

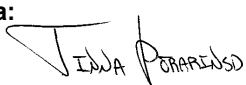
Hermun jökulhlaupa í Skjálfandafljóti: Tæknilegar niðurstöður hættumats

Jón Elvar Wallevik
Tinna Pórarinsdóttir
Bergur Einarsson
Bogi Brynjar Björnsson
Matthew J. Roberts

Hermun jökulhlaupa í Skjálfandafljót: Tæknilegar niðurstöður hættumats

Jón Elvar Wallevik
Tinna Þórarinsdóttir
Bergur Einarsson
Bogi Brynjar Björnsson
Matthew J. Roberts

Lykilsíða

Skýrsla nr. 2024-008	Dags. 13.08 2024	ISSN 1670-8261	Dreifing: Opín ☒ Lokuð ☐
			Skilmálar:
Heiti skýrslu: Hermun jökulhlaupa í Skjálfandafljót: Tæknilegar niðurstöður hættumats			Upplag: Rafræn útgáfa
			Fjöldi síðna: 41
Höfundar: Jón Elvar Wallevik, Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson, Bogi Brynjar Björnsson, Matthew J. Roberts			Framkvæmdastjóri sviðs: Matthew J. Roberts
			Verkefnisstjóri: Tinna Þórarinsdóttir
Gerð skýrslu/verkstig: Tæknileg lokaskýrsla			Verknúmer: 3721-0-0009
			Málsnúmer: 2024-0223
Unnið fyrir: Ofanflóðasjóð			
Samvinnuaðilar:			
Útdráttur: Í skýrslunni er farið yfir niðurstöður hermana á jökulhlaupum frá Vatnajökli til norðurs um farveg Skjálfandafljóts og tjónmætti reiknað fyrir þau svæði sem jökulhlaupin ná yfir. Jökulhlaup af völdum eldgosa undir norðanverðum Vatnajökli hafa komið í Jökulsá á Fjöllum á sögulegum tíma og vatnavextir í Skjálfandafljóti árið 1902 voru sennilega af völdum eldvirkni. Markmið verkefnisins er að útbúa hættumatskort og taka saman yfirlit sem nýtist samfélaginu þannig að tjónnæmi aukist ekki til framtíðar. Verkefnið er hluti af stærri verkefnabálki sem hefur fengið yfirheitið GOSVÁ en undir því eru fjölmörg verkefni sem snúa að heildarhættumati vegna eldgosa á Íslandi og eru styrkt af Ofanflóðasjóði. Nýtt og ítarlegt landlíkan er notað í verkefninu og nær reiknisvæðið frá upptökum hlaupa við jökuljaðar alla leið til sjávar í Skjálfanda. Þrjár sviðsmyndir hlaupa með mismunandi hámarksrennsli undan jökli eru reiknaðar, 19.300 m³/s, 14.000 m³/s og 10.200 m³/s. Líkanreikningar voru framkvæmdir innan samstarfsvettvangsins Rafrænir rannsóknarinnviðir (einnig þekkt sem IREI), sem styrktur er af Innviðasjóði RANNÍS. Í viðauka eru birt kort sem sýna niðurstöður reikninga, hámarksútbreiðslu jökulhlaupanna, framrásarlínur og tjónmætti fyrir þessar þrjár sviðsmyndir.			
Lykilorð: Skjálfandafljót, jökulhlaup, hættumat, tjónmætti, straumfræðilegir líkanreikningar, ofurtölvureikningar		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs: 	
		Undirskrift verkefnisstjóra: 	
		Yfirfarið af: pp	

Efnisyfirlit

Efnisyfirlit	6
Myndaskrá	6
Töfluskrá	7
Yfirlit	8
1 Inngangur	9
1.1 Almennt um verkefnið	9
1.2. Hlaup í Skjálfandafljóti fyrr á tímum	9
2 Aðferðir	10
2.1 Hugbúnaður	10
2.2 Inntaksgögn líkanreikninga	11
2.2.1 Landlíkan	11
2.2.2 Rennslisrit og upptakasvæði hlaupa	11
2.3 Úttaksgögn úr líkanreikningum	12
2.4 Hættumat/Tjónmætti	13
3 Niðurstöður	14
3.1 Sviðsmynd A – 19.300 m ³ /s (6 m reikninet)	15
3.2 Sviðsmynd B – 14.000 m ³ /s (4 m reikninet)	16
3.3 Sviðsmynd C – 10.200 m ³ /s (4 m reikninet)	17
4 Óvissuþættir	18
4.1 Næmnigreining fyrir Manning stuðul	18
4.2 Næmnigreining fyrir upplausn reikninet	19
5 Samantekt	20
Heimildir	21
Viðauki A – Hætta, tjónmætti, tjónnæmi og áhætta	23
A.1 Aðrar skilgreiningar	23
A.2 Tjónmætti og hætta	23
A.3 Tjónnæmi	23
A.4 Áhætta	23
Viðauki B – Heildstæð kort	24

Myndaskrá

Mynd 1. Grálitaða svæðið sýnir landlíkanið sem notað er í þessu verkefni. Flatarmál þess er 50 x 200 km, þ.e. um 10.000 km ² og upplausnin 2x2 m.	11
Mynd 2. Líkleg upptakasvæði jökulhlaupa undan jökuljaðri til norðurs vegna eldsumbrota í Bárðarbungu, merkt A, B og C (Magnús Tumi Guðmundsson, 2014). Samsvarandi merkingar A, B og C eiga við á mynd 3.	12

Mynd 3. Þróun rennslis undan jökli fyrir sviðsmyndirnar þrjár (Magnús Tumi Guðmundsson, 2014). Merkingarnar A, B og C eru samsvarandi merkingum á mynd 2.	12
Mynd 4. Staðsetning rennslisþversniða sem númeruð eru 1, 2 og 3. Bláa flóðsléttan gildir fyrir sviðsmynd A með $19.300 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli (kaflí 3.1), rauða fyrir sviðsmynd B, $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (kaflí 3.2) og græna fyrir sviðsmynd C, $10.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (kaflí 3.3).	15
Mynd 5. Rennsli um þversnið 1, 2 og 3 á mynd 4. Sviðsmynd A: $19.300 \text{ m}^3/\text{s}$	16
Mynd 6. Rennsli um þversnið 1, 2 og 3 á mynd 4. Sviðsmynd B: $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$	17
Mynd 7. Rennsli um þversnið 1, 2 og 3 á mynd 4. Sviðsmynd C: $10.200 \text{ m}^3/\text{s}$	17
Mynd 8. Rennsli um þversnið 1, 2 og 3 fyrir hrýfisgildin $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ og $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$. Gildir fyrir sviðsmynd A: $19.300 \text{ m}^3/\text{s}$ og 6 m reikninet.	19
Mynd 9. Samanburður á hámarksútbreiðslu hlaups við Fosshól fyrir $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ (gult) og $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ (blátt). Sviðsmynd A: $19.300 \text{ m}^3/\text{s}$ og 6 m reikninet.	19
Mynd 10. Rennsli í gegnum þversnið 1, 2 og 3 fyrir 4 og 6 m reikninet. Sviðsmynd B: $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ og $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$	20

Töfluskrá

Tafla 1. Hætta sem fólki stafar af flóði, samkvæmt flokkun tjónmættisgilda $hr_{\max}$. Sjá ítarlegri umfjöllun í heimild (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022).	14
---	----

Yfirlit

Í þessu verkefni eru reiknuð jökulhlaup niður farveg Skjálfandafljóts og hættumat gert fyrir slík hlaup. Notað er nýtt og ítarlegt landlíkan á 2 m neti (Landmælingar Íslands, 2020). Líkanreikningar ná yfir svæði sem liggur frá upptökum hlaupanna við jökuljaðar og alla leið til sjávar í Skjálfanda. Verkefnið er hluti af stærri verkefnabálki sem hefur fengið yfirheitið GOSVÁ en undir því eru fjölmörg verkefni sem snúa að heildarhættumati vegna eldgosa á Íslandi og eru styrkt af Ofanflóðasjóði. Samstarf Veðurstofu Íslands við Háskóla Íslands (HÍ) veitti Veðurstofunni aðgang að ofurtölvum HÍ og gerði það mögulegt að ráðast í svo umfangsmikla hlaupreikninga. Samstarfið er innan verkefnisins Rafrænir rannsóknarinnviðir (ensk skst. IREI), sem styrkt er af Innviðasjóði RANNÍS (Vegvísir um rannsóknarinnviði, 2021).

Líkanreikningar taka mið af þremur sviðsmyndum af stórum sprungugosum undir jökli sem leiða til mismikils hámarksrennslis undan jökli: 19.300 m³/s (A), 14.000 m³/s (B) og 10.200 m³/s (C). Hámarksrennslíð er byggt á reynsluformúlum fyrir ísbráðnun undir misþykkum jökli (Magnús Tumi Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir 2006). Horft er til verstu tilfella í þessari vinnu en fyrir dæmigerðar sprungugos má búast við minni hlaupum með hámarks rennslí á bilinu 1.200 til 4.800 m³/s (Magnús Tumi Guðmundsson, 2014). Tvær sviðsmyndir (B og C) nota 4 m reikninet og ein notar 6 m reikninet (sviðsmynd A). Í öllum tilvikum er líkantími 4 dagar. Niðurstöður eru birtar í Viðauka B á kortum sem sýna bæði hámarksútbreiðslu jökulhlaupa og tjónmætti fyrir þessar sviðsmyndir. Í öllum tilfellum hefur kortum verið skipt upp í smærri svæði til þess að sýna niðurstöður í hærri upplausn og eru kortin merkt með númerum frá ósum til upptaka. Þessi kort eru aðalafurð verkefnisins.

Niðurstöður gefa til kynna að jökulhlaup í Skjálfandafljóti af stærðinni 10–20.000 m³/s mundu ná yfir 1–3 km breitt svæði í Bárðardal og Köldukinn og dreifast enn meir á láglendi við Skjálfanda. Nokkrum bæjum gæti verið hætta búin og tún færu víða undir vatn meðan á hlaupi stæði. Við Goðafoss mundi hlaupvatn flæmast upp á Þjóðveg 1 og einnig mundi hlaupvatn dreifa verulega úr sér á svæðinu kringum Aldeyjarfoss. Niðurstöður sýna að hlaup þessara þriggja sviðsmynda næðu niður að Aldeyjarfossi á u.þ.b. 7–9 klst. og niður að ósi á u.þ.b. 18–24 klst.

1 Inngangur

1.1 Almennt um verkefnið

Í þessu verkefni eru jökulhlaup niður farveg Skjálfandafljóts hermd og hættumat gert fyrir slík hlaup. Notast er við nýtt og ítarlegt landlíkan á 2 m neti (Landmælingar Íslands, 2020). Reiknisvæðið nær frá upptökum hlaupanna við jökulrönd og alla leið til sjávar í Skjálfanda. Reikninetið er 4x4 m fyrir tvær minni sviðsmyndirnar (14.000 m³/s og 10.200 m³/s) og 6x6 m fyrir þá stærstu (19.300 m³/s). Reiknitími er 4 sólarhringar í öllum tilvikum, þ.e. reiknaður framgangur hlaupanna yfir 4 daga tímabil. Samstarf Veðurstofu Íslands við Háskóla Íslands (HÍ) veitti Veðurstofunni aðgang að ofurtölvum HÍ og gerði það kleift að ráðast í svo umfangsmikla hlaupreikninga. Samstarfið er innan verkefnisins Rafrænarannsóknarinnviðir (skst. IREI), sem styrkt er af Innviðasjóði RANNÍS (Vegvísir um rannsóknarinnviði, 2021).

1.2. Hlaup í Skjálfandafljóti fyrr á tímum

Sigurdís Björk Jónasdóttir (2020) rannsakaði ummerki jökulhlaupa sem fallið hafa frá Bárðarbungu niður eftir farvegi Rjúpnabrekkukvísar og þaðan í Skjálfandafljót. Hlaupin eru ekki tímasett en eru talin eldri en jökulgarðar þeir sem myndaðir voru við lok Litlu ísaldar (um 1890).

Tómas Jóhannesson o.fl. (2014) hafa rakið nýlega sögu hlaupa í Skjálfandafljóti og er vitnað beint í texta minnisblaðs þeirra hér að neðan:

Vorið 1903 gaus í Vatnajökli og mikil hlaup sem komu í Skjálfandafljót tæpri viku síðar eru talin hafa orsakast af þeim eldsumbrotum.

Í ritinu Fjallkonan (1896) er fjallað um flóð í Skjálfandafljóti sem gekk svo hátt að brúin rótaðist til að vestanverðu á stöplinum og allt að mannhæðarháir jakar sópuðust af fljótinu fram fyrir byggð og út fyrir Þingey. Menn töldu flóðið stafa af eldsumbrotum í jöklinum. Brúin við Fosshól var á þessum tíma lægra í gljúfrinu en nú er þannig að gljúfrið hefur væntanlega ekki verið barmafullt.

Árni Pálsson og K. Otterstedt (1936) rita um stór flóð í Skjálfandafljóti vegna mikilla vatnavaxta að vori til. Flóðin urðu árin 1916 og 1925 og talið var að rennslið hafi verið um 2000–2500 m³/s. Þá sást aðeins móta fyrir Goðafossi og gljúfrið var því sem næst barmafullt. Þessi flóð eru af svipaðri stærð og „líklegt“ jökulhlaup ef til goss kemur undir jökli á vatnasviði Skjálfandafljóts. Ekki fer sögum af tjóni á bæjum í Bárðardal í þessum flóðum.

Hlaup í Skjálfandafljóti er talið miklu ólíklegra en í Jökulsá á Fjöllum komi til eldgoss undir jökli. Rennsli í hugsanlegu hlaupi í Skjálfandafljóti yrði að líkindum aðeins 1/10 af rennsli hlaups, sem kæmi í Jökulsá á Fjöllum. Við „líklegasta“ hlaup í Skjálfandafljóti með rennsli um 3000 m³/s má ætla að fljótið haldi sig að mestu við núverandi farveg en breiðist eitthvað um dalbotninn þar sem vatnsdýpi kann að verða 0.5–1 m. Í slíku flóði geta byggingar orðið umflotnar vatni en lífi fólks er ekki hættu búin.

2 Aðferðir

2.1 Hugbúnaður

Við hermun er þörf á tvívíðu líkani sem getur reiknað dreifingu hlaupvatns yfir stór landsvæði. Straumfræðilíkanið GeoClaw (Clawpack Development Team, 2020) er þróað fyrir slíka reikninga með dýpiseilduðum jöfnum Navier–Stokes (e. shallow water equations). Líkanið leysir varðveislujöfnu skriðþunga fyrir tvívíða hreyfingu vatns og varðveislujöfnu massans (þ.e. samfellujöfnuna). Undanfarin ár hefur þetta líkan verið notað með góðum árangri á Veðurstofu Íslands. Ýmis önnur slík líkön standa einnig til boða til straumfræðilegra reikninga, þar sem flæði vatns stjórnast af undirliggjandi landlíkani og hrýfisstuðli Mannings.

GeoClaw líkanið er hluti af forritapakkanum ClawPack (e. Conservation Laws Package) sem var upphaflega þróaður af Randall LeVeque og síðar einnig af öðrum aðilum með stuðningi frá University of Washington, Boeing, Norska Rannsóknarráðinu (NFR) og fleirum. Líkanið er opinn hugbúnaður (e. open source) og auðveldar það notkun þess í háhraðareikningum á ofurtölvu. Allir líkanreikningar í þessu verkefni fóru fram á ofurtölvu Háskóla Íslands innan samstarfsins Rafrænarannsóknarinnviðir (IREI), sem stutt er af Innviðasjóði Rannís (Vegvísir um rannsóknarinnviði, 2021).

Stærðfræðilega eru allar jöfnur forritsins GeoClaw settar fram á fastheldnu formi, e. conservative form (LeVeque, 2002; Versteeg og Malalasekera, 2007). Brytjun (e. discretization) á þessum tengdu hlutafleiðujöfnum er gerð með aðferð endanlegs rúmmáls, e. finite volume method – FVM (LeVeque, 2002). Aðstreymishluti hreyfijöfnunnar (e. advection) er brytjaður með ákveðinni aðferð sem grípur högg í kerfinu og er nákvæm að öðru þrepi (e. shock-capturing method; 2nd-order accurate) (Berger o.fl., 2011). Tölulegum sveiflum sem eru almennt tengdar öðru þrepi er haldið niðri með beitingu TVD (e. total variation diminishing) (Versteeg og Malalasekera, 2007). Aðgengilegir TVD takmarkarar (e. TVD limiters) í þessu forriti bera heitin *Minmod*, *Superbee*, *vanLeer* og *MC* (LeVeque, 2002). Í þessu verkefni er MC takmarkarinn notaður. Samfellujafnan er einnig með takmarkara (hér einnig MC), brytjuð niður með FVM-aðferð og er leyst á sama reiknineti og hreyfijafnan (þ.e. í sömu upplausn). Þetta reikninet er kvikt í þeim skilningi að fjöldi reiknisella eykst sjálfkrafa við aukna dreifingu flóðs. Þetta minnkar umfang reikninetts og eykur þar af leiðandi reiknihraða allverulega. Aðferðin er á ensku nefnd „Arbitrary Mesh Refinement“, AMR (Berger og fl., 2011).

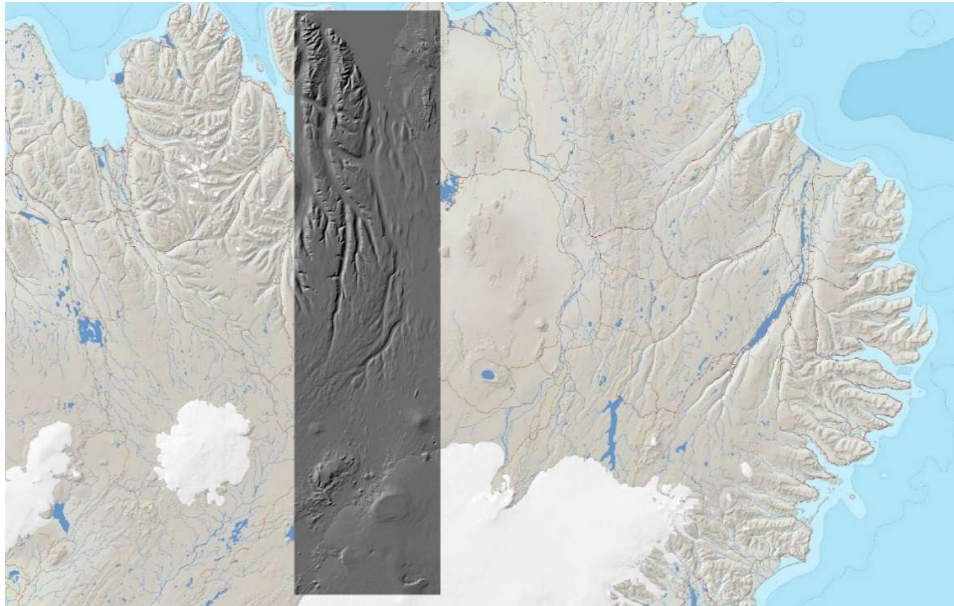
GeoClaw hefur verið notað til að herma útbreiðslu flóðbylgna (LeVeque, o.fl., 2011), stíflubrot (George, 2010), sjávarflóð (Mandli og Dawson, 2014) og önnur fyrirbæri. Á Veðurstofu Íslands hefur GeoClaw verið m.a. notað við hermun á flóðbylgju sem varð í Öskjuvatni árið 2014 eftir að berghlaup gekk út í vatnið (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2016), við hermun Skaftárhlaupa (Matthías Á. Jónsson o.fl., 2018; Emmanuel Pagneux o.fl., 2018), við hermun vatnaflóða í Ölfusá (Emmanuel Pagneux o.fl., 2019) og við hætumat fyrir Eyjafjarðará, Hvítá í Borgarfirði, Lagarfljót og Skjálfandafljót (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2021). Einnig hefur það verið notað við hermun hlaupa í Jökulsá á Fjöllum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017; Jón Elvar Wallevik o.fl., 2024).

2.2 Inntaksgögn líkanreikninga

2.2.1 Landlíkan

Nákvæmt landlíkan er ein helsta forsenda straumfræðilegra reikninga á flæði vatns eftir yfirborði lands. Nota má eitt líkan sem nær yfir allt reiknisvæðið eða líkan samsett úr nokkrum smærri. Í þessu verkefni er notað stafrænt hæðarlíkan (e. digital surface model) (Landmælingar Íslands, 2020), byggt á gervitunglamyndum frá tímabilinu 2008–2012. Landlíkanið nær yfir allt reiknisvæðið og upplausn þess er 2x2 m. Sjá mynd 1.

Reikninet hermana er myndað út frá ofangreindu landlíkani (mynd 1) og er upplausn þess í þessu verkefni háð rennslismagni (þ.e. álagi í reikningum). Fyrir sviðsmynd A (kafla 3.1) er upplausn reiknins 6x6 m en 4x4 m fyrir sviðsmyndir B og C (kaflar 3.2 og 3.3).

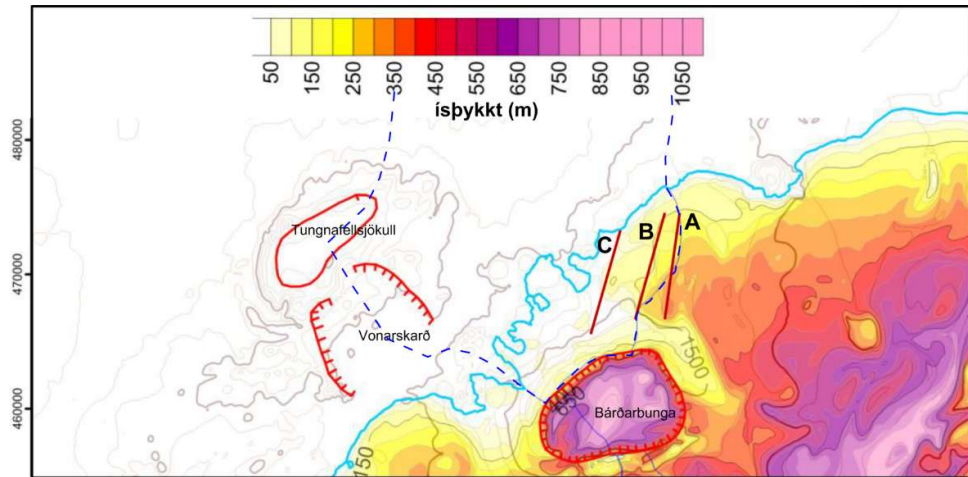


Mynd 1. Grálitaða svæðið sýnir landlíkanið sem notað er í þessu verkefni. Flatarmál þess er 50 x 200 km, þ.e. um 10.000 km² og upplausnin 2x2 m.

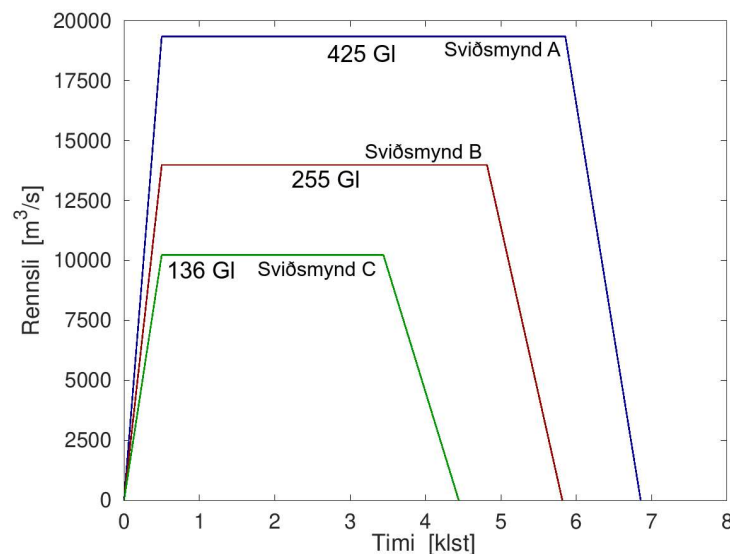
2.2.2 Rennslisrit og upptakasvæði hlaupa

Miðað er við þrjár sviðsmyndir eldgosa undir jökli í norðurhlíðum Bárðarbungu, innan vatnasviðs Skjálfandafljóts (Magnús Tumi Guðmundsson, 2014). Gert er ráð fyrir að hlaupvatnið komi undan vestanverðum Dyngjujökli, norður af Bárðarbungu-öskjunni. Á mynd 2 eru sýnd áætluð upptakasvæði merkt A, B og C og sviðsmyndir hlaupa í þessari skýrslu eru táknaðar með sambærilegum hætti (þ.e. „sviðsmynd A“, o.s.frv.). Hámarksrennsli er í þessum þremur tilvikum ákvarðað 10.200 m³/s, 14.000 m³/s og 19.300 m³/s, sjá rennslisrit á mynd 3. Hámarksrennslið er byggt á reynsluformúlum fyrir ísbráðnun undir misþykkum jökli (Magnús Tumi Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir 2006). Miðað er við einföld trapisulaga rennslisrit sem rísa í hámark á hálf tíma en falla frá hámarki og niður í núll á einum klukkutíma. Varandi í hámarki er svo metinn út frá ætluðu heildarrúmáli sviðsmyndarinnar. Í þessum þremur sviðsmyndum er miðað við hámarksbráðnun í stórum sprungugosum, þar sem miðað er við að horfa til verstu tilfella í þessari vinnu. Fyrir dæmigerð sprungugos má búast við minni hlaupum með hámarks rennsli á bilinu 1.200 til 4.800 m³/s (Magnús Tumi Guðmundsson, 2014).

Við framkvæmd reikninganna eru upptök hlaupanna staðsett um 0,5–2 km utan við jökuljaðar, og þá við nyrðri enda upptakanna A, B og C, sem gefin eru til kynna með rauðum strikum á mynd 2. Þessar staðsetningar upptaka skammt utan núverandi jökuljaðars breyta ekki rennslisleiðum hlaupanna því landslagið skorðar rennslisleiðirnar. Flatarmál hvers upptakasvæðis fyrir sig er um 0,2 km².



Mynd 2. Líkleg upptakasvæði jökulhlaupa undan jökuljaðri til norðurs vegna eldsumbrota í Bárðarbungu, merkt A, B og C (Magnús Tumi Guðmundsson, 2014). Samsvarandi merkingar A, B og C eiga við á mynd 3.



Mynd 3. Þróun rennslis undan jökli fyrir sviðsmyndirnar þrjár (Magnús Tumi Guðmundsson, 2014). Merkingarnar A, B og C eru samsvarandi merkingum á mynd 2.

2.3 Úttaksgögn úr líkanreikningum

Grunn-úttaksgögn hermunar eru hér dýpi og skriðþungavigur sem fall af tíma og staðsetningu, og er þeim lýst með eftirfarandi stærðum:

$$d = d(x,y,t) \quad (1)$$

$$\mathbf{p} = p_x(x,y,t) \mathbf{i}_x + p_y(x,y,t) \mathbf{i}_y \quad (2)$$

Stærðirnar x og y eru hnit (eða reiknipunktur) hnitakerfisins (í ISN93/EPSSG:3057) og t er tími. Stærðirnar p_x og p_y eru tilsvarendi skriðþungi fyrir tvívítt kerfi í x og y -átt. Nánar tiltekið er skriðþungi fyrir tvívíð kerfi reiknaður sem $p_x = v_x \cdot d$ og $p_y = v_y \cdot d$, þar sem v_x og v_y eru tilsvarendi hraði í x og y -átt (sjá t.d. LeVeque, 2002). Stærðirnar $\mathbf{i}_x$ og $\mathbf{i}_y$ eru einingarvigrar hnitakerfisins. Tölugildi skriðþungavigursins er reiknað með jöfnu (3):

$$p(x,y,t) = (p_x^2 + p_y^2)^{1/2} = vd(x,y,t) \quad [\text{þ.e. stærðin } p \text{ er einnig rituð sem } vd] \quad (3)$$

Hraði (e. speed) er reiknaður með jöfnu (4):

$$v(x,y,t) = p(x,y,t) / d(x,y,t) \quad (4)$$

Út frá hraða v og dýpi d er hægt að reikna út tjónmætti (e. „Hazard Rating“) með jöfnu (5):

$$hr(x,y,t) = (v(x,y,t) + 0,5) \cdot d(x,y,t) + DF. \quad (5)$$

Ofangreindri jöfnu er lýst betur síðar með jöfnu (8). Samanlagt gagnamagn úr þessum reikningum er yfirleitt mjög mikið (nokkur terabæti), sem torveldar framsetningu niðurstaðna með myndrænum hætti. Er því farin sú leið að leita kerfisbundið uppi hámarksgildi hvers stuðuls sem fall af tíma fyrir hvert hnit x og y , eins og er lýst með jöfnu (6).

$$\beta_{\max} = \beta_{\max}(x,y) = [\text{Hámark m.t.t. tíma } t \text{ af stærðinni } \beta(x,y,t) \text{ fyrir öll } x,y]. \quad (6)$$

Gildið β stendur fyrir stærðirnar dýpi d , hraða v , skriðþunga $p = vd$ og tjónmætti hr . Útkoma úr jöfnu (6) því gefin sem

$$d_{\max} = d_{\max}(x,y), \quad v_{\max} = v_{\max}(x,y), \quad vd_{\max} = vd_{\max}(x,y) \quad \text{og} \quad hr_{\max} = hr_{\max}(x,y). \quad (7)$$

Athuga ber að gildin í (7) eru ekki sem fall af tíma t . Út frá hámarksdýpi $d_{\max}$ er einnig mynduð hámarks flóðslétta (þ.e. hámarksútbreiðsla) sem sýnd er á kortum 1–5 í viðauka.

2.4 Hættumat/Tjónmætti

Í skýrslu þessari er gefið út hættumat. Hættumat felst í greiningu á tjónmætti. Tjónmætti er metið út frá stærð, afli og krafti náttúruváratburðar og á líkum þess að hann eigi sér stað, óháð því hvort byggð eða mannvirki séu til staðar (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022). Í þessu verkefni er ekki gert áhættumat, en slíkt mat er háð viðkvæmni samfélagsins, innviða og kerfa gagnvart tjóni (í viðauka A er gefið stutt yfirlit yfir hugtökin *hættu*, *tjónmætti*, *tjónnæmi* og *áhættu*).

Til þess að hægt sé að leggja mat á tjónmætti tiltekins viðmiðunarflóðs er nauðsynlegt að herma það í straumfræðilíkani. Straumfræðilíkon geta gefið upplýsingar um helstu kennistærðir flóða með því að líkja eftir rennslisháttum vatnsfalla (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022). Líkonin geta hermt flóðhraða og flóðdýpt og með tímaháðum líkanreikningum má einnig fá upplýsingar um framgang flóða, þ.e.a.s. hversu hratt þau koma fram, breiða úr sér og hjaðna.

Tjónmætti er gjarnan notað til þess að meta hvort straumhraði og vatnsdýpi verði umfram það sem líklegt er að mannvirki þoli eða hvort fólki stafi hættu af flóðum af ákveðinni stærð (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022). Með því að flokka tjónmættisgildi eftir stærð má þannig leggja mat á hættu sem steðjað getur að húsum og innviðum. Dæmi um útreikning á tjónmætti er sett fram af bresku ríkisstofnuninni DEFRA við mat á áhættu fólks vegna vatnsflóða (DEFRA, 2006a,b). Tjónmætti flóða (hér nefnt hr sem stytting á Hazard Rating) er reiknað með jöfnu (8), sjá heimildir (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022) og (DEFRA, 2006a,b).

$$hr = (v + 0,5) \cdot d + DF \quad (8)$$

Stærðirnar v og d eru eins og áður straumhraði og dýpi. Fastanum 0,5 er bætt við í þessari jöfnu, til þess að koma í veg fyrir að djúpt vatn með lítinn straumhraða flokkist sem hættulítið.

Stuðullinn DF (e. *debris factor*) í jöfnu (8), lýsir magni lausagryjts, ísjaka, braks og annars efnis í flóðinu og tekur gildi á bilinu 0–1. Gildið 0 á við hæg flóð sem bera ekki með sér lausagryjt, ísjaka eða annað efni. Gildið 0,5 á við flóð sem ber með sér lausagryjt, ísjaka og brak og gildið 1 á við flóð sem ber með sér mikið af slíku. Í þessu verkefni er stuðullinn hafður $DF = 0,5$.

Hægt er að reikna út gildið $hr = hr(x,y,t)$ skv. jöfnu (8) fyrir hvert hnit og tímasetningu sem reikningarnir ná yfir og er það gert í þessu verkefni. Hins vegar er látið nægja að birta hámarks tjónmætti $hr_{\max} = hr_{\max}(x,y)$ skv. jöfnu (6) og er sú niðurstaða notuð til að flokka þá hættu sem fólki stafar af flóðum. Samkvæmt DEFRA er mælt með flokkun á tjónmættisgildum skv. töflu 1 (Surendran o.fl., 2008). Fyrir sviðsmyndir þessa verkefnis má sjá lokaniðurstöður slíkrar greiningar í viðauka.

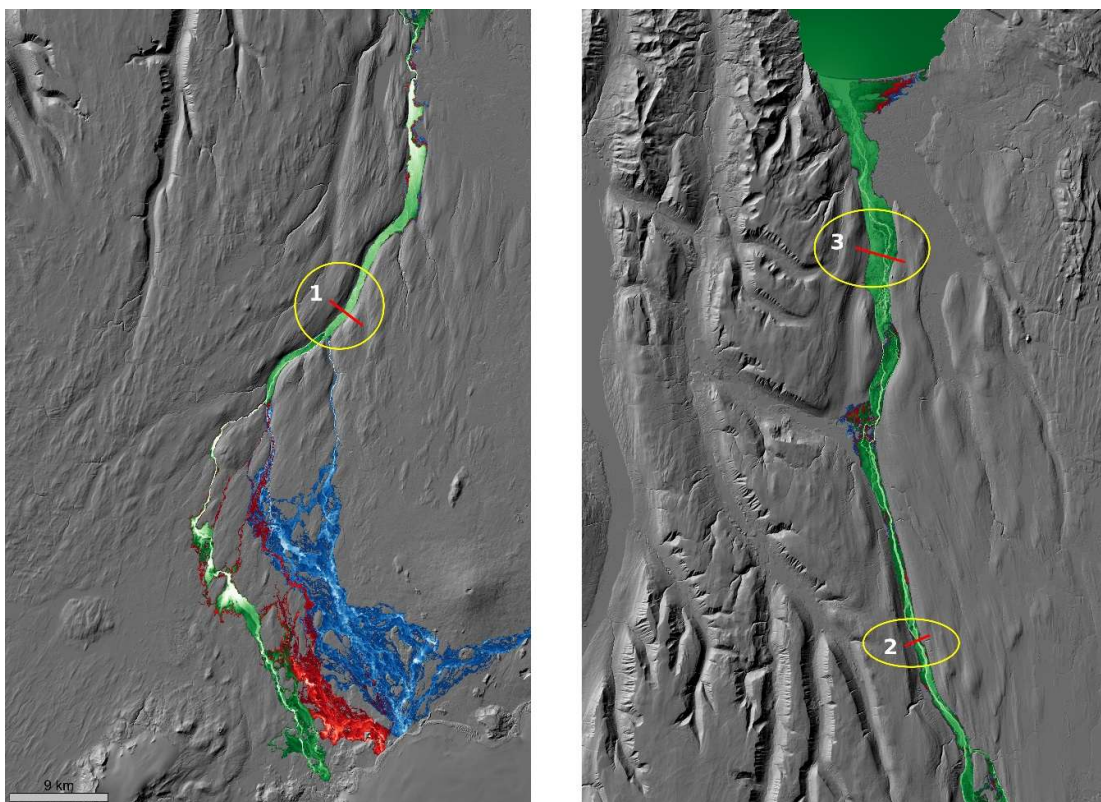
Tafla 1. Hætta sem fólki stafar af flóði, samkvæmt flokkun tjónmættisgilda $hr_{\max}$. Sjá ítarlegri umfjöllun í heimild (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022).

Tjónmættisgildi	Litaflokkun	Hætta gagnvart fólki
< 0,75		Mjög lítil hættu
0,75–1,25		Hætta fyrir börn, eldra fólk og þá sem fara hægt yfir
1,25–2,0		Hætta fyrir flesta
> 2,0		Hætta fyrir alla, þ.m.t. fyrir björgunaraðila

3 Niðurstöður

Hér að neðan er fjallað um niðurstöður sviðsmyndanna A, B og C (sbr. kafla 2.2.2). Í sviðsmynd A er hámarksrennslið 19.300 m³/s (kafla 3.1), í sviðsmynd B 14.000 m³/s (kafla 3.2) og í sviðsmynd C reiknast hámarksrennsli 10.200 m³/s (kafla 3.3). Öll kort sem hér er vísað til, eru birt í Viðauka B. Kortin sýna bæði hámarksútbreiðslu jökulhlaupa og tjónmætti fyrir þessar sviðsmyndir og eru aðalafurð þessa verkefnis. Hér í þessu verkefni er horft til verstu sviðsmynda en fyrir minni og líklegri hlaup má horfa til tiltækra útreikninga á áætluðu úrkomu og leysingarflóði með 1000 ára endurkomutíma. Útbreiðsla og tjónmætti slíks flóðs í Skjálfafljóti voru reiknuð í hættumati vatnasviða árið 2021 (Tinna Þórarinsdóttir o.fl. 2021). Miðað var við flóð með hámarksrennsli 1.400 m³/s við Aldeyjarfoss og 1.740 m³/s við Goðafoss, sem er á við jökulhlaup vegna lítils eða meðalstórs goss undir jökli í norðurhlíðum Bárðarbungu (Magnús Tumi Guðmundsson, 2014). Niðurstöðurnar úr þeim reikningum má sjá í viðauka við greinargerð Tinnu Þórarinsdóttur og fleiri (2021).

Í þessum kafla er farið stuttlega yfir niðurstöður fyrir þrjú rennslisþversnið sem sýnd eru á mynd 4. Á myndinni má einnig sjá mismunandi útbreiðslu hlaupvatns í sviðsmyndunum þrem á hálendari hluta reiknisvæðisins (u.þ.b. 40 km rennslisleið frá jökulrönd). Rennslisleið og útbreiðsla stjórnað að verulegu leyti af legu upptakanna norðantil í Bárðarbungu (sjá mynd 2). Bláa flóðsléttan sýnir hlaupið sem kemur fram í sviðsmynd A, hin rauða sýnir sviðsmynd B og sú græna sviðsmynd C.



Mynd 4. Staðsetning rennslisþversniða sem númeruð eru 1, 2 og 3. Bláa flóðsléttan gildir fyrir sviðsmynd A með $19.300 \text{ m}^3/\text{s}$ hámarksrennsli (kaflí 3.1), rauða fyrir sviðsmynd B, $14.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (kaflí 3.2) og græna fyrir sviðsmynd C, $10.200 \text{ m}^3/\text{s}$ (kaflí 3.3).

Rennslisþversniðin eru merkt með tölunum 1 til 3. Hvert stakt þversnið á mynd 4 liggur í beinni línu milli hnitanna (x_1, y_1) og (x_2, y_2) í hnitakerfinu (ISN93/EPSSG:3057):

1. $(x_1, y_1) = [571022.4, 515539.6]$ til $(x_2, y_2) = [572067.4, 514886.5]$
2. $(x_1, y_1) = [570489.8, 558316.2]$ til $(x_2, y_2) = [571554.9, 558667.9]$
3. $(x_1, y_1) = [566339.7, 594641.5]$ til $(x_2, y_2) = [569304.1, 593968.3]$

Rennslisþversnið 1 er við Batabrekku (einnig nálægt Smiðjuskógi), þversnið 2 er við Spónastokk (einnig nálægt Vallafjalli) og þversnið 3 er við Skriðhverfi.

Fyrir hvert þversnið er reiknað rennslið $Q = Q(t)$ í rúmmetrum á sekúndu (m^3/s) sem fall af tíma. Að auki er jafna (9) notuð til að reikna út heildarrúmmálið sem fer um tiltekið þversnið á 60 klst, þ.e. heildunartíminn T er ákvarðaður 60 klst.

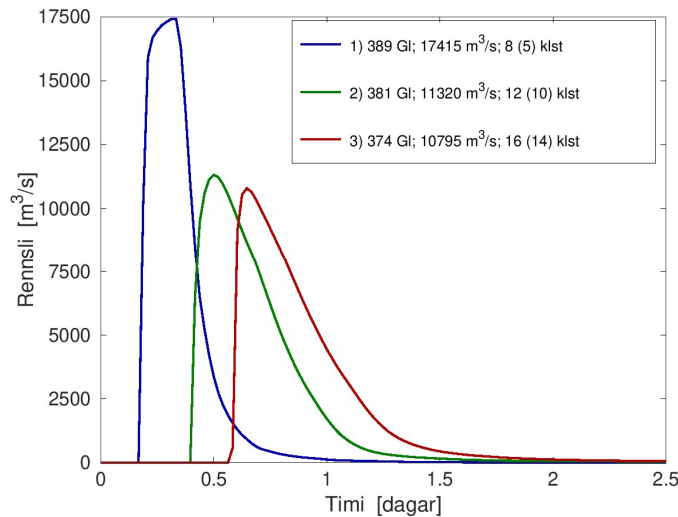
$$V = \int_0^T Q(t) dt \quad (9)$$

Í þessu verkefni er skrifbilið í hermun ákvarðað $\Delta HD = 30 \text{ mín}$; þ.e. jafna (9) heildar í 30 mínútna skrefum yfir samtals 60 klst (2,5 sólarhringa). Rennslisritin að neðan sýna að hlaupin hafa dvínað mjög eftir 48 klst og rennsli Skjálfandafljóts er þá orðið nærri venjulegu á ný.

3.1 Sviðsmynd A – $19.300 \text{ m}^3/\text{s}$ (6 m reikninet)

Mynd 5 sýnir reiknað rennsli í gegnum þversnið 1, 2 og 3. Táknlykillinn í ramma á myndinni sýnir fimm tölur: Fyrsta talan er númer þversniðs (sjá mynd 4). Önnur talan sýnir samanlagt rennsli í gegnum tiltekið þversnið í gígalítrum (Gl) samkvæmt jöfnu (9). Þriðja talan sýnir

hámarksrennslið Q_{max} , fjórða talan sýnir eftir hve margar klst þetta hámarksrennsli á sér stað og fimmta talan (í sviga) sýnir hvenær stafn flóðbylgju nær að tilteknu þversniði. Tíminn 0 klst miðast við upphaf reikninga, þ.e. þegar jökulhlaup hefst við jökuljaðar. Athuga ber að öll þessi gildi eru nálgðu í næstu heilu tölu, t.d. „1) 389,4 Gl; 17414,9 m³/s; 7,5 (4,8) klst“ eru nálgðu í „1) 389 Gl; 17415 m³/s; 8 (5) klst“. Með þessari nálgun, ásamt skrifbili $\Delta HD = 30$ mín, er óvissa í tímasetningu táknykils u.þ.b. ± 30 mín = $\pm 0,5$ klst. Samkvæmt umræðu í kafla 4 er a.m.k. 15% óvissa í niðurstöðum líkanreikninganna og reynist hún ráðandi í mati á heildaróvissu. Þetta mat á óvissu er byggt á áhrifum á óvissu í hryfisstuðli Mannings og breytilegs þéttleika reikninet, en ekki þeirri óvissu sem aðrir þættir kunna að skapa líkt og fram kemur í kafla 4.



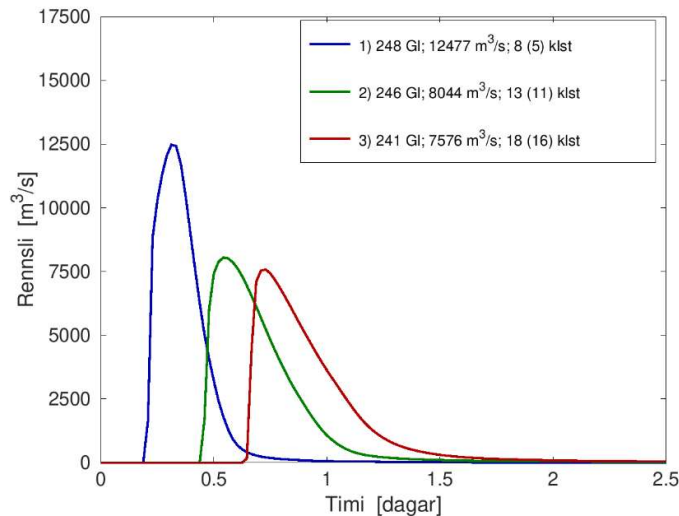
Mynd 5. Rennsli um þversnið 1, 2 og 3 á mynd 4. Sviðsmynd A: 19.300 m³/s.

Í sviðsmynd A, er hámarksrennsli um þversnið 1 (þ.e við Batabrekku/Smiðjuskóg) 17.415 m³/s og er þessu hámarki náð 8 klst eftir upphaf jökulhlaups við jaðar jökulsins. Það tekur flóðstafinn um 5 klst að ferðast frá jökuljaðri að þessu þversniði. Eftir um 14 klst, hefur flóðstafinn náð Skriðhverfi.

Á 60 klst tímabili flæða 389 Gl um þversnið 1 (sbr. jöfnu (9)), en til samanburðar er heildarsviðsmyndin 425 Gl, sbr. mynd 3. Eftir 2,5 sólarhringa hefur rennslið í gegnum þversniðið náð 92% af heildarrúmmáli hlaupvatnsins og eftir jafnlangan tíma hafa 88% hlaupvatns farið um þversnið 3 við Skriðhverfi.

3.2 Sviðsmynd B – 14.000 m³/s (4 m reikninet)

Í sviðsmynd B (mynd 6) er hámarksrennslið Q_{max} um þversnið 1 (við Batabrekku/Smiðjuskóg) 12.477 m³/s og er þessu hámarki náð 8 klst eftir að jökulhlaup hefst við jökuljaðar. Það tekur flóðstafinn um 5 klst að ferðast frá jökuljaðri að þessu þversniði og er þetta svipaður tími og í sviðsmynd A. Nákvæmar tiltekið er rennslistíminn 5,25 klst (sviðsmynd B) á móti 4,75 klst (sviðsmynd A). Í þessu samhengi ber að athuga að lestraróvissa þessara gagna er um ± 30 mín (sjá kafla 3.1). Einnig ber þess utan að hafa í huga a.m.k. 15% óvissu í reikningum (sbr. kafla 3.1). Eftir um $16 \pm 0,5$ klst frá upphafi jökulhlaups er flóðstafinn kominn að Skriðhverfi.



Mynd 6. Rennsli um þversnið 1, 2 og 3 á mynd 4. Sviðsmynd B: 14.000 m³/s.

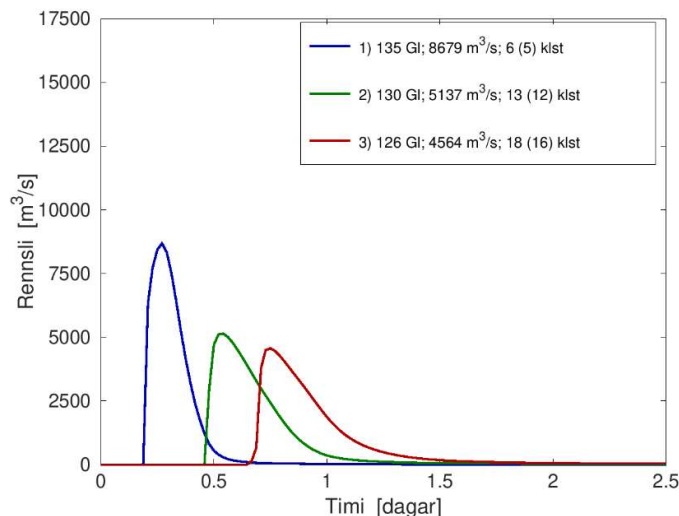
Á 60 klst flæða 248 Gl um þversnið 1, en til samanburðar er hlauprennsli í þessari sviðsmynd 255 Gl, sbr. mynd 3. Rennslið um þversnið 1 nemur því 97% af hlauprennslinu. Á sama tíma hafa 95% hlaupvatns farið um þversnið 3 við Skriðuhverfi.

3.3 Sviðsmynd C – 10.200 m³/s (4 m reikninet)

Í sviðsmynd C (mynd 7) er hámarksrennsli Q_{max} um þversnið 1 (við Batabrekku/Smiðjuskóg) 8.679 m³/s og er þessu hámarki náð 6 klst eftir upphaf hlaupsins við jökuljaðar.

Það tekur flóðstafinn um 5 klst að ferðast frá jökuljaðri að þversniði 1 og er þetta svipaður tími og í sviðsmyndum A og B (nákvæmar: C = 5,25 klst; B = 5,25 klst og A = 4,75 klst; lestraróvissa ± 30 mín = $\pm 0,5$ klst, sbr. kafla 3.1). Eftir um $16 \pm 0,5$ klst, er flóðstafinn kominn að Skriðuhverfi.

Á 60 klst tímabili flæða 135 Gl um þversnið 1, en til samanburðar er heildarsviðsmyndin 136 Gl, sbr. mynd 3. Reiknað heildarrennsli um þetta þversnið nemur því 99% af hlaupvatni í þessari sviðsmynd. Á sama tíma hafa 93% hlaupvatns farið um þversnið 3 við Skriðuhverfi.



Mynd 7. Rennsli um þversnið 1, 2 og 3 á mynd 4. Sviðsmynd C: 10.200 m³/s.

4 Óvissuþættir

Við skoðun og túlkun niðurstaðna er gott að hafa í huga að ýmsar takmarkanir fylgja aðferðum þeim og nálgunum sem nýttar eru í þessu verkefni. Ber fyrst að nefna óvissuþætti á borð við mat á stærð sviðsmyndar, tímaþróun rennslis undan jökli, val á hrýfisstuðli Mannings og ástand landlíkans. Þá er ekki gert ráð fyrir rennslis vatns ofan í hraunin, né gert ráð fyrir rofi eða setflutningi. Þess ber að geta að hér er aðeins fjallað um óvissu vegna hrýfisstuðuls og upplausn reikninets.

Í kafla 4.1 er fjallað um áhrif óvissu í hrýfisstuðli Mannings og í kafla 4.2 eru könnuð áhrif breytilegs þéttleika reikninets (s.k. *mesh independence analysis*). Er þetta dæmi um áhrif sem geta skekkt niðurstöður líkanreikninganna.

4.1 Næmnigreining fyrir Manning stuðul

Sviðsmyndirnar þrjár, A, B og C, eru reiknaðar með hrýfisstuðlinum $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ og lýsir þetta gildi bæði grófum farvegi og jökulvatni með miklu íshröngli (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017). Mikil einföldun er að velja einn Manning stuðul fyrir allan farveginn frá jökli alla leið til ósa. Nákvæmara væri að taka tillit til mismunandi gerðar farvegarins og leyfa gildinu að lækka með fjarlægð frá jökli eftir því sem íshröngl og aurburður sest til. Hinsvegar verður að hafa í huga að mikil óvissa er þegar til staðar í líkaninu, sérstaklega varðandi tímaþróun rennslis undan jökli (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).

Til að fá skýrari hugmynd um áhrif Manning stuðuls á niðurstöður var sviðsmynd A keyrð með hrýfisgildinu $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ og niðurstaðan borin saman við samsvarandi niðurstöðu með hrýfisgildinu $0,05 \text{ s/m}^{1/3}$. Mynd 8 sýnir þennan samanburð fyrir rennslíð Q í gegnum þversnið 1 til 3. Eins og áður hefur verið nefnt er þversnið 1 við Batabrekku, þversnið 2 er við Spónastokk og þversnið 3 er við Skriðuhverfi, sjá mynd 4.

Táknlykillinn á mynd 8 er hinn sami og á myndum 5, 6 og 7: Fyrsta talan er númer þversniðs; 1, 2 eða 3 og hér hefur hvert þversniðsnúmer undirtöluna 5 (fyrir hrýfisstuðulinn $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$) eða 3 (hrýfisstuðulinn $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$). Önnur talan sýnir samanlagt rennslí í gegnum tiltekið þversnið í gígalítrum (Gl) samkvæmt jöfnu (9). Þriðja talan sýnir hámarksrennslíð Q_{max} . Fjórða talan sýnir eftir hve margar klst (frá upphafi hlaups) þetta hámarksrennslí á sér stað og fimmta talan (í sviga) sýnir eftir hve margar klst flóðstafinn nær að tilteknu þversniði. Eins og ávallt miðast tíminn 0 við upphaf hlaups við jaðar jökuls. Öll gildi eru nálgðuð að næstu heilu tölu.

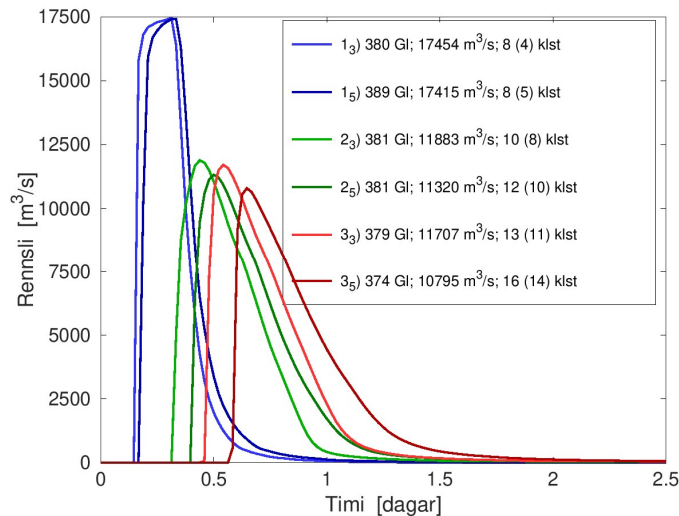
Munurinn á hámarksrennslí Q_{max} fyrir hrýfistilfellin $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ og $0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ er reiknaður hér að neðan ($p1 =$ þversnið 1 og $p3 =$ þversnið 3):

- $\Delta Q_{max-p1} = 100 \cdot (17454 \text{ m}^3/\text{s} - 17415 \text{ m}^3/\text{s}) / ((17454 \text{ m}^3/\text{s} + 17415 \text{ m}^3/\text{s})/2) = 0\%$
- $\Delta Q_{max-p2} = 100 \cdot (11883 \text{ m}^3/\text{s} - 11320 \text{ m}^3/\text{s}) / ((11883 \text{ m}^3/\text{s} + 11320 \text{ m}^3/\text{s})/2) = 5\%$
- $\Delta Q_{max-p3} = 100 \cdot (11707 \text{ m}^3/\text{s} - 10795 \text{ m}^3/\text{s}) / ((11707 \text{ m}^3/\text{s} + 10795 \text{ m}^3/\text{s})/2) = 8\%$

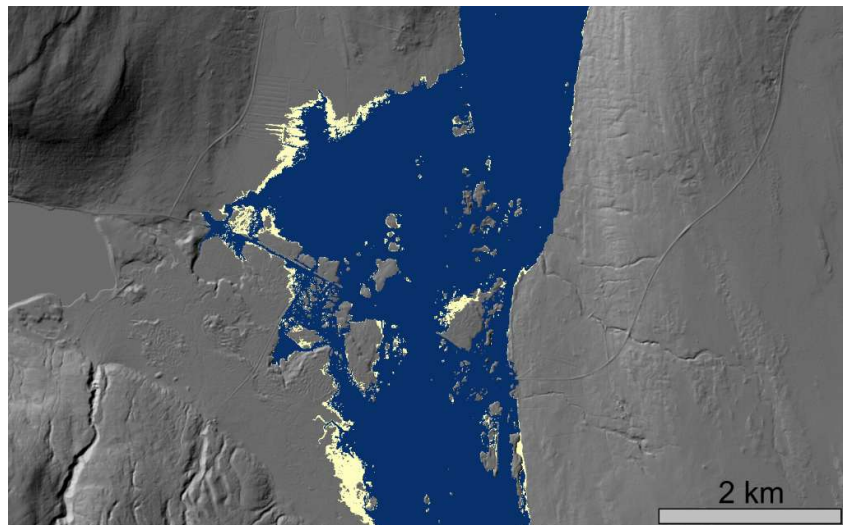
Tilsvarandi munur á tímasetningu reiknast þannig:

- $\Delta t_{p1} = 100 \cdot (5 \text{ klst} - 4 \text{ klst}) / ((5 \text{ klst} + 4 \text{ klst})/2) = 22\%$
- $\Delta t_{p2} = 100 \cdot (10 \text{ klst} - 8 \text{ klst}) / ((10 \text{ klst} + 8 \text{ klst})/2) = 22\%$
- $\Delta t_{p3} = 100 \cdot (14 \text{ klst} - 11 \text{ klst}) / ((14 \text{ klst} + 11 \text{ klst})/2) = 24\%$

Út frá ofangreindum gildum, þ.e. prósentugildin 0% til 24%, má gróflega gera ráð fyrir a.m.k. 15% óvissu þegar niðurstöður líkanreikninganna eru túlkaðar. Þetta óvissumat er t.d. í samræmi við heimild (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017) fyrir Jökulsá á Fjöllum.



Mynd 8. Rennsli um þversnið 1, 2 og 3 fyrir hrýfisgildin $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ og $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$. Gildir fyrir sviðsmynd A: $19.300 \text{ m}^3/\text{s}$ og 6 m reikninet.



Mynd 9. Samanburður á hámarksútbreiðslu hlaups við Fosshól fyrir $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ (gult) og $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ (blátt). Sviðsmynd A: $19.300 \text{ m}^3/\text{s}$ og 6 m reikninet.

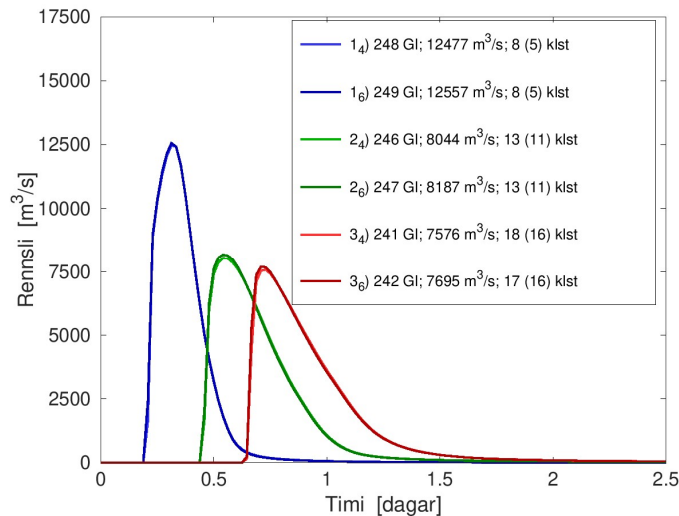
Mynd 9 sýnir samanburð á hámarksútbreiðslu flóðvatns við Fosshól (hjá hringvegi) fyrir mismunandi hrýfisstuðul Mannings $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ og $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$. Fyrir hærra gildið eykst útbreiðslan samfara aukinni vatnshæð. Mismunur á útbreiðslu vegna breytilegs Manningsstuðuls er meiri þarna en annars staðar á reiknisvæðinu og skýrist það af landslagi og legu hlaupfarveggar.

4.2 Næmnigreining fyrir upplausn reikninet

Við reikninga fyrir hinar stærri sviðsmyndir þarf að stækka möskva reikninettsins og getur það leitt til minni nákvæmni í niðurstöðum. Til að meta áhrif möskvastærðar var sviðsmynd B keyrð frá upphafi til enda fyrir tvö tilfelli, annarsvegar á 4 m reiknineti og hinsvegar á 6 m reiknineti.

Mynd 10 sýnir þróun rennslis og vatnshæðar í þessum keyrslum fyrir þversnið 1, 2 og 3. Sjá útskýringu á táknyklum í kafla 3 (þ.e. táknyklar eru eins og fyrir myndir 5 til 8).

Eins og sjá má á mynd 10 er svo til enginn munur á rennsli $Q = Q(t)$ um þversniðin fyrir 4 m og 6 m reikninet.



Mynd 10. Rennsli í gegnum þversnið 1, 2 og 3 fyrir 4 og 6 m reikninet. Sviðsmynd B: 14.000 m^3/s og $n = 0,05 \text{ s}/\text{m}^{1/3}$.

5 Samantekt

Í skýrslu þessari eru settar fram niðurstöður líkanreikninga á útbreiðslu, rennslishegðun og tjónmætti jökulhlaupa sem upptök ættu undir jökli í norðanverðri Bárðarbungu og bærast þaðan um farveg Skjálfandafljóts og nálæg svæði, allt til sjávar í Skjálfanda. Rennsli frá upptökum í þeim þrem sviðsmyndum, sem kannaðar voru, er 10.200 m^3/s , 14.000 m^3/s og 19.300 m^3/s . Öll hlaupin næðu efstu byggð í Bárðardal eftir 7–9 klst og þar væri rennslishámarki náð 1–3 klst síðar (sbr. tölur varðandi þversnið 1 og 2). Þjóðvegi 1 við Goðafoss væri náð 11–14 klst eftir upphaf við jökuljaðar og hámarki væri náð kringum 1–3 klst síðar (sbr. tölur varðandi þversnið 2 og 3). Frá Goðafossi tæki það hlaupin svo 6–7 klst til viðbótar að ná til sjávar þannig að í öllum tilvikum væru mestu hamfarirnar yfirstaðnar á innan við sólarhring og hlaupin að mestu hjöðnuð þegar 2 sólarhringar væru liðnir frá því rennsli undan jökli hófst.

Kort 1–5 af hámarksútbreiðslu sýna að stærsta hlaupið, sem á upptök sín austast og nyrst í hlíðum Bárðarbungu, mundi dreifa mest úr sér á fyrsta kaflanum suðvestan og vestan Trölladyngju. Það bærast svo allt í núverandi farveg Skjálfandafljóts norðan Fljótshnjúks og Ytrimúla. Ofan Aldeyjarfoss ykist útbreiðsla aftur og hluti hlaupvatns bærast í neðstu 10 km af farvegi Suðurár. Þar fyrir neðan tekur allur Bárðardalur við og næði hlaupið yfir 1–2 km breitt svæði í dalbotninum öllum, niður undir Goðafoss. Í Köldukinn yrði smám saman enn meiri útbreiðsla og mikill hluti láglendis við Skjálfanda færi undir vatn. Veruleg hættu mundi steðja að nokkrum bæjum á hlaupleiðinni, allt frá efstu byggð í Bárðardal.

Smærri hlaupin bærast eftir afmarkaðri rennslisleiðum frá Bárðarbungu niður í farveg Skjálfandafljóts en frá og með Fljótshnjúk og alla leið til sjávar yrði lítill munur á útbreiðslu í sviðsmyndunum þrem. Einnig reiknast tiltölulega lítill munur á tjónmætti í sviðsmyndum A, B og C (kort 6–17) og er það mjög hátt á mestöllu hinu byggða svæði sem reikningarnir ná til.

Heimildir

- Árni Pálsson og K. Otterstedt (1936). Virkjun Goðafoss. *Tímarit Verkfræðingafélagsins*, 21(4), 27–36.
- Berger M.J., George D.L., LeVeque R.J. og Mandli K.T. (2011). The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Advances in Water Resources*, 34, 1195–1206.
- Clawpack Development Team (2020), Clawpack Version 5.7.1, <http://www.clawpack.org>, doi: 10.5281/zenodo.4025432
- Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) (2006a). *Flood Risks to People*. Phase 2 (Skýrsla FD2321/TR2).
- Department for Environment Food and Rural Affairs (DEFRA) (2006b). *R&D OUTPUTS: Flood Risks to People*. Phase 2 (Skýrsla FD2321/TR1).
- Emmanuel Pagneux, Matthías Á. Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilson og Matthew J. Roberts (2018). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá - Hermun flóðasviðsmynda*. Skýrsla VÍ 2018-008. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Emmanuel Pagneux, Matthías Á. Jónsson, Bogi B. Björnsson, Sif Pétursdóttir, Njáll F. Reynisson, Hilmar B. Hröðmarsson, Bergur Einarsson og Matthew J. Roberts (2019). *Hættumat vegna vatnsflóða í Ölfusá*. Skýrsla VÍ 2019-013. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Fjallkonan (1896). Skemmdir á brúm. XIII árgangur, 11. tbl, 10. mars. Reykjavík.
- George, D. (2010). Adaptive finite volume methods with well-balanced Riemann solvers for modeling floods in rugged terrain: Application to the Malpasset dam-break flood (France, 1959). *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 66(8), 1000–1018.
- Jón Elvar Wallevik, Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson, Bogi Brynjar Björnsson og Matthew J. Roberts (2024). *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum: Tæknilegar niður-stöður hættumats*. Skýrsla VÍ 2024-007. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Landmælingar Íslands (2020). ÍslandsDEM útgáfa 1.0, <https://gatt.lmi.is/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/e6712430-a63c-4ae5-9158-c89d16da6361>
- LeVeque, R.J. (2002). *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*, Cambridge University Press.
- LeVeque, R.J., George, D.L. og Berger M.J. (2011). Tsunami modelling with adaptively refined finite volume methods. *Acta Numerica*, 20, 211–289.
- Magnús T. Guðmundsson og Þórdís Högnadóttir (2006). Ísbráðnun og upptakarennisli jökulhlaupa vegna eldgosa í Kötluöskju og austanverðum Mýrdalsjökli. Skýrsla RH-02-2006. Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands.
- Magnús Tumi Guðmundsson (2014). Vatnasvið Skjálfafljóts undir jökli - Ísþykkt, vatnaskil og möguleg lega gossprungna, Minnisblað dags. 26. ágúst 2014, Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands.
- Mandli, K. T. og Dawson, C. N. (2014). Adaptive Mesh Refinement for Storm Surge. *Ocean Modelling*, 75, 36–50.
- Matthías Ásgeir Jónsson, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux, Bogi B. Björnsson, Davíð Egilson, Tómas Jóhannesson og Matthew J. Roberts (2018). *Hættumat vegna jökulhlaupa í Skaftá - Kvörðun straumfræðilíkans*. Skýrsla VÍ 2018-007. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason og Tómas Jóhannesson (2016). *Hættumat vegna berghlaupa í Öskju*. Skýrsla VÍ 2016-007. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.

- Sigríður Sif Gylfadóttir, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel P. Pagneux og Bogi Brynjar Björnsson (2017). *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum með GeoClaw*. Skýrsla VÍ 2017-004. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Sigurdís Björg Jónasdóttir (2020). The geomorphological and sedimentary signature of palaeo jökulhlaup on the north-western flank of Bárðarbunga volcano, Iceland. MS ritgerð, Newcastle University. 167 bls.
- Surendran, S., G. Gibbs, N. Wade & H. Udale-Clarke (2008). Supplementary note on flood hazard ratings and thresholds for development planning and control purpose – Clarification of the Table 13.1 of FD2320/TR2 and Figure 3.2 of FD2321/TR1.
https://assets.publishing.service.gov.uk/FLOOD_HAZARD_RATINGS_AND_THRESHOLDS_explanatory_note.pdf
- Tinna Þórarinsdóttir, Matthew J. Roberts, Jón Elvar Wallevik, Bogi Brynjar Björnsson og Andréa-Giorgio R. Massad (2021). Hættumat vatnasviða: Eyjafjarðará, Héraðsvötn, Hvítá í Borgarfirði, Lagarfljót og Skjálfandafljót. Greinargerð TTh/ofl/2021-01. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Tinna Þórarinsdóttir, Matthew J. Roberts og Bergur Einarsson (2022). Tillögur að áhættuviðmiðum fyrir vatnsflóð. Skýrsla VÍ 2022-005. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Tómas Jóhannesson, Tinna Þórarinsdóttir, Emmanuel Pagneux, Philippe Crochet og Esther H. Jensen (2014). Mat á vatnshæð í jökulhlaupi í Skjálfandafljóti vegna hugsanlegs eldgoss í eða við Bárðarbungu 2014. Minnisblað 28.8.2014 (Málsnúmer: 2014-233; Verknúmer: 3720-7-0001). Veðurstofa Íslands.
- Vegvísir um rannsóknarinnviði 2021 (Júní 2021). Mennta- og menningarmálaráðuneytið, Stjórnarráð Íslands.
- Versteeg H.K. og Malalasekera W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method, Second Edition, Pearson Education Limited.

Viðauki A – Hætta, tjónmætti, tjónnæmi og áhætta

Hér er stuttlega gerð grein fyrir hugtökunum *hættu*, *tjónmætti*, *tjónnæmi* og *áhætta*. Nánari umfjöllun um þessi hugtök og önnur sem notuð eru í þessu samhengi má sjá í kafla 1.2 „*Hugtök í hættu- og áhættumati*“ í skýrslu Tinna Þórarinsdóttur o.fl. (2022).

A.1 Aðrar skilgreiningar

Athuga ber að aðrar skilgreiningar á ofangreindum hugtökum eru einnig til. Til dæmis hefur hugtakið „Áhætta“ víðari merkingu hjá Almannavörnum. Hugtökin sem hér eru lýst miða við skilgreiningar í ofanefndri skýrslu (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022).

A.2 Tjónmætti og hættu

Tjónmætti (e. *damage potential*) flóða má kortleggja með því að taka saman upplýsingar um dýpi og straumhraða (t.d. úr straumfræðilegu líkani). Einnig er hægt að taka tillit til annarra þátta líkt og vatnshita og magns lausagtrjóts og annars efnis sem getur borist fram með flóði. Hægt er að nálga tjónmættið með vd fyrir hægt vaxandi flóð sem aðallega ógna mannvirkjum eða stuðlinum hr (e. hazard rating) fyrir hraðvaxandi flóð sem geta ógnað fólki (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022). Þ.e.

$$\text{Tjónmætti} \approx vd_{\max} \quad (\text{fyrir hæg vaxandi flóð}) \quad (\text{A.1})$$

$$\text{Tjónmætti} \approx hr_{\max} \quad (\text{fyrir hrað vaxandi flóð}) \quad (\text{A.2})$$

Sjá umfjöllun um $vd_{\max}$ og $hr_{\max}$ í kafla 2.3 (sjá einnig jöfnu (8) í kafla 2.4).

Líkur á sviðsmynd: Ef tiltekin sviðsmynd gildir fyrir flóð með 100 ára endurkomutíma er átt við að 1% líkur eru á því að flóð af þeirri stærð eða stærra verði á tilteknu ári. Yfir 100 ára tímabil getur þó hent að flóð af þeirri stærð verði aldrei, einu sinni eða oftar. Sjá skilgreininguna á endurkomutíma í kafla 1.2. í ofanefndri skýrslu (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022).

Hætta (e. *hazard*) = Ógnandi atburður. Líkur á því að náttúruhamfarir eða atburður sem getur valdið tjóni eigi sér stað innan tiltekins tíma og á tilteknu svæði. Mat á líkum og tjónmætti eru leiðir til að magntaka hættu.

A.3 Tjónnæmi

Tjónnæmi (e. *vulnerability*) = Tjónhlutfall (mælt í prósentum, frá 0 til 100%) sem yrði ef náttúruhamfarir eða atburður sem getur valdið tjóni eiga sér stað.

$$\text{Tjónnæmi} \in [0, 1] \quad (\text{A.3})$$

Tjónnæmi gagnvart flóðum má skipta upp í tvo þætti:

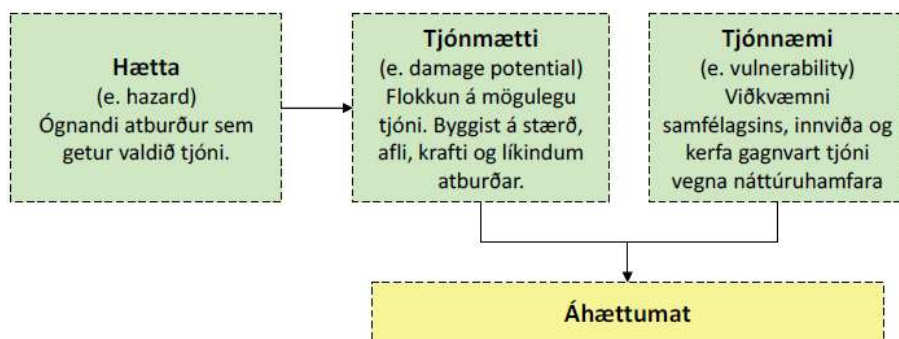
- Tjónnæmi svæðis (e. *area vulnerability*) byggist á stigagjöf fyrir þrjá þætti; i) viðvörunarkerfi, ii) rishraða, og iii) svæðisbundna eiginleika.
- Tjónnæmi fólks (e. *people vulnerability*) er metið út frá mati á hlutfalli fólks á svæðinu sem gæti átt í vandræðum með að forða sér.

A.4 Áhætta

Áhætta (e. *risk*) er háð Tjónnæmi og Tjónmætti. Hugtakið nær yfir það tjón sem ákveðin ógn veldur á ákveðnu svæði yfir ákveðið viðmiðunartímabil. Sé áhætta sett fram á stærðfræðilegan

hátt er hún reiknuð sem fall af hættu (að teknu tilliti til tjónmættis), annars vegar, og tjónnæmi (að teknu tilliti til verðmæta og viðveru), hins vegar.

$$\text{Áhætta} = f(\text{Tjónnæmi}, \text{Tjónmætti}) \quad (\text{A.4})$$



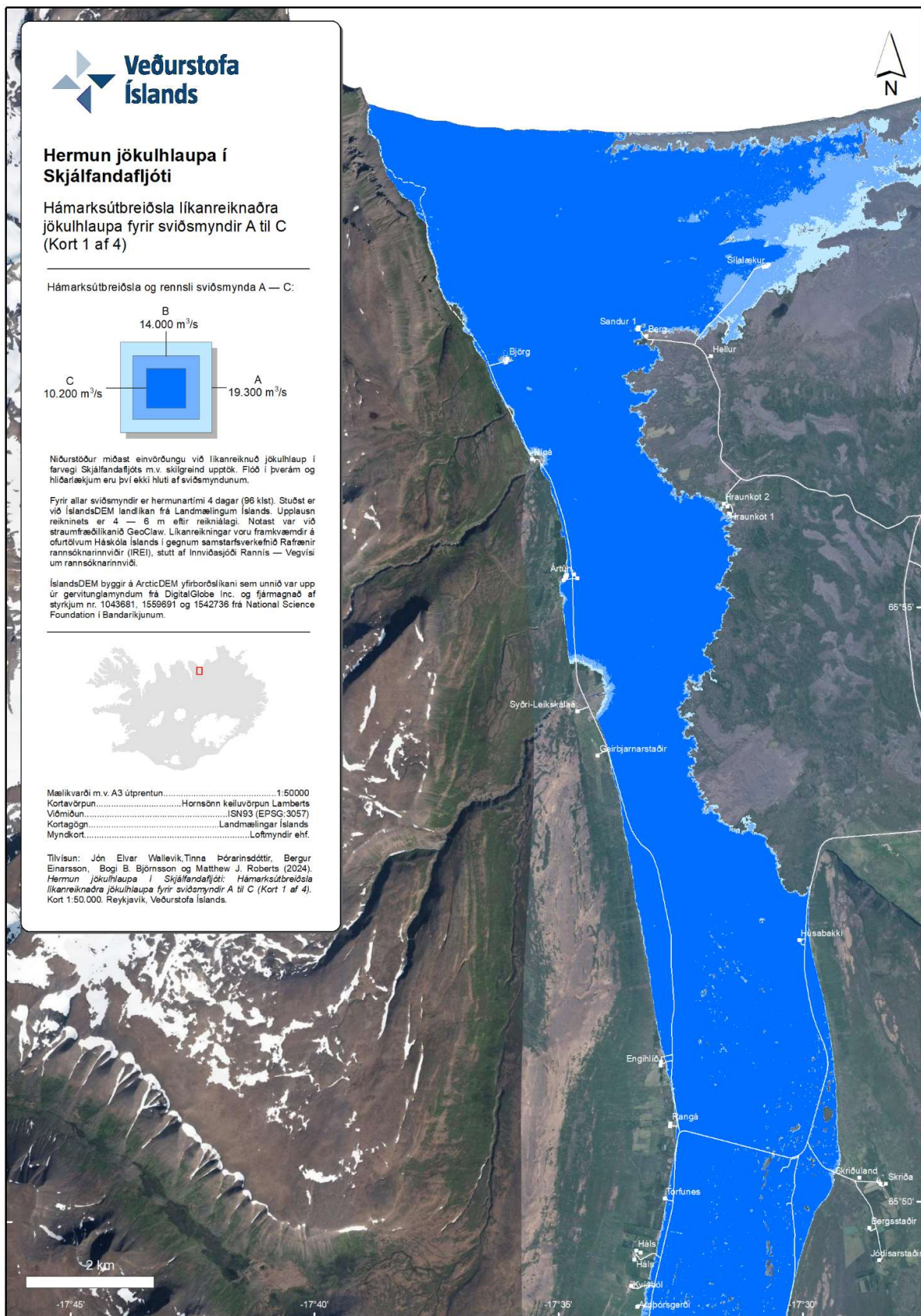
Mynd er sett saman af Trausta Jónssyni (2002).

Viðauki B – Heildstæð kort

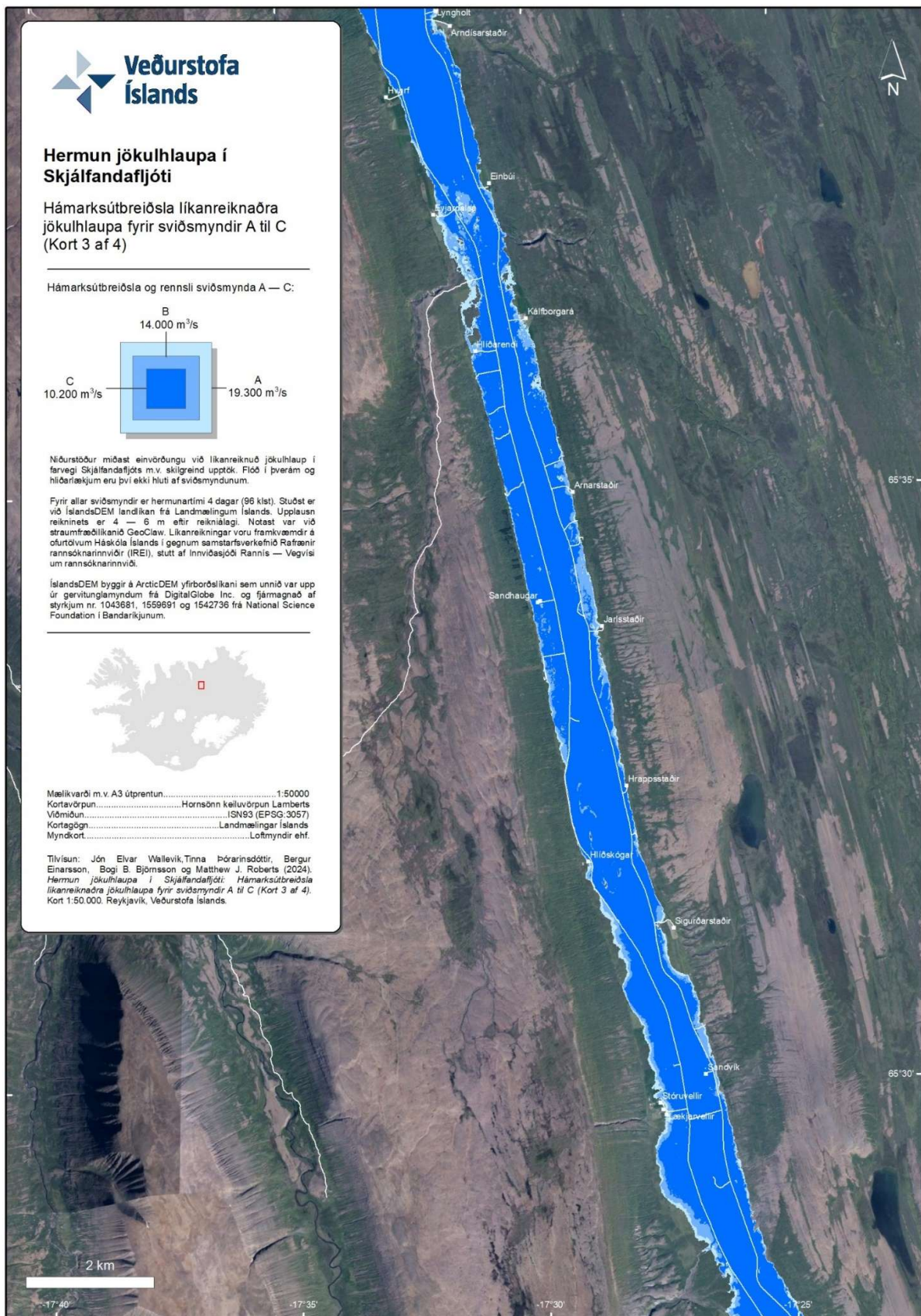
Í þessum viðauka eru birtar niðurstöður hættumats vegna reiknaðra jökulhlaupa niður farveg Skjálfandafljóts. Kortin sýna bæði hámarksútbreiðslu og tjónmætti hlaups fyrir mismunandi sviðsmyndir. Heildarlíkantími fyrir hverja sviðsmynd er 96 klst. (4 dagar) og tekur hámarksútbreiðslan og tjónmættið mið af því, sbr. jöfnur (6) og (7). Eins og sést t.d. fyrir þversnið 3 á mynd 5 í kafla 3 er hlaupið að mestu hjaðnað eftir 2 daga og litlar breytingar verða eftir það. Eru 96 klst. því nægjanlegur reiknitími til þess að ná yfir öll hámörk og mestalla hjöðnun útbreiðslu og tjónmættis.

Í öllum tilfellum hefur kortum verið skipt upp í smærri svæði til þess að sýna niðurstöður í hærri upplausn. Í þeim tilfellum eru kortin merkt með númerum frá ósum til upptaka, t.d. kort 1 af 5. Hámarksútbreiðslukortin eru af öllu reiknisvæðinu, frá jökuljaðri til ósa. Ekki var talin þörf á að sýna hættumatskort af efsta hálendi við jökul.

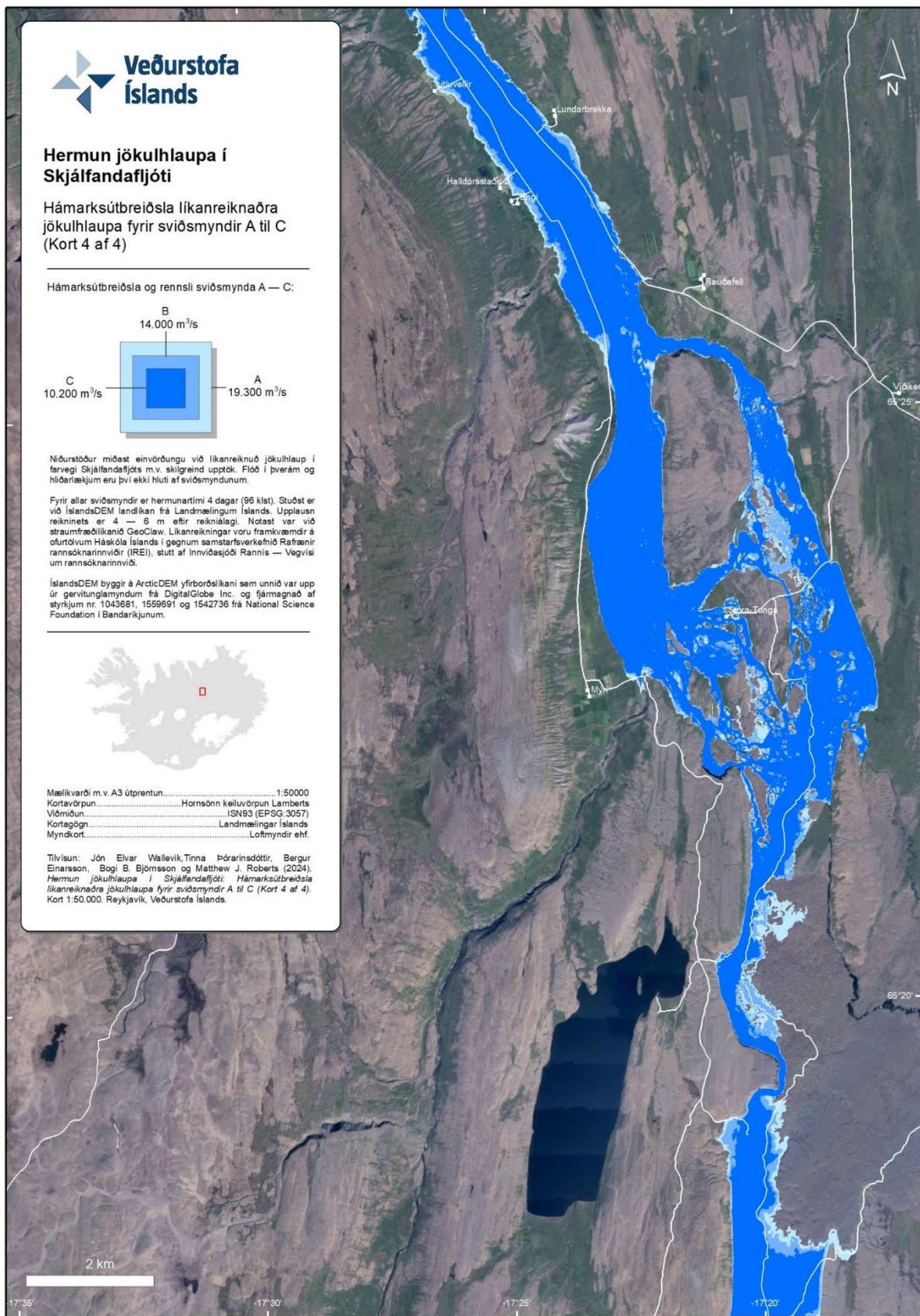
Í kortum sem sýna hámarks tjónmætti eru einnig sýndar framrásarlínur hlaups og eru þær merktar í klukkustundum frá upphafi hlaups við jökuljaðar. Samkvæmt umræðu í kafla 4, má gera ráð fyrir að lágmarki 15% óvissu í þessu mati sem ber að hafa í huga við mat á hættu.



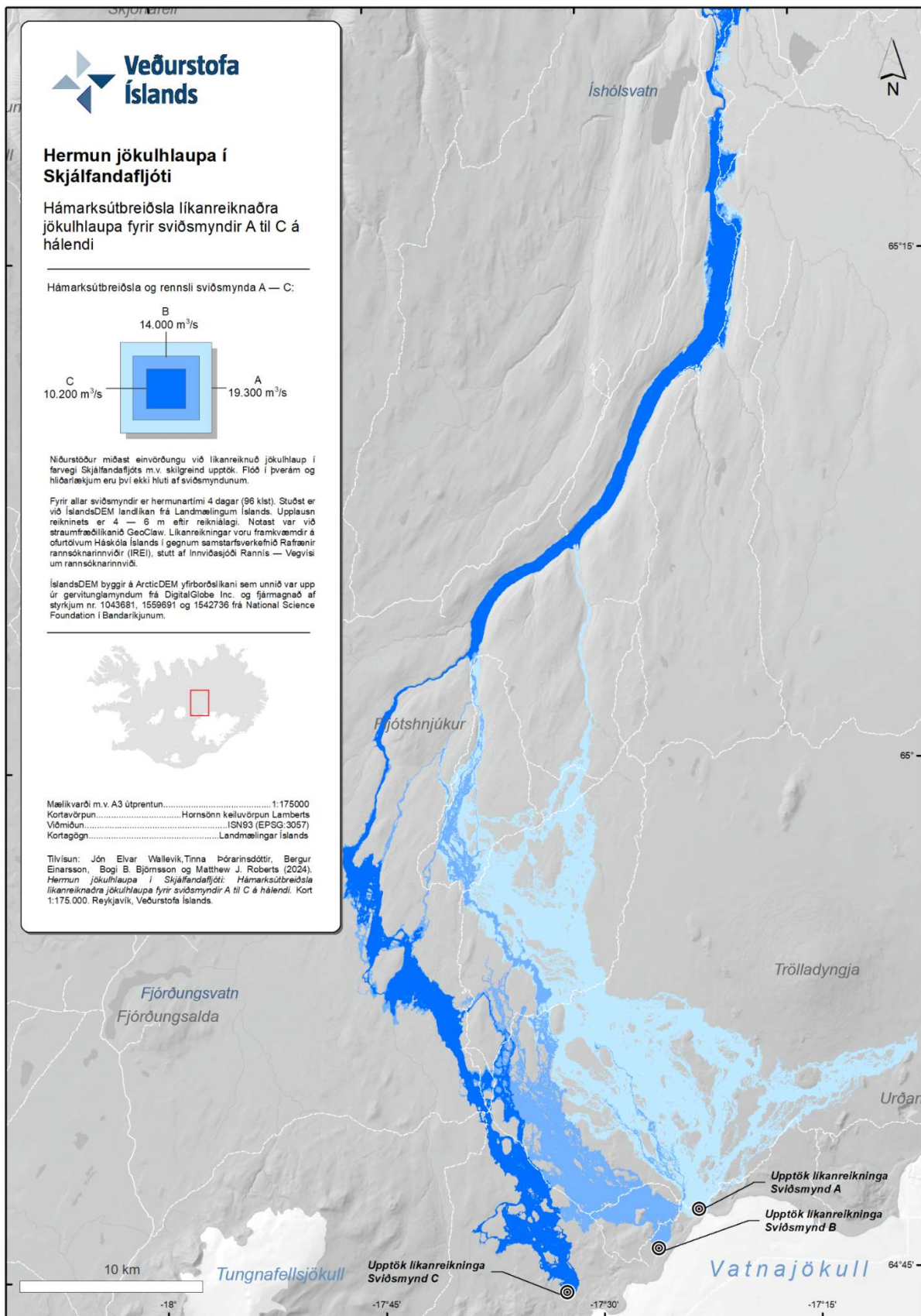
Viðauki B, Kort 1. Hámarksútbreiðsla líkanreiknaðra jökulhlaupa. Sviðsmyndir A til C: Kort 1 af 4, neðra svæði.



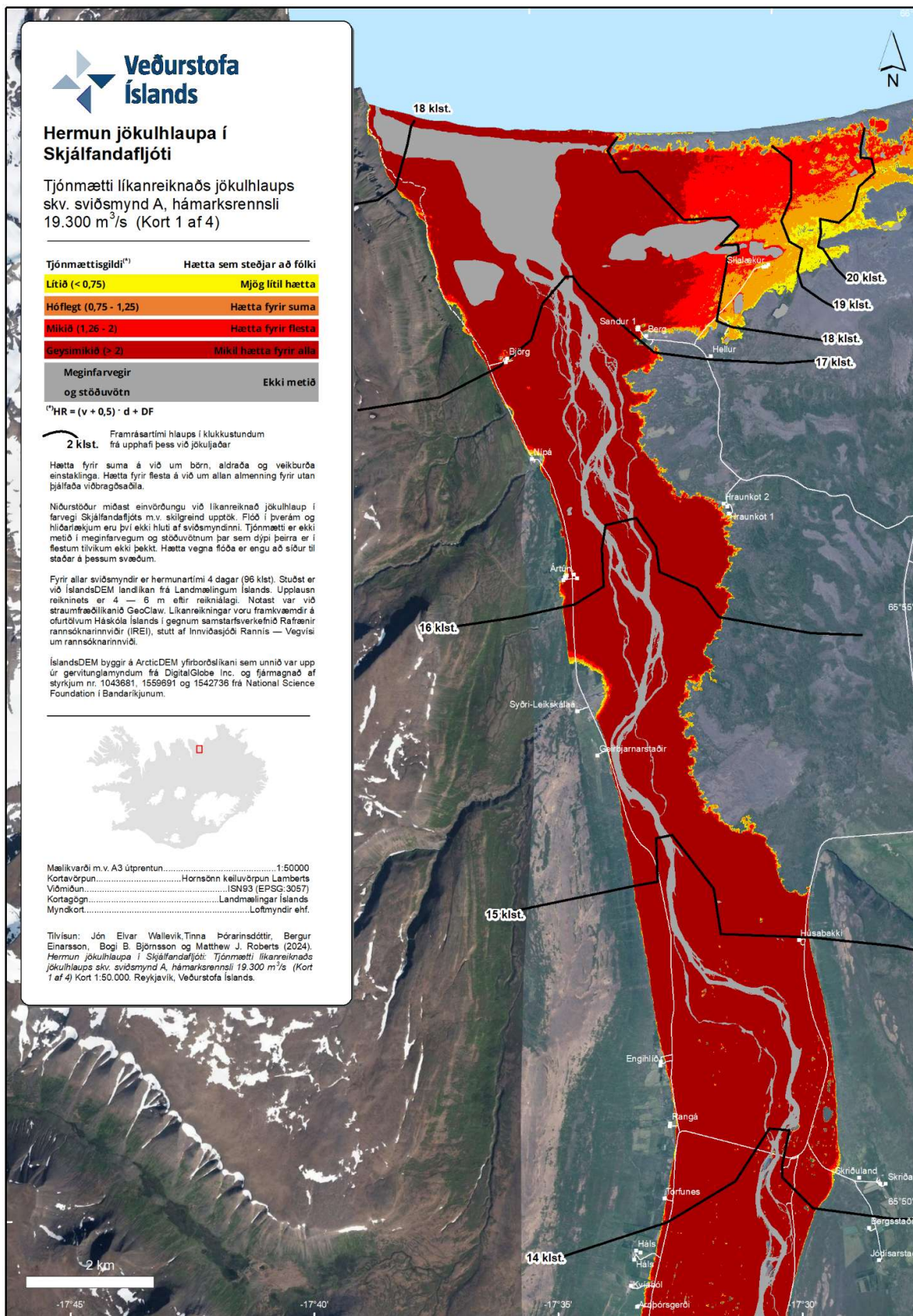
Viðauki B, Kort 3. Hámarksútbreiðsla líkanreiknaðra jökulhlaupa. Sviðsmyndir A til C: Kort 3 af 4, miðsvæði.



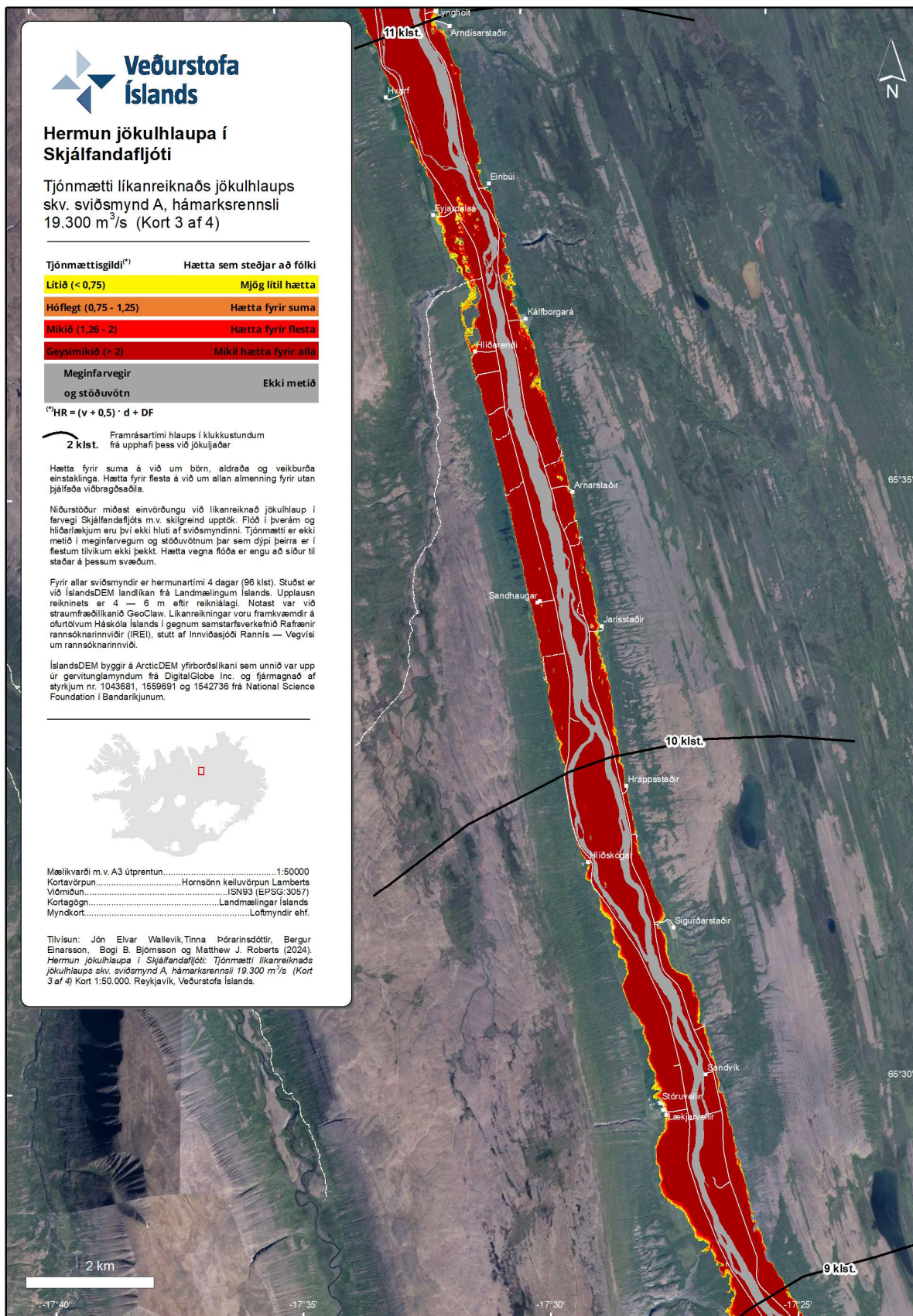
Viðauki B, Kort 4. Hámarksútbreiðsla líkanreiknaðra jökulhlaupa. Sviðsmyndir A til C: Kort 4 af 4, efra svæði.



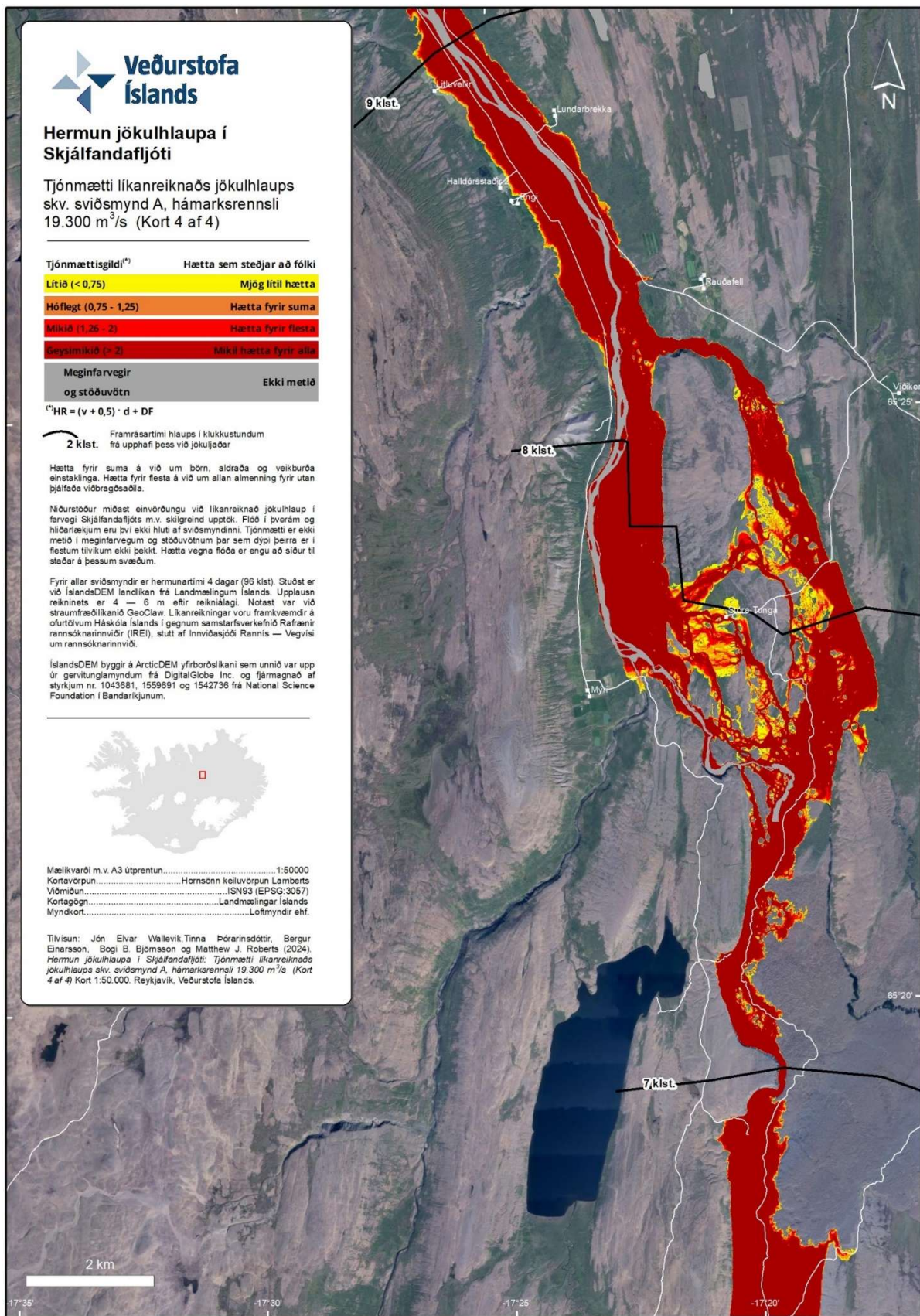
Viðauki B, Kort 5. Hámarksútbreiðsla líkanreiknaðra jökulhlaupa. Sviðsmyndir A til C á hálendi.



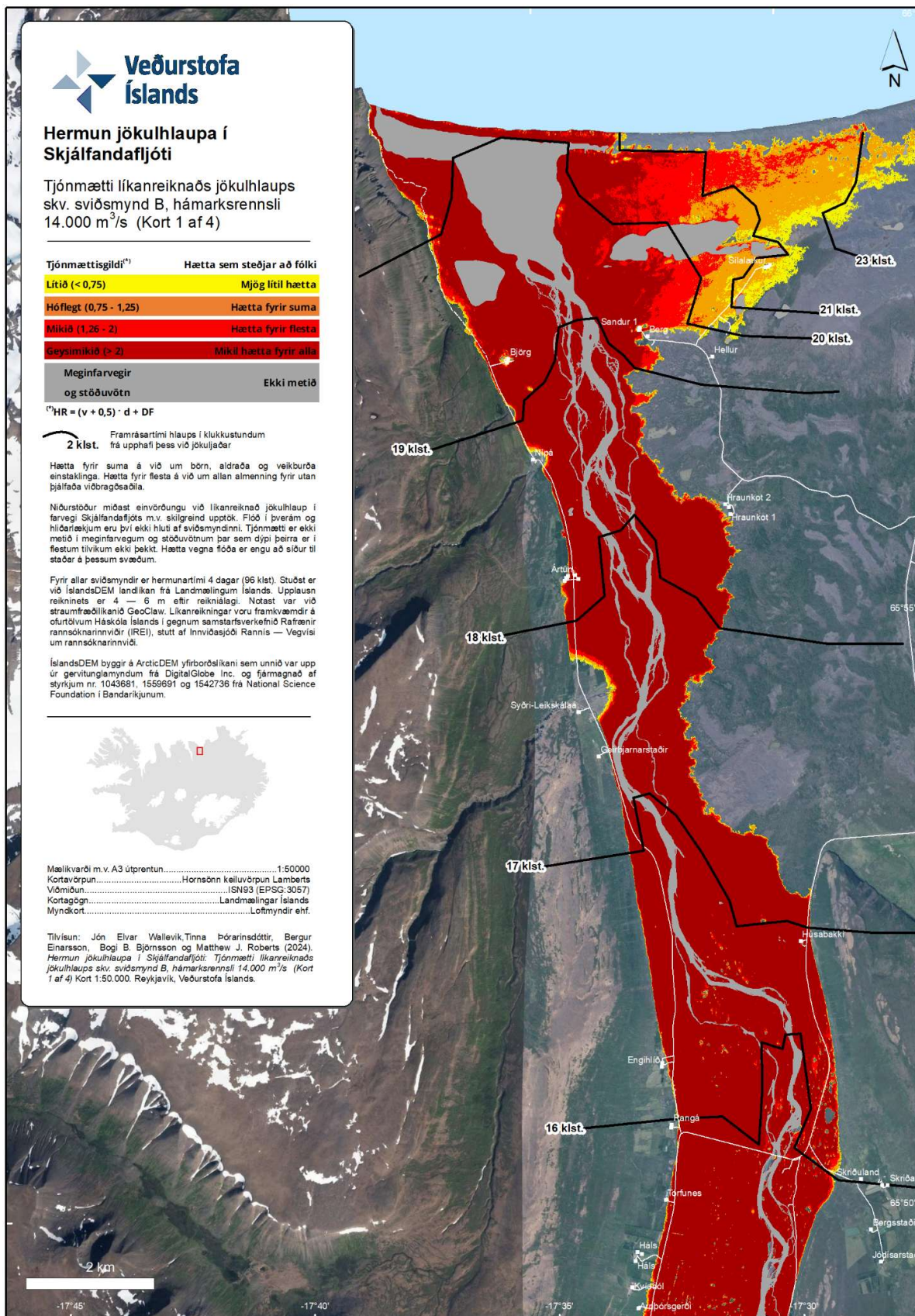
Viðauki B, Kort 6. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd A (19.300 m³/s): Kort 1 af 4 – neðra svæði.



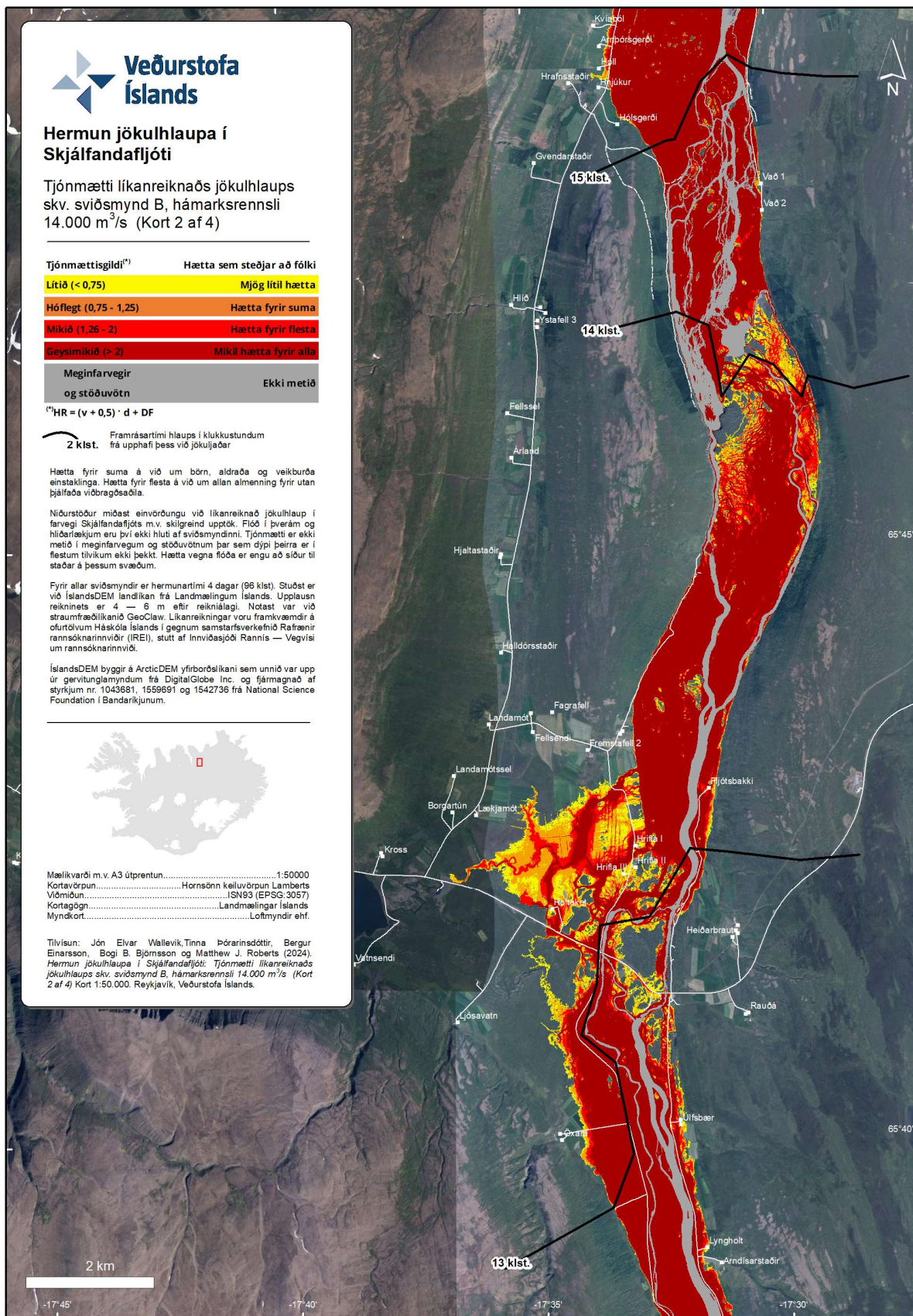
Viðauki B, Kort 8. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd A (19.300 m³/s): Kort 3 af 4 – miðsvæði.



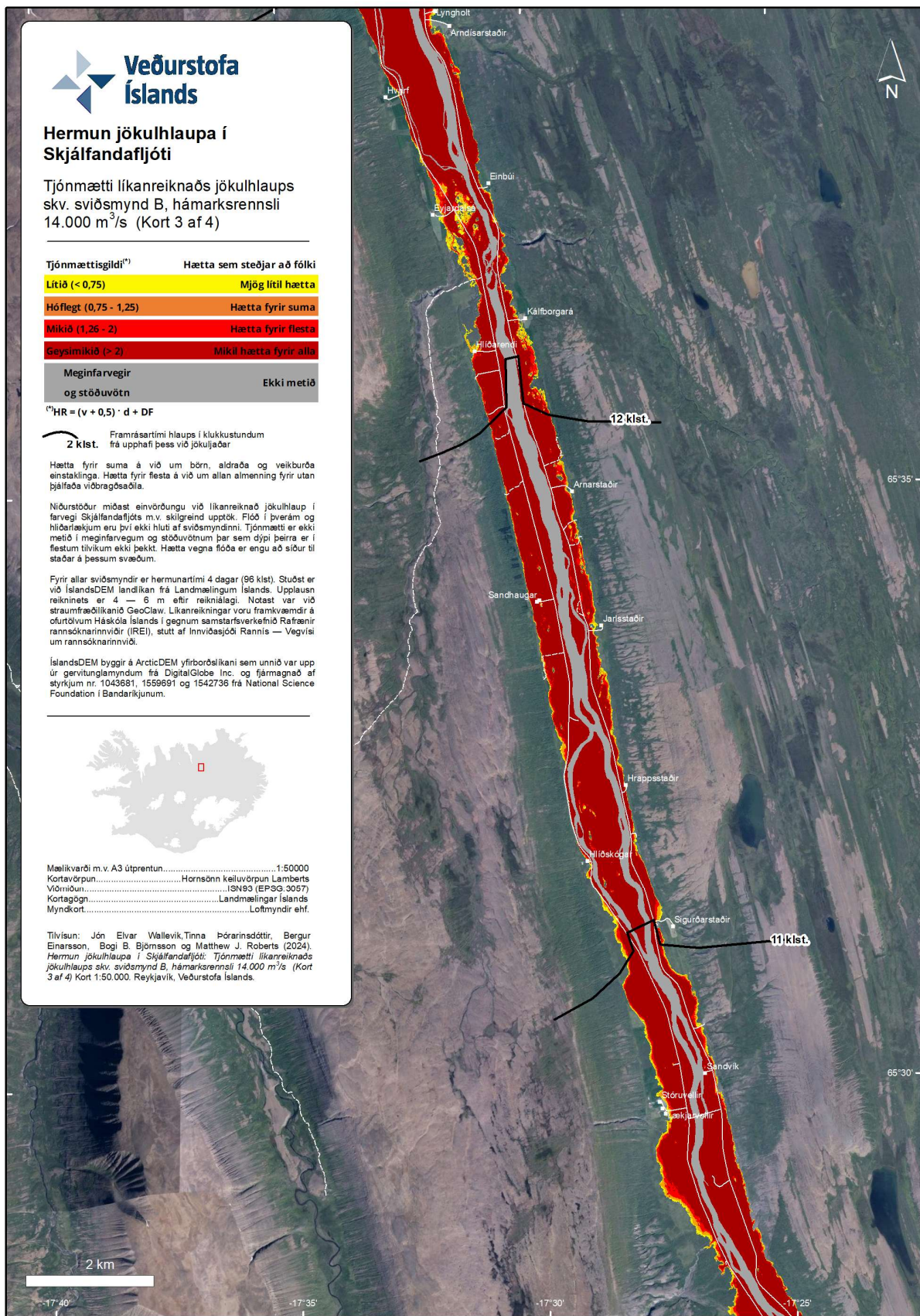
Viðauki B, Kort 9. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd A (19.300 m³/s): Kort 4 af 4 – efra svæði.



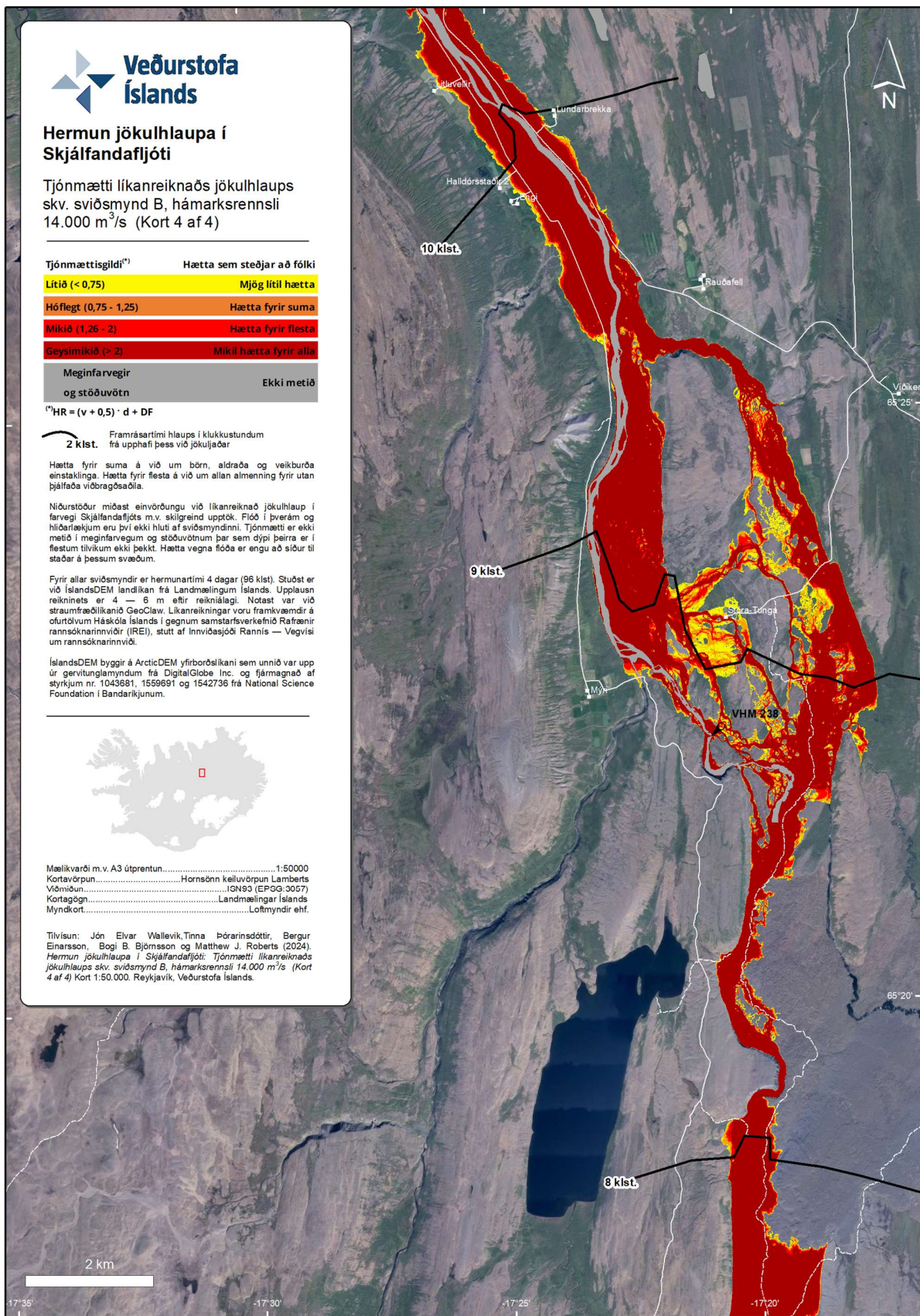
Viðauki B, Kort 10. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd B (14.000 m³/s): Kort 1 af 4 — neðra svæði.



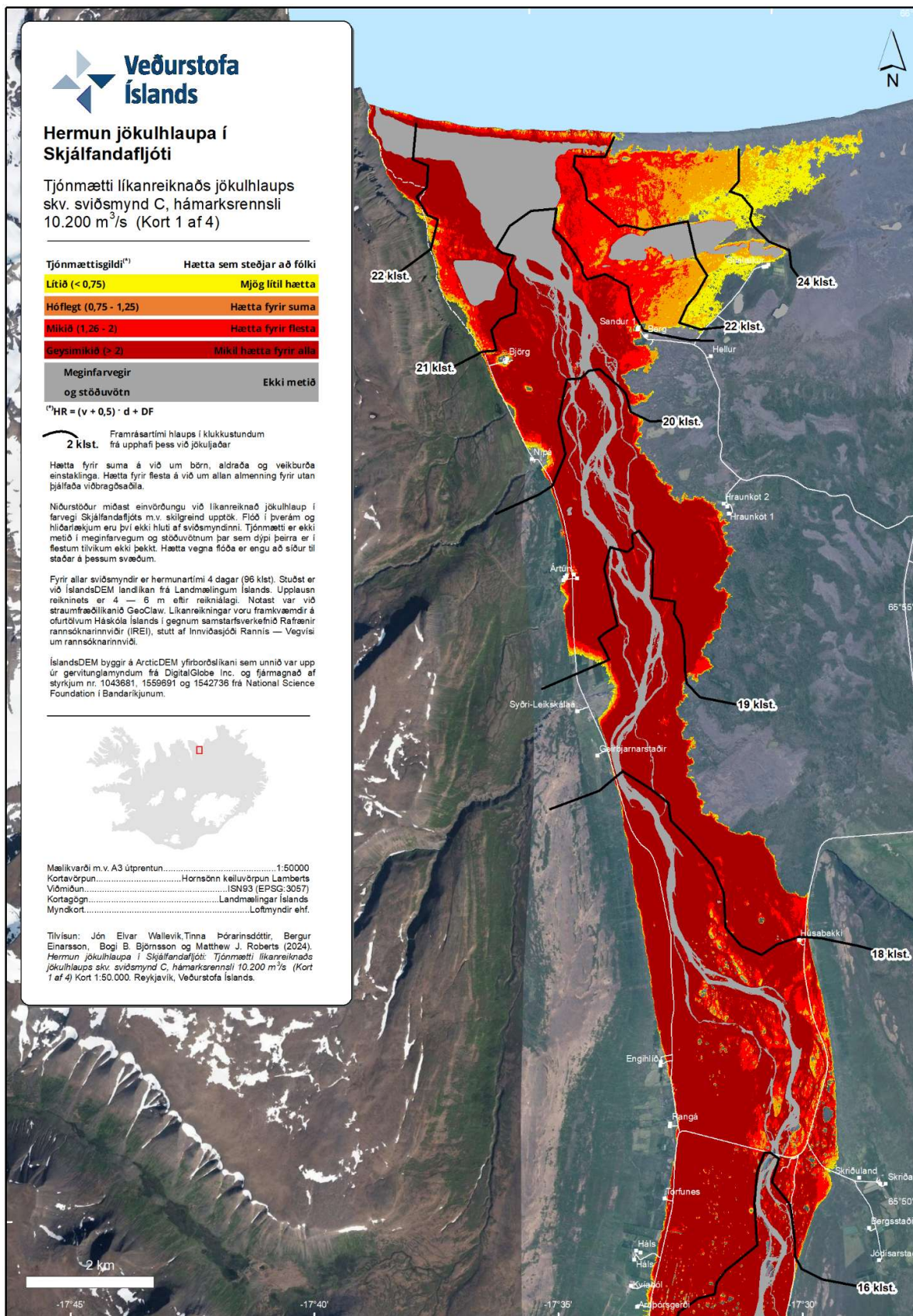
Viðauki B, Kort 11. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd B (14.000 m³/s): Kort 2 af 4 — miðsvæði.



Viðauki B, Kort 12. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd B (14.000 m³/s): Kort 3 af 4 – miðsvæði.



Viðauki B, Kort 13. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd B (14.000 m³/s): Kort 4 af 4 — efra svæði.



Viðauki B, Kort 14. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd C (10.200 m³/s): Kort 1 af 4 – neðra svæði.

Hermun jökulhlaupa í Skjálfandafljóti

Tjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups
skv. sviðsmynd C, hámarksrennsli
10.200 m³/s (Kort 2 af 4)

Tjónmættisgildi ^(*)	Hætta sem stöðjar að fólki
Litið (< 0,75)	Mjög lítil hætta
Hóflegt (0,75 - 1,25)	Hætta fyrir suma
Mikið (1,26 - 2)	Hætta fyrir flesta
Geysimikið (> 2)	Mikil hætta fyrir alla

Meginfarvegir og stöðuvötn	Ekki metið
-------------------------------	------------

$$^{(*)}HR = (v + 0,5) \cdot d + DF$$

2 klst. Framrásartími hlaups í klukkustundum frá upphafi þess við jókuljaðar

Hætta fyrir suma á við um börn, aldraða og veikburða einstaklinga. Hætta fyrir flesta á við um allan almenning fyrir utan þjálfaða viðbragðsaðila.

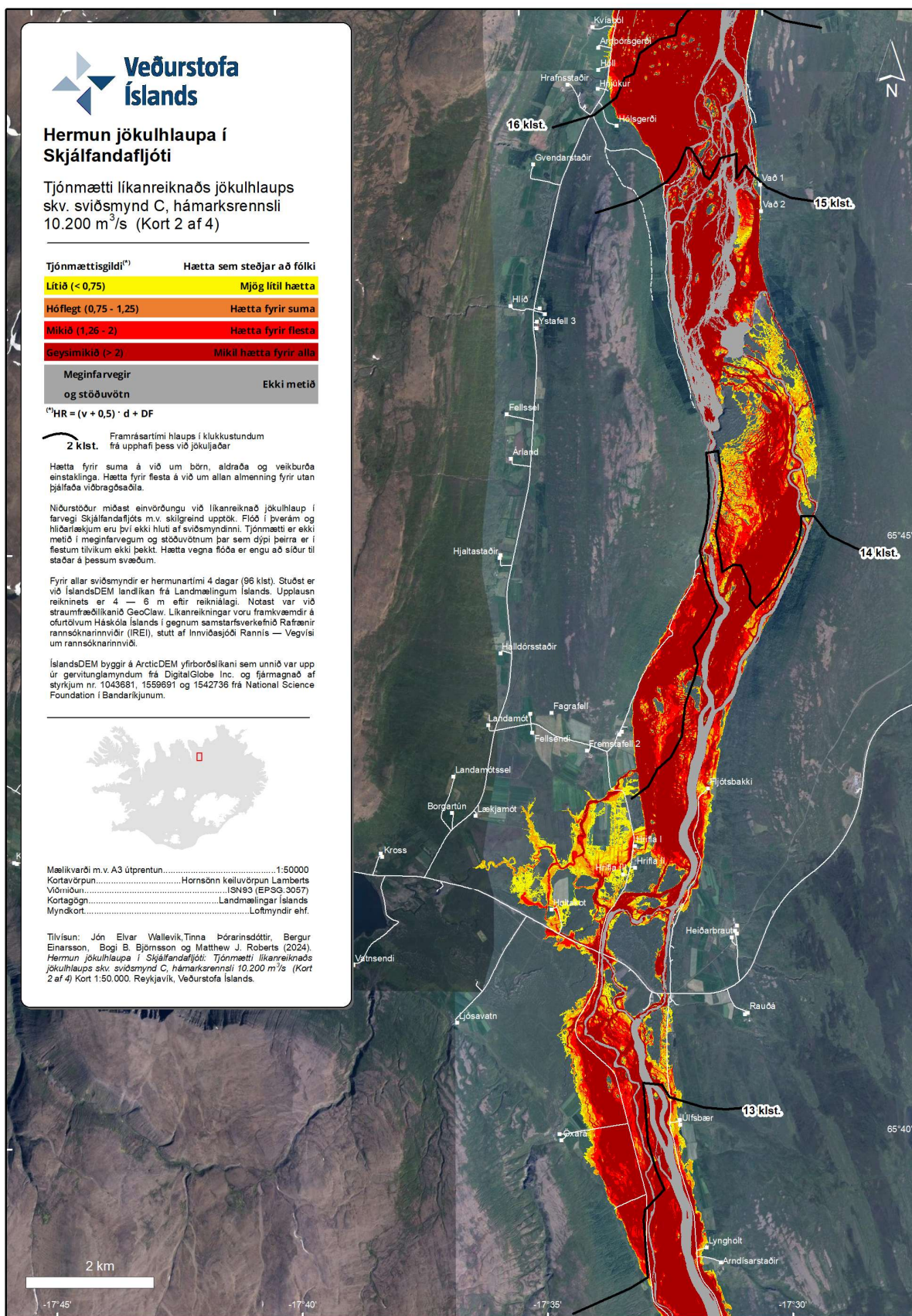
Niðurstöður míðast einvörðungu við líkanreiknað jökuhlaup í farvegi Skjálfandafjöts m.v. skilgreind upptök. Flóð í þveram og hlíðarlækjum eru því ekki hluti af sviðsmyndinni. Tjónmætti er ekki metið í meginfarvegum og stöðvörnum þar sem dýpi þeirra er í flestum tilvikum ekki þekkt. Hætta vegna flóða er engu að síður til staðar á þessum svæðum.

Fyrir allar sviðsmyndir er hermunaartími 4 dagar (96 klst). Stuðst er við ÍslandsDEM landlíkan frá Landmælingum Íslands. Upplausn reiknins er 4 — 6 m eftir reiknialagi. Notast var við straumfræðilíkanin GeoClaw. Líkanreikningar voru framkvæmdir á fúrtölvum Háskóla Íslands í gegnum samstarfsverkefnið Rafrænnir rannsóknarinngvið (IREI), stutt af Innviðasjóði Rannís — Vegvisi um rannsóknarinngvið.

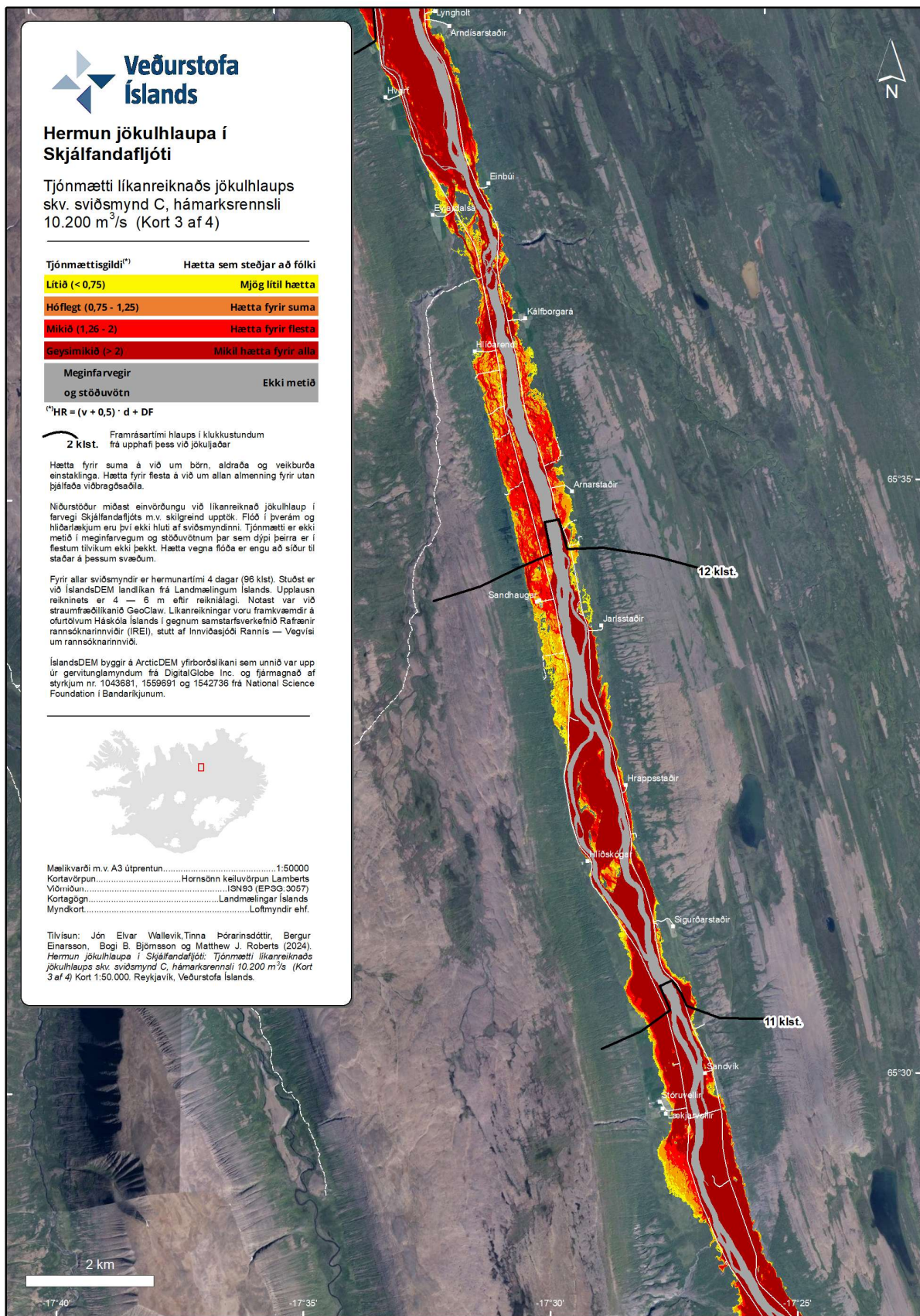
ÍslandsDEM byggir á ArcticDEM yfirborðslíkani sem unnið var upp úr gervitunglamyndum frá DigitalGlobe Inc. og fjármagnað af styrkjum nr. 1043681, 1559691 og 1542736 frá National Science Foundation í Bandaríkjunum.

Mælikvarði m. v. A3 útprentun.....1:50000
Kortavörpun.....Hornsnönn keiluvörpun Lamberts
Viðmiðun.....ISN93 (EPSG.3057)
Kortagögn.....Landmælingar Íslands
Myndkort.....Löfmyndir ehf.

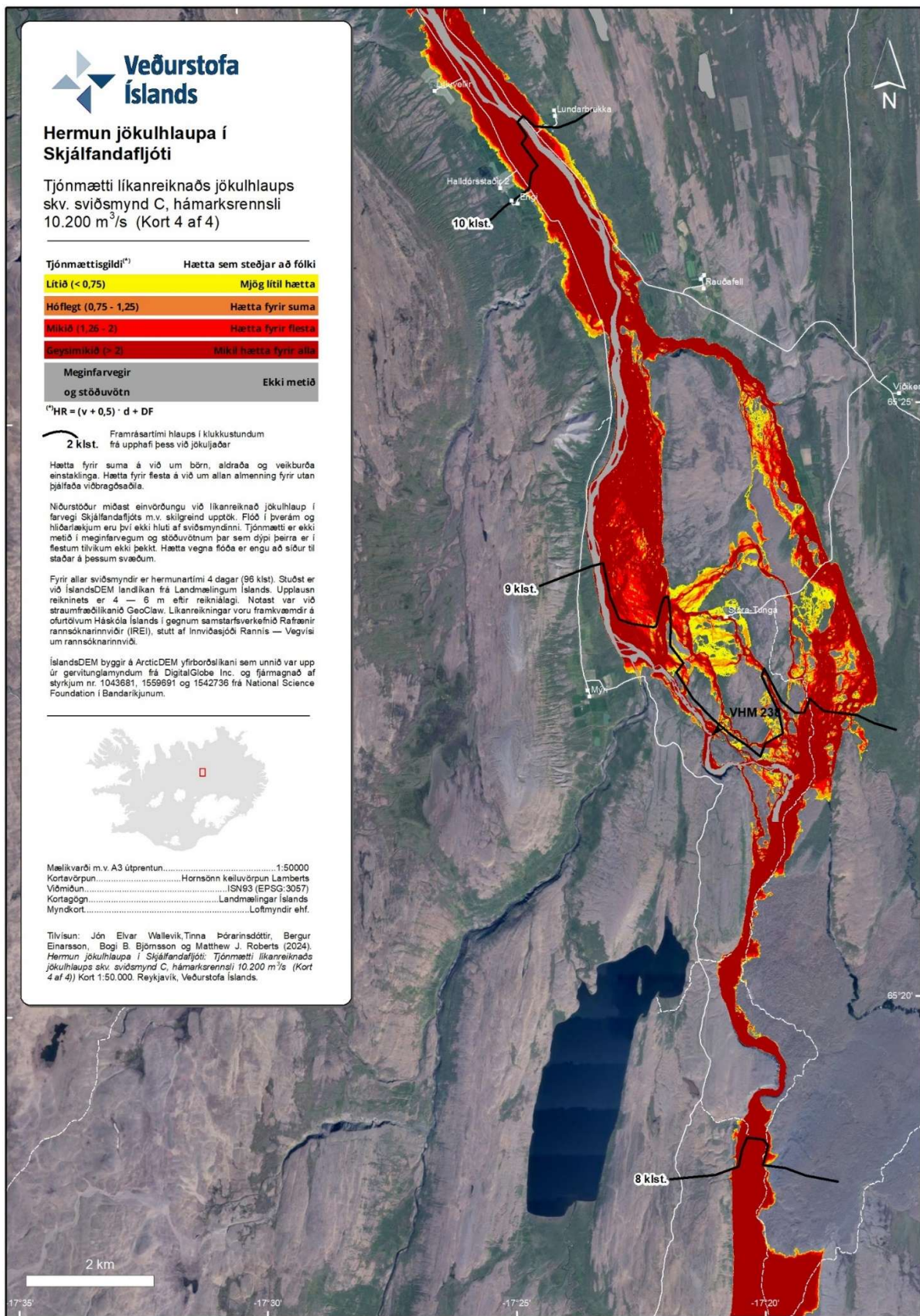
Tilvísun: Jón Elvar Wallevik, Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson, Bogi B. Björnsson og Matthew J. Roberts (2024). *Hermun jökulhlaupa í Skjálfandafjöti: Tjónmætti líkanreiknads jökulhlaups skv. sviðsmynd K, hámarksrennsli 10.200 m³/s (Kort 2 af 4)* Kort 1:50.000. Reykjavík, Veðurstofa Íslands.



Viðauki B, Kort 15. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd C (10.200 m³/s): Kort 2 af 4 – miðsvæði.



Viðauki B, Kort 16. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd C (10.200 m³/s): Kort 3 af 4 – miðsvæði.



Viðauki B, Kort 17. Hámarkstjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd C (10.200 m³/s): Kort 4 af 4 — efra svæði.

