna þess að reynslan sýnir að jökulsporðurinn lækkar niður fyrir flothæð áður en hann brotnar upp og flýtur sem ísjakar fram í lónið.



Mynd 32. Stærð lóna í líkanreikningum á sviðsmyndum fyrir 2040 (vinstri) og 2070 (hægri).

Sviðsmyndirnar þrjár sem sýndar eru á myndum 29 og 31 voru notaðar til þess að útbúa landlíkön fyrir hermun flóða af völdum berghlaups niður í lónið við Svínafellsjökul. Fyrir hverja stöðu jökulsporðsins var lækkað yfirborðið jökulsins notað ofan við hina metnu stöðu sporðsins í viðkomandi sviðsmynd en gert ráð bröttum íshamri niður að jökulbotni þar fyrir framan. Skorið var framan af jöklinum hornrétt á straumlínuna sem sýnd er á kort á mynd 1. Af tæknilegum ástæðum var íshamarinn ekki lóðréttur heldur látinn hafa 45° halla niður að jökulbotni til þess að koma í veg fyrir tölulegan óstöðugleika í reiknilíkaninu r.avaflow. Mynd 32 sýnir kort af stærð lónsins í sviðsmyndum fyrir 1940 og 1970.

6.3.1.4 Manning stuðull

Í r.avaflow og öðrum líkönum sem lýsa flæði vatns kemur fyrir stuðull sem lýsir núningi milli vatns og undirlags. Mismunandi er milli líkana hvernig sá stuðull er skilgreindur, en algengast er að nota svokallaðan Manning stuðul og hefð er fyrir því í jökulhlaupareikningum hérlendis að stilla hann af til að lýsa því hversu mikið fast efni og ís er í hlaupvatni. Í r.avaflow er hins vegar notaður Darcy stuðull. Hér að neðan verður Darcy stuðullinn umritaður í Manning stuðul til að fylgja hefðinni. Í einni vídd eru dýpisheilduðu jöfnurnar sem lýsa flæði vatns ritaðar

$$h_t + (hu)_x = 0 \quad (1)$$

$$(hu)_t + \left(hu^2 + \frac{gh^2}{2}\right)_x = -ghB_x - ghS_f \quad (2)$$

þar sem h er vatnshæð, u er vatnshraði, $()_{t/x}$ táknar diffrun með tilliti til t eða x , B lýsir botnlandslagi og S_f er viðnám. Í r.avaflow er viðnámi lýst með jöfnu Darcy-Weisbach og viðnámsliðurinn er ritaður

$$S_f = \frac{fu|u|}{8gh} \quad (3)$$

þar sem f er einingarlaus stuðull. Í hermun jökulhlaupa er algengara að nota jöfnu Mannings til að lýsa viðnámi. Viðnámsliðurinn má rita út frá jöfnu Mannings sem

$$S_f = \frac{n^2 u |u|}{h^{4/3}} \quad (4)$$

Þannig má finna samband Darcy og Manning stuðla

$$f = \frac{8n^2 g}{h^{1/3}} \quad (5)$$

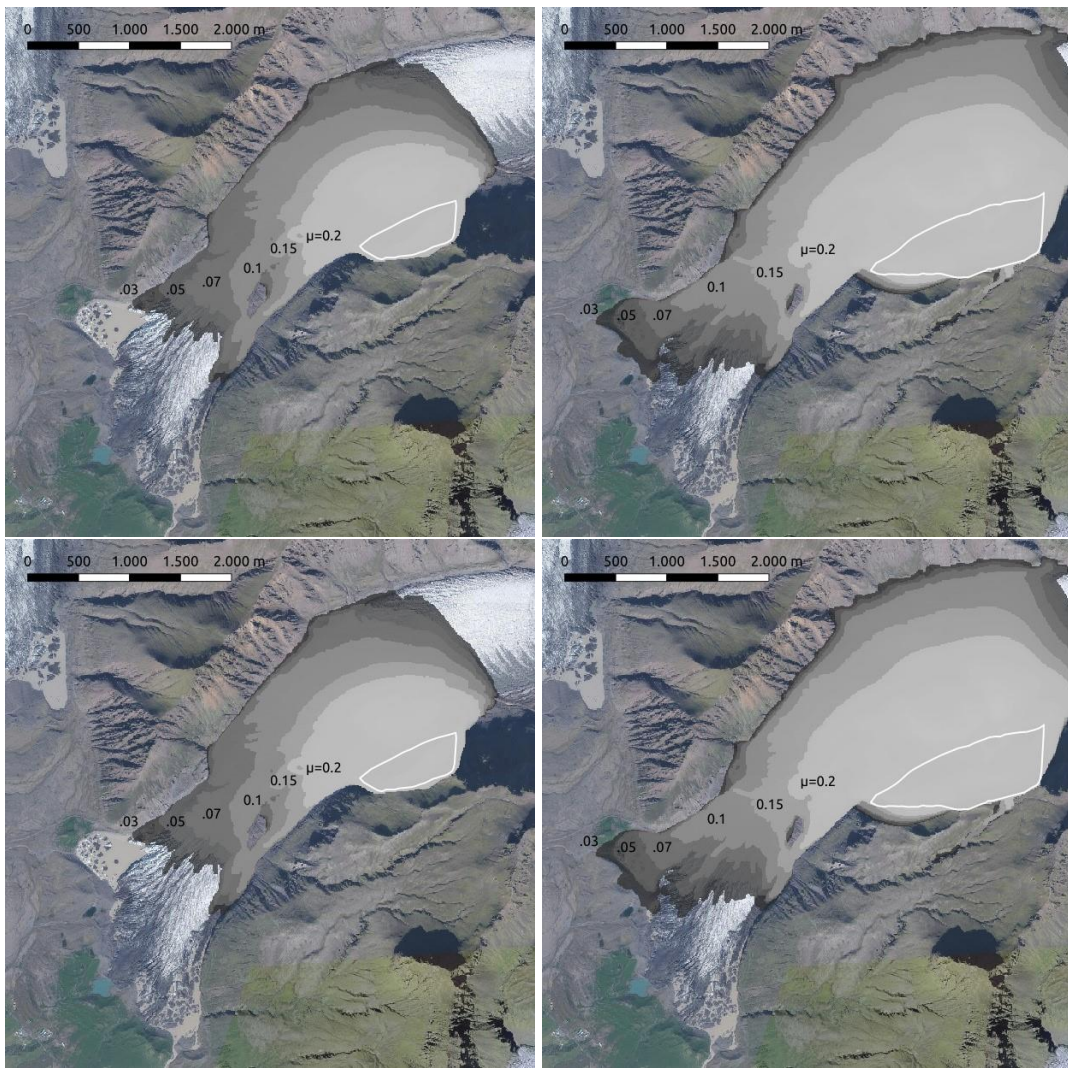
Fjallað er ítarlega um val á gildum Manning stuðuls fyrir hermun jökulhlaupa í (Kristín Martha Hákonardóttir o.fl., 2005; Snorri Páll Kjarran o.fl., 2009; Ásdís Helgadóttir o.fl., 2015). Fyrir árfarvegi er Manning stuðull á bilinu 0.035 til 0.15 $\text{sm}^{-1/3}$ (Chow, 1959; Gerhart o.fl., 1993) eftir því hversu grófur farvegurinn er og hversu mikill gróður er í honum. Lagt hefur verið mat á Manning stuðul í Kötluhlaupinu 1918 byggt á frásögnum og reyndist hann á bilinu 0.08 til 0.1 (Haukur Tómasson, 1996). Einnig hefur Manningstuðull verið metinn fyrir 13 snið í flóðfarvegi jökulhlaups úr Sólheimajökli í júlí 1999 (Russell o.fl., 2010) og fengust gildi á bilinu 0.03–0.08. Fleiri heimildir má finna í skýrslu Ásdísar Helgadóttur o.fl. (2015). Í hermunum á flóðbylgju úr Svínafellslóni sem hér eru til umfjöllunar voru líkankeyrslur gerðar með þremur gildum Manning stuðuls, 0.03, 0.05 og 0.1. Hærri gildin hafa gjarnan verið notuð í hermunum á jökulhlaupum sem flytja með sér ís og mikið magn lausra efna, til dæmis í hermunum Kristínar Mörthu Hákonardóttur o.fl. (2005) og Ásdísar Helgadóttur o.fl. (2015) á jökulhlaupum úr Eyjafjalla- og Öræfajöklum. Lægsta gildið er eðlilegra fyrir flóð sem að mestu eru vatnsflóð. Á meðan lónið við sporð Svínafellsjökuls er af núverandi stærð og eitthvað stærra er líklegt að flóðbylgja sem berghlaupið kastar fram verði mjög blönduð skriðuefni og ís (úr lóninu og ís sem berghlaupið rífur með sér á ferð sinni yfir jökulinn). Staðan er þá svipuð og við Steinsholtslón árið 1967 þar sem berghlaupið var mun meira að rúmmáli en lónið og ruddi því í heild sinni með sér út dalinn. Eftir því sem lónið við Svínafellsjökul stækkar verður líkleggra að berghlaupið stöðvist að mestu í lóninu en flóðbylgjan sem það ryður upp ferðist áfram sem vatnsflóð niður helstu farvegi. Fyrir framtíðarsviðsmyndir (2040 og 2070) verða niðurstöður fyrir lægri gildin á Manningstuðli því hafðar til hliðsjónar við hættumat.

Til þess að umreikna Manning stuðul í Darcy stuðul skv. jöfnu 5 þarf flóðdýpt, sem er breytileg. Í hermunum er flóðdýpt í þrengri farvegum gjarnan 3–6m en þar sem flóðvatn breiðist út á söndum er hún á bilinu 0–2m. Til einföldunar er f reiknað með því að festa flóðdýptina í $h = 3\text{m}$. Fyrir $n = 0.03$ fæst þá $f = 0.05$, fyrir $n = 0.05$ fæst $f = 0.14$ og fyrir $n = 0.1$ fæst $f = 0.54$.

6.3.2 Líkanreikningar með Voellmy líkani

Líkanreikningar á skriðum hafa í flestum tilfellum verið gerðir með svokölluðu Voellmy líkani (Hungar & Evans, 1996; Sosio o.fl., 2012). Í stuttu máli má segja að Voellmy líkanið lýsi því hvernig skriða hraðar á sér þegar hún fellur undan eigin þunga og tapar hraða annars vegar vegna núnings við botn og hins vegar vegna hraðaháðs viðnáms. Stuðlar stjórna styrk viðnámsliðanna í hreyfijöfnunni, μ stýrir botnviðnámi og ξ stýrir hraðaháðu viðnámi. Í líkanreikningum eru gildi stuðlanna stillt til að herma tiltekna skriðu. Stuðlarnir eru óþekktir og vegna þess hversu líkanið er mikil einföldun á raunveruleikanum hafa þeir ekki eiginlega eðlisfræðilega merkingu og ekki er hægt að mæla þá. Það er því mikilvægt að nýta söguleg gögn til þess að meta líkleg gildi á stuðlunum tveimur með því að kvarða líkön að úthlaupi þekktra framhlaupa. Tekinn var saman listi yfir líkanreikninga á framhlaupum á jökla víða um heim og þau gildi á viðnámsstuðlum sem reyndust lýsa hegðun þeirra best, sjá töflu 7 í viðauka II. Botnviðnámsstuðullinn hleypur á bilinu $\mu = 0.03\text{--}0.2$ og hraðaháða viðnámið er yfirleitt $\xi = 1000\text{--}2000 \text{ m/s}^2$ nema í einstaka tilfellum.

Settar voru upp tvær sviðsmyndir með Voellmy líkani fyrir berghlaup úr Svínafellsheiði. Sú fyrri miðast við sprungur sem fundist hafa í hlíðinni neðan við stallinn þar sem efri sprungan liggur, og verður rúmmál berghlaupsins þá um 20 milljón rúmmetra. Seinni sviðsmyndin miðast við efri sprunguna og verður rúmmál efnis sem hleypur af stað þá um 65 milljón rúmmetra. Í báðum sviðsmyndum er brotflötur berghlaupsins ágískaður, gert er ráð fyrir því að sprungan sé nokkuð brött efst en neðar minnki hallinn jafnt og þétt niður að yfirborði jökulsins. Líkankeyrslur voru gerðar fyrir $\xi = 1000$ og $\xi = 2000 \text{ m/s}^2$ en valin voru sex gildi botnviðnámsstuðuls: $\mu = 0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.15$ og 0.2 . Gildið á ξ hefur mest áhrif á hámarkshraða berghlaupsins og lítil áhrif á úthlaupið svo hér eru einungis sýndar niðurstöður fyrir $\xi = 1000 \text{ m/s}^2$. Í þessum reikningum er ekki gert ráð fyrir vatni í lónunum og landlíkanið sýnir yfirborð vatns sem yfirborð lands. Keyrslurnar fylgja ferð berghlaupsins í tvær mínútur. Þá hefur berghlaupið í flestum tilfellum svo gott sem stöðvast, nema fyrir lægstu gildin á μ , þar sem botnviðnámið er svo lítið að nánast engan halla þarf til þess að knýja hlaupið áfram. Fyrir lægsta gildið, $\mu = 0.03$, er svokallað viðnámshorn einungis 1.7° en það þýðir að í líkanreikningunum getur berghlaupið ferðast takmarkalaust svo lengi sem halli landsins sem það rennur yfir er umfram það horn.

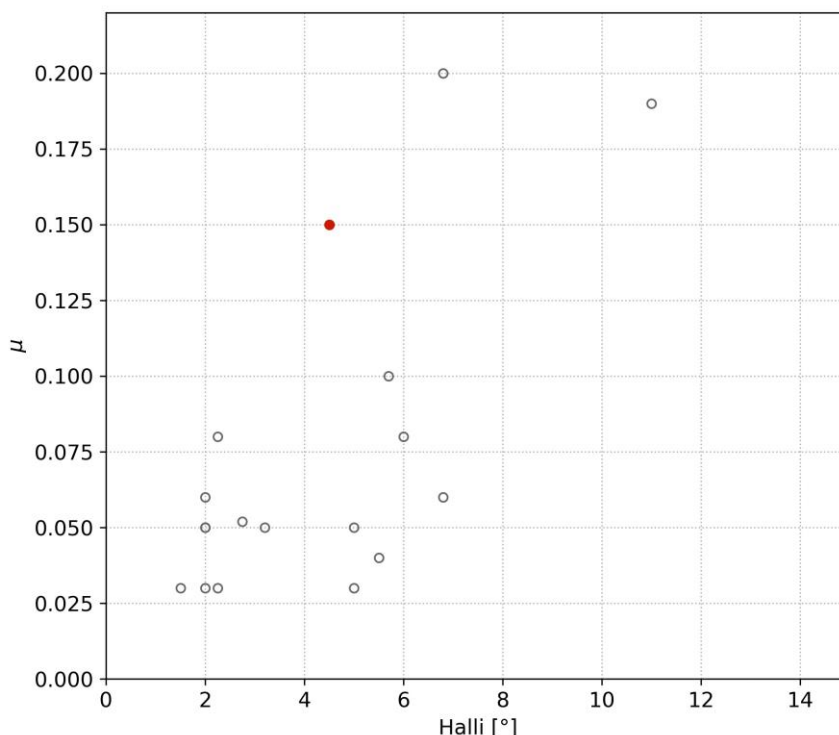


Mynd 33. Útbreiðsla berghlaups skv. Voellmy líkani fyrir 20 milljón rúmmetra skriðu (vinstri) og 65 milljón rúmmetra skriðu (hægri). Stuðull hraðaháðs viðnáms er $\xi = 1000 \text{ m/s}^2$ og botnviðnámsstuðullinn tekur gildin $\mu = 0.03$ (dökkgrár), 0.05, 0.07, 0.1, 0.15 og 0.2 (ljósgrár).

Hámarksútbreiðsla berghlaups skv. þessum líkanreikningum er sýnd á mynd 30. Reikningarnir gefa til kynna að lága botnviðnámsstuðla þurfi til að berghlaup nái í vestara lónið og afar ólíklegt er að það nái í eystra lónið. Erfitt er að segja nánar til um hvaða gildi á μ er eðlilegt að miða við í líkanreikningum vegna hættumats. Einhverja hugmynd má gera sér með því að skoða betur líkanreikningana sem teknir eru saman í töflu 7. Mynd 34 sýnir gildi μ sem fall af halla jökulsins þar sem tiltekið berghlaup stöðvast. Gögnin benda til þess að eftir því sem hallinn er minni þeim mun lægra gildi á μ þarf til þess að líkanið nái úthlaupi berghlaupsins. Hallinn á Svínafellsjökli er um 5° (4° á miðjum jökli en 6° nær vestara lóni). Hugsanlega eru gildi ofan $\mu > 0.05$ því líklegri til að eiga betur við þótt það sé auðvitað mikilli óvissu undirorpið. Niðurstöður Schneider o.fl. (2010) styðja þetta. Í hermun á berghlaupi sem féll úr Aoraki/Mt. Cook á Nýja-Sjálandi árið 1991 reyndist unnt að ná góðu samræmi við úthlaupið fyrir ýmis pör af líkanstuðlum frá $\mu = 0.07$

og $\xi = 1000 \text{ m/s}^2$ upp í $\mu = 0.15$ og $\xi = 4000 \text{ m/s}^2$. Samanburður við jarðskjálftagögn benti til þess að hærri gildi á stuðlunum væru líklegri.

Þótt nokkur óvissa sé um gildi líkanstuðla og hvort berghlaupið falli í lónið má draga þá ályktun af Voellmy líkanreikningunum að afar ólíklegt sé að berghlaupið sjálft hafi áhrif lengra en í næsta nágreinni lónanna og við jökuljaðarinn á milli þeirra. Eins og staðan er nú er líklegast að það stöðvist ofan lónanna.



Mynd 34. Gildi botnviðnáms (í líkanreikningum með Voellmy líkani) sem fall af halla jökuls þar sem berghlaupið stöðvast, gögn tekin úr töflu 7. Rauður punktur auðkennir niðurstöðu hermunar á berghlaupi sem féll úr Aroaki/Mt. Cook á Nýja Sjálandi árið 1991. Hægt var að ná góðu samræmi við mælingar fyrir ýmis pör af líkanstuðlum frá $\mu = 0.07$ og $\xi = 1000$ upp í $\mu = 0.15$ og $\xi = 4000 \text{ m/s}^2$, sem sýnt er hér. Samanburður við jarðskjálftagögn benti til þess að tiltölulega há gildi á stuðlunum séu líklegri (Schneider o.fl., 2010).

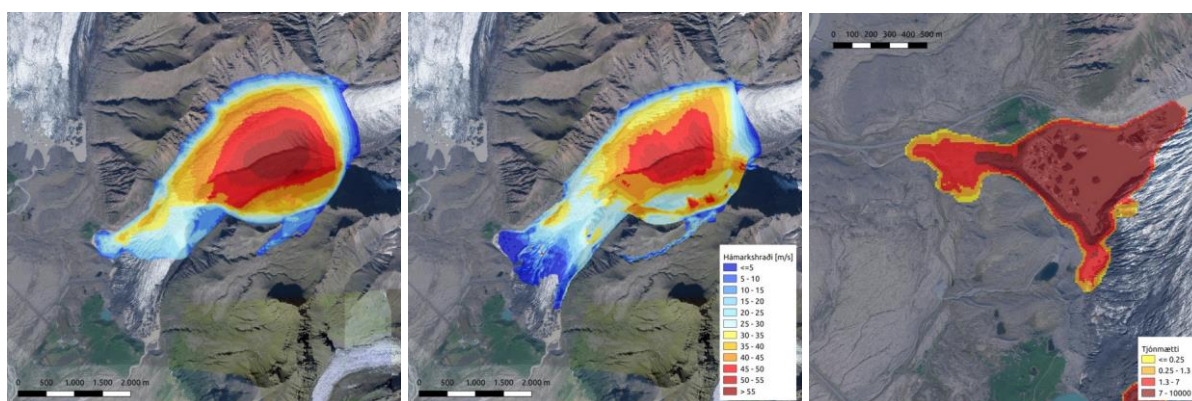
Þar sem Voellmy líkanið getur eingöngu hermt flæði berghlaupsins en meginhættan fyrir svæðið neðan Svínafellsjökuls er vegna vatnsflóða reyndist nauðsynlegt að taka í notkun líkanið r.avaflow sem getur hermt alla atburðarásina frá því að berghlaup fellur þar til það rennur í lónið við sporð jökulsins og hvernig vatnsflóð ferðast um svæðið neðan jökuls. Lítil reynsla er af kvörðun líkansins r.avaflow fyrir söguleg berghlaup og notkun þess á dæmin þrjú sem fjallað var um hér að framan gefur ekki nægilega skýra mynd af vali á inntaksstikum. Því var valin sú leið að miða við niðurstöður Voellmy líkans á hraða berghlaupsins þegar það fellur í lónið fyrir $\mu = 0.05$, en það gildi er nokkuð algengt í þeim kvörðunum sem hafa verið gerðar (sjá töflu 7) og svarar til frekar „slæmra“ efniseiginleika fyrir berghlaupið. Með þessu gildi á μ er viðnám á jökli nokkru hærra en allra lægstu gildin

sem notuð hafa verið en er samt sem áður mjög lítið (svarar til viðnámshorns 2.9°) og hraði berghlaupsins þar með nokkuð hár þegar það nær lóninu. Líkanið r.avaflow var þá keyrt fyrir mismunandi gildi á viðnámshorni á jökli og niðurstöður fyrir hraða berghlaupsins þegar það fellur í lónið bornar saman við niðurstöður Voellmy líkans fyrir $\mu = 0.05$ til að ákvarða hvaða viðnámshorn er haft til viðmiðunar fyrir hættumatið. Þessi viðnámshorn hlaupa á bilinu $4-6^\circ$ en ágætt er að hafa í huga að kvarðanir á Steinsholtshlaupinu og bergflóðinu á Morsárjökul benda til þess að botnviðnámshorn á bilinu $7-8^\circ$ gefi niðurstöðu sem fellur best að mælingum. Fyrir svo hátt viðnámshorn stöðvast berghlaup á Svínafellsjökli ofan lóns.

6.3.3 Líkanreikningar með r.avaflow

6.3.3.1 Sviðsmynd fyrir árið 2020

Mynd 35 sýnir reiknaðan hámarkshraða berghlaupsins samkvæmt Voellmy líkani fyrir $\mu = 0.05$ og í r.avaflow fyrir 4° viðnámshorn á jökli. Fyrir það gildi á viðnámshorninu er hraði berghlaups þegar það fellur í lónið næst niðurstöðum Voellmy líkans. Á myndinni er einnig sýnt reiknað tjónmætti samkvæmt r.avaflow. Niðurstöður r.avaflow fyrir 4° viðnámshorn gefa til kynna að einungis verði minniháttar gusa úr lóninu við Hafrafell. Berghlaupið stöðvast áður en það nær eystra lóninu við Svínafell. Við núverandi stöðu skapast því fyrst og fremst hætta fyrir ferðamenn sem kunna að vera staddir við vestara lónið eða á jöklinum. Skriðan lendir $5-10$ m þykk á $25-30$ m/s í lóninu og setur af stað bylgju sem nær $2-4$ m hæð á vatninu. Þar sem hún gengur á land við útfallið rís hún í 6 m og ferðast á $4-7$ m/s hraða.

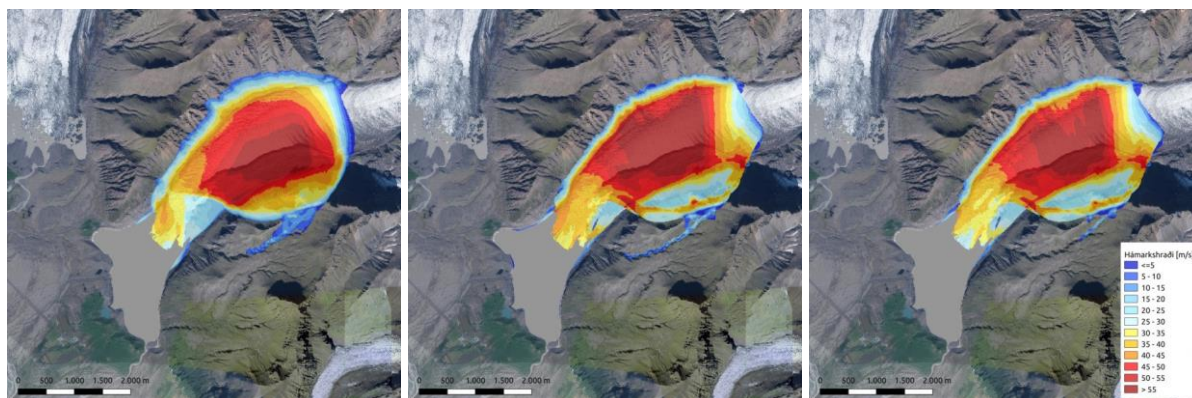


Mynd 35. Hámarkshraði berghlaups í líkanreikningum árið 2020 með Voellmy líkani fyrir $\mu = 0.05$ (vinstri), og r.avaflow fyrir 4° (miðja) viðnámshorn á jökli og 11° utan jökuls. Hægra megin er tjónmætti flóðbylgju fyrir árið 2020 reiknað með r.avaflow.

6.3.3.2 Sviðsmynd fyrir árið 2040

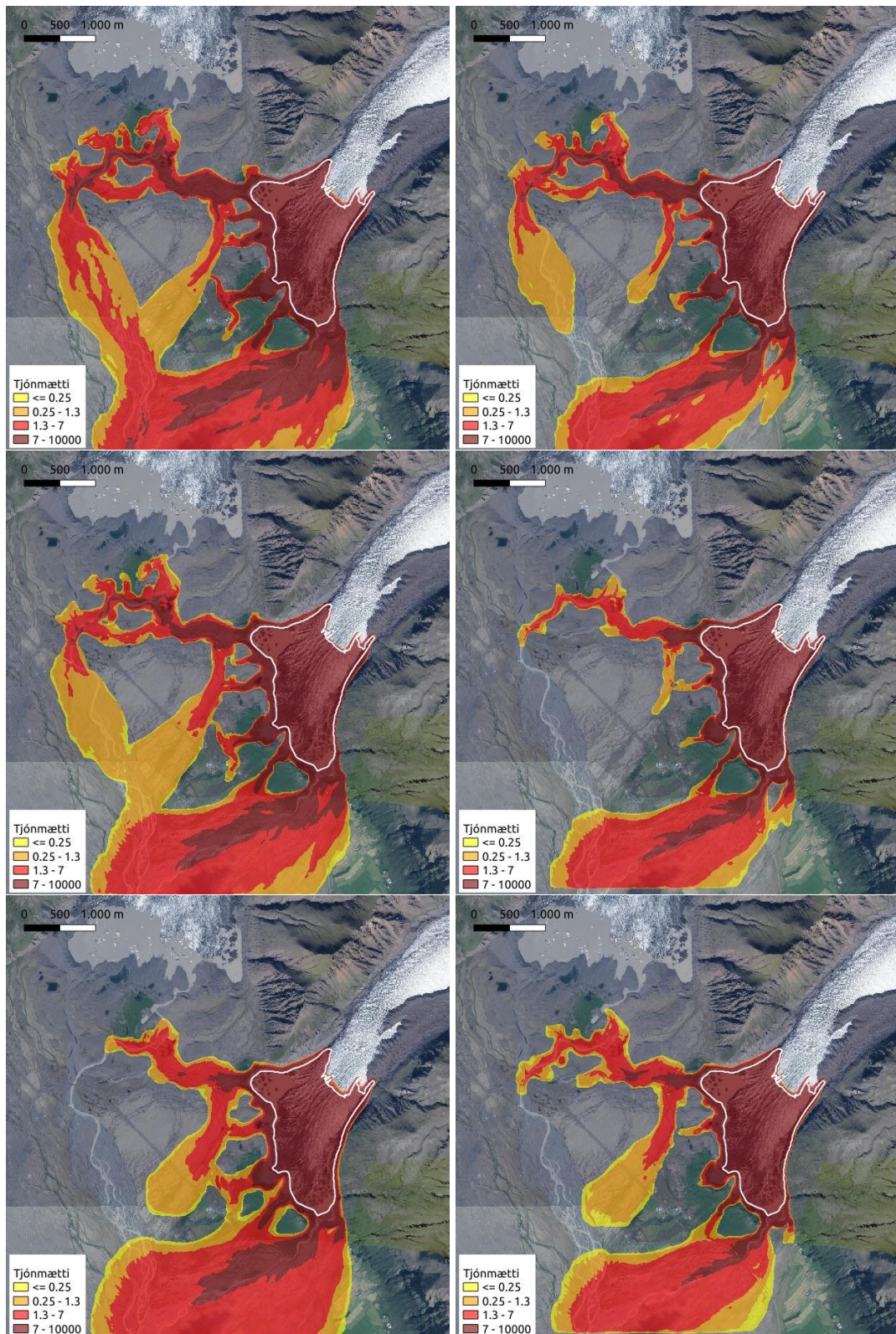
Mynd 36 sýnir reiknaðan hámarkshraða berghlaupsins fyrir sviðsmynd árið 2040 samkvæmt Voellmy líkani fyrir $\mu = 0.05$ og í r.avaflow fyrir 5° og 6° viðnámshorn á jökli. Hraði berghlaups þegar það fellur í lónið er næst niðurstöðum Voellmy líkans fyrir viðnámshorn nálægt 6° . Í r.avaflow lendir skriðan $5-10$ m þykk á $30-40$ m/s í lóninu og setur af stað bylgju sem nær $5-15$ m hæð á vatninu. Hún gengur á land við útfallið við

Hafrafell rúmri hálfri mínútu eftir að berghlaupið lendir í lóninu. Þar kemur hún að landi á 10–15 m/s hraða og rís í 15 m hæð yfir vatnsborðið. Bylgjan kemur að útfalli Svínafellsár rúmri mínútu eftir að berghlaupið lendir í lóninu á 5–15 m/s hraða og rís í 15–20 m hæð yfir vatnsborðið.



Mynd 36. Hámarkshraði berghlaups í líkanreikningum fyrir árið 2040 með Voellmy líkani fyrir $\mu = 0.05$ (vinstri), og $r.avaflow$ fyrir 5° (miðja) og 6° (hægri) viðnámshorn á jökli og 11° utan jökuls.

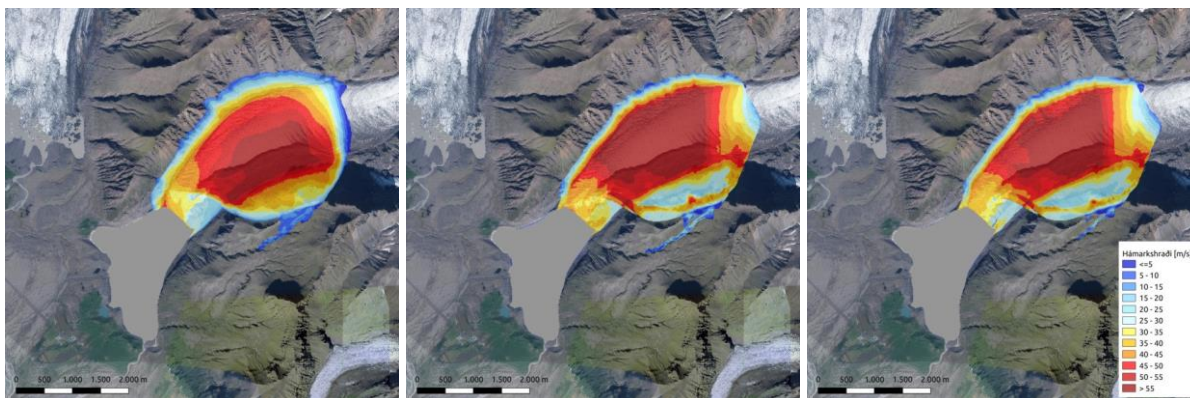
Mynd 37 sýnir reiknað tjónmætti fyrir 5° og 6° viðnámshorn og Manning stuðla $n = 0.03$, 0.05 og 0.1 . Flóðbylgjan gengur á land í flestum útföllum lónsins og veldur nokkuð stóru flóði niður farveginn við Hafrafell og í Svínafellsá. Flóð niður farveg ofan Freysness verður að öllum líkindum lítið og jökulgarðurinn beinir því framhjá byggingum. Við Svínafell skapast nokkur hættu við tvö innstu húsin. Flóðið breiðir hins vegar vel úr sér á sléttunni og skapar væntanlega ekki hættu fyrir önnur hús á svæðinu, en flæðir yfir túnin suðvestan við bæjarhúsin.



Mynd 37. Tjónmætti fyrir árið 2040. Niðurstöður í vinstri dálki eru fyrir 5° viðnámshorn á jökli en 6° í hægri dálki. Utan jökuls er viðnámshorn 11°. Efstu myndir eru fyrir Manning stuðul $n = 0.03$, í miðju er stuðullinn $n = 0.05$ en neðst $n = 0.1$.

6.3.3.3 Sviðsmynd fyrir árið 2070

Mynd 38 sýnir reiknaðan hámarkshraða berghlaupsins fyrir sviðsmynd árið 2070 samkvæmt Voellmy líkani fyrir $\mu = 0.05$ og í r.avaflow fyrir 4° og 5° viðnámshorn á jökli. Hraði berghlaups, sem reiknast í r.avaflow, þegar það fellur í lónið passar best við niðurstöður Voellmy líkans fyrir viðnámshorn nálægt 5° . Í r.avaflow lendir skriðan 5–15 m þykk á 30–40 m/s í lóninu og setur af



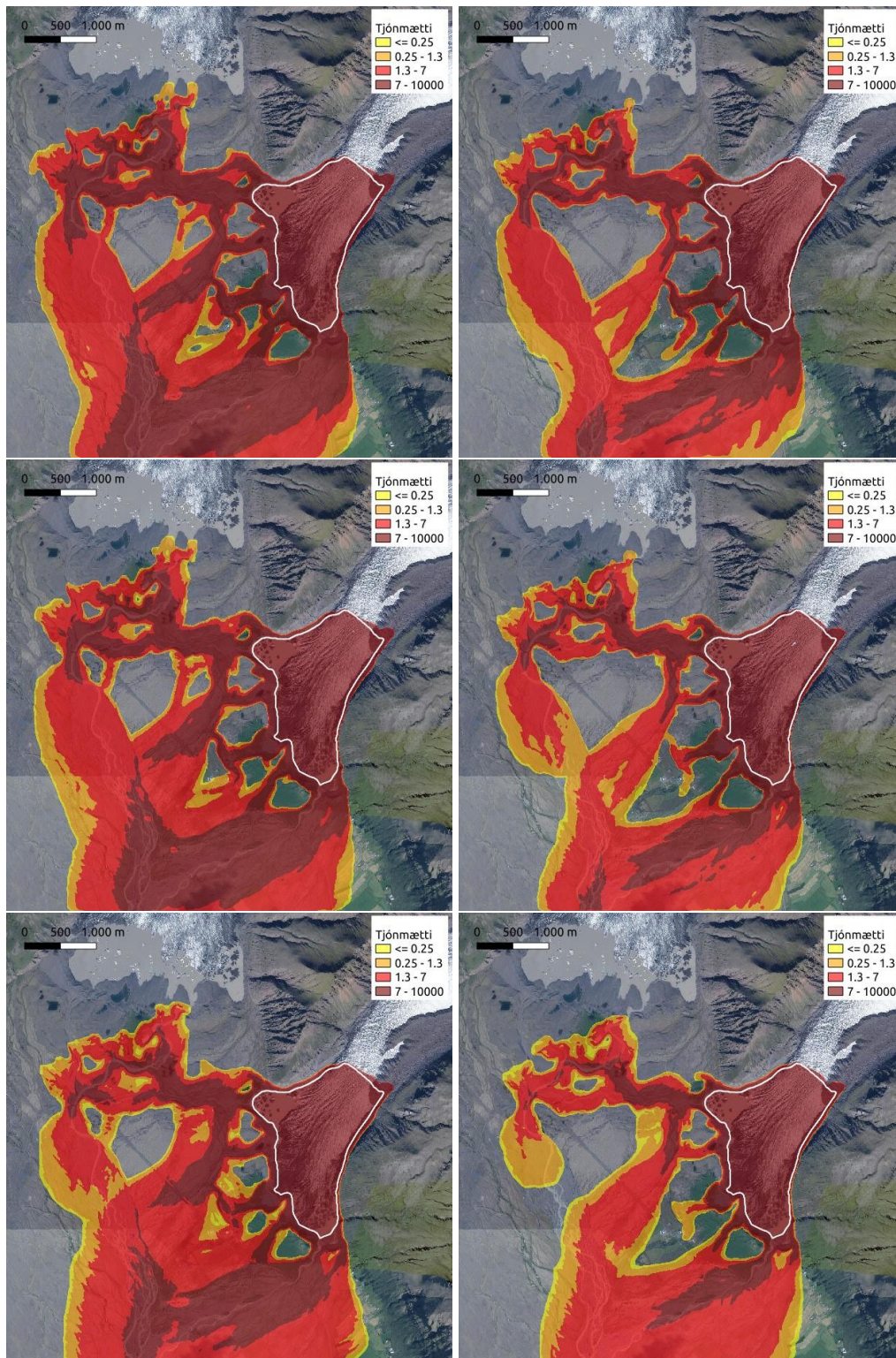
Mynd 38. Hámarkshraði berghlaups í líkanreikningum fyrir árið 2070 með Voellmy líkani fyrir $\mu = 0.05$ (vinstri), og r.avaflow fyrir 4° (miðja) og 5° (hægri) viðnámshorn á jökli og 11° utan jökuls.

stað bylgju sem nær 5–15 m hæð á vatninu. Hún gengur á land við útfallið við Hafrafell rúmri hálfri mínútu eftir að berghlaupið lendir í lóninu. Þar kemur hún að landi á 5–10 m/s hraða og rís í 20 m hæð yfir vatnsborðinu. Bylgjan kemur að útfalli Svínafellsár rúmri mínútu eftir að berghlaupið lendir í lóninu á 10–15 m/s hraða og rís í 15–20 m hæð yfir vatnsborðið.

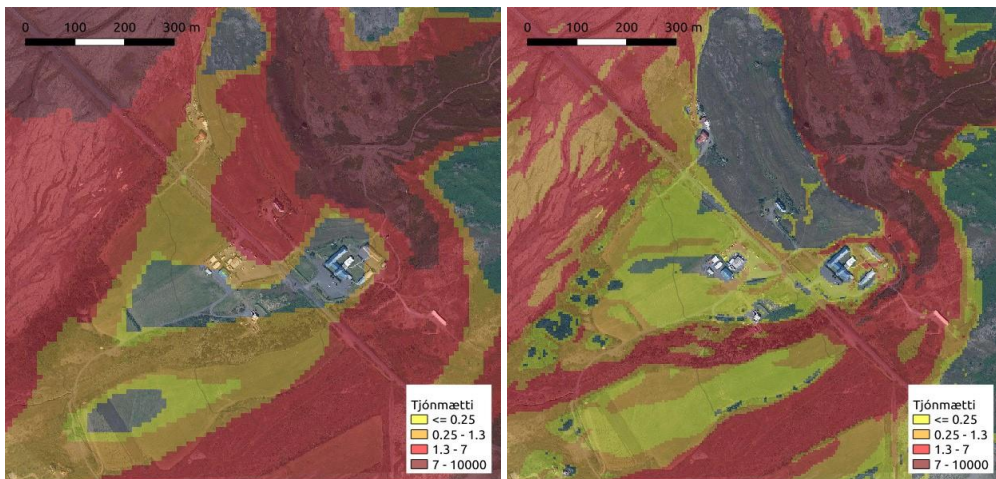
Mynd 39 sýnir reiknað tjónmætti fyrir 4° og 5° viðnámshorn og Manning stuðla $n = 0.03$, 0.05 og 0.1. Flóðbylgjan gengur á land og veldur miklum flóðum niður alla farvegi úr lóninu. Niður farveginn ofan Freysness kemur töluvert flóð. Ef berghlaupið lendir af minni krafti í lóninu (5° viðsnámshorn) beinir jökulgarðurinn flóðinu að mestu framhjá hótelinu þótt flóðvatn geti lagst upp að því. Ef berghlaupið lendir af miklum krafti í lóninu (4° viðsnámshorn) gæti flóðvatn lent á hóteli og flætt inn á bílaplan við bensínstöðina. Við Svínafell benda líkanreikningar til nokkuð meiri hættu við innstu tvö húsin en í reikningum fyrir árið 2040. Töluvert meira flóðvatn rennur þó úr lóninu og flóðið breiðir því meira úr sér á sléttunni og gæti lagst upp að næstu húsum innan við og flætt að veginum neðan við Svínafell 1.

Niðurstöður r.avaflow fyrir 4° viðnámshorn og $n = 0.03$ sýna hraðfara flóðvatnstungu sem kemur niður farveg ofan Freysness og fer yfir 8–12 m háan jökulgarðinn og á íbúðarhúsið neðan garðsins, sjá mynd 40. Reikningarnir eru gerðir á 10×10 m reiknineti, sem er ekki nógu þétt til að ná landslagi við jökulgarðinn og veldur útjöfnun landlíkansins því að garðurinn er lægri í reikningum en í raun. Þeir reikningar voru því endurteknir á 2×2 m reiknineti með HEC-RAS líkaninu, sem hentar betur í slíka nákvæmisreikninga en r.avaflow. Þessir nákvæmu reikningar benda til þess að íbúðarhúsið í Freysnesi sé vel

varið af jökulgarðinum. Með því að garðurinn beinir flóðvatninu frekar til austurs umlykur flóðtungan hótelið og rennur með þónokkrum krafti á bensínstöðina og planið framan við, eins og sést á mynd 40.

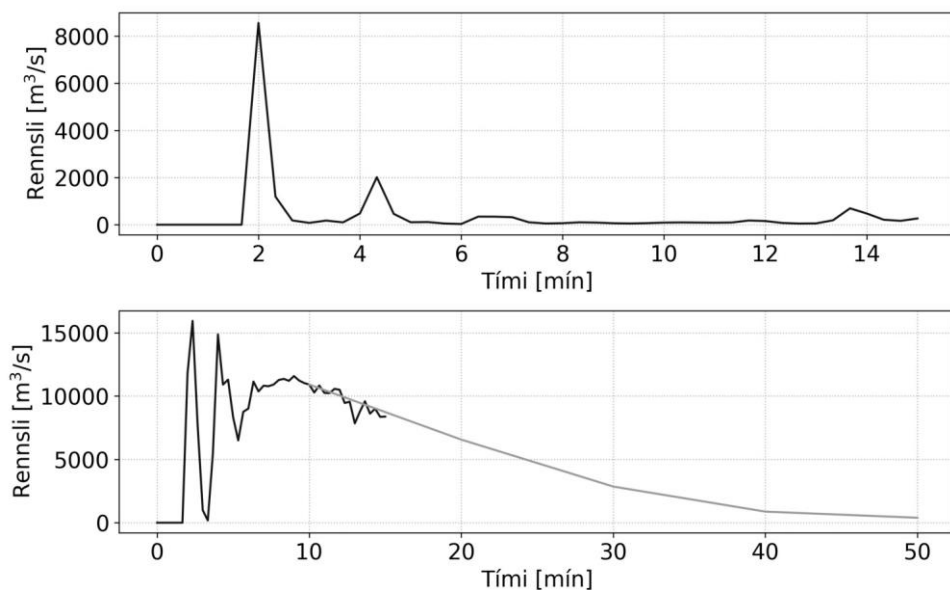


Mynd 39. Tjónmætti fyrir árið 2070. Niðurstöður í vinstri dálki eru fyrir 4° viðnámshorn á jökli en 5° í hægri dálki. Utan jökuls er viðnámshorn 11° . Efstu myndir eru fyrir Manning stuðul $n = 0.03$, í miðju er stuðullinn $n = 0.05$ en neðst $n = 0.1$.



Mynd 40. Tjónmætti fyrir sviðsmynd árið 2070, 4° viðnámshorn á jökli og Manning stuðul $n=0.03$. Vinstra megin eru niðurstöður úr *r.avaflow* á 10×10 m reiknineti en hægra megin úr HEC-RAS með 2×2 m upplausn. Athuga ber að í HEC-RAS vantar meginstrauma í flóðtungum sem liggja vestan og austan Freysness.

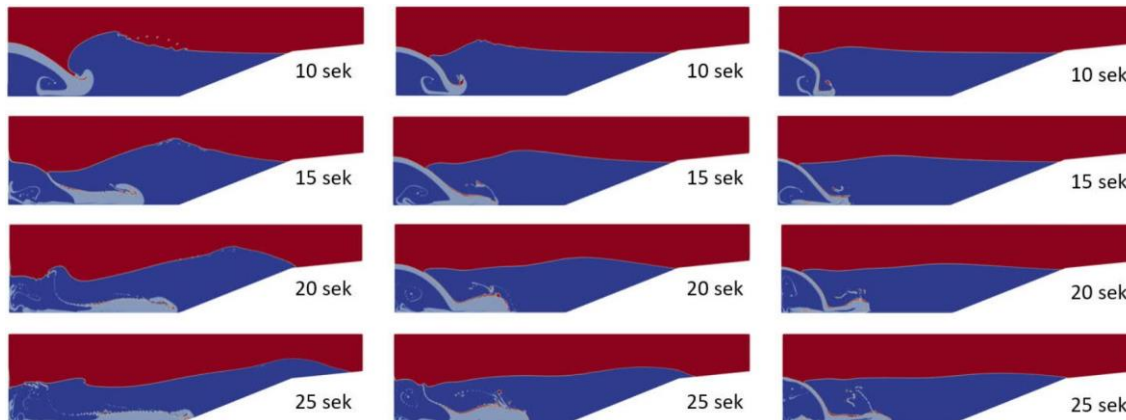
Mynd 41 sýnir rennsli um útfall úr lóninu við Hafrafell annars vegar fyrir sviðsmynd árið 2040 og 6° viðnám á jökli en hins vegar fyrir 2070 og 4° viðnám á jökli. Í fyrra tilfallinu, sem lýsir aðstæðum sem eru líklegar til að viðhaldast næstu tvo áratugi, fer tiltölulega lítill hluti berghlaupsins ofan í lónstæðið og einungis myndast skammvinn flóðbylgja á lóninu við það að hlaupið lendir á vatninu. Í því seinna, sem lýsir stöðunni eins og hún gæti verið eftir nokkra áratugi eða hálfa öld, fellur mikið berghlaupsefni í lónið og langvarandi flóð rennur úr lóninu við það að berghlaupið fyllir upp í hluta lónstæðisins. Í þessu tilfalli líkist vatnsritið helst jökulhlaupum svipuðum þeim sem verða t.d. við Sólheimajökul.



Mynd 41. Rennsli um útfall úr lóninu við Hafrafell fyrir tvær sviðsmyndir, efri myndin 2040 og 6° viðnám á jökli en neðri myndin 2070 og 4° viðnám. Gráa línan á neðri myndinni sýnir niðurstöður úr lengri keyrslu með stærra tímaskref.

6.3.4 Líkanreikningar með OpenFOAM

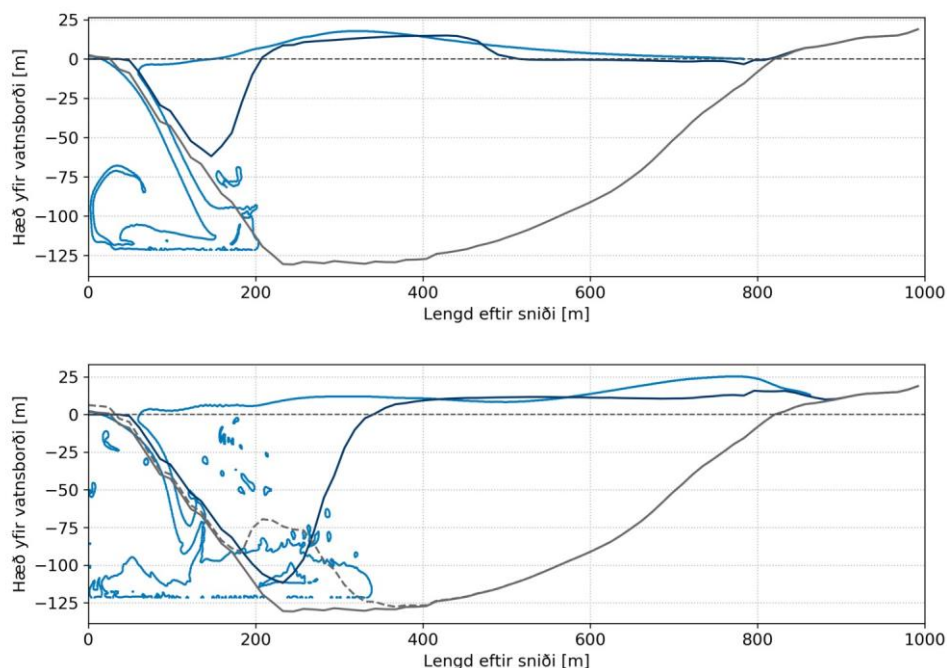
Tilraunir með vatn sem lendir á miklum hraða á fyrirstöðu sýna að það getur kastast gríðarlega hátt og með miklum gusugangi (Kristín Martha Hákonardóttir & Katrín Helga Ágústsdóttir, 2019). Gera má ráð fyrir að svipuðu máli gegni um berghlaup sem lendir á miklum hraða í kyrrstæðu vatni. Dýpsheilduð líkön líkt og ravaflow geta ekki lýst þessu ferli nákvæmlega heldur þarf að leysa Navier–Stokes jöfnurnar á þéttri neti þar sem umlykjandi loft er tekið með í reikninginn. Opni hugbúnaðurinn OpenFOAM býður upp á leiðir til slíkra hermana í allt að þremur víddum. Til þess að kanna hvort þessi annmarki á dýpsheilduðum líkönum hafi umtalsverð áhrif á hæð eða hraða flóðbylgjunnar var Verkís fengið til þess að herma flóðbylgjuna með OpenFOAM. Miðað var við sviðsmynd fyrir árið 2040 og sett var upp tvívítt líkan (lárétt–lóðrétt) á sniði í gegnum lónið (sniðið má sjá á mynd 44). Tveimur lausnaraðferðum var beitt, annars vegar þrífasa hermun þar sem skriðan er hermd sem seigur, þungur vökvi og henni sprautað lárétt inn um innstreymisop á tilteknum hraða. Hæð innstreymisopsins er breytileg til að stýra þykkt skriðunnar og rúmmálsflæði inn í líkanið. Hins vegar var beitt tvífasa hermun þar sem líkt er eftir skriðunni með stimpli sem gengur inn í lónið á föstum hraða. Í báðum uppsetningum voru gerðar hermanir fyrir þrjár mismunandi þykkir á skriðunni: 7, 14 og 28 m. Í þrífasa hermuninni var hraði hennar festur í 38 m/s í samræmi við niðurstöður Voellmy líkans. Í tvífasa hermuninni er hraði stimpilsins hins vegar breytilegur og reiknaður í samræmi við rúmmálsflæði. Hermunin með stimpli má segja að sé að nokkru leyti sambærileg við dýpsheilduð líkön.



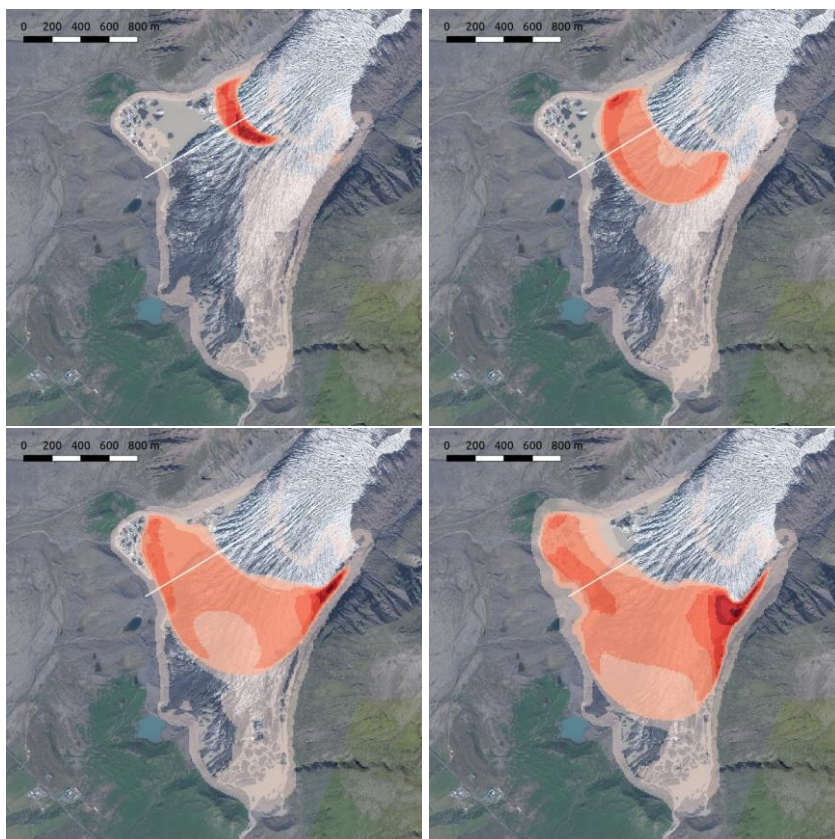
Mynd 42. Þrífasa OpenFOAM hermanir á flóðbylgju á Svínafellslóni. Rauður litur táknar loft, dökkblár vatn en ljósblár táknar skriðu. Vinstra megin eru sýndar niðurstöður fyrir 28 m þykka skriðu, í miðju fyrir 14 m en hægra megin 7 m.

Mynd 42 sýnir stöðu hermunarinnar 10 upp í 25 sekúndum eftir að berghlaupið gengur í lónið. Þar sést hvernig skriðan rennur skáhallt ofan í lónið og keyrir af stað bylgju sem er mishá eftir þykkt innstreymisins. Berghlaupið sekkur semsagt ekki umsvifalaust eftir að út í lónið er komið, enda á miklum hraða. Eins og rætt er fyrr í skýrslunni bendir þetta til þess að sú leiðrétting sem gerð var á landlíkaninu fyrir hermanir með dýpsheilduðum líkönum, þ.e. að útbúa jafnhallandi brekku frá jökuljaðri niður til botns, sé ágætis nálgun. Fyrir 7 m þykka skriðu myndast um 20 m há flóðbylgja á lóninu sem gengur á land á 15

m/s hraða 30 sekúndum eftir að berghlaupið lendir í lóninu. Fyrir 14m þykka skriðu myndast um 35m há bylgja á lóninu sem gengur á land á 20 m/s hraða eftir 25 sek. en fyrir 28 m þykka skriðu rís flóðbylgjan 60–70 m yfir lónborðið og gengur á land eftir u.þ.b. 22.5 sek og er þá á 20–30 m/s hraða. Fyrsta tilfellið kemst næst niðurstöðum hermana í r.avaflow, en þær sýna að berghlaupið er á bilinu 5–10 m þykkt þegar það lendir í lóninu. Niðurstöðunum ber ágætlega saman, í r.avaflow myndast um 15 m há bylgja á lóninu þegar berghlaupið er á 35–40 m/s þegar það kemur í lónið. Hún er á 10-15 m/s þegar hún gengur á land en þar er bylgjuhæðin nokkuð lægri en reiknast í OpenFOAM, sjá mynd 43. Niðurstöður hermana eru í öllum tilfellum að stimpillinn veldur lægri bylgju sem ferðast hægar. Þetta gæti bent til þess að dýpsheilduð líkön vanmeti flóðbylgjuhæðina. Á móti kemur að OpenFOAM reikningarnir eru gerðir á tvívíðu sniði eftir línu í gegnum lónið og því er ekkert tillit tekið til þess að bylgjan breiðir úr sér til hliðanna og þar með lækkar bylgjutoppurinn, sjá mynd 44 af útbreiðslu bylgjunnar eins og hún reiknast í r.avaflow. Frekari upplýsingar um OpenFOAM hermanirnar má finna í minnisblaði Verkís (Hafþór Örn Pétursson, 2020).



Mynd 43. Flóðbylgja á Svínafellslóni 15 og 30 sekúndum eftir að berghlaupið gengur í lónið í líkanreikningum með OpenFOAM (ljósblá lína) og r.avaflow (dökkblá lína). Botn lónsins er sýndur með grárri línu og útlínur skriðunnar í r.avaflow með grárri brotalínu. Ljósbláa línan úr OpenFOAM hjúpar einnig skriðuna eins og hún lítur út í reikningum.



Mynd 44. Flóðbylgja á Svínafellslóni í líkanreikningum með *r.avaflow* fyrir sviðsmynd árið 2040 og 4° viðnámshorn á jökli en 11° utan jökuls. Tímaskref milli mynda er 10 sekúndur. Hvíta línan sýnir staðsetningu sniðs sem reiknað er í OpenFOAM.

7 Hættumat

Svipuðu máli gegnir um hættu af völdum berghlaups úr Svínafellsheiði og ofanflóða að almennt má telja eðlilegt að lögð sé mest áhersla á hættu á slysum á fólki en tjón á eignum, röskun á starfsemi eða aðrir þættir skipti minna máli. Því verður athygli hér fyrst og fremst beint að dánarlíkum fólks sem á leið um, býr eða dvelst á svæðinu neðan Svínafellsjökuls og á leið um jökulinn sjálfan.

Líkanreikningar á berghlaupi úr Svínafellsheiði benda til þess að afar ólíklegt sé að sjálft berghlaupið nái niður af jöklinum og skapi hættu í byggð. Hættan er fyrst og fremst bundin við vatnsflóð sem berghlaupið kann að setja af stað ef það nær svo langt að það falli í lónið við sporð jökulsins. Umhverfi jökla er síbreytilegt og næstu áratugi eru fyrirsjáanlegar miklar breytingar sökum hlýnunar loftslags. Svínafellsjökull þynnist og hopar og á síðasta áratug hefur myndast lón framan við hann sem líklegt er að fari sístækkandi. Ef litið er til næstu 10–20 ára er hættan fremur lítil í þeirri byggð sem risin er á svæðinu, en þegar horft er til lengri tíma og staðan metin eftir t.d. 50 ár miðað við líklega þróun jökulsins, þá getur skapast hætta á umfangsmiklum vatnsflóðum niður helstu farvegi. Af þessum sökum eru dregnar hættumatslínur til skemmri og lengri tíma. Skammtímahættumat á við næstu u.þ.b. tvo áratugi og er til viðmiðunar um framkvæmdir sem tengjast núverandi umsvifum á svæðinu, s.s. viðhald hótels, viðbyggingar við hús (sem ekki fjölga íbúðum) og viðhald frístundahúsa. Hættumatslínur sem miðast við þróun næstu 50 árin eru hugsaðar til viðmiðunar við skipulagsákvæðanir til lengri tíma, s.s. nýjar byggingar, uppbyggingu nýrrar þjónustumiðstöðvar og þess háttar.

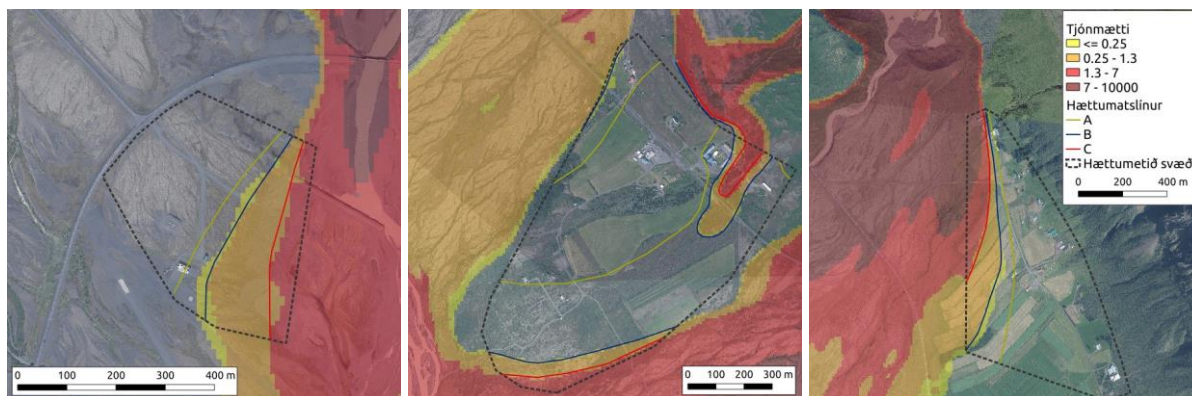
7.1 Áhætta í byggð

Hættumatslínur eru dregnar með hliðsjón af reiknuðu tjónmætti og áhættugreiningunni sem rædd er í kafla 5. B- og C-línur eru dregnar út frá tjónmætti sem fæst með Manning stuðli $n = 0.03$ og því viðnámshorni sem gefur svartsýnni niðurstöðu, en A-lína miðast við Manning stuðul $n = 0.1$, sem leiðir til mestu útbreiðslu. Þessar forsendur eru báðar tiltölulega varkárar eða svartsýnar, en á móti kemur að mikil óvissa er um bæði stærð og tíðni berghlaupsins og í líkanreikningum og má líta svo á að þessi óvissa auki á áhættuna. Hættumatið er fyrst og fremst gróft mat á hættunni sem kann að skapast og ástæða er til að fylgjast vel með vísbendinum um að yfirvofandi hætta kunni að vera á berghlaupi og grípa þá til rýmingar hættusvæðis miðað við svartsýnar forsendur.

7.1.1 Freysnes

Freysnes er nokkuð vel staðsett með tilliti til vatnsflóða. Þar standa íbúðarhús og bensínstöð í vari af Stóröldu, sem er 8–12 m hár jökulgarður, talinn myndaður fyrir um 2500 árum. Stóralda beinir flóðvatni til norðvesturs eftir farvegi Öldukvíslar og til suðvesturs í lítinn farveg sem sveigir framhjá byggingum Hótel Skaftafells. Á meðan Svínafellslón hefur ekki vaxið svo að það nái mikið norðar en suðurendi Hafrafells verður flóðbylgja á lóninu ekki nógu stór til þess að veita miklu flóðvatni niður farveg ofan Freysness. Uppi við jökulinn þarf flóðvatn að klífa 8–10 m áður en landi tekur að halla til

sjávar. Næstu tvo áratugi er því líklegt að flóðvatn sem kemur niður að Stóröldu verði fremur lítið og að garðurinn nái að bægra því að mestu frá fyrirbyggjandi byggð. Mynd 45 sýnir legu hættumatslína til skemmri tíma í Freysnesi. Vegna óvissu um hversu vel farvegurinn austan hótélbygginganna heldur að flóðvatni er A-lína dregin vestan hótelsins og húsnaði austan þess lendir einnig á A-svæði. Íbúðarhúsið í Freysnesi, bensínstöðin og byggingar sunnan hennar eru utan hættusvæða. Byggingar sem standa ofan vegar vestan við



Mynd 45. Skammtímahættumat undir Svínafellsjökli við núverandi aðstæður og líklega þróun til u.þ.b. 2040. Til hægri er Freysnes en vinstra megin eru bæirnir við Svínafell. Tjónmætti fyrir 5° viðnámshorn og Manning stuðul $n = 0.03$ er sýnt í bakgrunni.

Freysnes lenda á A-svæði. Frístundabyggðin (Freysnesbyggð) sunnan söluskálans er í vari fyrir flóðvatni á meðan lónin eru svipuð eða ívið stærri en nú og lendir stærsti hluti frístundabyggðarinnar því á A-svæði en eftir því sem lónið stækkar vex hættu á því að flóðvatn renni um farveg austan Freysness og í Svínafellsá. Við það færast jaðar flóðvatnsins nær byggðinni og leiðir til þess að syðsti hluti frístundabyggðarinnar er á B- og C-svæði í hættumati til næstu 20 ára.

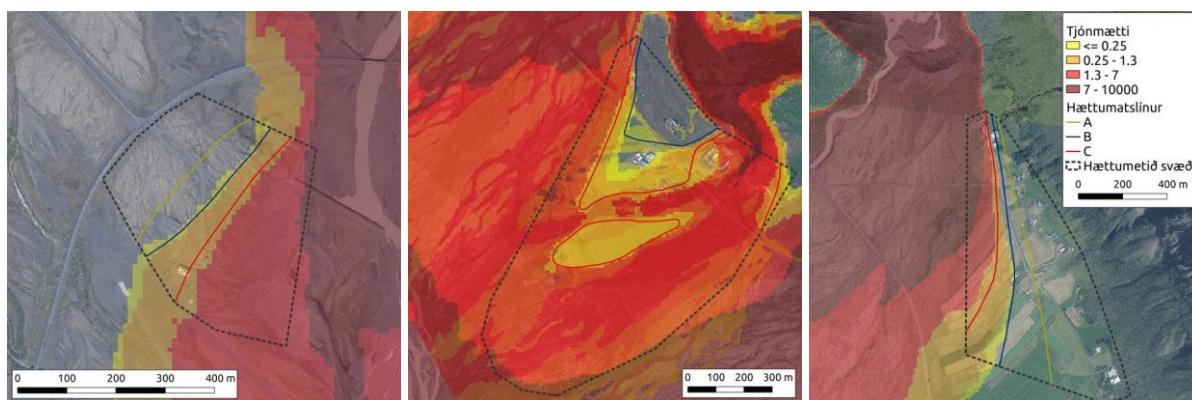
Langtímahættumat tekur mið af niðurstöðum líkanreikninga fyrir sviðsmynd fyrir árið 2070. Ef fram heldur sem horfir verður Svínafellslón þá orðið stórt og djúpt stöðuvatn. Nái berghlaupið að kastast í lónið gengur mikið vatnsflóð niður alla farvegi úr lóninu. Við Freysnes verður útbreiðsla flóðvatns mun meiri en í skammtímasviðsmynd og ólíklegt er að farvegurinn austan hótelsins geti haldið að því. Tillaga að langtímahættumati fyrir Freysnes er sýnd á mynd 46. Stærsti hluti svæðisins í kringum Freysnes lendir á C-svæði. Íbúðarhúsið undir Stóröldu er á A-svæði en söluskálinn og svæðið í kringum hann er á B-svæði auk íbúðarhúss við Freysnes 2. Hótelið liggur í farvegi hraðfara flóðtungu og lendir því á C-svæði. Frístundabyggðin lendir öll á C-svæði.

7.1.2 Svínafell

Flest húsanna í Svínafelli eru vel staðsett með tilliti til vatnsflóða, enda byggð í hlíðarfætinum undir Svínafellslón. Innstu húsin við Svínafell 3 (Breiðtorfu) eru þó í eða mjög nærri flóðfarveginum. Líkanreikningarnir benda til þess að ekki skapist hættu við

bæjarhúsin fyrr en lónið við Svínafellsjökul hefur stækkað svo mikið að það myndar samfelld stöðuvatn frá vestri til austurs, en það gæti gerst á næstu tveimur áratugum. Við þær aðstæður nær há flóðbylgja sem ferðast hefur yfir lónið landi við útfall Svínafellsár og getur flætt yfir syðsta jökulgarðinn og í rásinni milli hans og hlíðarfótarins. Tillaga að legu hættumatslína miðað við næstu tvo áratugi er sýnd á mynd 45. Innstu tvö húsin lenda á C-svæði og næstu hús innan við eru á A-svæði sem og vélageymsla vestan við tjaldstæðið.

Í sviðsmynd fyrir árið 2070 verður flóðbylgjan stærri og meira flóðvatn nær yfir jökulgarðinn svo útbreiðsla þess á sléttunni við Svínafell verður nokkuð meiri. Af þeim sökum færast hættumatslínur nær hlíðinni í langtímahættumati. Innstu tvö húsin eru eftir sem áður á C-svæði en húsin þar innan við ásamt vélageymslunni vestan tjaldsvæðisins færast á B-svæði. Þjónustuhús við tjaldsvæðið ásamt gistiskálum lenda á A-svæði en önnur bæjarhús lenda utan hættusvæða.



Mynd 46. Tillaga að langtímahættumati undir Svínafellsjökli við aðstæður sem gera má ráð fyrir að hafi skapast um 2070. Lengst til hægri er flugvallarsvæðið, þá Freysnes í miðju og lengst til vinstri eru bæirnir við Svínafell. Tjónmætti fyrir 4° viðnámshorn og Manning stuðul $n = 0.03$ er sýnt í bakgrunni, en það stýrir legu C- og B-lína. A-lína er teiknuð með hliðsjón af útbreiðslu flóðs fyrir Manning stuðul $n = 0.1$. Hættumatskort er að finna í viðauka III.

7.1.3 Flugvallarsvæðið

Flugvöllurinn í Freysnesi stendur nærri farvegi Skaftafellsár neðan þjóðveg 1 þar sem vegurinn að Skaftafelli mætir þjóðveginum. Til skemmri tíma skapa jökulhlaup ekki mikla hættu á flugvallarsvæðinu en verði nokkuð stórt flóð úr lóninu við Hafrafell gæti flóðvatn þó lagst að starfsmannaaðstöðu sem þar hefur verið reist, og lendir á A-svæði, auk þess að flæða yfir flugbrautirnar, sjá mynd 45. Til lengri tíma eykst hættan á stórflóðum í farvegi Skaftafellsár og hættusvæðin stækka umtalsvert. Í hættumati til lengri tíma lendir byggingin sem hýsir starfsmannaaðstöðu á C-svæði, flugskýli sem reist hefur verið lendir á A-svæði og líklegt er að flóðvatn fari yfir mestan hluta flugbrautanna.

7.2 Áhætta ferðafólks

Viðvera þeirra sem heimsækja nágrenni Svínafellsjökuls á ferðum sínum er jafnan miklu minni en fólks í heimahúsum á snjóflóðahættusvæðum. Ferðamenn sem leið eiga um svæðið koma flestir mjög sjaldan en leiðsögumenn eru á ferð jafnvel daglega. Áhætta bæði ferðamanna og leiðsögumanna af völdum berghlaups og mögulegrar flóðbylgju er annars eðlis en áhætta íbúa á hættusvæðum vegna ofanflóða. Hefð er fyrir því að miða við hærri áhættu þegar fólk tekur ákvörðun um að ferðast um svæði eða fyrirtæki ákveður að vera þar með starfsemi heldur en þegar um er að ræða hættu sem beinist að öllum íbúum ákveðins svæðis, jafnt börnum sem fullorðnum, eða hættu sem beinist að fólki í heimahúsum. Ferðafólk getur farið um miklu hættulegri svæði en henta til búsetu og taka þarf tillit til þess í hættumati.

Hættumat á ferðamannastöðum verður sífellt meira aðkallandi í takt við mikla fjölgun ferðamanna undanfarinn áratug og aukinnar viðveru þeirra á svæðum þar sem hætta getur skapast vegna náttúruhamfara. Í hættumati vegna berghlaupa í Öskju (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2016) var áhætta ferðamanna metin með hliðsjón af áætlaðri viðveru þeirra við Öskjuvatn. Sú áhætta reiknast mjög lítil þegar miðað er við stutta viðveru nokkrum sinnum eða ef til vill aðeins einu sinni á ævinni burtséð frá því hversu líklegur atburðurinn er og hversu hættulegur hann er lífi fólks. Gjarnan er um að ræða skipulagðar ferðir sem farnar eru með hópa ferðamanna dag hvern og jafnvel oft á dag. Ljóst er að þessi mikla umferð um hættusvæði leiðir til þess að líkur á slysum aukast mikið þótt áhætta hvers einstaks ferðamanns af dvöl á svæðinu sé vel innan ásættanlegra marka.

Til þess að taka visst tillit til hættu á hópslysum og gera ákveðnar öryggiskröfur til umfangsmikillar ferðapjónustu þar sem farið er með skipulagða hópa ferðamanna um svæði þar sem hætta kann að skapast er hér lagt til að reikna viðverðu ferðamanna í gistiheimilum og í skipulögðum skoðunarferðum eins og þeir nýti viðkomandi þjónustu allt sumarið eða allan ársins hring eftir því sem við á. Þannig verði öryggiskröfur til gistiheimila þær sömu og fyrir íbúðarhús sem heimamenn dvelja í allan ársins hring og miða við að öryggiskröfur sem uppfylla þarf fyrir ferðafólk í skoðunarferðum séu sambærilegar og fyrir starfsfólk eða leiðsögumenn sem fara e.t.v. í allar eða flestar ferðir sem í boði eru viðkomandi sumar eða viðkomandi ár. Einstaklingsáhætta ferðamanna í skipulögðum hópferðum (ferðapjónustufyrirtækja) er þá reiknuð út frá áætlaðri tíðni og lengd skipulagðra ferða.

Framhlaup og flóðbylgjur við Svínafellsjökul geta leitt til slyss á stórum hópi fólks sem fyrir tilviljun er statt á óheppilegum stað þegar slys verður. Oft er miðað við að meira tilefni sé til þess að koma í veg slíka hættu, svokallaða safnáhættu, en þegar um er að ræða hættu sem beinist að einum eða fáum einstaklingum í hvert sinn. Jafnvel þótt niðurstaða áhættugreiningar sé að áhætta einstaklinga sé viðunandi, miðað við þær forsendur sem stjórnvöld hafa ákveðið fyrir ofanflóð, kann að vera ástæða til þess að vara við hættunni og draga úr líkum á slysum með aðgerðum til þess að ekki verði slys sem einfalt hefði verið að koma í veg fyrir.

Nokkur fyrirtæki bjóða upp á jöklagöngur frá Skaftafelli allan ársins hring að undanskildum helstu frídögum. Ferðirnar voru áður farnar á Svínafellsjökul en slíkar skipulagðar ferðir lögðust af vegna berghlaupshættu árið 2018. Yfir mesta ferðamannatímamann á sumrin eru farnar margar ferðir á dag, en þegar haustar eru ferðirnar gjarnan tvær og yfir vetrartímamann aðeins ein á dag. Gera má ráð fyrir að ferðir falli niður vegna veðurs hluta úr ári og er hér miðað við að fimmta hver ferð falli niður. Að meðaltali eru ferðirnar því tvær daglega (gert er ráð fyrir 4 ferðum á dag í 4 mánuði, 2 ferðum í 5 mánuði og 1 ferð í 3 mánuði). Það svarar til 3–4 klst viðveru dag hvern á hugsanlegu hættusvæði, eða 12% á ársgrundvelli. Hér er einungis metin viðvera miðað við eitt fyrirtæki og þannig gert ráð fyrir að öll fyrirtæki sem bjóða upp á slíkar ferðir séu samtímis á jöklinum. Ennfremur er eingöngu miðað við stystu ferðirnar, þar sem viðdvöl á jökli er jafnan 1.5–2 klst en fyrirtækin bjóða einnig upp á lengri ferðir. Til að reikna áhættuna sem er samfara þessari viðveru á Svínafellsjökli er gert ráð fyrir að árlegar líkur á berghlaupi séu 1–10% og að dánarlíkur séu 50%. Þetta endurspeglar það að óvíst er hversu langt berghlaupið skriður áður en það stöðvast og því er mögulegt að þeir hópar sem á jöklinum væru séu fyrir tilviljun staddir utan farvegarins. Það er hins vegar nánast öruggt að fólk lifir það ekki að verða fyrir berghlaupi. Með þessum forsendum reiknast áhætta ferðafólks og leiðsögumanna í jöklagöngu $6-60 \cdot 10^{-4}$ á ársgrundvelli, sem er yfir mörkum sem sett eru um ásættanlega áhættu í reglugerð um ofanflóðahættumat. Stjórnvöld hafa hins vegar ekki sett viðmið um ásættanlega áhættu fyrir ferðamenn.

Auk jöklaganga hafa skipulagðar rútuferðir að Svínafellslóni verið starfræktar. Mörg fyrirtæki buðu upp á slíkar ferðir og sum oftast en einu sinni á dag. Ef miðað er við svipaða viðveru og fyrir skipulagðar jöklagöngur, um 12% á ársgrundvelli, 1–10% árlegum líkum á berghlaupi, 10–40% líkum á að berghlaup nái í lón og 50% dánarlíkum þeirra sem á svæðinu eru þegar flóðbylgja gengur yfir, þá reiknast áhættan $0.6-24 \cdot 10^{-4}$, sem einnig er yfir viðmiðunarmörkum um ásættanlega áhættu fyrir íbúa á ofanflóðahættusvæðum.

Áhætta ferðamanna sem koma á eigin vegum reiknast á einstaklingsgrunni. Ef ferðamaður kemur að Svínafellslóni á nokkurra ára fresti og tekur ekkert tillit til slysaáttu má ætla að hann geti dvalið í allt að nokkrar klukkustundir við lónið þar sem flóðbylgja gæti gengið á land. Hann gæti gengið um svæðið, numið staðar til að fræðast um svæðið, borða nesti og skoða áhugaverð jarðfræðileg fyrirbæri. Ef áhættu sem þessu er samfara er jafnað á nokkurra ára tímabil má meta hana u.þ.b. $(0.0001-0.005) \cdot 10^{-4}$ á ári (þá er miðað við tveggja klukkustunda viðdvöl ferðamanns og áhættunni jafnað yfir 10 ár, 1–10% árlegar líkur á berghlaupi, 10–40% líkur á að berghlaup nái í lón og 50% dánarlíkur).

Byggt á þeirri greiningu sem hér hefur verið lýst uppfyllir skipulögð ferðaþjónusta í nágrenni Svínafellsjökuls og ferðir á jökulinn sjálfan ekki viðmið um ásættanlega áhættu sem sett eru í reglugerð nr. 505/2000 um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða ásamt síðari breytingum. Hins vegar hafa stjórnvöld ekki sett viðmið um ásættanlega áhættu fyrir ferðamenn, sambærileg þeim sem sett eru í reglugerðinni, og eiga við um íbúa og starfsfólk á svæðum þar sem hætt er við ofanflóðum.

Rétt er að hafa í huga að hætta vegna berghlaups á Svínafellsjökul og flóðbylgju af þess völdum er ekki eini áhættupátturinn sem ræður líkum á slysum á fólki á og í nágrenni Svínafellsjökuls vegna náttúruhamfara. Öræfajökull er virk megineldstöð og þar geta orðið eldgos sem fylgir slysaþætta fyrir þá sem staddir eru á svæðinu. Eldgosi í Öræfajökli getur fylgt gushlaup niður Svínafellsjökul, eins og fjallað er um í hættumati vegna jökulhlaupa í Öræfum og Markarfljóti í tengslum við eldgos undir jökli (Pagneux o.fl., 2015). Slík hlaup geta verið mjög hættuleg fólki eins og ýmis dæmi sanna, t.d. er talið að gjóskuhlaup í Öræfajökulsgosinu 1362 hafi náð yfir 10 km frá fjallinu (Ármann Höskuldsson & Þorvaldur Þórðarson, 2007; Ármann Höskuldsson, 2012). Ekki hefur verið lagt tölulegt mat á þessa áhættu.

8 Niðurstaða

Líkanreikningar á berghlaupi úr Svínafellsheiði benda til þess að afar ólíklegt sé að sjálft berghlaupið nái niður af jöklinum og skapi hættu í byggð. Hættan er fyrst og fremst bundin við vatnsflóð sem berghlaupið kann að setja af stað ef það nær að svo langt að það falli í lónið við sporð jökulsins. Ef litið er til næstu 10–20 ára er hættan fremur lítil í þeirri byggð sem risin er á svæðinu, nema vestast við Svínafell, en þegar horft er til lengri tíma og staðan metin eftir t.d. 50 ár miðað við líklega þynningu og hopun jökulsins og stækkun lónsins við sporð hans, þá getur skapast hættu á umfangsmiklum vatnsflóðum niður helstu farvegi. Til næstu tveggja áratuga má gera ráð fyrir því að hættu af vatnsflóðum sé fremur lítil á flugvallarsvæðinu og í Freysnesi, þar lenda nokkrar byggingar á A-svæði. Á Svínafelli 3 (Breiðtorfa) lenda skemma og íbúðarhús á C-svæði, næstu byggingar utan við lenda að hluta á A-svæði en önnur mannvirki eru að mestu utan hættusvæða.

Langtímahættumat miðast við niðurstöður líkanreikninga fyrir fremur svartsýnt mat á hraða berghlaupsins þegar það skellur í lóninu og hversu stór hluti þess endar í lónstæðinu. Ekki er gert ráð fyrir að mikið berghlaupsefni eða jökulís blandist flóðvatninu þegar áhrif flóðsins er reiknuð. Í langtímahættumati lendir hótelið í Freysnesi á C-svæði, auk bílskúrs við Freysnes 2, tveggja húsa við Svínafell 3 (Breiðtorfa), starfsmannaaðstöðu á flugvallarsvæðinu og frístundabyggðarinnar Freysnesbyggðar. Á B-svæði lenda íbúðar- og útihús við Svínafell 3 (Bölti), vélageymsla vestan tjaldsvæðisins í Svínafelli, söluskálinn í Freysnesi og byggingar þar í kring, auk Freysness 2 og útihúsa ofan vegar vestan Freysness. Önnur hús í Freysnesi lenda á A-svæði, þjónustuhús og gístiskálar á tjaldsvæðinu, auk flugskýlis á flugvallarsvæðinu.

Skipulögð ferðapjónusta í nágrenni Svínafellsjökuls og ferðir á jökulinn sjálfan uppfylla ekki viðmið um ásættanlega áhættu, sem sett er í reglugerð nr. 505/2000 um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða ásamt síðari breytingum. Áhætta einstakra ferðamanna sem heimsækja svæðið á eigin vegum er þó undir viðmiðunarmörkum en engu að síður er ástæða til þess að setja upp merkingar sem vara við hættunni til að draga úr slysaáætlu. Þess ber þó að geta að reglugerðin nær ekki til slíkrar ferðapjónustu en lagt er til að þau viðmið séu notuð, eins og lýst er hér að framan.

Þótt hér sé miðað við fremur svartsýnt mat á hættunni er ekki hægt að útiloka að stærra berghlaup falli. Einnig gæti hraði hlaupsins eða skriðlengd orðið meiri eða jökulhlaupið stærra en hér hefur verið miðað við. Slíku þarf að taka á með rýmingarviðbúnaði til að draga úr áhættu. Berghlaup falla sjaldnast án fyrirboða. Þetta sýna dæmin og liggur það til grundvallar viðbúnaði við berghlaupahættu hjá öðrum þjóðum, t.d. Norðmönnum. Hættumatið miðar við tiltölulega slæma sviðsmynd til þess að stýra byggðapróun og langtímaskipulagi þannig að áform um frekari uppbyggingu færist af svæðum sem berskjölduð eru fyrir jökulhlaupi úr lóninu og yfir á hættuminni svæði. Til að koma í veg fyrir slys sem orðið gætu ef berghlaupið verður stærra eða kemur af meiri krafti í lónið verður að beita öflugri vöktun og rýmingarviðbúnaði.

Hörfun jökulsins og þróun sprungunnar þegar fram í sækir kalla á að hættumatið sé endurskoðað reglulega. Á þessu er tekið að vissu marki með því að leggja annars vegar fram hættumat til skamms tíma til viðmiðunar um nýtingu svæðisins á næstu árum og hins vegar varfærnara hættumat þegar til lengri tíma er litið til þess að hafa til hliðsjónar við skipulag svæðisins. Á næstu áratugum eru fyrirsjáanlegar miklar breytingar vegna hlýnandi loftslags. Svínafellsjökull þynnist og hopar og á síðasta áratug hefur myndast lón framan við hann sem líklegt er að fari sístækkandi þannig að hætta af völdum jökulhlaups fari vaxandi. Einnig er hugsanlegt að breytingar verði á sprungunni, t.d. þannig að hreyfingin herði á sér eða að svæðið sem er á hreyfingu brotni upp og fari að hreyfast í nokkrum einingum sem síga fram á mismunandi hraða. Einnig er mögulegt að berghlaup verði og hættan minnki í kjölfar þess. Nauðsynlegt er að fylgjast með þessari þróun og meta á nokkurra ára fresti hvort tilefni er til þess að endurskoða hættumatið.

Hér hefur ekki verið fjallað um mótvægisáðgerðir til þess að verja byggðina undir Svínafellsjökli fyrir flóðum af völdum berghlaups og aðeins stuttlega um aðrar öryggisráðstafanir eins og rýmingu húsnæðis ef talin er yfirvofandi hætta á berghlaupi. Unnt er að reisa fyrirstöður eða varnargarða til þess að beina vatnsflóði frá byggingum, t.d. hótelinu við Freysnes og einhverjum bygginganna við flugvöllinn við Skaftafell. Einkum virðast aðstæður við Stóröldu bjóða upp á möguleika á því að beina flóðstraumnum frá byggingum með því að framlengja jökulgarðinn til suðausturs. Í framhaldi af hættumatinu sem hér hefur verið lýst þarf að fara fram greining á möguleikum á slíkum varnarviðbúnaði.

Eins og kom fram í inngangi hafa komið fram nýjar upplýsingar um svæðið frá því að hættumatið var unnið á árunum 2018–2020. Mjög lítil hreyfing hefur verið á svæðinu síðan mælitæki voru sett upp. Þá hafa verið gerðar töluverðar rannsóknir á svæðinu á vegum háskóla Íslands, m.a. stöðugleika greining á hlíðinni. Ekki hefur verið tekið tilliti til þessara upplýsinga heldur byggir hættumatið á þeim líkanreikningum sem þegar hafa verið gerðir. Gera má ráð fyrir að vegna lítilla hreyfinga og stöðugleika hlíðarinnar á meðan farg er á jöklinum að hætta til skamms tíma sé eitthvað minni en hættumatið hér gerir ráð fyrir. Aftur á móti hefur þessa litla hreyfing nú ekki áhrif á hættumatið til langs tíma enda sýna stöðugleikagreining hvernig hlíðin getur aftur orðið óstöðug þegar fargið fer og jökullinn þynnist. Vegna mögulega dýpri skriðflatar og stærra berghlaups gæti hætta aftur á móti verið eitthvað meiri. Ekkert þessara atriða myndi þó breyta því að sé horft til langs tíma eru stór C-svæði neðan Svínafellsjökuls en undirstrika óvissuna sem er í hættumatinu.

9 Þakkir

Joaquín M. C. Belart, Landmælingum Íslands, Doris Hermle, Háskólanum í Innsbruck, og Loftmyndir ehf. lögðu til landlíkön af Svínafellsjökli og Steinsholtsjökli. Eyjólfur Magnússon, Jarðvísindastofnun Háskólans, lagði til landlíkan af landi undir Svínafellsjökli byggt á íssjármælingum. Martin Mergili, Háskólanum í Vín, veitti margvíslega aðstoð við líkanreikninga og túlkun niðurstaðna. Hafþór Örn Pétursson og Kristín Martha Hákonardóttir, á verkfræðistofunni Verkís, unnu líkanreikninga á flóðbylgju með OpenFOAM og komu að túlkun niðurstaðna þeirra.

Heimildir

- Allen, S.K., Schneider, D. & Owens, I.F. (2009). First approaches towards modelling glacial hazards in the Mount Cook region of New Zealand's Southern Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9**, 481–499.
- Ármann Höskuldsson & Þorvaldur Þórðarson (2006). *Eldgos í Öræfajökli 1362 og myndun gushlaupa í upphafi eldgoss*. Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands. Reykjavík.
- Ármann Höskuldsson & Þorvaldur Þórðarsson (2007). *The eruption of Öræfajökull 1362 and destruction of the district Hérað, SE-Iceland*. (Ágrip) Cities on Volcanoes 5, Shimabara, Japan, p 176.
- Ásdís Helgadóttir, Emmanuel Pagneuz, Matthew J. Roberts, Esther H. Jensen & Eiríkur Gíslason (2015). Öræfajökull volcano: Numerical simulations of eruption-induced jökulhlaups using the Samos flow model. Í: Emmanuel Pagneuz, Magnús T. Guðmundsson, Sigrún Karlsdóttir & Matthew J. Roberts (ritstj.): *Volcanogenic floods in Iceland. An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain* (bls 73–99). Reykjavík: IMO, IES-UI, NCIP-DCPEM.
- Áslaug Geirsdóttir, G.H. Miller, Y. Axford & Sædís Ólafsdóttir (2009). Holocene and latest Pleistocene climate and glacier fluctuations in Iceland. *Quaternary Science Reviews*, **28**, 2107–2118. doi: 10.1016/j.quascirev.2009.03.013.
- Ben-Yehoshua, D. (2016). *Drone imaging of a potentially hazardous slope on Svínafellsheiði, SE-Iceland. A new approach to mass movement prediction*. Lokaskýrsla, Nýsköpunarsjóður námsmanna, 26 bls.
- Ben-Yehoshua, D., Þorsteinn Sæmundsson, Sigurður Erlingsson, Jón Kristinn Helgason, Reginald L. Hermanns, Eyjólfur Magnússon, Benedikt G. Ófeigsson, Joaquín M.C. Belart, Ásta Rut Hjartardóttir, Halldór Geirsson, Snævarr Guðmundsson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Finnur Pálsson, Vincent Drouin, og Bergur H. Bergsson (2023). The destabilization of a large mountain slope controlled by thinning of Svínafellsjökull glacier, SE Iceland. *Jökull*, **73**, 1–33.
- Ben-Yehoshua, D., Sigurður Erlingsson, Þorsteinn Sæmundsson, Reginald L. Hermanns, Eyjólfur Magnússon, Robert A. Askew og Jóhann Helgason, J. (2025). The Destabilizing Effect of Glacial Unloading on a Large Volcanic Slope Instability in Southeast Iceland. *GeoHazards*, **6**(1), 1–30.
<https://doi.org/10.3390/geohazards6010001>
- Belart, J.M.C. (2018). *Mass balance of Icelandic glaciers in variable climate*. PhD ritgerð, Jarðvísindadeild Háskóla Íslands, 171 bls.
- Belart, J.M.C., Magnússon, E., Berthier, E., Aðalgeirsdóttir, G. & Jóhannesson, T. (2019). The geodetic mass balance of Eyjafjallajökull ice cap for 1945–2014: processing guidelines and relation to climate. *Journal of Glaciology*, **65**, 395–409.

- Berger, M.J., George, D.L., LeVeque, R.J. & Mandli, K.T. (2011). The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Advances in Water Resources*, **34**, 1195–1206.
- Chinn, T.J. & McSaveney, M.J. (1992). *The Mount Cook rock avalanche of 14 December 1991*.
Institute of Geological and Nuclear Sciences Ltd., New Zealand.
- Chow, V.T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw Hill.
- Crandell, D.R. & Fahnstock, R.F. (1965), *Rockfalls and avalanches from Little Tahoma Peak on Mount Rainier, Washington*. Geological Survey Bulletin 1221A. 30 bls.
- Delaney, K.B. & Evans, S.G. (2014). The 1997 Mount Munday landslide (British Columbia) and the behaviour of rock avalanches on glacier surfaces. *Landslides*, **11**, 1019–1036.
- Deline, P., Hewitt, K., Reznichenko, N. & Shugar, D. (2015). Rock Avalanches onto Glaciers. Í John F. Shroder & Tim Davies (ritstj.) *Landslide Hazards, Risks, and Distasters* (263–319). Elsevier Inc.
- Evans, D.J.A., Archer, S. & Wilson, D.J.H. (1999). A comparison of the lichenometric and Schmidt hammer dating techniques based on data from the proglacial areas of some Icelandic glaciers. *Quaternary Science Reviews*, **18**, 13–41. doi: 10.1016/S0277-3791(98)00098-5.
- Evans, S.G. & Clague, J.J. (1988). Catastrophic rock avalanches in glacial environments. Í C. Bonnard (ritstj.) *Landslides*, Proceedings, 5th International Symposium on Landslides, 2, 1153–1158.
- Evans, S.G. & Clague, J.J. (1999). *Rock avalanches on glaciers in the Coast and St. Elias Mountains, British Columbia*. Proceedings of the 13th annual Vancouver Geotechnical Society Symposium, Vancouver, British Columbia 28. maí 1999.
- Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Helgi Björnsson & Snævar Guðmundsson (2012). Removing the ice cap of Öräfajökull central volcano, SE-Iceland: Mapping and interpretation of bedrock topography, ice volumes, subglacial troughs and implications for hazards assessments. *Jökull*, **62**, 131–150.
- Gerhart, P.M., Gross, R.J. & Hochstein, J.I. (1993). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (2. útgáfa). Addison-Wesley.
- Geertsema, M., Hungr, O., Schwab, J.W. & Evans, S.G. (2006). A large rockslide–debris avalanche in cohesive soil at Pink Mountain, northeastern British Columbia, Canada. *Engineering Geology*, **83**, (1–3), 64–75.
- Guðbjörn Margeirsson (2014). *Myndun landforma framan við Steinsholtsjökul eftir hlaupið 1967*. B.S. ritgerð, Jarðvísindadeild Háskóla Íslands, 35 bls.

- Guðfinna Aðalgeirsdóttir, Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Þorsteinn Þorsteinsson, Belart Joaquín M. C., Tómas Jóhannesson, Hrafnhildur Hannesdóttir, Oddur Sigurðsson, Andri Gunnarsson, Bergur Einarsson, Etienne Berthier, Schmidt Louise Steffensen, Hannes H. Haraldsson, Helgi Björnsson (2020). Glacier Changes in Iceland From ~1890 to 2019. *Frontiers in Earth Science*, **8**.
- Guðmundur Kjartansson (1968). Steinsholtshlaupið 15. janúar 1967. *Náttúrufræðingurinn*, **37**, 120–169.
- Hafþór Örn Pétursson (2020). *Berghlaup í Svínafellslón*. Verkís minnisblað ID 138529, 21. apríl 2020.
- Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson og Trausti Jónsson (2018). *Lofslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla vísindanefndar um lofslagsbreytingar*. Reykjavík, Veðurstofa Íslands.
- Halldór Geirsson, Michelle M. Parks, Benedikt G. Ófeigsson, Vincent Drouin, Siqi Li, Freysteinn Sigmundsson, Þóra Árnadóttir, Ásta R Hjartardóttir, Maggý Lárentínusdóttir, Páll Einarsson, Peter Schmidh, Finnur Pálsson, Andy Hooper & Kristín Jónsdóttir (2018). *Reawakening of the Örfajökull volcano in Iceland: deformation signals of stress triggers and intrusive activity*. EGU General Assembly, Abstract EGU2018-15438, Vínarborg, 8–13. apríl.
- Haukur Tómasson (1996). The jökulhlaup from Katla in 1918. *Annals of Glaciology*, **22**, 249– 254.
- Heim, A. (1932). *Bergsturz und Menschenleben*. Naturforschenden Gesellschaft, Zürich.
- Þýðing Skermer, N.A. (1989). *Landlides and Human Lives*. Bi-Tech Publishers, Vancouver, BC, 196 bls.
- Helgi Björnsson (2009). *Jöklar á Íslandi*. Bókaútgáfan Opna, Reykjavík, 479 bls.
- Hermle, D. (2015). *Impact of climate change and the 2007 rock avalanche on the glacial behaviour of Morsárjökull, southeast Iceland. Analysis of multitemporal remote sensing data (1982–2014)*. Meistararitgerð, Institute of Geography, University of Innsbruck.
- Hewitt, K. (1988). Catastrophic landslide deposits in the Karakoram Himalaya, *Science*, **242**, 64–67.
- Hewitt, K., Clague, J.J. & Deline, P. (2011). Catastrophic rock slope failures and mountain glaciers. Í Singh, V.P., Singh, P., Haritashaya, U.K. (ritstj.). *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Springer, Dordrecht, 112–126.
- Hjalti J. Guðmundsson (1997). A review of the Holocene environmental history of Iceland. *Quaternary Science Reviews*, **16**, 81–92.
- Hjalti J. Guðmundsson (1998). *Holocene glacier fluctuations and tephrochronology of the Örfæfi district, Iceland*. Óbirt doktorsritgerð, University of Edinburgh, 272 bls.

- Holm, K., Bovis, M. & Jakob, M. (2004). The landslide response of alpine basins to post-Little Ice Age glacial thinning and retreat in southwestern British Columbia. *Geomorphology*, **57**, 201–216.
- Hrafnhildur Hannesdóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir & Snævarr Guðmundsson (2015a). Variations of southeast Vatnajökull ice cap (Iceland) 1650–1900 and reconstruction of the glacier surface geometry at the Little Ice Age maximum. *Geogr. Ann. A*, **97**(2), 237–264.
- Hrafnhildur Hannesdóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Guðfinna Aðalgeirsdóttir og Snævarr Guðmundsson (2015b). Changes in the southeast Vatnajökull ice cap, Iceland between ~1890–2010. *Cryosph.*, **9**, 565–585, doi:10.5194/tc-9-565-2015.
- Hsü, K.J. (1975). Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. *Geol. Soc. Am. Bull.*, **86**, 129–140.
- Huggel, C., Zraggen-Oswald, S., Haeberli, W., Kääb, A., Polkvoj, A., Galushkin, I. & Evans, S.G. (2005). The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **5**, 173–187.
- Hungr, O. & Evans, S.G. (1996). *Rock avalanche runout prediction using a dynamic model*. In Senneset (ritstj.) Proceedings, 7th international symposium on landslides, Trondheim, 1, 233–238.
- Jóhann Helgason (2007). *Berggrunnskort af Skaftafelli*. Jarðfræðistofan Ekra.
- Jóhann Helgason & Robert A. Duncan (2001). Glacial-interglacial history of the Skaftafell region, Southeast Iceland, 0–5 Ma. *Geology*, **29**, 179–782.
- Jóhann Helgason & Robert A. Duncan (2013). Stratigraphy, ^{40}Ar – ^{39}Ar dating and erosional history of Svínafell, SE-Iceland. *Jökull*, **63**, 33–54.
- Jón Kristinn Helgason, Sigríður Sif Gylfadóttir, Sveinn Brynjólfsson, Harpa Grímsdóttir, Ármann Höskuldsson, Þorsteinn Sæmundsson, Ásta Rut Hjartardóttir, Freysteinn Sigmundsson og Tómas Jóhannesson (2019). Berghlaupið í Öskju, 21. júlí 2014. *Náttúrufræðingurinn*, **89** (1–2), bls. 5–21.
- Kirkbride, M.P. & Dugmore, A.J. (2008). Two millenia of glacier advances from southern Iceland dated by tephrochronology. *Quaternary Research*, **70**, 398–411. doi: 10.1016/j.yqres.2008.07.001.
- Kristín Martha Hákonardóttir, Tómas Jóhannesson & Peter Sampl (2005). Líkanreikningar á jökulhlaupum niður suðurhlíðar Eyjafjallajökuls. Í: Magnús T. Guðmundsson & Ágúst Gunnar Gylfason (ritstj.): *Hættumat vegna eldgosa og hlaupa frávestanverðum Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli* (181–192). Ríkislögreglustjórn og Háskólaútgáfan.
- Kristín Martha Hákonardóttir & Katrín Helga Ágústsdóttir (2019). *The design of slushflow barriers: Laboratory experiments*. International Symposium on Mitigation Measures

against Snow Avalanches and Other Rapid Gravity Mass Flows, Siglufjörður, Iceland, April 3–5, 2019.

Kristín Jónsdóttir, Magnús Tumi Guðmundsson, Melissa Pfeffer, Andri Stefánsson, Michelle Parks, Thomas Lecocq, Ragnar Heidar Thrastarson, Halldór Geirsson, Sara Barsotti, Eyjólfur Magnússon, Finnur Pálsson, Matthew Roberts, Joaquin M.C. Belart, Kristín Vogfjörð, Freysteinn Sigmundsson, Sigurlaug Hjaltadóttir, Benedikt Ófeigsson, Guðrún Larsen, Thordis Hognadóttir, and Björn Oddsson and the Glacier & Volcano Monitoring Team at IMO. (2018). *Reawakening of Öraefajökull volcano monitored using a multidisciplinary approach*.

EGU General Assembly, Abstract EGU2018-17969, Vínarborg, 8–13. apríl.

Kristján Jónasson, Sven Þ. Sigurðsson & Þorsteinn Arnalds (1999). *Estimation of Avalanche Risk*. Veðurstofa Íslands, rit 99001.

Larsen, D.J., Miller, G.H., Áslaug Geirsdóttir & Þorvaldur Þórðarsson (2011). A 3000-year varved record of glacier activity and climate change from the proglacial lake Hvítárvatn, Iceland. *Quaternary Science Reviews*, **30**, 2715–2731. doi: 10.1016/j.quascirev.2011.05.026.

Lipovsky, P.S., Evans, S.G., Clague, J.J., Hopkinson, C., Couture, R., Bobrowsky, P., Ekström, G., Demuth, M.N., Delaney, K.B., Roberts, N.J., Clarke, G. & Schaeffer, A. (2008). The July 2007 rock and ice avalanches at Mount Steele, St. Elias Mountains, Yukon, Canada. *Landslides*, **5**, 445–455.

Magnús Tumi Guðmundsson, Guðrún Larsen, Ármann Höskuldsson & Ágúst Gunnar Gylfason (2008) Volcanic hazards in Iceland. *Jökull*, **58**, 251–268.

McSaveney, M. (2002). Recent rock falls and rock avalanches on Mount Cook National Park, New Zealand. Í Evans, S.G., DeGraff, J.V. (ritstj.), *Catastrophic Landslides: Effects, Occurrence, and Mechanisms*, Reviews in Engineering Geology, **15**, 35–70.

Mergili, M., Fischer, J.-T., Krenn, J. & Pudasaini, S.P. (2017). r.avaflow v1, an advanced opensource computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flow. *Geoscientific Model Development*, **10**, 553–569.

Oddur Sigurðsson (2005). Variations of termini of glaciers in Iceland in recent centuries and their connection with climate. Í Caseldine, Russell, Harðardóttir and Knudsen (ritstj.), *Iceland – Modern processes and past environments*, 241–255, Elsevier, London.

Oddur Sigurðsson & Richard S. Williams (1991). Rockslides on the Terminus of „Jökulsargilsjökull”, Southern Iceland. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*, **73**, 129–140. Pacione, M. (1999). *Applied Geography: Principles and Practice*. Routledge, London, 664 bls.

- Pagneux, E., Gudmundsson, M.T., Karlsdóttir, S. & Roberts, M.J. (ritstj.) (2015). *Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain*. Reykjavík: IMO, IES-UI, NCIP-DCPEM.
- Pagneux, E. & Roberts, M.J. (2015). Öræfi district and Markarfljót outwash plain: Rating of flood hazards. Í Emmanuel Pagneux, Magnús T. Guðmundsson, Sigrún Karlsdóttir & Matthew J. Roberts (ritstj.), *Volcanogenic floods in Iceland: An assessment of hazards and risks at Öræfajökull and on the Markarfljót outwash plain* (101–122). Reykjavík: IMO, IES-UI, NCIP-DCPEM.
- Post, A.S. (1965). Alaskan Glaciers: recent observations in respect to the earthquake-advance theory. *Science*, **148**, 366–368
- Pudasaini, S.P. (2012). A general two-phase debris flow model. *Journal of Geophysical Research*, **117**, F03010. doi:10.1029/2011JF002186.
- 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*, **29**(11–12), 1363–1381.
- Scheidegger, A.E. (1973). On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mech.*, **5**, 231–236.
- Schneider, D., Bartelt, P., Caplan-Auerbach, J., Christen, M., Huggel, C. & Mcardell, B.W. (2010). Insights into rock-ice avalanche dynamics by combined analysis of seismic recordings and a numerical avalanche model. *Journal of Geophysical Research*, **115**, F04026.
- Schneider, D., Huggel, C., Haeberli, W. & Kaitna, R. (2011). Unraveling driving factors for large rock-ice avalanche mobility. *Earth Surface Processes and Landforms*, **36**, 1948–1966.
- Sharma, K., Self, S., Blake, S., Thordarson, Th. & Larsen, G. (2008). The AD 1362 Öræfajökull eruption, S.E. Iceland: Physical volcanology and volatile release. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **178**, 719–739.
- Shreve, R.L. (1966). Sherman landslide, Alaska. *Science*, **154**, 1639–1643.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason & Tómas Jóhannesson (2016). *Hættumat vegna berghlaupa í Öskju*. Veðurstofa Íslands, skýrsla VÍ 2016-007.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jihwan Kim, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Ármann Höskuldsson, Tómas Jóhannesson, Carl Bonnevie Harbitz & Finn Løvholt (2017). The 2014 Lake Askja rockslide-induced tsunami: Optimization of numerical tsunami model using observed data. *J. Geophys. Res. Oceans*, **122**, doi: 10.1002/2016JC012496.
- Sigurður Björnsson (1982). Lifði engin kvik kind eftir. Í Helga Þórarinsdóttir, Ólafur H. Óskarsson, Sigurður Steinþórsson og Þorleifur Einarsson (ritstj.), *Eldur er í norðri*.

- Afmælisrit helgað Sigurði Þórarinssyni sjötugum 8. janúar 1982*. Sögufélag, Reykjavík, 353–359.
- Sigurður Þórarinsson (1943). Oscillations of Icelandic glaciers in the last 250 years. *Geografiska Annaler*, **25**, 1–54.
- Sigurður Þórarinsson (1958). The Öræfajökull eruption of 1362. *Acta Nat. Isl.*, **II**, 2, 1–100.
- Sosio, R., Crosta, G.B., Chen, J.H. & Hungr, O. (2012). Modelling rock avalanche propagation onto glaciers. *Quaternary Science Reviews*, **47**, 23–40.
- Snorri Páll Kjaran, Sigurður Lárus Hólm, Eric M. Myer, Tómas Jóhannesson & Peter Sampl (2009). Modelling of subaerial jökulhlaups in Iceland. Í: D. Burr, P. Carling, & V. Baker (ritstj.), *Megaflooding on Earth and Mars* (265–272). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CB09780511635632.014
- Snævarr Guðmundsson, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson, Þorsteinn Sæmundsson og Tómas Jóhannesson (2019). Terminus lagoons on the south side of Vatnajökull ice cap, SE-Iceland. *Jökull*, **69**, 1–34.
- Stoffel, M. & Huggel, C. (2012). Effects on climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography*, **36**(3), 421–439.
- Tómas Jóhannesson, Helgi Björnsson, Eyjólfur Magnússon, Sverrir Guðmundsson, Finnur Pálsson, Oddur Sigurðsson, Þorsteinn Þorsteinsson og Etienne Berthier (2013). Ice-volume changes, bias estimation of mass-balance measurements and changes in subglacial lakes derived by lidar mapping of the surface of Icelandic glaciers. *Ann. Glaciol.*, **54**(63), 63–74, doi: 10.3189/2013AoG63A422.
- Umhverfissráðuneytið (2000). *Reglugerð nr. 505/2000 um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða með síðari breytingum*.
- Þorsteinn Sæmundsson (2017) *Hreyfingar á sprungu á Svínafellsheiði*. Minnisblað, 12. september 2017.
- Þorsteinn Sæmundsson (2018) *Sprungur á Svínafellsheiði*. Minnisblað, 24. apríl 2018.
- Þorsteinn Sæmundsson, Ingvar A. Sigurðsson, Halldór G. Pétursson, Helgi Páll Jónsson, Armelle Decaulne, Matthew J. Roberts & Esther Hlíðar Jensen (2011). Bergflóðið sem féll á Morsárjökul 20. mars 2007 – Hverjar hafa afleiðingar þess orðið?. *Náttúrufræðingurinn*, **81**(3–4), 131–141.
- Þorsteinn Sæmundsson & Guðbjörn Margeirsson (2016) *Frequency, triggering factors and possible consequences of mass movements on outlet glaciers in Iceland*. EGU General Assembly Conference Abstracts 18, bls. 4704.
- Þorsteinn Sæmundsson, Costanza Morino, Jón Kristinn Helgason, Susan J. Conway & Halldór G. Pétursson (2018). The triggering factors of the Móafellshyrna debris slide in northern Iceland: intense precipitation, earthquake activity and thawing of mountain permafrost. *Science of the Total Environment*, **621**, 1163–1175.

Þorsteinn Sæmundsson, Páll Einarsson, Joaquin M.C. Belart, Ásta Rut Hjartardóttir, Eyjólfur Magnússon, Halldór Geirsson, Finnur Pálsson, Gro Pedersen & Vincent Druin (2020). *Slope deformation above the Tungnakvíslarjökull outlet glacier in western part of the Mýrdalsjökull glacier*. 34th Nordic Geological Winter Meeting. Oslo, Norway, 8–10th January 2020.

Viðauki I. Listi yfir berghlaup

Tafla 6. Gagnasafn um skriður á jökla víða um heim úr Schneider o.fl., (2011) og Deline o.fl., (2015).

Staður	Ár	H [m]	L [m]	H/L	V [10^6 m^3]	V _{berg}	Athugasemdir
Triplet	1717	1657	7450	0.22	12.0	12.0	
Flutschhorn	1901	2305	6001	0.38	5.0	5.0	
Brenva Glacier (ITA)	1920	2660	5621	0.47	10.0	10.0	
Becca di Lusney (ITA)	1952	1650	4000	0.41	1.0	1.0	
Tim Williams Glacier (CAN)	1956	940	3700	0.25	3.0	3.0	
Pandemonium Creek (CAN)	1959	1940	8105	0.24	6.0	5.5	
Little Tahoma Peak (USA)	1963	1655	6798	0.24	10.7	10.7	
Schwan Glacier 1 (USA)	1964	1385	6476	0.21	27.0	27.0	
Sherman Glacier (USA)	1964	978	5962	0.16	12.0	10.1	
Martin River 2	1964		4000	0.28	11.9	11.9	
Martin River 3	1964		5000	0.28	8.6	8.6	
Martin River 4	1964		5900	0.40	10.7	10.7	
Martin River 5	1964		3700	0.32	3.6	3.6	
Martin River unnamed 1	1964		4300	0.40	4.4	4.4	
Martin River unnamed 2	1964		3600	0.31	4.0	4.0	
Sioux Glacier 1 (USA)	1964	1350	4500	0.30	7.0	7.0	
Steller Glacier 1 (USA)	1964	1150	6700	0.17	20.0	20.0	
Bering Gl 1	1964	1882	5703	0.33	8.0	8.0	
Bering Gl 2	1964	2007	6748	0.30	10.5	10.5	
Bering Gl 3	1964	2279	5664	0.40	7.0	7.0	
Allen Glacier 4 (USA)	?1965	1116	7659	0.15	23.0	23.0	
Fairweather Glacier (USA)	?1965	3350	10197	0.33	26.0	26.0	
Steinsholtsjökull (ISL)	1967	460	3200	0.14	15.0	15.0	Vegalengd reiknuð frá brotsári að miðjum Steinsholtsdal þar sem berghlaupsurð er greinileg (utar eru staksteinar sem vatnsflóðið bar fram)
Devastation Glacier (CAN)	1975	1170	6568	0.18	13.0	13.0	
Ama Dablam (NPL)	1979	1400	3000	0.47	1.0	1.0	
Tweedsmuir Glacier (USA)	1979	500	1350	0.37			
Jarvis Glacier (USA)	1979	720	2440	0.30			
Towagh Glacier (USA)	1979	880	4350	0.20			

Tafla 6. Gagnasafn um skriður á jökla víða um heim úr Schneider o.fl., (2011) og Deline o.fl., (2015).

Staður	Ár	H [m]	L [m]	H/L	V [10 ⁶ m ³]	V _{berg}	Athugasemdir
W Fork Robertson Glacier (USA)	1981	700	3500	0.20	2.2	2.2	
Beelzebub Gl. (NZL)	1984	402	1012	0.40	2.0	2.0	
Glacier de Bualtar 1 (PAK)	1986	1490	4808	0.31	10.0	10.0	
Glacier de Bualtar 2 (PAK)	1986	1430	3700	0.39	7.0	7.0	
Glacier de Bualtar 3 (PAK)	1986	1300	2400	0.54	3.0	3.0	
North Creek (CAN)	1986	745	2683	0.28	2.0	1.5	
Frobisher Glacier I	1990	3100	0.34				
Frobisher Glacier II	1991	2400	0.41				
Aroaki/Mount Cook (NZL)	1991	2720	7008	0.39	60.0	12.0	
Mount Fletcher 1 (NZL)	1992	1364	3806	0.36	10.0	8.0	
Mount Fletcher 2 (NZL)	1992	1440	3800	0.38	5.0	5.0	
Kshwan Glacier (CAN)	?1992	790	2250	0.35	3.2	3.2	
Mount Munday (CAN)	1997	900	4545	0.20	5.0	3.2	
Brenva Glacier (ITA)	1997	2325	5849	0.40	6.5	2.0	
Howson Glacier 2 (CAN)	1999	1300	2700	0.48	1.0	1.0	
Tsar Mountain (CAN)	2000	668	2546	0.26	4.0	1.6	
Kolka-Karmadon (RUS)	2002	2050	19400	0.11	100.0	12.0	Upprunarúmmál 18.5-27 Mm3, þar af 46-58% ís
McGinnis Peak Glacier N (USA)	2002	1718	10960	0.16	20.0	18.4	
McGinnis Peak Glacier S (USA)	2002	1904	11463	0.17	11.0	11.0	
Black Rapids Glacier E (USA)	2002	997	4605	0.22	14.0	12.0	
Black Rapids Glacier M (USA)	2002	827	4478	0.18	14.0	10.0	
Black Rapids Glacier W (USA)	2002	724	3307	0.22	10.0	6.0	
West Fork Glacier N (USA)	2002	737	3296	0.22	4.0	4.1	
West Fork Glacier S (USA)	2002	1005	4249	0.24	5.0	4.4	
Vanch Valley, Pamir (Tajikistan)	2002	1549	9138	0.17	20.0	20.0	
Punta Thurwieser (ITA)	2004	1296	2697	0.48	2.5	2.5	
Mount Steller (USA)	2005	2433	9009	0.27	50.0	40.0	
Mount Steele (CAN)	2007	1852	5996	0.31	30.0	30.0	
Morsárjökull (ISL)	2007	600	2200	0.27	4.5	4.5	
Mount Miller (USA)	2008	910	4507	0.20	22.0	22.0	Blanda jökulíss og bergs í upptökum

Tafla 6. Gagnasafni um skriður á jökla víða um heim úr Schneider o.fl., (2011) og Deline o.fl., (2015).

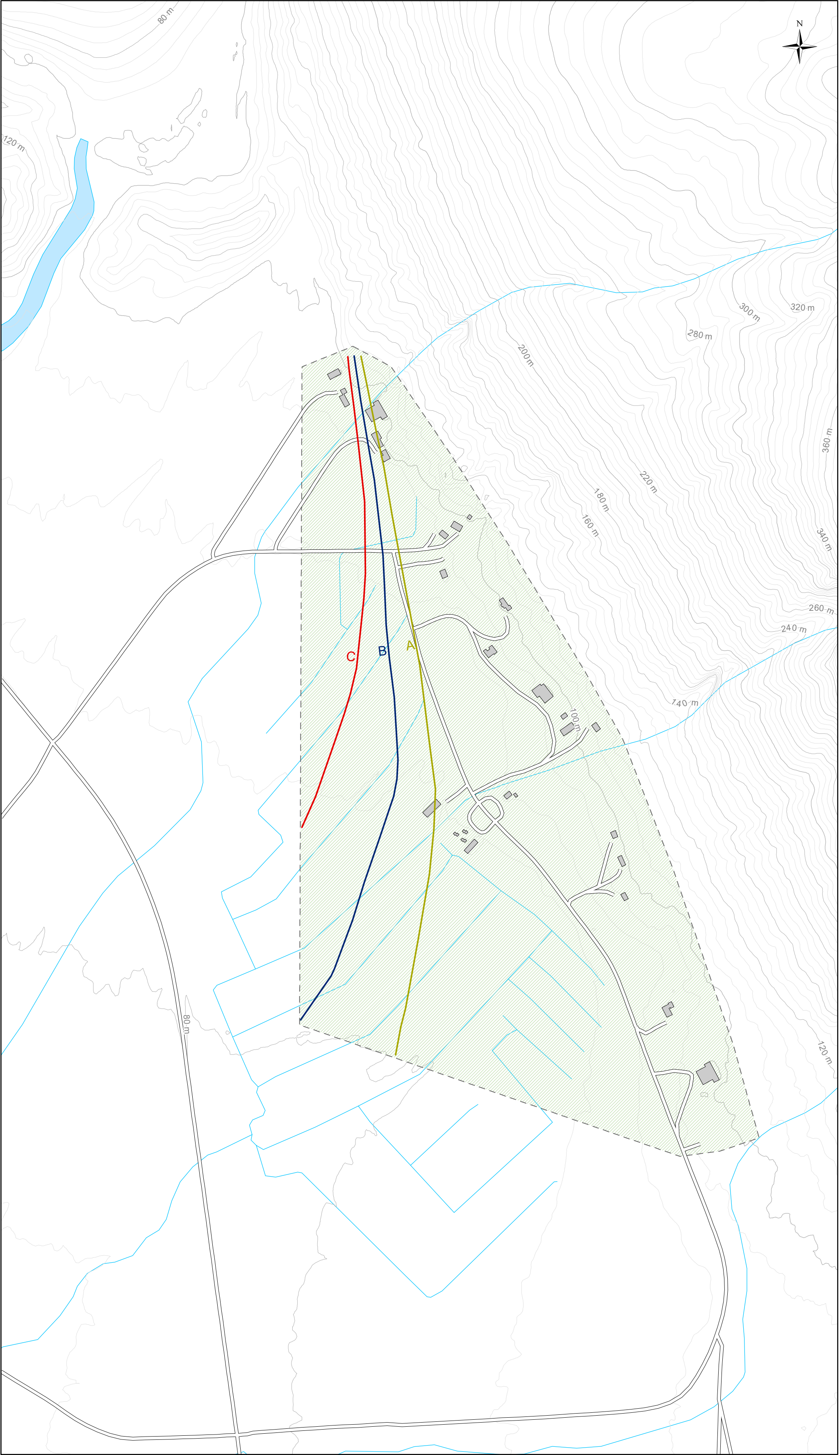
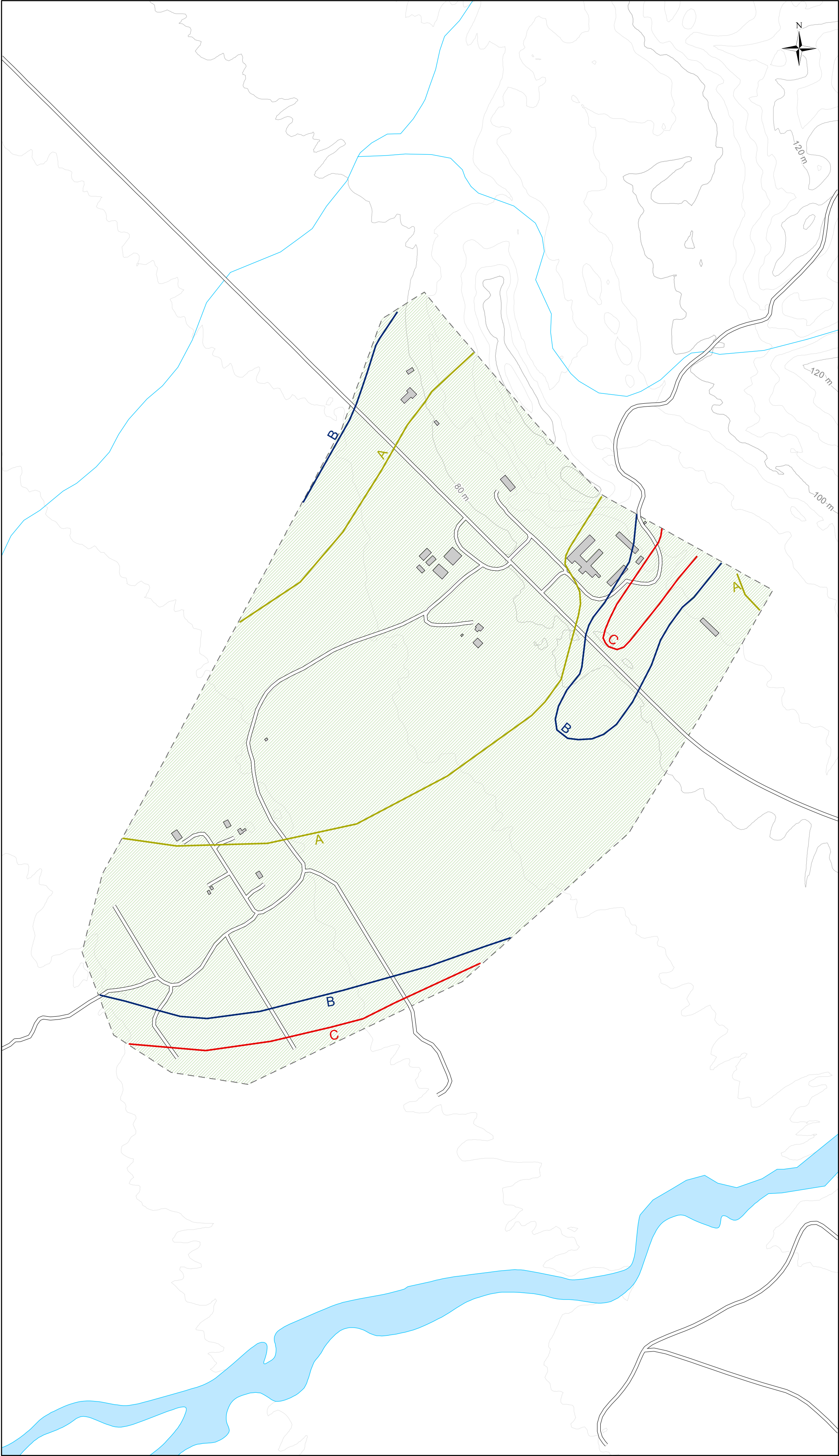
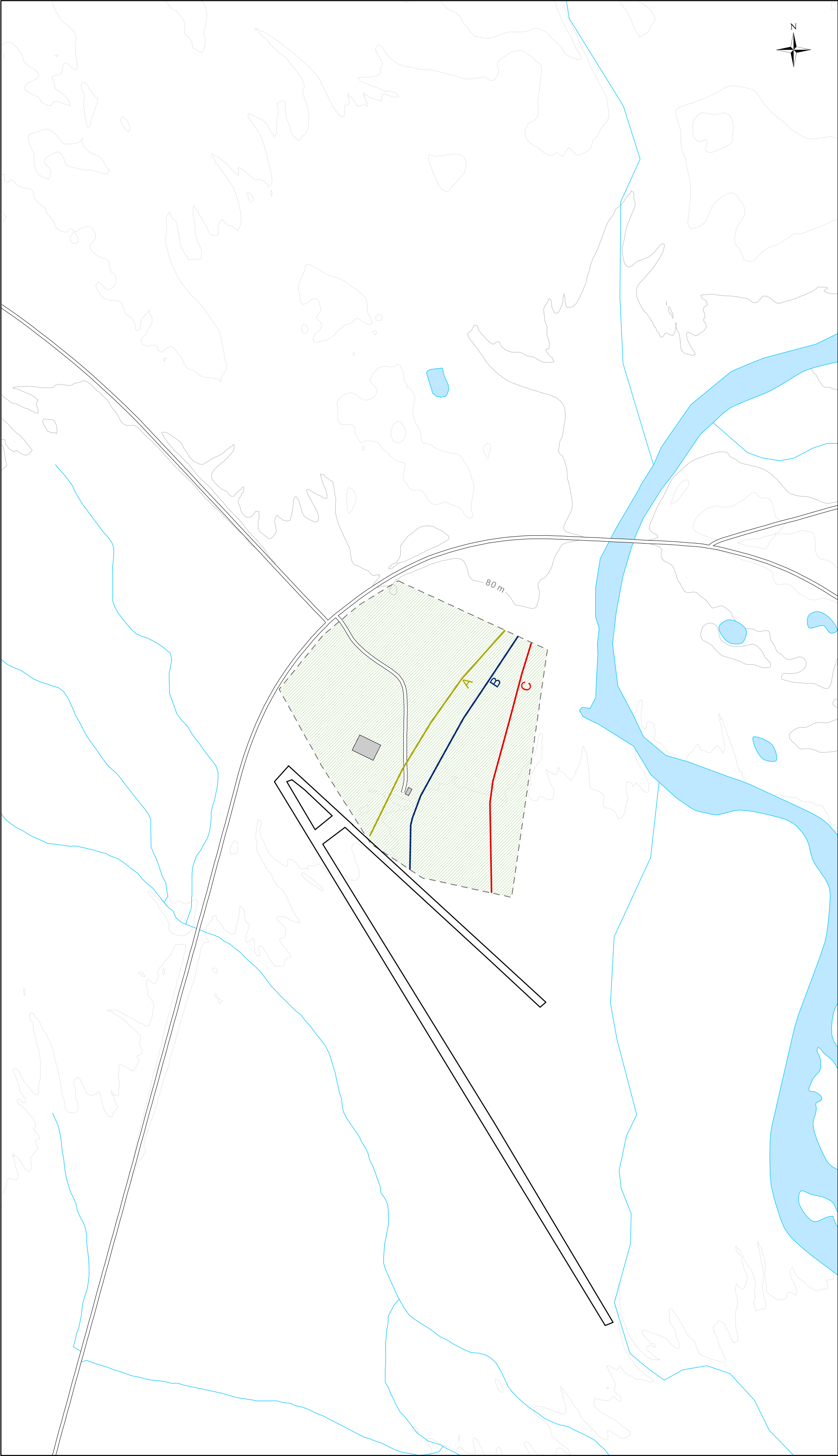
Staður	Ár	H [m]	L [m]	H/L	V [10^6 m^3]	V _{berg}	Athugasemdir
Mount Steller north 1 (USA)	2008	822	1767	0.47	1.5	1.5	Blanda jökulíss og bergs í upptökum
Mount Steller north 2 (USA)	2008	476	2200	0.22	1.5	1.5	
Mount Meager (CAN)	2010	2180	12700	0.17	48.5	48.5	Nær í mikið efni úr jökulurð neðan brotsárs (moraine) og verður að aurskriðu
Lituya Mountain (USA)	2012	2500	9000	0.28	20.0	20.0	Blanda jökulíss og bergs í upptökum
Mount Dixon (NZL)	2013	850	2800	0.30	1.0	1.0	

Viðauki II. Kvörðun líkanstika í Voellmy líkani

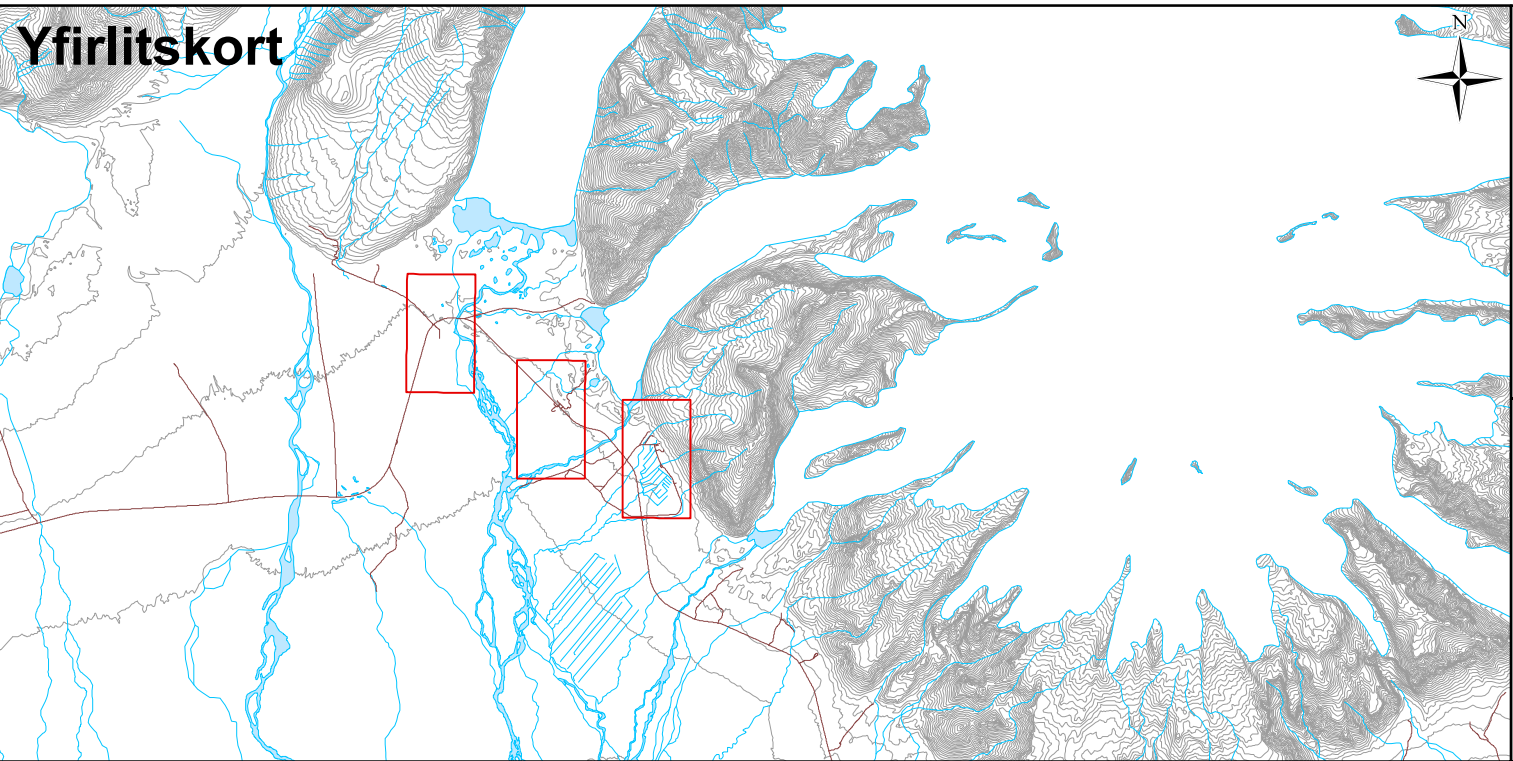
Tafla 7. Kvörðun á líkanstuðlum í Voellmy líkani fyrir skriður á jökla, skv. ýmsum heimildum.

Staður	Ár	Heildar- rúmmál	H/L	μ	ξ	Halli á Líkan jökli	Heimild
Becca di Luseney (ITA)	1952	1	0.41	0.04	1250	24	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Sherman Glacier (USA)	1964	12	0.16	0.03	1000	1.5	DAN Hungr & Evans, (1996)
				0.03	2000		DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Martin River 2 (USA)	1964	11.9	0.28	0.05	1500	2	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Martin River 3 (USA)	1964	8.6	0.28	0.1	1000	5.7	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Martin River 4 (USA)	1964	10.7	0.4	0.03	1000	2	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Martin River 5 (USA)	1964	3.6	0.32	0.06	1000	2	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Martin River unnamed 1 (USA)	1964	4.4	0.4	0.04	1000	5–6	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Martin River unnamed 2 (USA)	1964	4.0	0.31	0.05	1000	2	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Bering Gl 2 (USA)	1964	10.5	0.3	0.03	1000	5	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Bering Gl 3 (USA)	1964	7.0	0.4	0.05	1000	5	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Aroaki/Mount Cook (NZL)	1991	60	0.39	0.15	4000	3.5-4.5	RAMMS Schneider o.fl., (2010)
Mount Fletcher 1 (NZL)	1992	10	0.36	0.19	2100	11	RAMMS Allen o.fl., (2009)
Mount Munday (CAN)	1997	5	0.2	0.07	1000	6	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
				0.085	850		DAN-W Delaney & Evans, (2014)
				0.08	1050		DAN-3D Delaney & Evans, (2014)
Brenva Glacier (ITA)	1997	6.5	0.4	0.06	1000	6.8	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
				0.2	2000		RAMMS Allen o.fl., (2009)
Kolka–Karnadon (RUS)	2002	22	0.11	0.05	2700		RAMMS Allen o.fl., (2009)
Black Rapids Glacier E (USA)	2002	14	0.22	0.03	1000	2-2.5	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Black Rapids Glacier W (USA)	2002	10	0.22	0.08	1000	2-2.5	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Punta Thurwieser (ITA)	2004	2.5	0.48	0.05	1000		DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Mount Steller (USA)	2005	50	0.27	0.05	1500	3.2	DAN-3D Sosio o.fl., (2012)
Mount Steele (CAN)	2007	30	0.31	0.052	1525	2.75	DAN-3D Lipovsky o.fl., (2008)

Viðauki III. Hættumatskort



Yfirlitskort

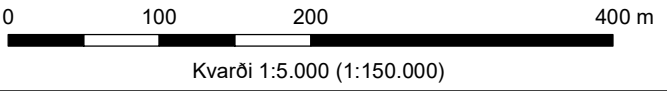


Svínafellsjökull

Hættumatskort - byggð svæði
Hættumat vegna berghlaupa til ~2040

Kortinu fylgja greinargerðir þar sem gerð er grein fyrir helstu forsendum, aðferðafræði og niðurstöðum hættumatsins.
Hættumat fyrir svæðið neðan Svínafellsjökuls vegna berghlaups á Svínafellsheði. Greinargerð með hættumatskort.
Skýrsla VI 2025-002, júní 2025.

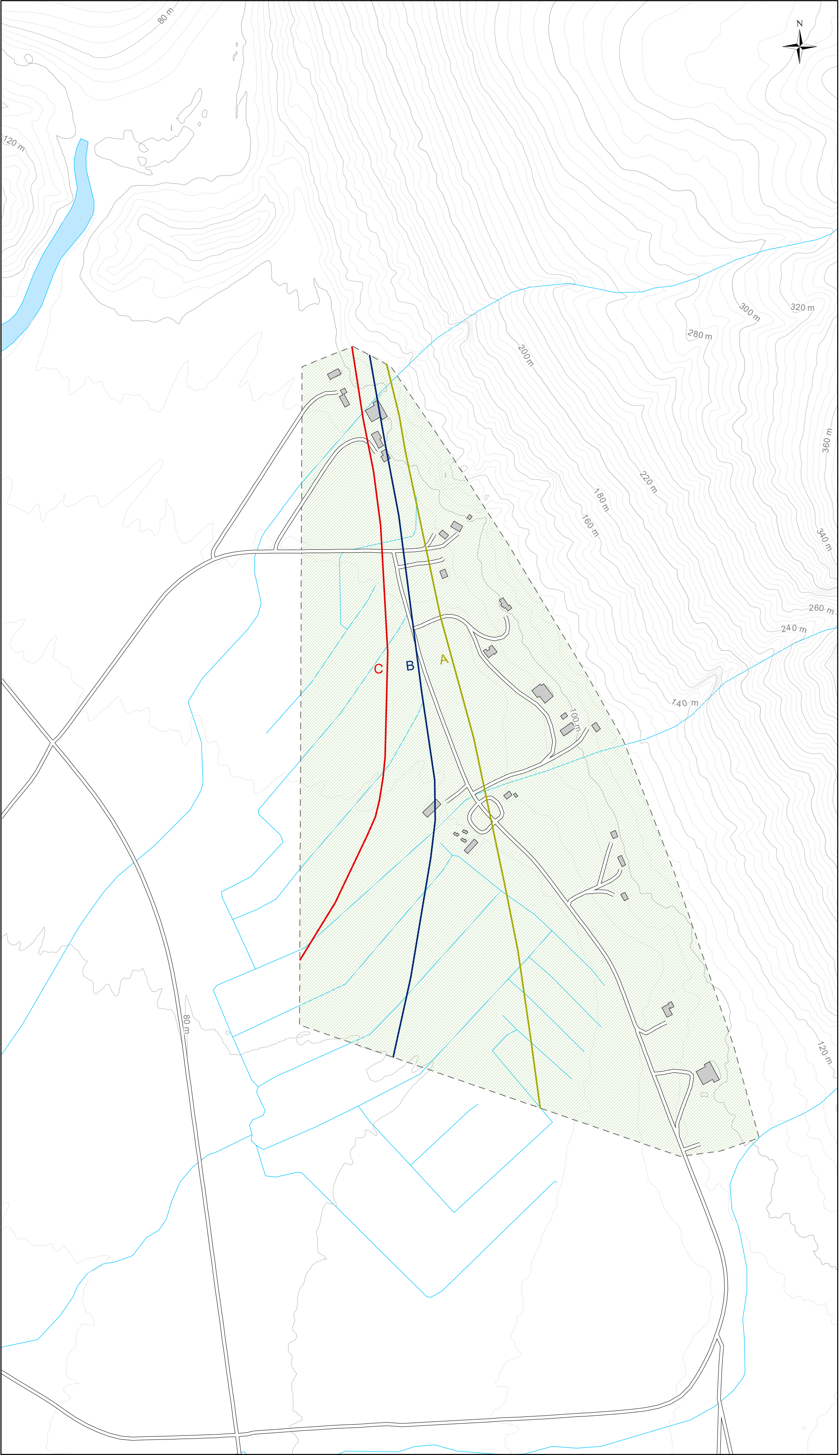
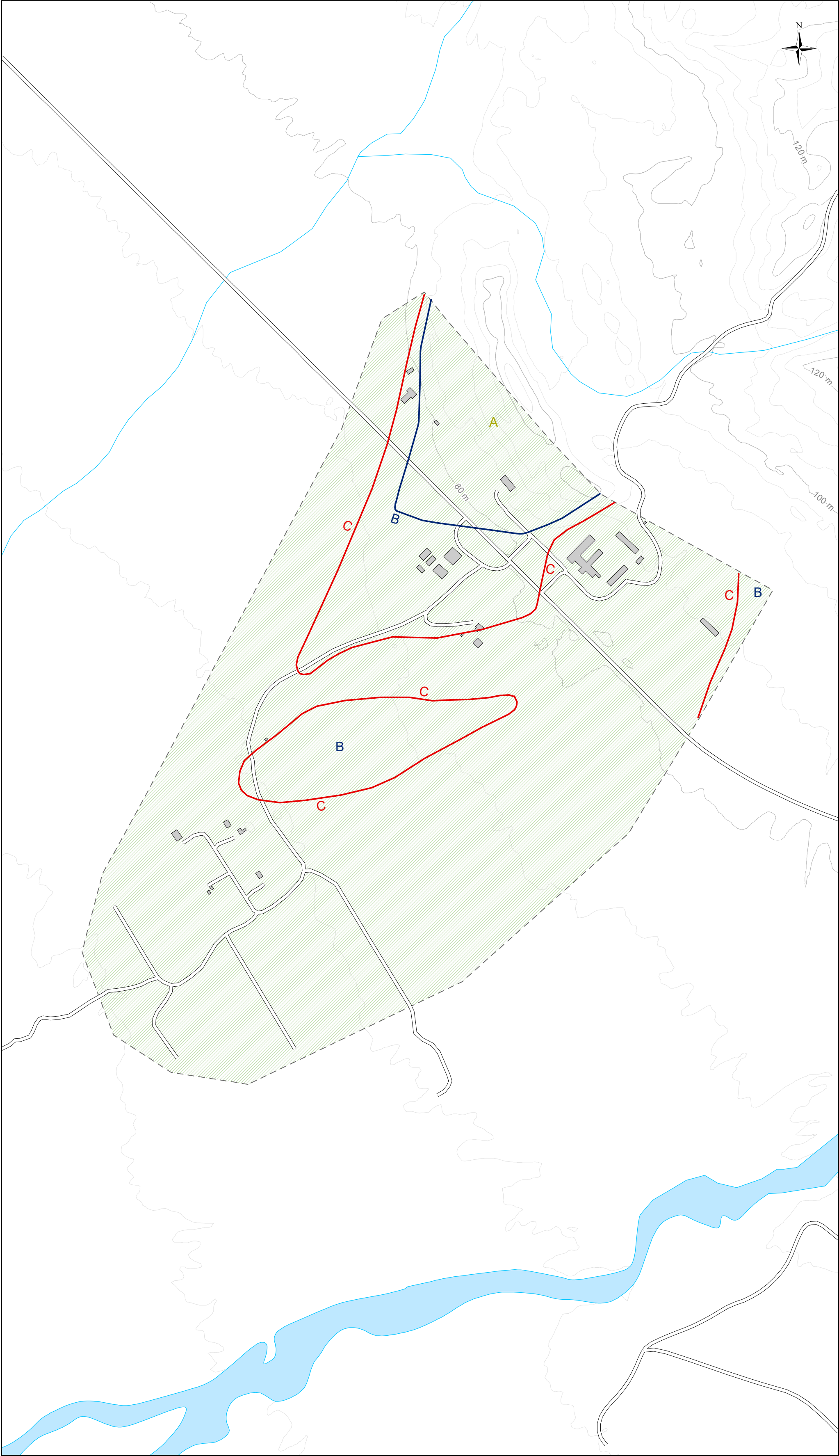
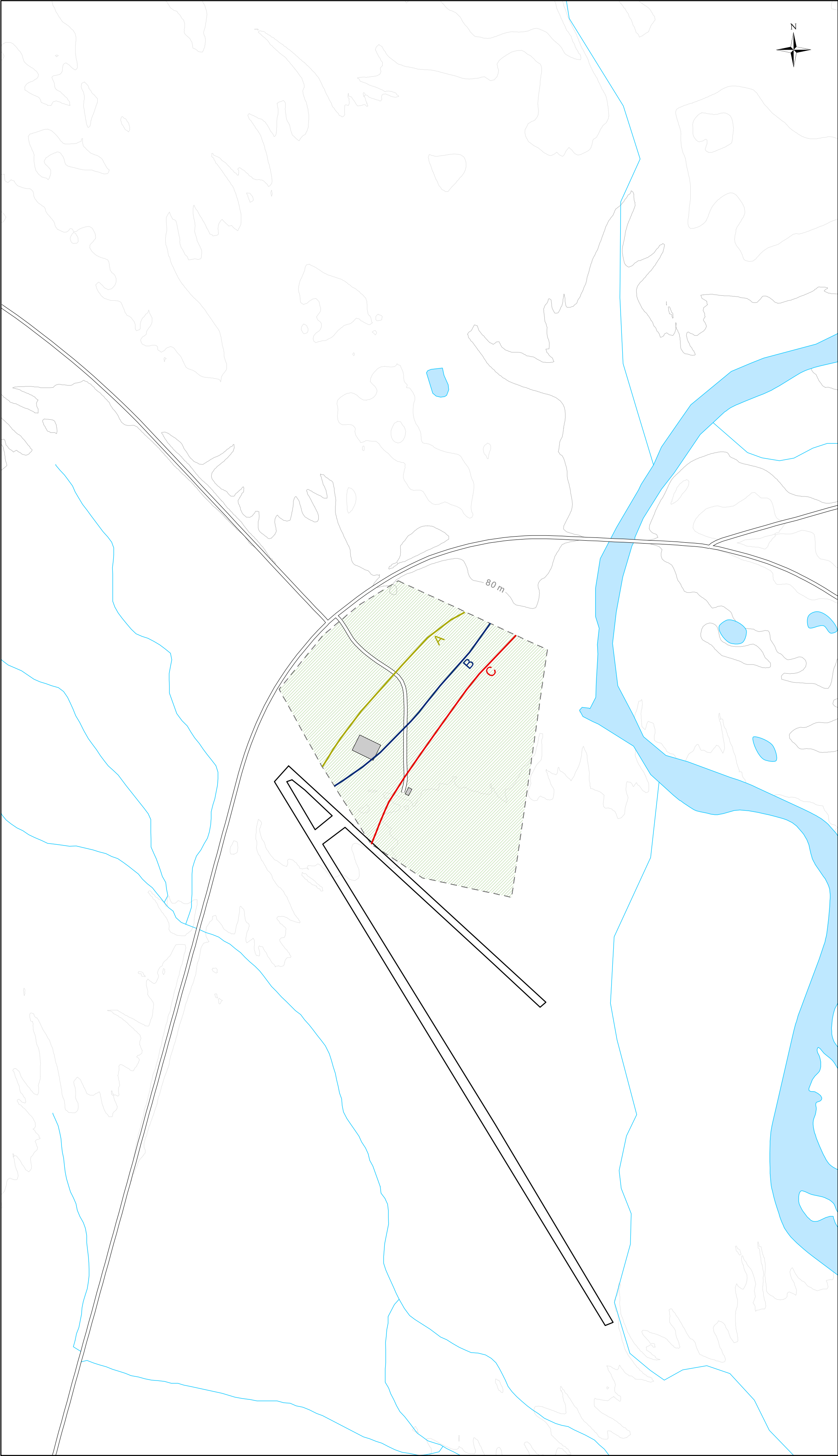
Kortagerð: Veðurstofa Íslands 2020/2025/RH
Vörpun: Keiluvörpun Lamberts
Vörmið: ISN93
Kortagrunnur: Loftmyndir ehf. 2020
Landmælingar Íslands 2020



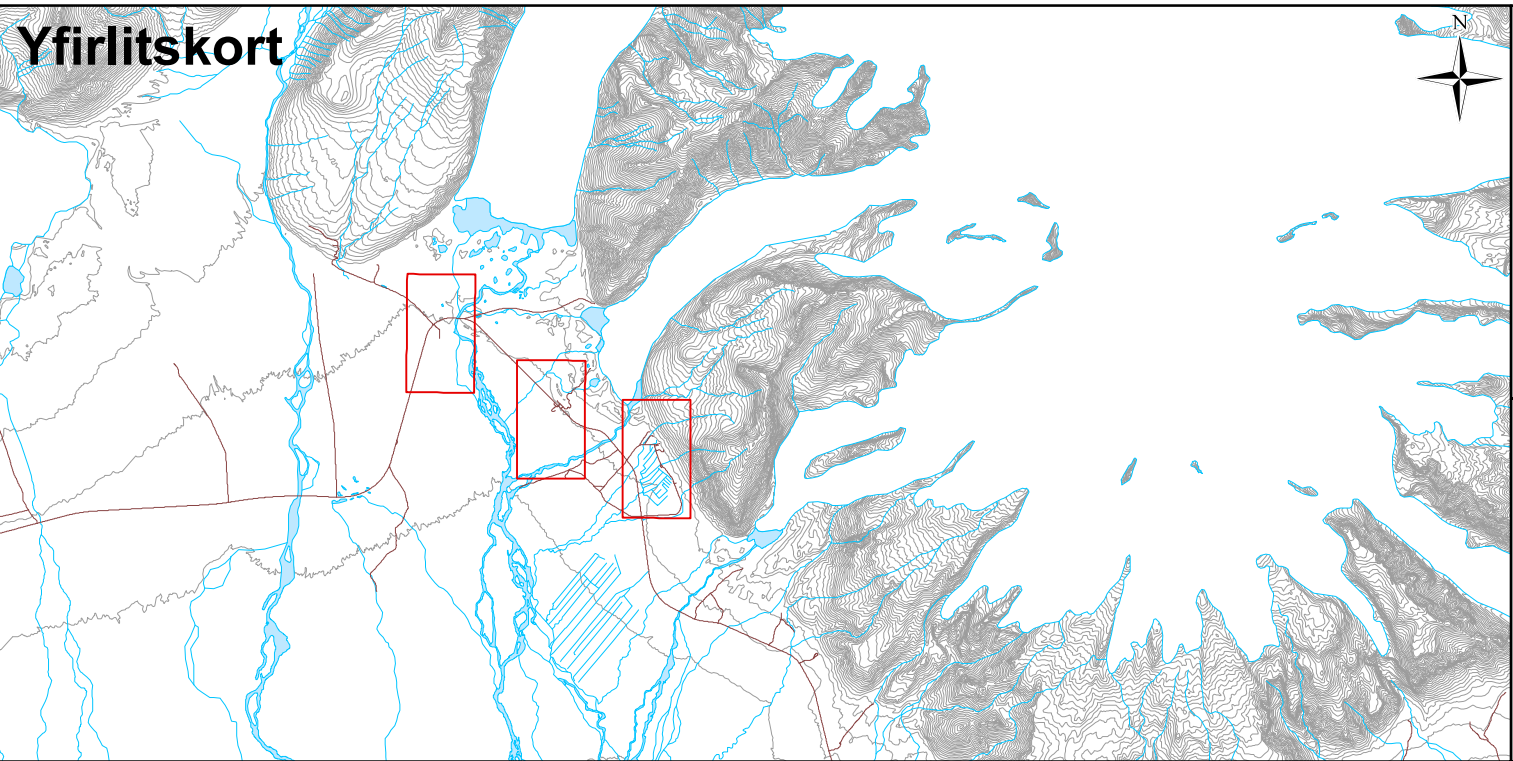
Staðaráhætta

- Jafnáhættulína, áhætta: $3,0 \cdot 10^{-4}$
- Jafnáhættulína, áhætta: $1,0 \cdot 10^{-4}$
- Jafnáhættulína, áhætta: $0,3 \cdot 10^{-4}$
- C** Hættusvæði C: áhætta $\geq 3,0 \cdot 10^{-4}$
- B** Hættusvæði B: $1,0 \cdot 10^{-4} < \text{áhætta} \leq 3,0 \cdot 10^{-4}$
- A** Hættusvæði A: $0,3 \cdot 10^{-4} < \text{áhætta} \leq 1,0 \cdot 10^{-4}$
- Hættumetið svæði

Gefin er upp staðaráhætta fyrir hvert hættusvæði, sem er árlegar dænarlikur einstaklings af völdum ofanflóða ef dvalið er öllum stundum í óskyrtu einbýlishúsi, þ.e. hásí sem hefur ekki verið styrkt sérstaklega vegna álags frá hugsanlegu ofanflóði.



Yfirlitskort



Svínafellsjökull

Hættumatskort - byggð svæði

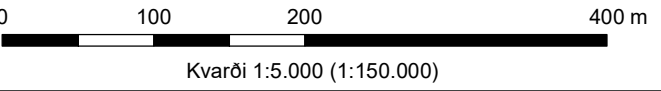
Hættumat vegna berghlupa til ~2070

Kortinu fylgja greinargerðir þar sem gerð er grein fyrir helstu forsendum, aðferðafræði og niðurstöðum hættumatsins.

Hættumat fyrir svæðið neðan Svínafellsjökuls vegna berghlups á Svínafellsheði. Greinargerð með hættumatskort.

Skýrsla VI 2020-002, júní 2025.

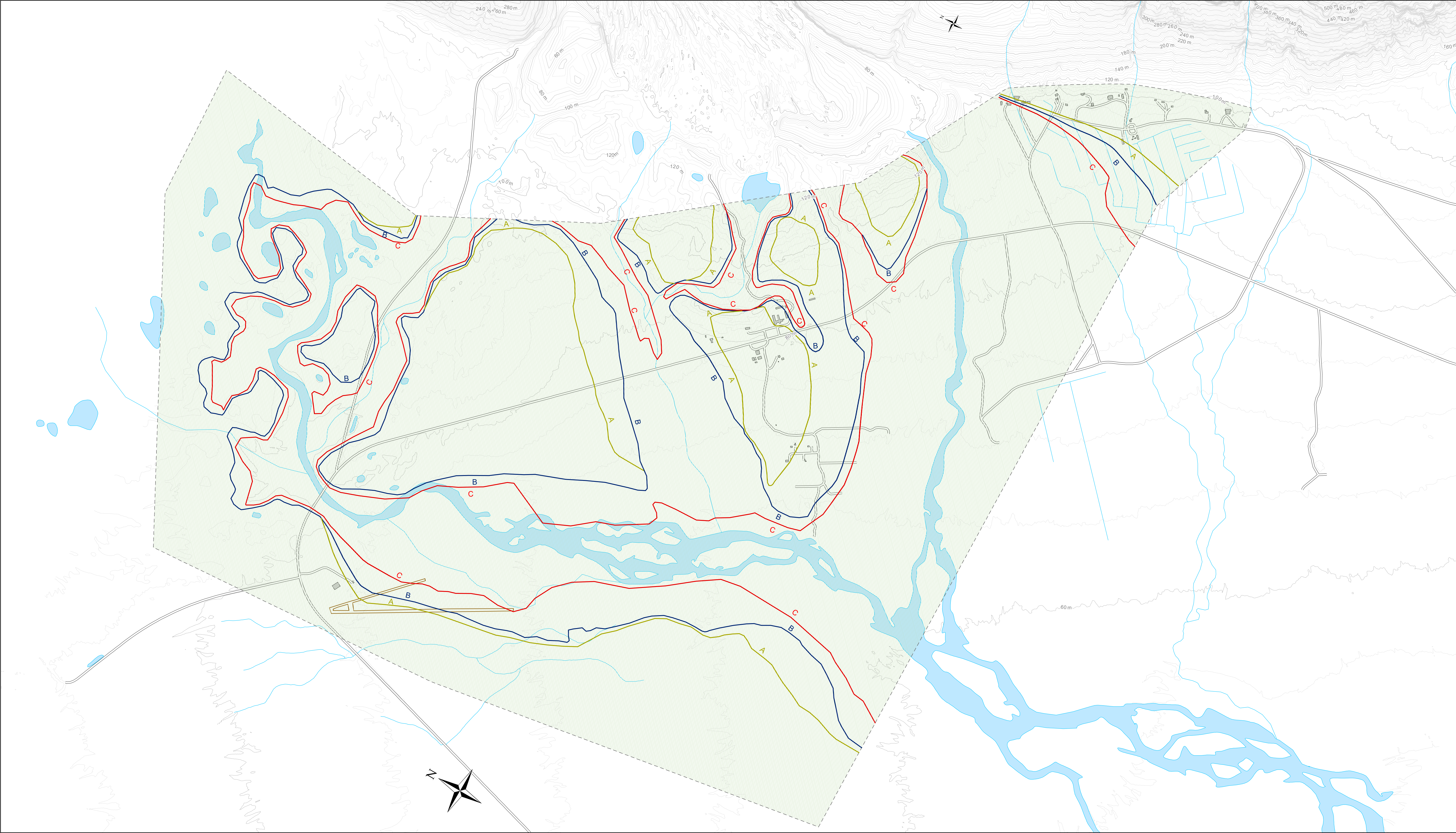
Kortagerð: Veðurstofa Íslands 2020/RHP
Vörpun: Keiluvörpun Lamberts
Vörmið: ISN93
Kortagrunnur: Loftmyndir ehf. 2020
Landmælingar Íslands 2020



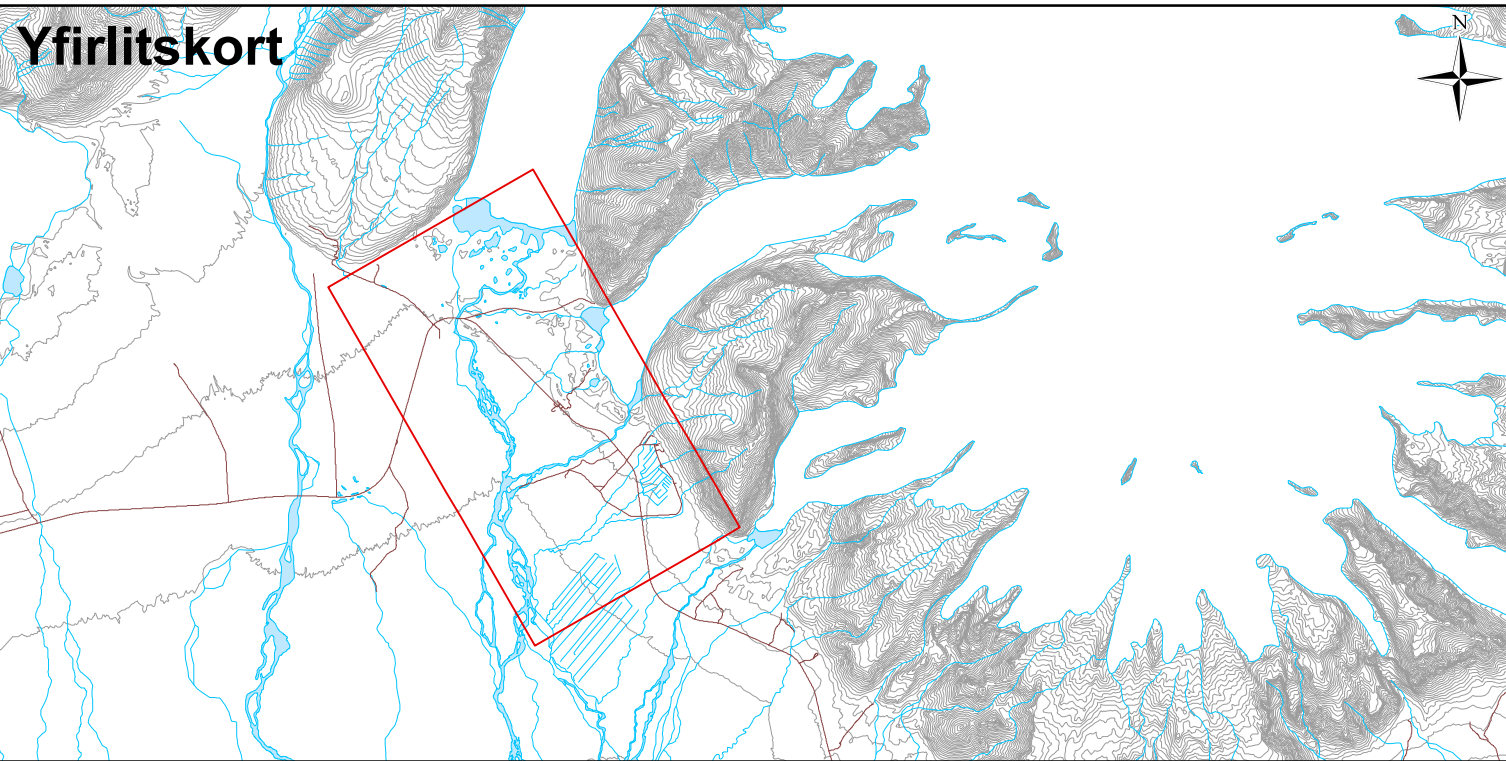
Staðaráhætta

- Jafnáhættulína, áhætta: $3,0 \cdot 10^{-4}$
- Jafnáhættulína, áhætta: $1,0 \cdot 10^{-4}$
- Jafnáhættulína, áhætta: $0,3 \cdot 10^{-4}$
- Hættusvæði C: áhætta $\geq 3,0 \cdot 10^{-4}$
- Hættusvæði B: $1,0 \cdot 10^{-4} < \text{áhætta} \leq 3,0 \cdot 10^{-4}$
- Hættusvæði A: $0,3 \cdot 10^{-4} < \text{áhætta} \leq 1,0 \cdot 10^{-4}$
- Hættumetið svæði

Gefin er upp staðaráhætta fyrir hvert hættusvæði, sem er árlegar dánarlíkur einstaklings af völdum ofanflóða ef dvalið er öllum stundum í óskyrtu einbýlishúsi, þ.e. húsi sem hefur ekki verið styrkt sérstaklega vegna álags frá hugsanlegu ofanflóði.



Yfirlitskort



Svinafellsjökull
Hættumatskort
Hættumat vegna berghlaupa til ~2040

Kortinu fylgja greinargerðir þar sem gerð er grein fyrir helstu forsendum, aðferðafræði og niðurstöðum hættumatsins.

Hættumat fyrir svæðið neðan Svinafellsjökuls vegna berghlaups á Svinafellsheði. Greinargerð með hættumatskortli.
Skýrsla VI 2025-002, júní 2025.

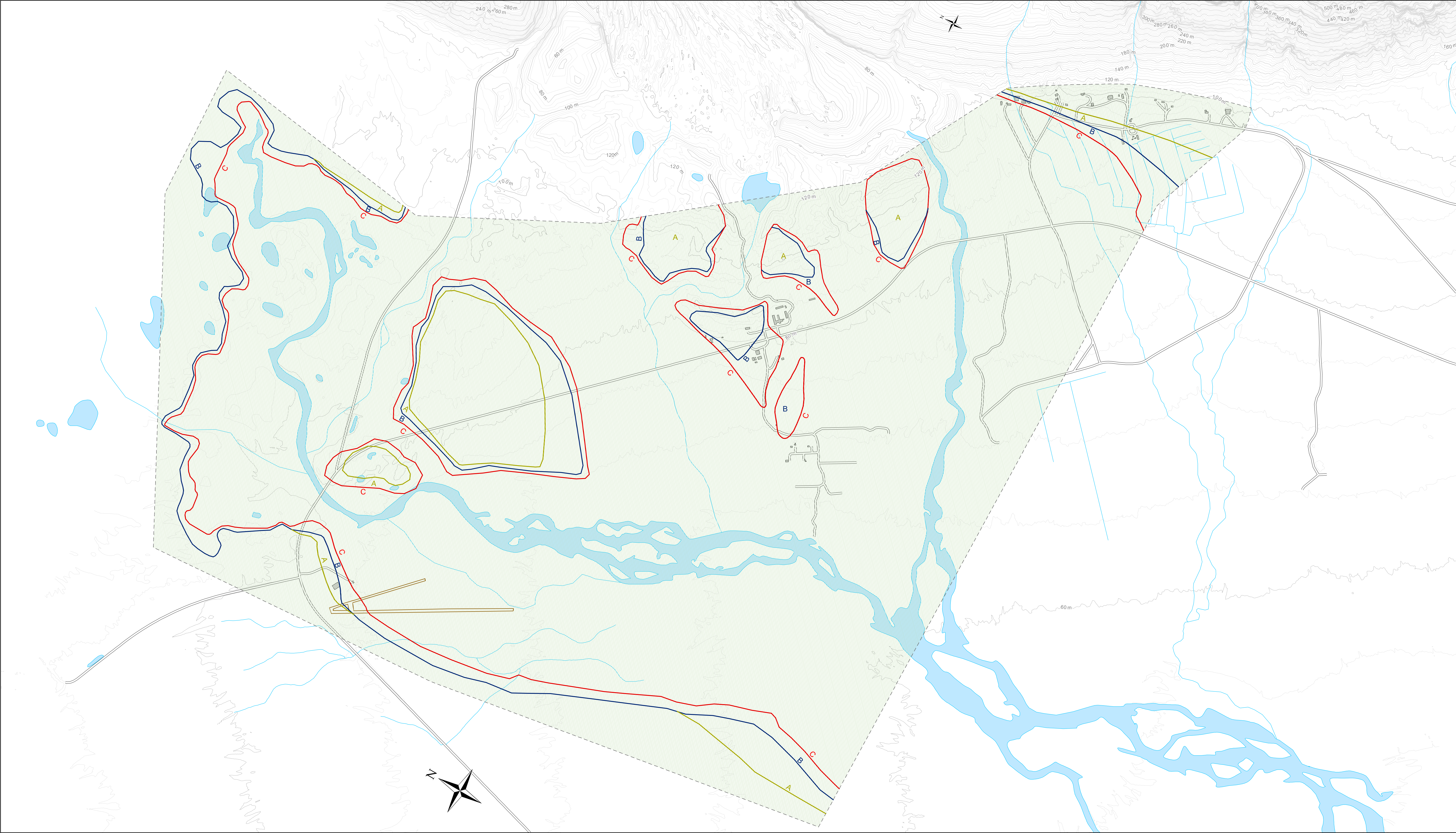
Kortagerð: Veðurstofa Íslands 2025/RHB/MHJ
Vörpun: Keiluvörpun Lamberts
Vörmið: ISM93
Kortagrunnur: Loftmyndir ehf. 2020
Landmælingar Íslands 2020

Kvarði 1:5.000 (1:150.000)

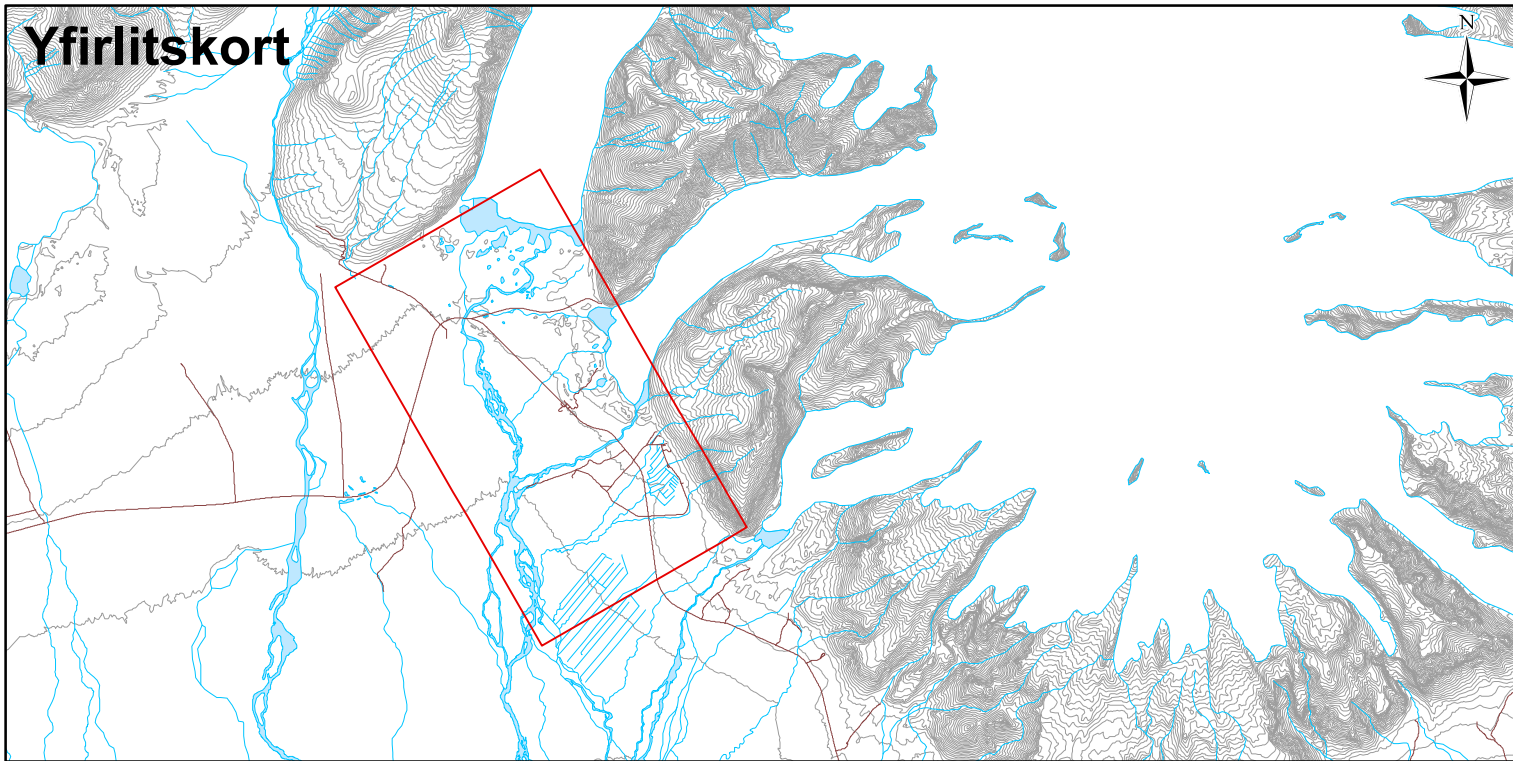
Staðaráhætta

- Jafnáhættulína, áhætta: $3,0 \cdot 10^{-4}$
- Jafnáhættulína, áhætta: $1,0 \cdot 10^{-4}$
- Jafnáhættulína, áhætta: $0,3 \cdot 10^{-4}$
- C** Hættusvæði C: áhætta $\geq 3,0 \cdot 10^{-4}$
- B** Hættusvæði B: $1,0 \cdot 10^{-4} < \text{áhætta} \leq 3,0 \cdot 10^{-4}$
- A** Hættusvæði A: $0,3 \cdot 10^{-4} < \text{áhætta} \leq 1,0 \cdot 10^{-4}$
- Hættumetið svæði

Gefin er upp staðaráhætta fyrir hvert hættusvæði, sem er árlegar dænarlikur einstaklings af völdum ofanflóða ef dvalið er öllum stundum í óskyrtu einbýlishúsi, þ.e. hásí sem hefur ekki verið styrkt sérstaklega vegna álags frá hugsanlegu ofanflóði.



Yfirlitskort



Svínafellsjökull

Hættumatskort

Hættumat vegna berghlaupa til ~2070

Kortinu fylgja greinargerðir þar sem gerð er grein fyrir helstu forsendum, aðferðafræði og niðurstöðum hættumatsins.

Hættumat fyrir svæðið neðan Svínafellsjökuls vegna berghlaups á Svínafellsheði. Greinargerð með hættumatskort.

Skýrsla VI 2025-002, júní 2025.

Kortagerð: Veðurstofa Íslands 2020/RHP
Vörpun: Keiluvörpun Lamberts
Vörpun: ISM93
Kortagrunnur:
Loftmyndir ehf. 2020
Landmælingar Íslands 2020



Kvarði 1:5.000 (1:150.000)

Staðaráhætta

- Jafnárhættulina, áhætta: $3,0 \cdot 10^{-4}$
- Jafnárhættulina, áhætta: $1,0 \cdot 10^{-4}$
- Jafnárhættulina, áhætta: $0,3 \cdot 10^{-4}$
- Hættusvæði C: áhætta $\geq 3,0 \cdot 10^{-4}$
- Hættusvæði B: $1,0 \cdot 10^{-4} < \text{áhætta} \leq 3,0 \cdot 10^{-4}$
- Hættusvæði A: $0,3 \cdot 10^{-4} < \text{áhætta} \leq 1,0 \cdot 10^{-4}$
- Hættumetið svæði

Gefin er upp staðaráhætta fyrir hvert hættusvæði, sem er árlegar dænarlikur einstaklings af völdum ofanflóða ef dvalið er öllum stundum í óskyrtu einbýlishúsi, þ.e. hafi sem hefur ekki verið styrkt sérstaklega vegna álags frá hugsanlegu ofanflóði.