

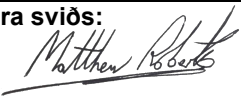
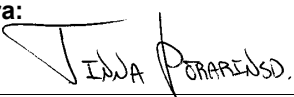
Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum: Tæknilegar niðurstöður hættumats

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

Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum: Tæknilegar niðurstöður hættumats

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

Lykilsíða

Skýrsla nr. 2024-007	Dags. 15/08/2024	ISSN 1670-8261	Dreifing: Opín ☒ Lokuð ☐
			Skilmálar:
Heiti skýrslu: Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum: Tæknilegar niður- stöður hættumats			Upplag: Rafræn útgáfa
			Fjöldi síðna: 49
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: Þessi skýrsla fjallar um hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum og kynningu hættumats með kortum og útreikningum. Verkefnið byggir á fyrri líkanreikningum frá árinu 2017 (Veðurstofa Íslands, skýrsla 2017-004: Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum með GeoClaw). Markmið verkefnisins er að draga úr tjónnæmi á svæðum sem gætu orðið fyrir áhrifum hlaupa frá Dyngjujökli niður farveg Jökulsár á Fjöllum. Verkefnið er hluti af stærri verkefnaáætlun, sem kallast GOSVÁ, og felur í sér heildarhættumat vegna eldgosa á Íslandi. Áætlunin er styrkt af Ofanflóðasjóði. Í þessu verkefni var notað uppfært landlíkan og mun umfangsmeira reikninet en í fyrri líkanreikningum, ásamt lengri reiknitíma. Líkanreikningar voru framkvæmdir innan samstarfsvettvangsins Rafrænir rannsóknarinnviðir (einnig þekkt sem IREI), sem styrktur er af Innviðasjóði RANNÍS. Fjórar sviðsmyndir voru settar upp til þess að meta áhrif hlaupa við mismunandi hámarksrennsli undan jökli, frá dæmigerðum hlaupum til hamfarahlaupa; 3.000, 10.000, 30.000 og 100.000 m³/s. Kort sem sýna hámarksútbreiðslu, framrásarlínur og tjónmætti fyrir hverja sviðsmynd eru birt í viðauka skýrslunnar.			
Lykilorð: Jökulsá á Fjöllum, 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
2 Aðferðir	9
2.1 Hugbúnaður	9
2.2 Inntaksgögn líkanreikninga	10
2.2.1 Landlíkan	10
2.2.2 Rennslisrit og upptakasvæði hlaupa	11
2.3 Úttaksgögn úr líkanreikningum	13
2.4 Hættumat/Tjónmætti	13
3 Niðurstöður	14
3.1 Sviðsmynd 1 – 3.000 m ³ /s (4 m reikninet)	18
3.2 Sviðsmynd 2 – 10.000 m ³ /s (6 m reikninet)	20
3.3 Sviðsmynd 3 – 30.000 m ³ /s (6 m reikninet)	20
3.4 Sviðsmynd 4 – 100.000 m ³ /s (10 m reikninet)	22
3.5 Hámarksútbreiðsla og tjónmætti	23
4 Óvissuþættir	24
4.1 Næmnigreining fyrir Manning stuðul	24
4.2 Næmnigreining fyrir upplausn reikninet	26
Heimildir	28
Viðauki A – Hætta, Tjónmætti, Tjónnæmi & Áhætta	30
A.1 Aðrar skilgreiningar	30
A.2 Tjónmætti og hætta	30
A.3 Tjónnæmi	30
A.4 Áhætta	31
Viðauki B –Heildstæð kort	31

Myndaskrá

Mynd 1. Landlíkanið nær frá norðanverðum Vatnajökli að Öxarfirði. Flatarmál þess er 55 x 166 km, þ.e. um 9.100 km ² og upplausnin 2x2 m.	11
Mynd 2. Upptakasvæði þar sem talið er líklegt að jökulhlaup vegna eldsumbrota í Bárðarbungu renni undan jaðri Dyngjujökuls (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).	12
Mynd 3. Þróun rennslis undan jökli fyrir sviðsmyndirnar fjórar (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).	12

Mynd 4. Yfirlitsmynd af svæðinu við brú yfir Jökulsá á Fjöllum, nærri Grímsstöðum á Fjöllum. Langavatnslindar eru merktar á myndinni (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).	15
Mynd 5. Yfirlitsmynd af fyrirhuguðu brúarstæði á Jökulsá á Fjöllum nærri Grímsstöðum á Fjöllum (Vegagerðin, 2013).	15
Mynd 6. Staðsetning á rennslisþversniðum 1 til 8 og mælipunktum I til V sem notast er við í þessu verkefni. Bláa flóðsléttan gildir fyrir sviðsmynd 1, þ.e. 3.000 m ³ /s (kafla 3.1) en rauða flóðsléttan reiknast í sviðsmynd 4, þ.e. 100.000 m ³ /s (kafla 3.4). Myndirnar þrjár (a), (b) og (c) eru allar í sama mæliskvarða. Lengdirnar á þversniðum 1, 2, 6 og 7 eru sýndar í metrum og km.	17
Mynd 7. Rennsli um þversnið 1 til 8 á mynd 6. Sviðsmynd 1: 3.000 m ³ /s.	19
Mynd 8. Vatnshæð (t.v.) og hraði (t.h.) í mælipunktum I til V á mynd 6. Vatnshæð er reiknuð frá yfirborði árinna við eðlilegt rennsli. Gildir fyrir sviðsmynd 1: 3.000 m ³ /s.	19
Mynd 9. Rennsli um þversnið 1 til 8 á mynd 6. Sviðsmynd 2: 10.000 m ³ /s.	20
Mynd 10. Vatnshæð (t.v.) og hraði (t.h.) í mælipunktum I til V á mynd 6. Vatnshæð er reiknuð frá yfirborði árinna við eðlilegt rennsli. Gildir fyrir sviðsmynd 2: 10.000 m ³ /s.	21
Mynd 11. Rennsli um þversnið 1 til 8 á mynd 6. Sviðsmynd 3: 30.000 m ³ /s.	21
Mynd 12. Vatnshæð (t.v.) og hraði (t.h.) í mælipunktum I til V á mynd 6. Vatnshæð reiknast frá yfirborði árinna við eðlilegt rennsli. Gildir fyrir sviðsmynd 3: 30.000 m ³ /s.	21
Mynd 13. Rennsli um þversnið 1 til 8 á mynd 6. Sviðsmynd 4: 100.000 m ³ /s.	22
Mynd 14. Vatnshæð (t.v.) og hraði (t.h.) í mælipunktum I til V á mynd 6. Vatnshæð reiknast frá yfirborði árinna við eðlilegt rennsli. Gildir fyrir sviðsmynd 4: 100.000 m ³ /s.	22
Mynd 15. Rennsli um þversnið 1 og 4 (t.v.) og vatnshæð í mælipunktum I, III og V (t.h.), fyrir hrýfisgildin $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ og $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$. Gildir fyrir sviðsmynd 3: 30.000 m ³ /s á 6 m reiknineti.	25
Mynd 16. T.v.: Yfirlitsmynd af staðsetningu þversniða 1 og 4 ásamt mælipunktum I, III og V (sjá einnig mynd 6). T.h.: Samanburður á hámarksútbreiðslu hlaups í nágrenni þjóðveg 1 fyrir $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ (rautt) og $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ (blátt). Gildir fyrir sviðsmynd 3: 30.000 m ³ /s á 6 m reiknineti.	26
Mynd 17. Rennsli um þversnið 1 og 4 (t.v.) og vatnshæð í mælipunktum I, III og V (t.h.), fyrir 6 m og 10 m reikninet. Sviðsmynd 3: 30.000 m ³ /s og $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$.	27
Mynd 18. Samanburður á hámarksútbreiðslu hlaups í nágrenni þjóðveg 1 fyrir 6 m reikninet (rautt) og 10 m reikninet (blátt). Sviðsmynd 3: 30.000 m ³ /s og $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$.	27

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 möguleg jökulhlaup í Jökulsá á Fjöllum hermd og hættumat vegna slíkra hlaupa sett fram. Verkefnið er sjálfstætt framhald af fyrri hermunum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017) og felst munurinn aðallega í notkun nýrra landlíkans auk þess sem reikninetið er umfangsmeira. Verkefnið er hluti af stærri verkefnaáætlun sem hefur fengið yfirheitið GOSVÁ, sem snýr að heildarhættumati vegna eldgosa á Íslandi og er styrkt af Ofanflóðasjóði. Niðurstöðurnar sem hér eru birtar ná yfir stærra landsvæði, nýta mun þéttara reikninet og líkantími er tvöfalt lengri. Þessi umfangsmikla uppfærsla varð möguleg vegna samstarfs Veðurstofu Íslands við Háskóla Íslands (HÍ) um notkun á ofurtölvum HÍ. Verkefnið var unnið innan samstarfs-vettvangsins *Rafrænar rannsóknarinnviðir* (einnig þekkt sem IREI), sem styrktur er af Innviðasjóði RANNÍS (Vegvísir um rannsóknarinnviði, 2021).

Fjórar sviðsmyndir jökulhlaupa eru reiknaðar með straumfræðilegu líkani. Hámarksrennsli undan jökli í sviðsmyndunum er 3.000, 10.000, 30.000 og 100.000 m³/s og eru niðurstöður birtar í Viðauka B á kortum sem sýna bæði hámarksútbreiðslu hlaupanna og útreiknað tjónmætti. Í öllum tilfellum hefur kortum verið skipt upp í smærri svæði til að sýna niðurstöður í hærri upplausn og eru kortin merkt með númerum frá ósum til upptaka. Þessi kort eru aðalafurð þessa verkefnis.

Sviðsmyndir 1 og 2 (þ.e. með hámarksrennsli 3.000 m³/s og 10.000 m³/s) geta orðið vegna hlaupa úr jökullónum eða vegna eldsumbrota undir jökli. Sviðsmyndir 3 og 4 (þ.e. með hámarksrennsli fyrir 30.000 m³/s og 100.000 m³/s) geta einungis orðið vegna eldsumbrota undir jökli.

Niðurstöður sýna að minnsta hlaupið (3.000 m³/s) næði brúnni nærri Grímsstöðum á rúnum sólarhring eftir upphaf við jökuljaðar og brúnni framan Jökulsárgljúfra við Ásbyrgi eftir rúmlega 1,5 sólarhring. Fyrir sviðsmynd 2 (10.000 m³/s) eru samsvarandi tölur um 18 klst. (Grímsstaðir) og um 25 klst. (Ásbyrgi) og fyrir sviðsmynd 3 eru þær um 17 klst. (Grímsstaðir) og 22 klst. (Ásbyrgi). Í öllum þessum tilvikum væri hámarksrennsli náð 1–4 klst. eftir að flóðstafn næði viðkomandi brú.

Í tilviki hamfarahlaups (100.000 m³/s) væri hlaupvatn komið að brúnni við Grímsstaði eftir um 14 klst. en hlauphámarki væri náð um 10 klst. síðar. Hlaupið næði brúnni við Ásbyrgi eftir um 19 klst. og hámarki væri náð um 8 klst. síðar.

Í hinum stærri sviðsmyndum sýna niðurstöður hermána að hlaupvatn flæmist allvíða á hinum hálendari hluta rennslisleiðarinnar og berst inn í Herðubreiðarlindir. Í Jökulsárgljúfrum mundi steðja hætta að tjaldstæðinu í Vesturdal auk þess sem hlaupvatn mundi dreifast víða um láglendið norðan Ásbyrgis og nokkrum bæjum verður hætta búin. Talsvert vatn berst inn í Ásbyrgi í sviðsmyndum 2–4, suður fyrir enda Eyjarinnar en þó ekki alla leið inn í botn.

Tiltölulega lítil hætta mundi stafa af minnsta hlaupinu (3.000 m³/s) af þeim fjórum, sem reiknuð hafa verið í þessu verkefni.

1 Inngangur

Verkefni þetta miðar að hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum og hættumati vegna slíkra hlaupa, í framhaldi af hermunum sem birtar voru 2017 (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017). Vísað er til þeirrar skýrslu varðandi hlaupsögu og annan bakgrunn þessa verkefnis, enda eru forsendur þessara verkefna hinar sömu að heita má. Nýjum upplýsingum er þó bætt við í þessari skýrslu þegar við á. Komi í ljós misræmi milli þessarar skýrslu og hinnar fyrrgreindu, ber að líta frekar til þeirra niðurstaðna, sem hér eru birtar, enda er um nákvæmari reikninga að ræða. Hér er notað nýrra og nákvæmara landlíkan sem nær yfir stærra svæði og reikninetið er mun þéttara en í fyrra verkefni. Líkántíminn er einnig tvöfalt lengri en áður, 6 dagar í stað tæplega 3ja daga í fyrri reikningum. Þessi uppfærsla reikninganna varð möguleg þegar Veðurstofa Íslands fékk aðgang að ofurtölvunum Garpi og Elju við Háskóla Íslands í samstarfsverkefninu Rafrænir rannsóknarinnviðir (IREI), sem styrkt var af Innviðasjóði RANNÍS (Vegvísir um rannsóknarinnviði, 2021). Reiknilíkanið GeoClaw er notað líkt og í fyrra verkefninu, en þó í nýrri útgáfu.

Fjórar sviðsmyndir jökulhlaupa eru reiknaðar með straumfræðilegu líkani. Hámarksrennsli undan jökli í sviðsmyndunum er 3.000, 10.000, 30.000 og 100.000 m³/s og eru niðurstöður birtar í Viðauka B á kortum sem sýna bæði hámarksútbreiðslu hlaupanna og útreiknað tjónmætti. Sviðsmyndir 1 og 2 (þ.e. með hámarksrennsli 3.000 m³/s og 10.000 m³/s) geta orðið vegna hlaupa úr jökullónum eða vegna eldsumbrota undir jökli. Sviðsmyndir 3 og 4 (þ.e. með hámarksrennsli fyrir 30.000 m³/s og 100.000 m³/s) geta einungis orðið vegna eldsumbrota undir jökli.

2 Aðferðir

2.1 Hugbúnaður

Við hermun jökulhlaups er notað tvívítt líkan sem getur reiknað dreifingu flóðvatns á stórum svæðum sem hlaupið nær til. Straumfræðilíkanið GeoClaw (Clawpack Development Team, 2020) framkvæmir slíka reikninga með dýpisheilduðum jöfnum Navier–Stokes (e. shallow water equations). Varðveislujafna skriðþunga er leyst fyrir tvívíða hreyfingu vatns og einnig varðveislujafna massans (þ.e. samfellujafnan). Undanfarin ár hefur þetta líkan verið notað með góðum árangri á Veðurstofu Íslands. Ýmis önnur líkөн standa einnig til boða við straumfræðilega reikninga á jökulhlaupum og öðrum flóðum 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. Þetta er opinn hugbúnaður (e. open source) og auðveldar það notkun hans í háhraðareikningum á ofurtölvu. Allir líkanreikningar sem hér eru kynntir fóru fram á ofurtölvu Háskóla Íslands.

Stærðfræðileg framsetning varðveislu- og samfellujafna í GeoClaw er á fastheldnu formi (e. *conservative form*, sjá LeVeque, 2002; Versteeg og Malalasekera, 2007). Brytjun (e. discretization) á þessum tengdu hlutfleiðujöfnum er gerð með aðferð endanlegs rúmmáls (e.

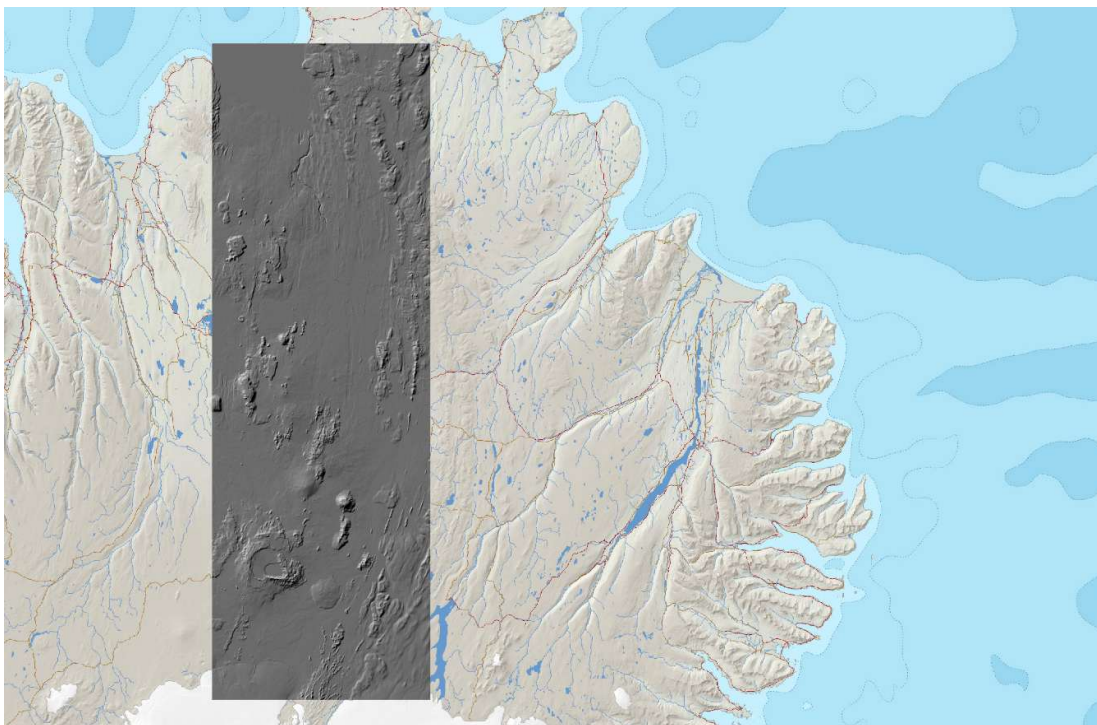
finite volume method – FVM, sbr. LeVeque, 2002). Aðstreymishluti hreyfijöfnunnar (e. *advection*) er brytjaður með ákveðinni aðferð sem grípur högg í kerfinu og er nákvæm að öðru þrepi (e. *shock-capturing method*; *2nd-order accurate*, sjá Berger og fl., 2011). Tölulegar sveiflur sem almennt eru tengdar öðru þrepi eru takmarkaðar með sk. TVD-aðferð (e. *total variation diminishing*, sjá Versteeg og Malalasekera, 2007). Aðgengilegir TVD takmarkarar (e. *TVD limiters*) í þessu forriti ganga undir heitunum *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 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 reikninetis og eykur þar af leiðandi reiknihraða allverulega. Aðferðin er á ensku nefnd *Arbitrary Mesh Refinement*, AMR (Berger o.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 reikninga á útbreiðslu flóða í Ölfusá (Emmanuel Pagneux o.fl., 2019) og við hættumat fyrir Eyjafjarðará, Hvítá í Borgarfirði, Lagarfljót og Skjálfandafljót (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2021). Eins og áður hefur verið nefnt var líkan þetta einnig notað í fyrra verkefni sem miðaði að hermun hlaupa í Jökulsá á Fjöllum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).

2.2 Inntaksgögn líkanreikninga

2.2.1 Landlíkan

Nákvæmt landlíkan er ein helsta forsenda straumfræðilegra reikninga á flæði vatns eftir yfirborði lands. Í sumum tilvikum nær eitt tiltekið landlíkan yfir allt reiknisvæðið, en einnig má setja saman nokkur landlíkön, sem ná hvert um sig yfir hluta reiknisvæðisins. Í þessu verkefni er notað stafrænt hæðarlíkan (e. *digital surface model*; Landmælingar Íslands, 2020), útbúið skv. gervitunglamyndum frá tímabilinu 2008–2012. Þetta er eitt heildstætt líkan, með upplausnina 2 x 2 m. Sjá mynd 1.

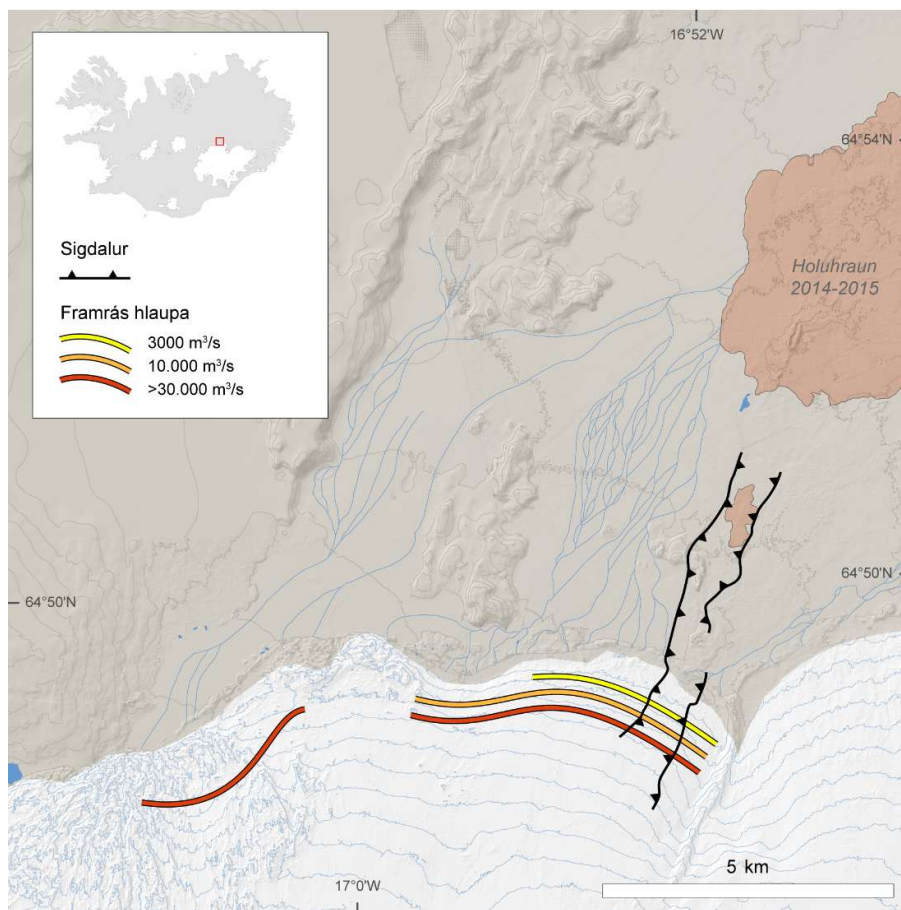


Mynd 1. Landlíkanið nær frá norðanverðum Vatnajökli að Öxarfirði. Flatarmál þess er 55 x 166 km, þ.e. um 9.100 km² og upplausnin 2 x 2 m.

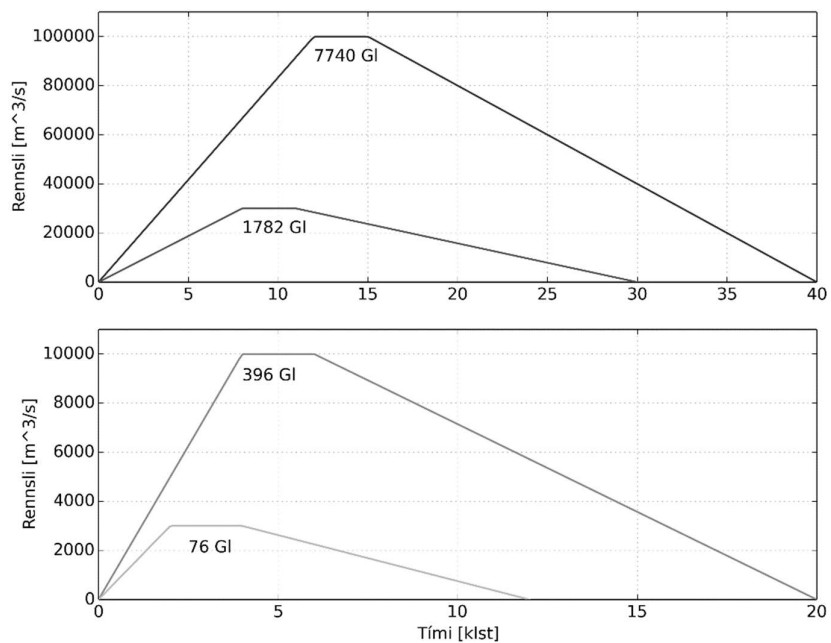
Reikninet fyrir hermanir er myndað út frá landlíkaninu og er upplausn þess látin stjórna af rennslismagni (þ.e. álagi í reikningum). Fyrir sviðsmynd 1, með 3.000 m³/s rennsli (kafla 3.1) er upplausn reiknins 4x4 m. Fyrir sviðsmyndir 2 og 3, með 10.000 m³/s og 30.000 m³/s rennsli (kaflar 3.2 og 3.3) er upplausn reiknins 6x6 m og fyrir sviðsmynd 4, með 100.000 m³/s rennsli (kafla 3.4), er upplausnin 10x10 m.

2.2.2 Rennslisrit og upptakasvæði hlaupa

Fjórar sviðsmyndir jökulhlaupa til norðurs frá Dyngjujökli eru nýttar í verkefninu, líkt og í fyrri hermunum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017). Til hliðsjónar við ákvörðun þeirra voru eldri mæligögn, upplýsingar um söguleg flóð og önnur gögn, sjá frekari upplýsingar í fyrri skýrslu frá 2017 (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl.). Eldvirkni tengd eldstöðvarkerfi Bárðarbungu er líklegasta orsök jökulhlaupa á þessu svæði þó að aðrar ástæður svo sem hlaup úr jaðarlónum séu einnig mögulegar. Vegna líkanna á tengingu við eldsumbrot í Bárðarbungu gert ráð fyrir að hlaupvatnið komi allt undan Dyngjujökli vestanverðum, því áberandi móbergshryggur skilur að eystri og vestari hluta vatnasviðs á botni jökulsins. Útfallssvæðið við jaðar Dyngjujökuls hefur breytilega lengd í hermunum, eftir áætluðu heildarrennsli. Í sviðsmynd 1 er lengdin 3,5 km, fyrir sviðsmynd 2 er hún 5,5 km og fyrir sviðsmyndir 3 og 4 er lengdin 9 km og tvískipt þar sem landið liggur hærra en jökullinn á milli útfallssvæðanna tveggja. Svæðið er sýnt á mynd 3 í fyrri skýrslu (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017) og er hún einnig sýnd sem mynd 2 í þessari skýrslu. Hámarksrennsli í sviðsmyndunum fjórum er sem fyrr segir ákvarðað 3.000, 10.000, 30.000 og 100.000 m³/s og eru áætluð rennslisrit sýnd á mynd 3 (sbr. mynd 2 í fyrri skýrslu, Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).



Mynd 2. Upptakasvæði þar sem talið er líklegt að jökulhlaup vegna eldsumbrota í Bárðarbungu renni undan jaðri Dyngjufjökuls (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).



Mynd 3. Þróun rennslis undan jökli fyrir sviðsmyndirnar fjórar (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017). Rúmmál hvernar sviðsmyndar í GI er tiltekið undir viðeigandi rennslisriti.

2.3 Úttaksgögn úr líkanreikningum

Grunn-úttaksgögn hermunar eru hér vatnsdýpi og skriðþungavigur hlaupvatns 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 tilsvareandi 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 tilsvareandi hraðagildi 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*) hlaupvatns 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 lýst er 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 . Útkoman úr jöfnu (6) er 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 jöfnu (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 B.

2.4 Hættumat/Tjónmætti

Í skýrslu þessari er gefið út hættumat sem felst í greiningu á tjónmætti. Tjónmætti byggist á stærð, afli og krafti náttúruváratburðar og líkindum 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 tjónnæmi, þ.e. 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 straumfræðilikani. Straumfræðilikön geta gefið upplýsingar um helstu kennistærðir flóða með því að líkja eftir rennslisháttum vatnsfalla (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022). Líkönin 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 fólki, 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) (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022; 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. DEFRA mælir með þeirri flokkun á tjónmættisgildum sem sýnd er í töflu 1 (Surendran o.fl., 2008). Fyrir sviðsmyndir þessa verkefnis má sjá lokaniðurstöður slíkrar greiningar í Viðauka B.

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

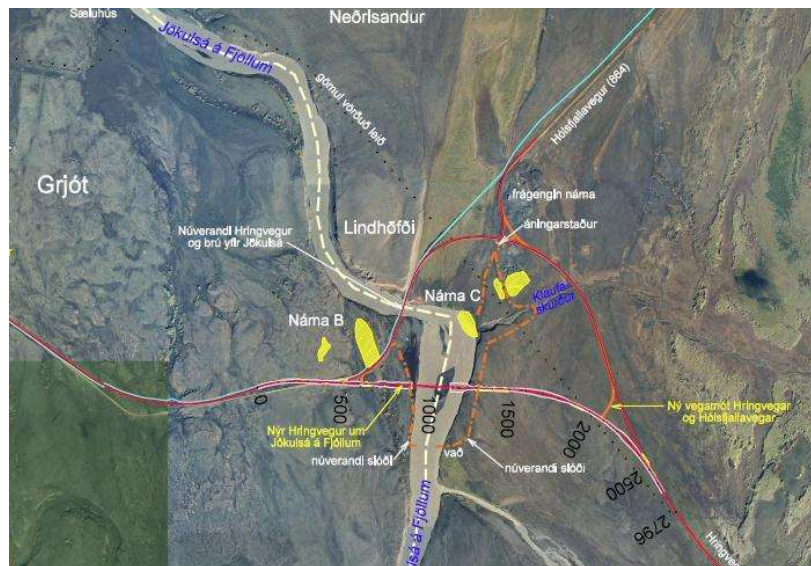
Hér að neðan er fjallað um niðurstöður líkanreikninga og þróun jökulhlaupanna í gegnum mælipunkta og þversnið. Kortlagningu á niðurstöðum má hins vegar finna í Viðauka B. Sviðsmynd 1 á við vatnsrit með hámarksrennsli 3.000 m³/s, sviðsmynd 2 er fyrir 10.000 m³/s hámarksrennsli, sviðsmynd 3 fyrir 30.000 m³/s hámarksrennsli og sviðsmynd 4 fyrir 100.000 m³/s hámarksrennsli. Sviðsmyndir 1 og 2 geta orðið vegna hlaupa úr jökullónum eða vegna eldsumbrota undir jökli. Sviðsmynd 3 og 4 geta einungis orðið vegna eldsumbrota undir jökli og myndu alltaf hafa einhvern fyrirvara. Sviðsmynd 4 er ólíkleg en ekki útilokuð.

Í fyrri hermunum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017) var sérstakt markmið að skoða stærð og útbreiðslu flóða við brúna yfir Jökulsá á Fjöllum nærri Grímsstöðum, sjá mynd 4. Var þetta vegna

áforma Vegagerðarinnar um að reisa þar nýja brú, sjá mynd 5 (Vegagerðin, 2013). Þessum áformum var hinsvegar frestað árið 2019 (Morgunblaðið, 2019).



Mynd 4. Yfirlitsmynd af svæðinu við brú yfir Jökulsá á Fjöllum, nærri Grímsstöðum á Fjöllum. Langavatnslindar eru merktar á myndinni (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).



Mynd 5. Yfirlitsmynd af fyrirhuguðu brúarstæði á Jökulsá á Fjöllum nærri Grímsstöðum á Fjöllum (Vegagerðin, 2013).

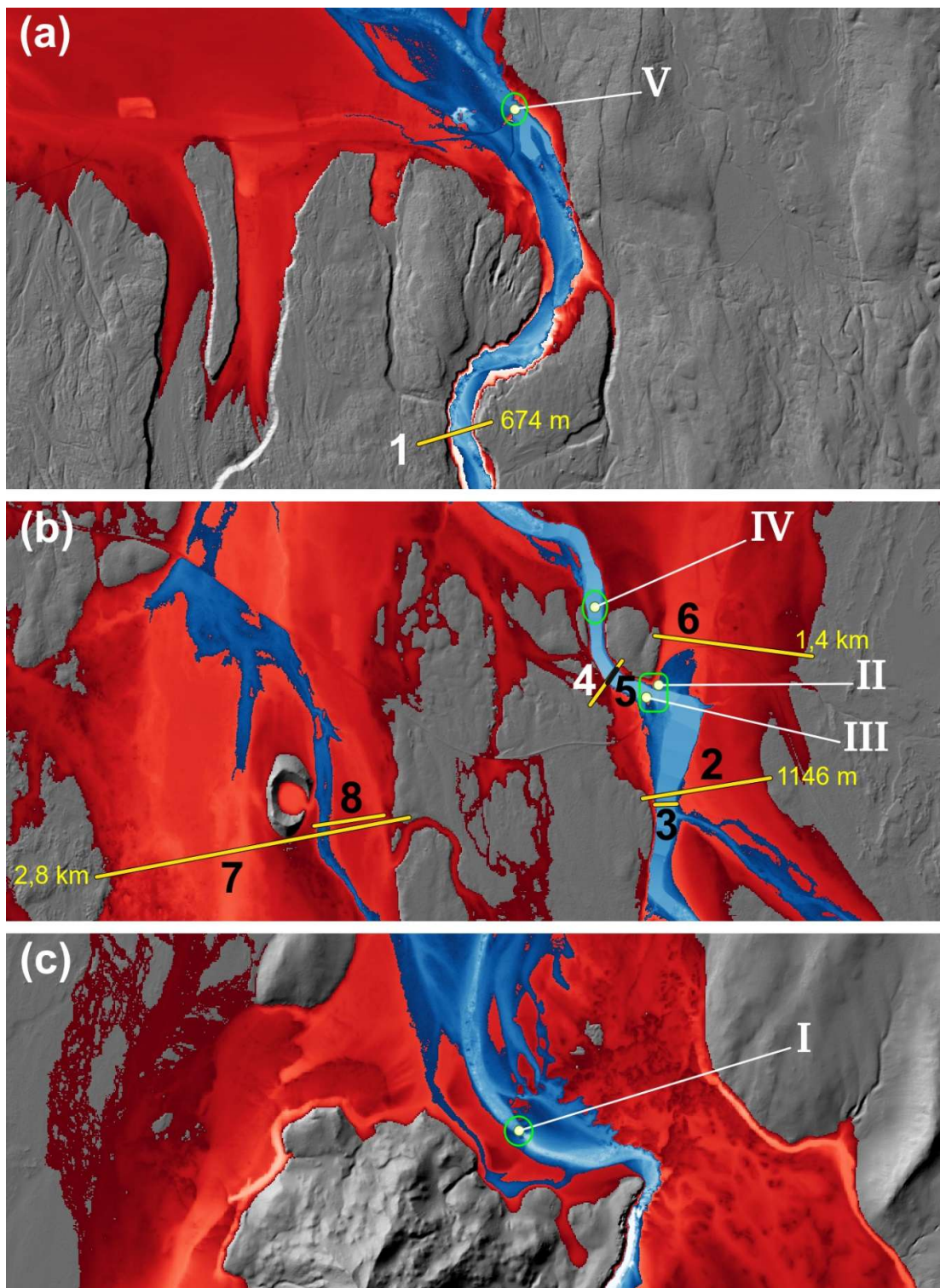
Mynd 6 sýnir staðsetningu mælipunkta og rennslisþversniða sem notuð eru í reikningunum, en til samanburðar við fyrri hermanir var ákveðið að nota sömu mælipunkta og notaðir voru í fyrri

skýrslu (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017). Hinsvegar eru rennslisþversniðin ekki hin sömu og áður. Á mynd 6 eru rennslisþversniðin merkt með tölunum 1 til 8 en mælipunktarnir (e. *gauge points*) eru merktir með rómversku tölunum I til V. Hnit mælipunktanna (í hnitakerfinu ISN93/EPSSG:3057) eru gefin að neðan og vísa tölurnar I til V til punkta með sömu táknunir á mynd 6:

I.	VHM 162 (Upptýppingar, mynd 6c):	$(x, y) = [631179.0, 509665.0]$
II.	VHM 102 (Grímsstaðir, mynd 6b):	$(x, y) = [629462.0, 572392.0]$
III.	Við núverandi brúarstæði (mynd 6b):	$(x, y) = [629354.0, 572280.0]$
IV.	Um 900 m norðan við núverandi brú (mynd 6b):	$(x, y) = [628898.0, 573079.0]$
V.	Brúarstæði nálægt Ásbyrgi (mynd 6a):	$(x, y) = [615883.0, 617508.0]$

Hvert stakt þversnið á mynd 6 liggur í beinni línu frá fyrra hniti (x_1, y_1) til hins síðara (x_2, y_2) . Punktahnitin eru gefin að neðan og eiga þau við þversnið 1 til 8 á mynd 6. Hnitin eru (í ISN93/EPSSG:3057):

1. $(x_1, y_1) = [615029.7, 614545.6]$ til $(x_2, y_2) = [615674.5, 614740.5]$
2. $(x_1, y_1) = [629318.5, 571386.3]$ til $(x_2, y_2) = [630449.6, 571568.1]$
3. $(x_1, y_1) = [629426.2, 571332.5]$ til $(x_2, y_2) = [629621.5, 571339.2]$
4. $(x_1, y_1) = [628854.0, 572214.4]$ til $(x_2, y_2) = [629136.8, 572604.9]$
5. $(x_1, y_1) = [629008.8, 572409.7]$ til $(x_2, y_2) = [629089.6, 572530.8]$
6. $(x_1, y_1) = [629426.2, 572827.1]$ til $(x_2, y_2) = [630819.8, 572645.3]$
7. $(x_1, y_1) = [624484.8, 570692.9]$ til $(x_2, y_2) = [627251.7, 571218.0]$
8. $(x_1, y_1) = [626410.2, 571144.0]$ til $(x_2, y_2) = [627029.6, 571238.2]$



Mynd 6. Staðsetning á rennslisþversniðum 1 til 8 og mælipunktum I til V sem notast er við í þessu verkefni. Bláa flóðsléttan gildir fyrir sviðsmynd 1, þ.e. $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (kafla 3.1) en rauða flóðsléttan reiknast í sviðsmynd 4, þ.e. $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (kafla 3.4). Myndirnar þrjár (a), (b) og (c) eru allar í sama mælikvarða. Lengdirnar á þversniðum 1, 2, 6 og 7 eru sýndar í metrum og km.

Þversnið 1 er nærri Ásbyrgi (nálægt Borgum), en önnur þversnið eru í námunda við brúna yfir Jökulsá á Fjöllum við Grímsstaði, sjá mynd 6. Þversnið 2 og 3 eru um 900 m sunnan við brú. Munurinn á þversniðum 2 og 3 er sá að hið síðarnefnda nær aðeins yfir árfarveginn, en hið fyrra nær yfir alla flóðsléttuna, þ.e. yfir rauðu flóðsléttuna á mynd 6b. Þversnið 4 og 5 eru um 300 m norðan við brúna. Hér er einnig sá munur tveggja þversniða að hið síðarnefnda nær aðeins yfir árfarveginn en hið fyrra yfir alla flóðsléttuna, eins og sést á mynd 6b (lengd þversniðs 5 er táknað með svörtu línunni en þversnið 4 með gulu og svörtu línunum saman lögðum). Þversnið 6 reiknar rennsli í átt að Langavatnslindum, sjá myndir 4 og 6b. Þversnið 7 og 8 eru sunnan og suðaustan við Hrossaborg og nær annað þversniðið u.þ.b. yfir farveg, sbr. mynd 6b.

Fyrir hvert þversnið er reiknað rennsli $Q = Q(t)$ í rúmmetrum á sekúndu (þ.e. m^3/s) sem fall af tíma. Að auki er jafna (9) notuð til að reikna út heildarrúmmál hlaupvatns sem fer í gegnum tiltekið þversnið á 6 dögum, þ.e. heildunartíminn T er 6 dagar.

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

Fyrir þetta verkefni er skrifbilið í hermun sett $\Delta HD = 30$ mín. Jafna (9) heildar því í 30 mínútna skrefum yfir samtals 6 daga.

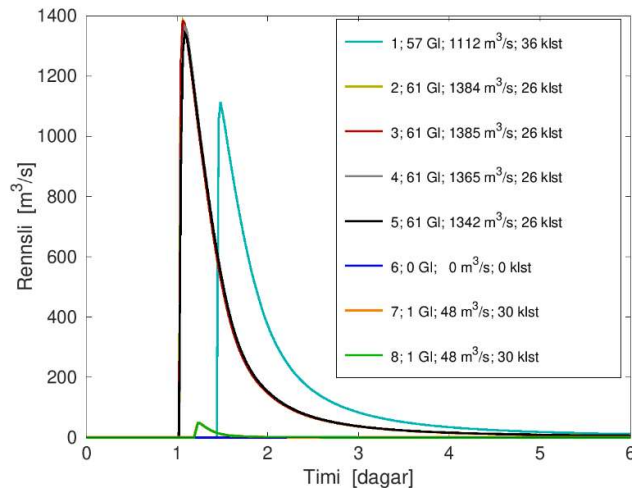
Í eftirfarandi umfjöllun er sérstaklega skoðuð þróun hlaupsviðsmynda í námunda við brúna yfir Jökulsá á Fjöllum við Grímsstaði, sér í lagi um þversnið 4 og mælipunkt III.

3.1 Sviðsmynd 1 – 3.000 m^3/s (4 m reikninet)

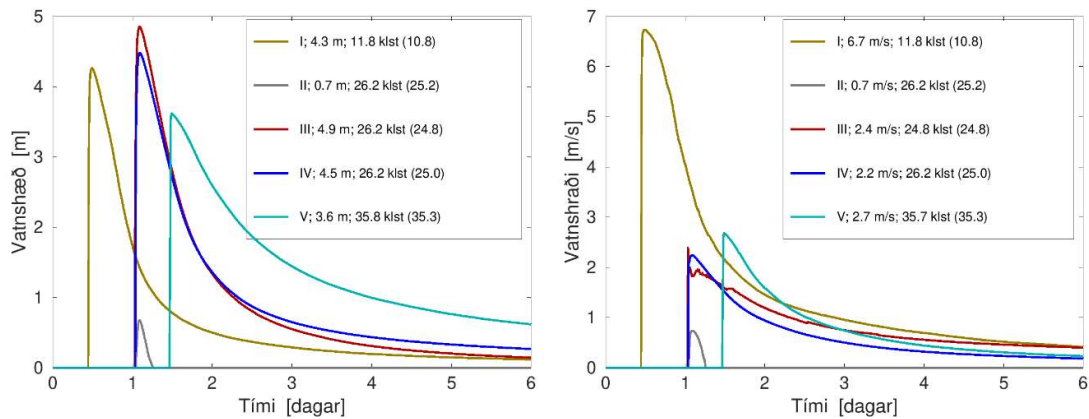
Mynd 7 sýnir rennsli í gegnum þversnið 1 til 8. Táknlykill í ramma á myndinni sýnir fjórar tölur: Fyrsta talan er númer þversniðs 1 til 8 og samsvarar tölum á mynd 6. Önnur talan sýnir samanlagt rennsli í gegnum viðkomandi þversnið í gígalítrum (Gl) samkvæmt jöfnu (9). Þriðja talan sýnir hámarksrennsli $Q_{\max}$ og fjórða talan sýnir hvenær þetta hámarksrennsli á sér stað (tíminn 0 klst. markar upphaf reiknings, þ.e. þegar jökulhlaup hefst við jaðar Dyngjujökuls, sjá mynd 2). Athuga ber að öll þessi fjögur gildi eru nálgðuð að næstu heilu tölu, t.d. eru tölurnar „1; 56,8 Gl; 1112,4 m^3/s ; 35,5 klst.“ nálgðuð að „1; 57 Gl; 1112 m^3/s ; 36 klst.“. Þessi nálgun og skrifbilið $\Delta HD = 30$ mín. leiða til óvissunnar ± 30 mín. (u.þ.b.) í tímasetningu hámarksrennslis um hvert þversnið. Samkvæmt umræðu í kafla 4, er þess utan a.m.k. 15% óvissa í niðurstöðum líkanreikninganna og er hún ráðandi í öllu óvissumati.

Þar sem hlaupið helst að mestu í farvegi Jökulsár, fer sama rennsli um þversnið 2,3,4 og 5 (mynd 7). Um þversnið 7 og 8 við Hrossaborg fer mjög lítið rennsli. Ekkert nær að flæða inn að Langavatnslindum (þversnið 6), en í fyrri skýrslu (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017) reiknaðist lítið heildarrennsli þar eða um 0,3 Gl. Hér ber þó að hafa í huga að nýrra landlíkan er nú notað yfir allt reiknisvæðið (sjá mynd 1) og er líklegt að munurinn skýrist af því.

Mynd 8 sýnir vatnshæð og vatnshraða sem fall af tíma í mælipunktum I til V. Athuga ber að vatnshæð er dýpi vatns yfir landlíkani, þ.e. yfir „venjulegu“ yfirborði árinna við eðlilegt rennsli.



Mynd 7. Rennsli um þversnið 1 til 8 á mynd 6. Sviðsmynd 1: $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$.



Mynd 8. Vatnshæð (t.v.) og hraði (t.h.) í mælipunktum I til V á mynd 6. Vatnshæð er reiknuð frá yfirborði árinna við eðlilegt rennsli. Gildir fyrir sviðsmynd 1: $3.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Táknlykillinn á mynd 8 sýnir fjórar tölur: Fyrsta talan er númer mælipunkts I til V og samsvarar tölum sem merktar eru inn á mynd 6. Önnur talan sýnir hámarksdýpi $d_{\max}$ (vinstri mynd) eða hámarkshraða $v_{\max}$ (hægri mynd). Þriðja talan sýnir hvenær þetta hámark á sér stað. Fjórða talan (í sviga) sýnir hvenær stafn flóðbylgju nær að tilteknum mælipunkti. Þar sem skrifbilið fyrir mælipunkta er 10 mín., er óvissa í tímasetningu um ± 5 mín. En í þessu samhengi ber að athuga að þess utan er a.m.k. 15% óvissa í niðurstöðum líkanreikninganna, fyrir utan óvissu sem aðrir þættir kunna að skapa líkt og fram kemur í kafla 4.

Ef greina á sérstaklega þróun hlaupsviðsmyndanna við brúna yfir Jökulsá á Fjöllum við Grímsstaði, má skoða mynd 7 þar sem grái ferillinn sýnir rennsli um þversnið 4, skammti neðan brúarinnar og á mynd 8 er mælipunktur III (rauða línan) næst brúnni. Í sviðsmynd 1 er hámarksrennsli um þversnið 4 $1.365 \text{ m}^3/\text{s}$, 26 klst. eftir að jökulhlaup hefst við jaðar Dyngjujökuls. Á 6 daga tímabili flæða um 61 Gl í gegnum þetta þversnið (jafna (9)), en til samanburðar er heildarsviðsmyndin 76 Gl, sbr. mynd 3. Eftir 6 daga hafa því um 80% hlaupvatnsins farið um þversnið 4. Í mælipunkti III reiknast hámarksdýpið 4,9 m og táknar sú tala aukningu í dýpi árinna við eðlilegt rennsli. Sé t.d. dæmigert vatnsdýpi farvegar í þessum tiltekna punkti um 3 m, verður hámarksdýpið í þessum sama punkti í þessari hlaupsviðsmynd um

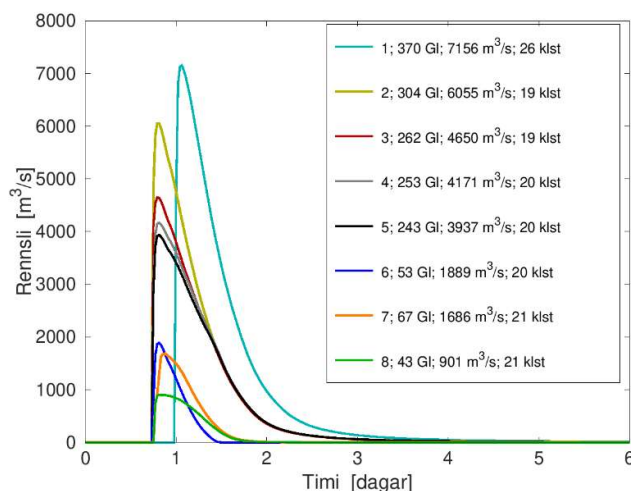
$4,9 \text{ m} + 3 \text{ m} = 7,9 \text{ m}$. Þessu hámarksdýpi er náð $26,2 \approx 26$ klst. eftir að jökulhlaup hefst við jaðar Dyngjujökuls. Flóðstafinn er fyrr á ferðinni, við $24,8 \approx 25$ klst., sjá mynd 8. Straumhraði í mælipunkti III reiknast mestur um $2,4 \text{ m/s}$.

Þó svo að mælipunktur II og III séu nálægt hvor öðrum, þá er sá fyrrgreindi í raun utan farvegar og er því ekki með há gildi á mynd 8. Þetta útskýrir líka tilsvareandi mun á myndum 10 og 12, fyrir hinar sviðsmyndirnar.

3.2 Sviðsmynd 2 – $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (6 m reikninet)

Í sviðsmynd 2 fer hámarksrennslið $Q_{\max} = 4.171 \text{ m}^3/\text{s}$ um þversnið 4 (þ.e. við núverandi brú) um 20 klst. eftir að jökulhlaup hefst við jaðar Dyngjujökuls (sjá mynd 9). Á 6 daga tímabili flæða um 253 Gl um þetta þversnið en til samanburðar er heildarsviðsmyndin 396 Gl, sbr. mynd 3. Rennslið um þversnið 4 nemur því 64% af heildarrennsli frá jökuljaðri.

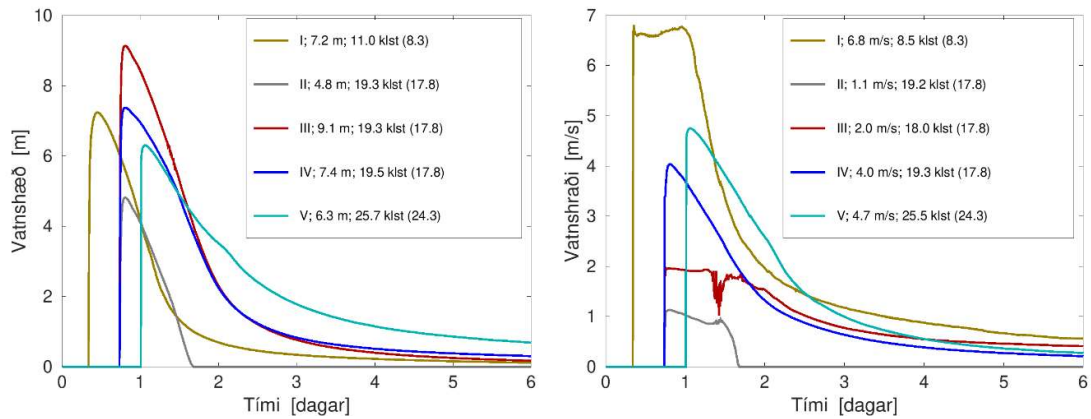
Við mælipunkt III reiknast hámarksdýpið $9,1 \text{ m}$ $19,3 \approx 19$ klst. eftir upphaf jökulhlaups (mynd 10). Flóðstafinn nær punktinum nokkru fyrr, eftir $17,8 \text{ klst.} \approx 18 \text{ klst.}$ Mestur straumhraði reiknast á móta og í sviðsmynd 1, um $2,0 \text{ m/s}$, en helst lengur í hámarki, þ.e. rúman sólarhring.



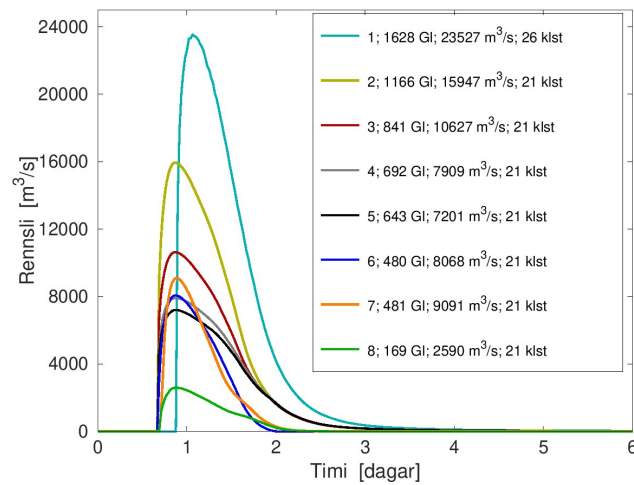
Mynd 9. Rennsli um þversnið 1 til 8 á mynd 6. Sviðsmynd 2: $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3 Sviðsmynd 3 – $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ (6 m reikninet)

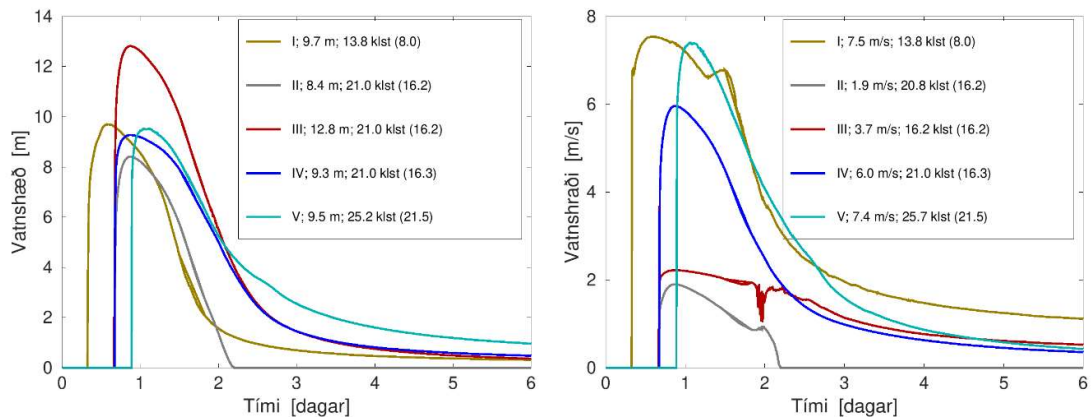
Í sviðsmynd 3 reiknast hámarksrennsli um þversnið 4 $Q_{\max} = 7.909 \text{ m}^3/\text{s}$ (mynd 11), um 21 klst. eftir upphaf jökulhlaups við jaðar Dyngjujökuls. Á 6 daga tímabili flæða um 692 Gl í gegnum þetta þversnið, en til samanburðar er heildarsviðsmyndin 1782 Gl, sbr. mynd 3. Rennslið um þversnið 4 nemur því aðeins 39% af heildarrennsli frá jökli, en nam 80% í sviðsmynd 1 (kafla 3.1) og 64% í sviðsmynd 2 (kafla 3.2). Munurinn skýrist af því að hlaupið flæmist sífellt meira út fyrir farveg Jökulsár þegar vatnsmagnið eykst. Við mælipunkt III verður hámarksdýpið $12,8 \text{ m}$ umfram meðaldýpi í punktinum (sjá mynd 12) og er því náð 21 klst. eftir að jökulhlaup hefst við jaðar Dyngjujökuls. Flóðstafn hlaupsins nær punktinum $16,2 \approx 16$ klst. eftir upphafið og straumhraði nær mest $3,7 \text{ m/s}$ í þessum tiltekna punkti.



Mynd 10. Vatnshæð (t.v.) og hraði (t.h.) í mælipunktum I til V á mynd 6. Vatnshæð er reiknuð frá yfirborði árinna við eðlilegt rennsli. Gildir fyrir sviðsmynd 2: 10.000 m³/s.



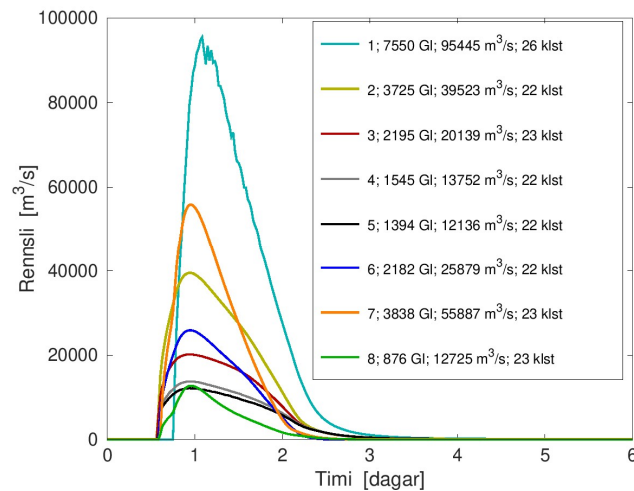
Mynd 11. Rennsli um þversnið 1 til 8 á mynd 6. Sviðsmynd 3: 30.000 m³/s.



Mynd 12. Vatnshæð (t.v.) og hraði (t.h.) í mælipunktum I til V á mynd 6. Vatnshæð reiknast frá yfirborði árinna við eðlilegt rennsli. Gildir fyrir sviðsmynd 3: 30.000 m³/s.

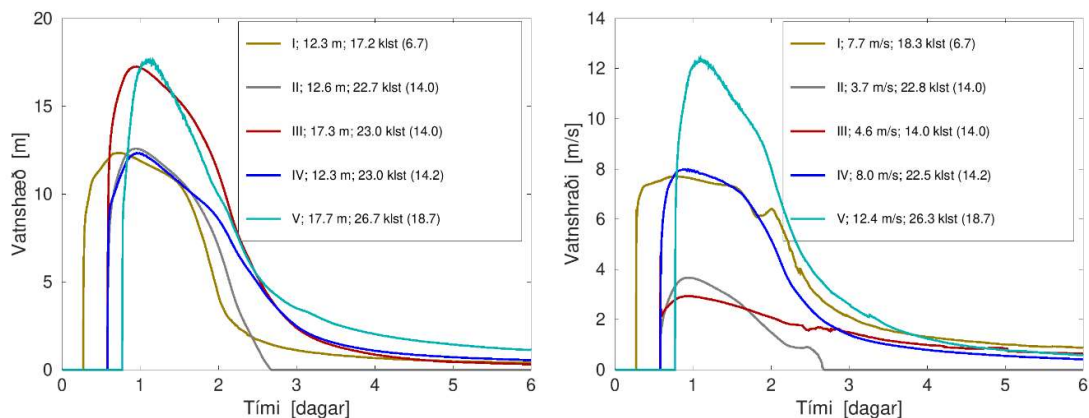
3.4 Sviðsmynd 4 – 100.000 m³/s (10 m reikninet)

Í sviðsmynd 4 er hámarksrennsli um þversnið 4 $Q_{\max} = 13.752 \text{ m}^3/\text{s}$ og er því náð 22 klst. eftir upphaf jökulhlaups við jaðar Dyngjujökuls (sjá mynd 13). Á 6 daga tímabili flæða um 1.545 Gl um þetta þversnið, en til samanburðar er heildarsviðsmyndin 7.740 Gl, sbr. mynd 3. Rennslið um þversnið 4 er því aðeins 20% af heildarsviðsmyndinni. Tölurnar fyrir mismunandi sviðsmyndir eru því 80% (kafla 3.1), 64% (kafla 3.2), 39% (kafla 3.3) og 20% (þessi kafla) og er skýring á þessum mun nefnd í kafla 3.3. Í þessari hlaups sviðsmynd hækkar vatnshæðin um rúmlega 17 m umfram vatnshæð við eðlilegt rennsli við mælipunkt III (sjá mynd 14, t.v.). Þessari vatnshæð er náð 23 klst. eftir að jökulhlaup hefst við jökulrönd. Flóðstafinn nær punktinum 14 klst. eftir upphafið og er mestur hraði 4,6 m/s í þessum tiltekna punkti.



Mynd 13. Rennsli um þversnið 1 til 8 á mynd 6. Sviðsmynd 4: 100.000 m³/s.

Mynd 14 til hægri sýnir straumhraða sem fall af tíma í mælipunktum I–V. Við mælipunkt III er hraðastökk við upphaf bylgju, nefnt „fyrsti flóðfaldur“ í fyrri skýrslu um svipaða reikninga (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017). Þetta fyrirbæri sést illa á mynd 14 því bláa línan þekur hina rauðu. Hraðahámark þetta - 4,6 m/s - sést hins vegar í táknyklarammanum á myndinni. Hraðastökkið sést fyrst og fremst í mælipunkti III fyrir sviðsmyndir 1, 3 og 4 og endist 10–20 mínútur. Ekki er ljóst hvað veldur þessari rennslishegðun.



Mynd 14. Vatnshæð (t.v.) og hraði (t.h.) í mælipunktum I til V á mynd 6. Vatnshæð reiknast frá yfirborði árinna við eðlilegt rennsli. Gildir fyrir sviðsmynd 4: 100.000 m³/s.

Á kortum í Viðauka B má sjá verulega útbreiðslu hlaupvatns ásamt háu tjónmætti í þessari sviðsmynd, vegna mikils heildarrúmmáls hlaupvatns (7.740 Gl) ásamt háu hámarksrennsli 100.000 m³/s (sjá mynd 3). Í þessu samhengi ber að athuga að þessi sviðsmynd er mjög ólíkleg, en þó ekki útilokuð.

3.5 Hámarksútbreiðsla og tjónmætti

Hámarksútbreiðsla og tjónmætti jökulhlaups innan hverrar sviðsmyndar er birt á kortum sem finna má í Viðauka B. Heildarlíkantími fyrir hverja sviðsmynd er 144 klst. (6 dagar) og tekur hámarksútbreiðslan og tjónmættið mið af því, sbr. jöfnur (6) og (7). Mynd 14 í kafla 3 sýnir t.d. að í mælipunkti V sjást litlar breytingar á hjaðnandi hlaupvatni eftir um þrjá daga og eru 6 dagar (144 klst.) því nægjanlegur tími til að ná yfir öll hámörk fyrir hámarksútbreiðslu og tjónmætti. Á 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.

Niðurstöður sýna að minnsta hlaupið (3.000 m³/s) næði brúnni nærri Grímsstöðum á rúmunum sólarhring eftir upphaf við jökuljaðar og brúnni framan Jökulsárgljúfra við Ásbyrgi eftir rúmlega 1,5 sólarhring. Fyrir sviðsmynd 2 (10.000 m³/s) eru samsvarandi tölur um 18 klst. (Grímsstaðir) og um 25 klst. (Ásbyrgi) og fyrir sviðsmynd 3 eru þær um 17 klst. (Grímsstaðir) og 22 klst. (Ásbyrgi). Í öllum þessum tilvikum væri hámarksrennsli náð 1–4 klst. eftir að flóðstafn næði viðkomandi brú. Í tilviki hamfarahlaups (100.000 m³/s) væri hlaupvatn komið að brúnni við Grímsstaði eftir um 14 klst. en hlauphámarki væri náð um 10 klst. síðar. Hlaupið næði brúnni við Ásbyrgi eftir um 19 klst. og hámarki væri náð um 8 klst. síðar. Tími frá komu flóðstafns og að hámarki við ákveðinn stað ræðst talsvert af rishraða rennslis í þeirri flóðasviðsmynd sem reiknuð er. Rishraðinn í raunverulegum jökulhlaupum getur verið talsvert breytilegur og þetta tímamat því ekki nákvæmt, jafnvel fyrir hlaup með svipað hámarksrennsli og gefin hlaupsviðsmynd. Í minni hlaupunum (sviðsmyndum 1 og 2) kemur vatn eingöngu fram í eystri upptökum við jökul en í hinum stærri (sviðsmyndum 3 og 4) kemur vatn einnig undan jökli vestar. Í öllum tilvikum dreifist hlaupvatn um Flæðurnar framan jökulsins og umlykur Holuhraunið nýja (2014–15). Mestallt vatnið leitar svo austur með Vaðöldu þótt tunga úr hlaupinu fari einnig vestur með henni í hinum stærri hlaupum. Í þeim tilvikum flæmist einnig hlaupvatn alllangt út fyrir farveg Jökulsár á Fjöllum og umkringir Upptýppinga. Talsvert vatn berst í neðsta hluta Krepputungu í stærri hlaupunum og í hinu stærsta (100.000 m³/s) fer hluti hlaupvatnsins austur fyrir Arnardalsöldu en sameinast svo meginflaumnum norðan hennar. Hætta mun steðja að tjaldsvæði við Herðubreiðarlindir og Þorsteinsskála í öllum sviðsmyndum og lindasvæðið færi allt á kaf í stærstu hlaupsviðsmyndinni. Hlaupin ná ekki upp að Möðrudal en vestan bæjarins nær hlaupvatn yfir 10 km breitt landsvæði og Lambafjöll verða umlukin vatni. Vestan Grímsstaða breiðir hlaupið einnig mikið úr sér í stærstu sviðsmyndunum og nær Hólsseli, en þar fyrir norðan verður útbreiðslan ekki eins mikil út fyrir hinn hefðbundna farveg Jökulsár. Í hinum 25 km löngu Jökulsárgljúfrum helst hlaupvatnið innan gljúfurveggja en flæmist þó um Vesturdal í stærstu sviðsmyndinni og mundi ógna þar tjaldstæði og skálum. Þegar hlaupvatn streymir út úr norðurenda Jökulsárgljúfra dreifist það mjög um láglandi Öxarfjarðar og nokkrum bæjum verður hætta búin, einkum í stærstu hlaupunum. Talsvert vatn berst inn í Ásbyrgi í sviðsmyndum 2–4, suður fyrir enda Eyjarinnar en þó ekki alla leið inn í botn.

Þjóðvegur 1 færi í kaf á 8 km kafla milli Hóls og Ferjubakka í sviðsmyndum 3 og 4 og að hluta í sviðsmynd 2.

Tiltölulega lítil hættu mundi stafa af minnsta hlaupinu ($3.000 \text{ m}^3/\text{s}$) af þeim fjórum, sem reiknuð hafa verið í þessu verkefni. Í hinum stærri sviðsmyndum má hins vegar greina hátt tjónmætti víðast hvar og skýrist það af miklu hlaupvatni og háu hámarksrennsli, sjá sérstaklega sviðsmynd 4 á kortum 15–17 með heildar hlaupvatn 7.740 Gl og hámarksrennsli $100.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Í þessu samhengi ber að athuga að þessi sviðsmynd er mjög ólíkleg, en þó ekki útilokuð. Erfitt er að segja til um líkindi sviðsmyndanna almennt en þó má nefna að sviðsmyndir 3 og 4 geta einungis orðið vegna eldsumbrota undir jökli og myndu alltaf hafa einhvern fyrirvara.

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 rennsli 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 reiknins.

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

4.1 Næmnigreining fyrir Manning stuðul

Sviðsmyndirnar fjórar voru hermdar með hrýfisstuðlinum $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$. Svo hár stuðull lýsir 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. Hins vegar verður að hafa í huga að mikil óvissa er þegar til staðar í líkaninu, sérstaklega hvað varðar tímaþróun rennslis undan jökli (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).

Til að fá skýrari hugmynd um áhrif Manning stuðuls á niðurstöður, var sviðsmynd 3 keyrð með hrýfisgildinu $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ og niðurstaðan borin saman við samsvarandi niðurstöðu með hrýfisgildinu $0,05 \text{ s/m}^{1/3}$.

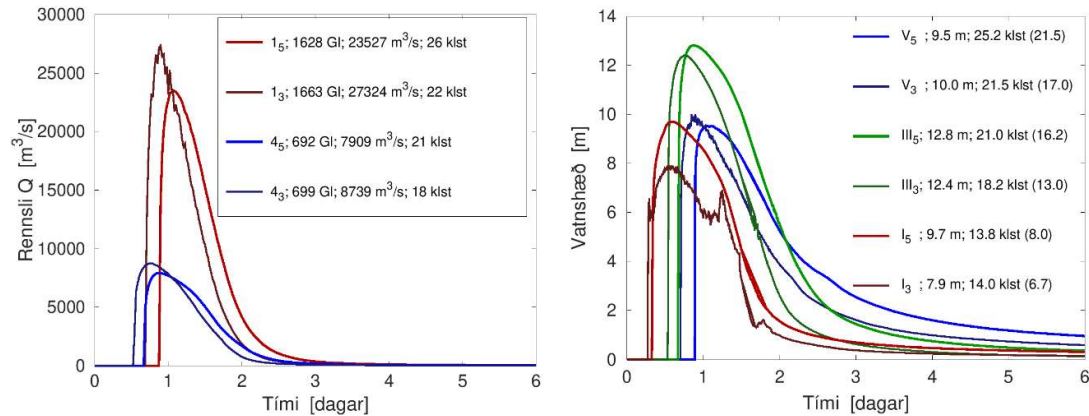
Mynd 15 t.v. sýnir rennsli Q í gegnum þversnið 1 og 4 (sjá mynd 6). Eins og áður hefur verið nefnt er þversnið 1 um 3 km sunnan við brúarstæði nálægt Ásbyrgi (nálægt Borgum) og þversnið 4 er við núverandi brúarstæði nærri Grímsstöðum. Táknlykill myndar 15 t.v. er hinn sami og fyrir myndir 7, 9, 11 og 13: Fyrsta talan er númer þversniðs, 1 og 4 (sjá mynd 6) annaðhvort með 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 er samanlagt rennsli í Gl, þriðja talan hámarksrennsli $Q_{\max}$ og fjórða talan er tímasetning á þessu hámarki.

Mismunurinn á milli hámarksrennslis $Q_{\max}$ fyrir hrýfistilfellin $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ og $0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ er eftirfarandi (P1 = þversnið 1 og P4 = þversnið 4):

- $\Delta Q_{\max-p1} = 100 \cdot (27.324 \text{ m}^3/\text{s} - 23.527 \text{ m}^3/\text{s}) / ((27.324 \text{ m}^3/\text{s} + 23.527 \text{ m}^3/\text{s})/2) = 15\%$
- $\Delta Q_{\max-p4} = 100 \cdot (8.739 \text{ m}^3/\text{s} - 7.909 \text{ m}^3/\text{s}) / ((8.739 \text{ m}^3/\text{s} + 7.909 \text{ m}^3/\text{s})/2) = 10\%$

Tilsvarandi mismunur í tímasetningu er eftirfarandi:

- $\Delta t_{Q\max-p1} = 100 \cdot (26 \text{ klst.} - 22 \text{ klst.}) / ((26 \text{ klst.} + 22 \text{ klst.})/2) = 17\%$
- $\Delta t_{Q\max-p4} = 100 \cdot (21 \text{ klst.} - 18 \text{ klst.}) / ((21 \text{ klst.} + 18 \text{ klst.})/2) = 15\%$



Mynd 15. Rennsli um þversnið 1 og 4 (t.v.) og vatnshæð í mælipunktum I, III og V (t.h.), fyrir hrýfisgildin $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ og $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$. Gildir fyrir sviðsmynd 3: $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ á 6 m reiknineti.

Mynd 15 t.h. sýnir vatnshæð sem fall af tíma fyrir mælipunkta I, III og V. Eins og sést á mynd 6, er mælipunktur V nálægt þversniði 1, og mælipunktur III nálægt þversniði 4. Táknlykillinn fyrir mynd 15 t.h. er eins og fyrir myndir 8, 10, 12 og 14 (vinstri): Fyrsta talan er númer mælipunkts, I, III og V (mynd 6) annaðhvort með undirtöluna **5** (fyrir hrýfisstuðulinn $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$) eða **3** (fyrir hrýfisstuðulinn $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$). Önnur talan er hámarksdýpi $d_{\max}$ (til viðbótar við dýpi árinna við eðlilegt rennsli) og þriðja talan er tímasetning á þessu hámarki. Fjórða talan (sem er í sviga) sýnir hvenær flóðstafn hlaupsins nær að tilteknum mælipunkti.

Munur á hámarksdýpi $d_{\max}$ fyrir hrýfistilfellin $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ og $0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ er eftirfarandi (V = mælipunktur V, III = mælipunktur III og I = mælipunktur I):

- $\Delta d_{\max-V} = 100 \cdot (10,0 \text{ m} - 9,5 \text{ m}) / ((10,0 \text{ m} + 9,5 \text{ m})/2) = 5\%$
- $\Delta d_{\max-III} = 100 \cdot (12,8 \text{ m} - 12,4 \text{ m}) / ((12,8 \text{ m} + 12,4 \text{ m})/2) = 3\%$
- $\Delta d_{\max-I} = 100 \cdot (9,7 \text{ m} - 7,9 \text{ m}) / ((9,7 \text{ m} + 7,9 \text{ m})/2) = 20\%$

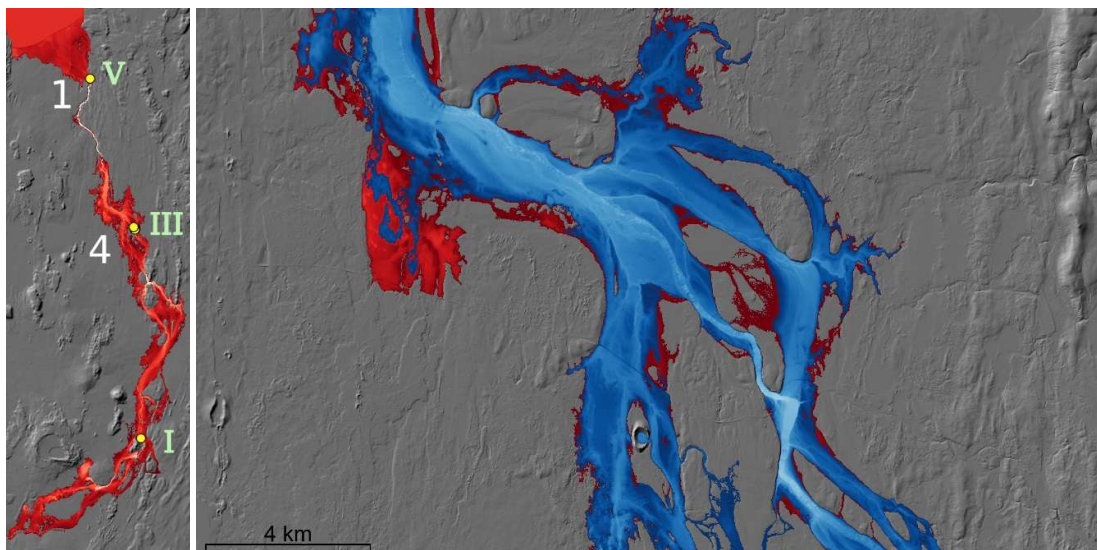
Munur á ferðatíma flóðstafns frá jökuljaðri að tilteknum mælipunkti (þ.e. tölurnar í sviga) er eftirfarandi:

- $\Delta t_{\max-V} = 100 \cdot (21,5 \text{ klst.} - 17,0 \text{ klst.}) / ((21,5 \text{ klst.} + 17,0 \text{ klst.})/2) = 23\%$
- $\Delta t_{\max-III} = 100 \cdot (16,2 \text{ klst.} - 13,0 \text{ klst.}) / ((16,2 \text{ klst.} + 13,0 \text{ klst.})/2) = 22\%$
- $\Delta t_{\max-I} = 100 \cdot (8,0 \text{ klst.} - 6,7 \text{ klst.}) / ((8,0 \text{ klst.} + 6,7 \text{ klst.})/2) = 18\%$

Út frá ofangreindum gildum $\Delta Q_{\max}$, $\Delta t_{Q\max}$, $\Delta d_{\max}$ og $\Delta t_{\max}$, þ.e. prósentugildin frá 3% til 23%, má gróflega gera ráð fyrir a.m.k. 15% óvissu þegar niðurstöður líkanreikninganna eru túlkaðar.

Þetta óvissumat er í samræmi við mat sem sett var fram í fyrri skýrslu um þetta efni (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).

Mynd 16 t.v. sýnir yfirlitsmynd af staðsetningu ofangreindra þversniða 1 og 4 ásamt mælipunktum I, III og V. Mynd 16 t.h. sýnir samanburð á hámarksútbreiðslu hlaups við Grímsstaði fyrir mismunandi hrýfisstuðul Mannings ($n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ og $0,03 \text{ s/m}^{1/3}$). Fyrir hærri gildið eykst útbreiðslan samfara aukinni vatnshæð, sjá einnig mynd 10 í fyrri skýrslu (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017).

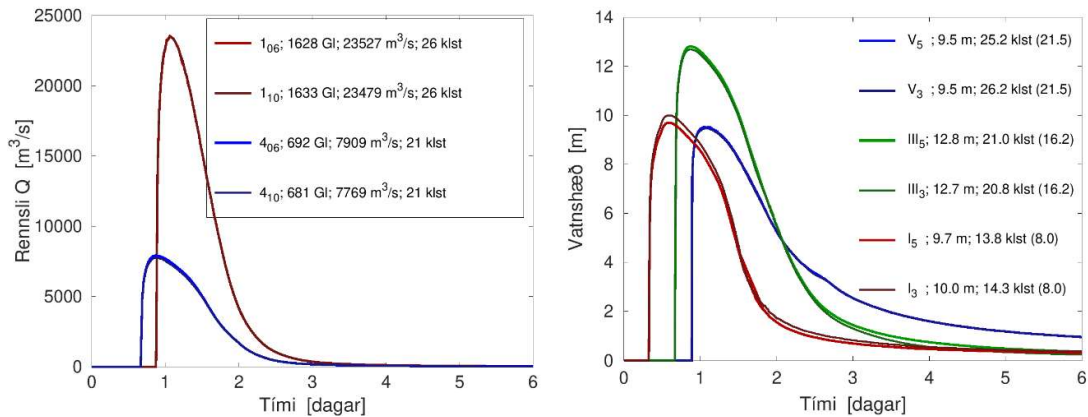


Mynd 16. T.v.: Yfirlitsmynd af staðsetningu þversniða 1 og 4 ásamt mælipunktum I, III og V (sjá einnig mynd 6). T.h.: Samanburður á hámarksútbreiðslu hlaups í nágrenni þjóðveg 1 fyrir $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$ (rautt) og $n = 0,03 \text{ s/m}^{1/3}$ (blátt). Gildir fyrir sviðsmynd 3: $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ á 6 m reiknineti.

4.2 Næmnigreining fyrir upplausn reikninet

Í fyrri reikningum (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2017) var upplausn reikninet annarsvegar 25 m og hinsvegar 12,5 m, háð sviðsmynd. Nú er reikninetið mun þéttara, með upplausn 10 m, 6 m og 4 m, háð sviðsmynd. Fyrir stækkandi sviðsmyndir þarf að stækka möskvana, sem getur leitt til minni nákvæmni. Til að meta þetta, var sviðsmynd 3 keyrð frá upphafi til enda fyrir tvö tilfelli, annarsvegar á 6 m reiknineti og hinsvegar á 10 m reiknineti.

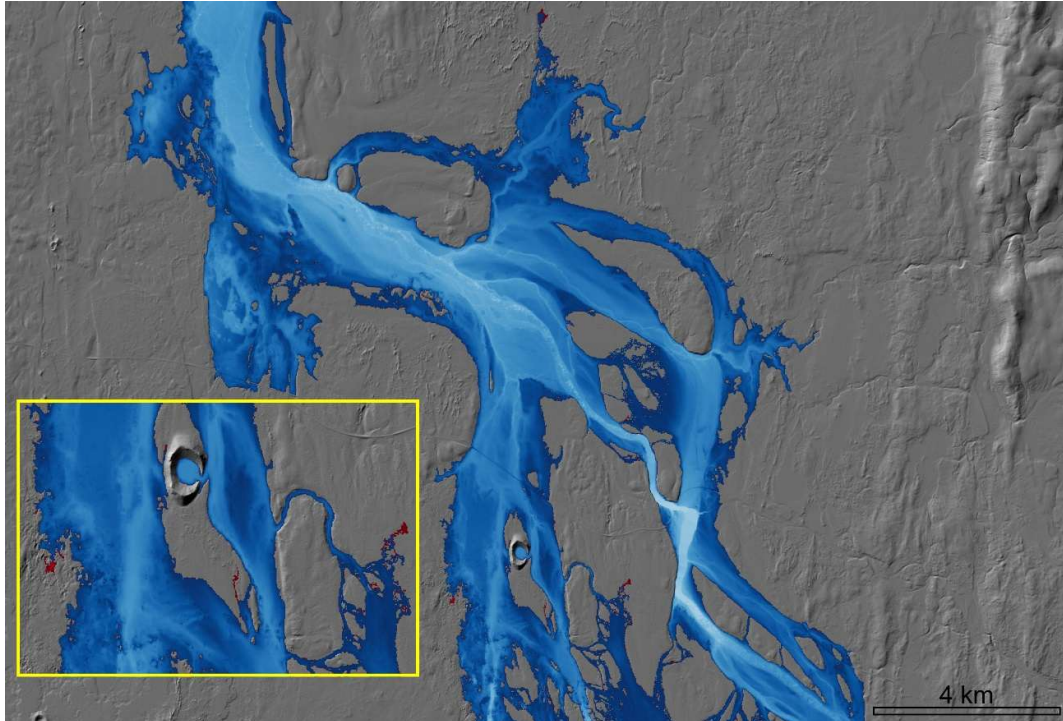
Mynd 17 sýnir þróun rennslis og vatnshæðar fyrir þversnið 1 og 4 og mælipunkta I, III og V. Sjá kafla 4.1 um útskýringu á táknyklum (þ.e. táknyklar eru eins og fyrir mynd 15).



Mynd 17. Rennsli um þversnið 1 og 4 (t.v.) og vatnshæð í mælipunktum I, III og V (t.h.), fyrir 6 m og 10 m reikninet. Sviðsmynd 3: $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ og $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$.

Á mynd 17 t.v. kemur fram sáralítill munur á rennsli $Q = Q(t)$ í gegnum þversnið 1 og 4 fyrir þessi tvö mismunandi reikninet. Mynd 17 t.h. gefur til kynna smávægilegan mismun í þróun vatnshæðar fyrir mælipunkt I, þ.e. þann sem er næst jökuljaðri. Hinsvegar eru báðar niðurstöður fyrir mælipunkta III og V mjög svipaðar í alla staði.

Mynd 18 sýnir samanburð á hámarksútbreiðslu hlaups í nágrenni þjóðveg 1, fyrir 6 m reikninet og 10 m reikninet. Þar er sáralítill mismunur til staðar, og þarf að stækka myndina til að sjá einhvern smávægilegan mismun, sem greinist á stækkaða svæðinu innan gula rammans. Reikningarnir eru því orðnir óháðir mörskvastærð (e. „mesh independent“).



Mynd 18. Samanburður á hámarksútbreiðslu hlaups í nágrenni þjóðveg 1 fyrir 6 m reikninet (rautt) og 10 m reikninet (blátt). Sviðsmynd 3: $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ og $n = 0,05 \text{ s/m}^{1/3}$.

Heimildir

- 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.
- 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, Guðrún E. Jóhannsdóttir, Tinna Þórarinsdóttir, Hilmar B. Hróðmarsson og Davíð Egilson (2017). *Flóð á vatnasviðum Eyjafjarðarár, Héraðsvatna, Hvítár í Borgarfirði, Lagarfljóts og Skjálfandafljóts: I. Yfirlit yfir orsakir, stærð og afleiðingar sögulegra atburða*. Skýrsla VÍ 2017-006. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- 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. Hróðmarsson, Bergur Einarsson og Matthew J. Roberts (2019). *Hættumat vegna vatnsflóða í Ölfusá*. Skýrsla VÍ 2019-013. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- 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.
- 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. & Berger M.J. (2011). Tsunami modelling with adaptively refined finite volume methods, *Acta Numerica*, 20, 211–289.
- Mandli, K. T., & 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.
- Morgunblaðið (2019), https://www.mbl.is/frettir/innlent/2019/06/05/jokulsarbruin_verdur_ad_bida/
- 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.

- Surendran, Gibbs, Wade & 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.
- Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarsson, Matthew J. Roberts og Einar Hjörleifsson (2020). *Áhættureikningar vatnsflóða og jökulhlaupa: Notkun aðferðafræði frá DEFRA við áhættumat á Íslandi*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, greinargerð TTh/ofl/2020-01.
- Tinna Þórarinsdóttir, 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.
- Trausti Jónsson (2002). *Hættumat og hlutverk Veðurstofunnar í ljósi hættumatsramma Alþjóðaveðurfræðistofnunarinnar*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Vegagerðin (2013), <https://www.vegagerdin.is/upplýsingar-og-utgafa/frettir/nr/5993>,
<https://www.vegagerdin.is/framkvaemdir/umhverfismat/kynningargogn/nr/5992>
- Vegvísir um rannsóknarinnviði 2021 (Júní 2021), Mennta- og menningarmálaráðuneytið, Stjórnarráð Íslands.
- Versteeg H.K. & Malalasekera W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*, Second Edition, Pearson Education Limited.

Viðauki A – Hætta, Tjónmætti, Tjónnæmi & Áhætta

Hér er stuttlega gerð grein fyrir hugtökunum *hætta*, *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 hætta- 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 er lýst miðast við skilgreiningar í ofanefndri skýrslu (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022).

A.2 Tjónmætti og hætta

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 lausagrjóts 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 oft. Sjá skilgreininguna á endurkomutíma í kafla 1.2. í ofanefndri skýrslu (Tinna Þórarinsdóttir o.fl., 2022).

Hætta (e. *hazard*) = Ógnandi atburður. Líkur þess 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.

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

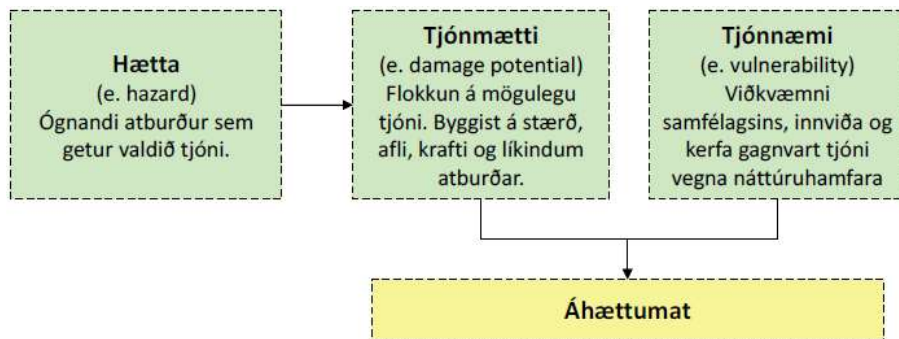
Tjónnæmi gagnvart flóðum má skipta upp í tvo þætti:

- 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.

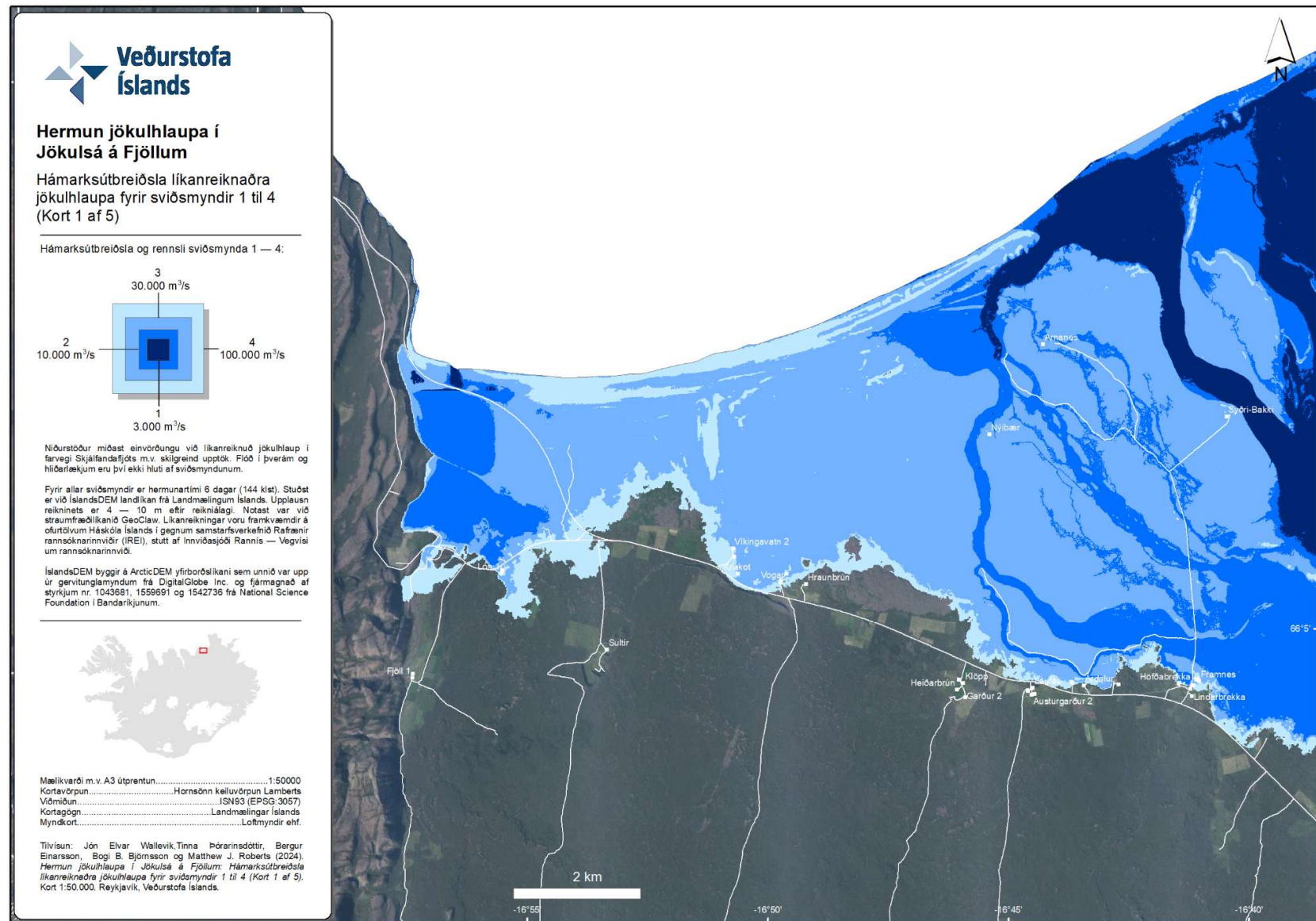
$$\text{Áhætta} = f(\text{Tjónnæmi}, \text{Tjónmætti}) \quad (\text{A.4})$$



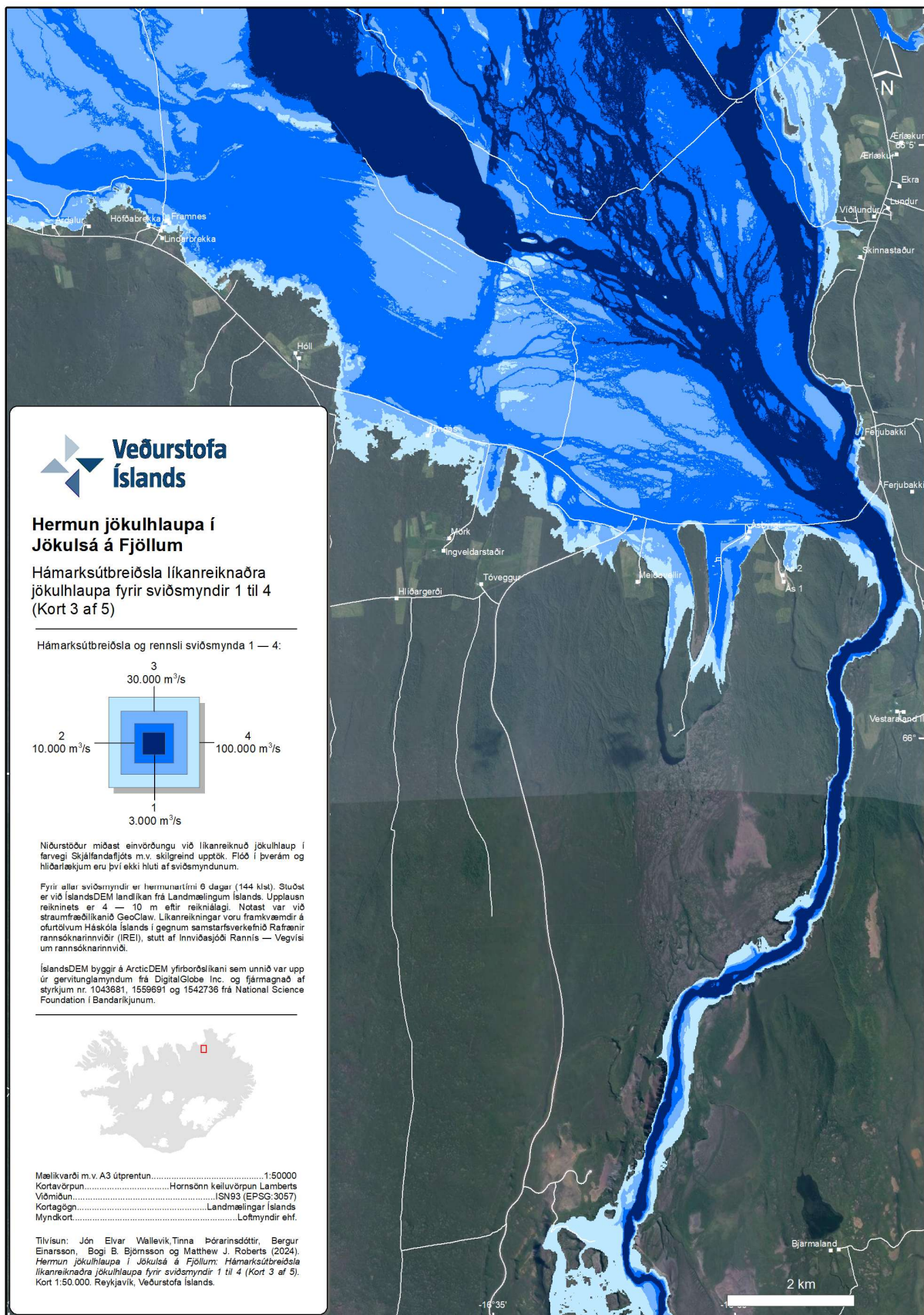
Mynd er sett saman af Trausta Jónssyni (2002).

Viðauki B –Heildstæð kort

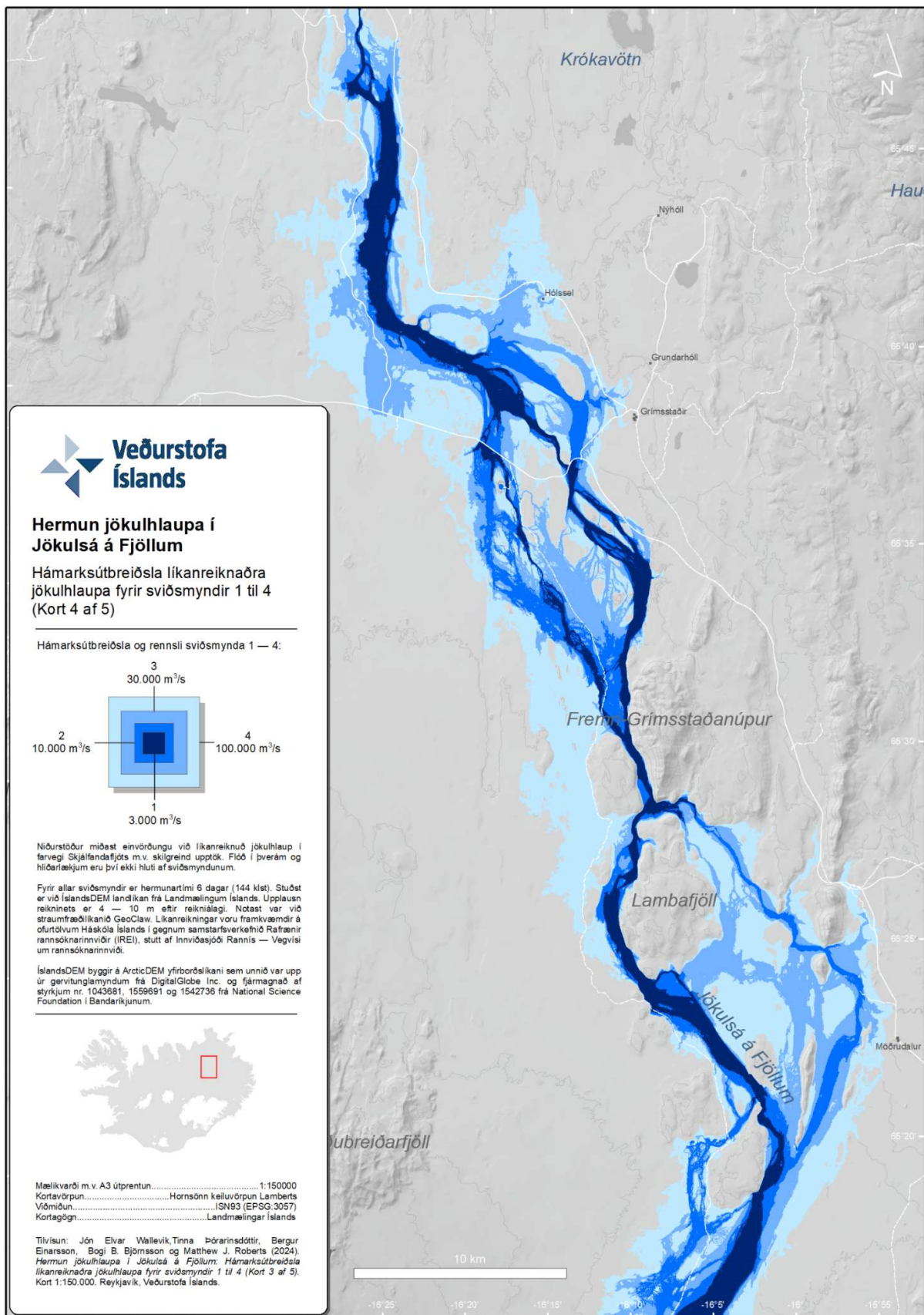
Í þessum viðauka má finna niðurstöður hættumats vegna jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum. Hér eru kort sem sýna bæði hámarksútbreiðslu og tjónmætti hlaups fyrir mismunandi sviðsmyndir. Í öllum tilfellum hefur kortum verið skipt upp í smærri svæði til að sýna niðurstöður í hærri upplausn en í þeim tilfellum 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 eru sýnd hættumatskort af efsta hálendi við jökul. Á 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. Athuga bar að í sumum tilfellum ná mörk framrásarlína út fyrir útbreiðslu hlaupa, sjá t.d. kort 15, er það einungis til að auðvelda aflestur.



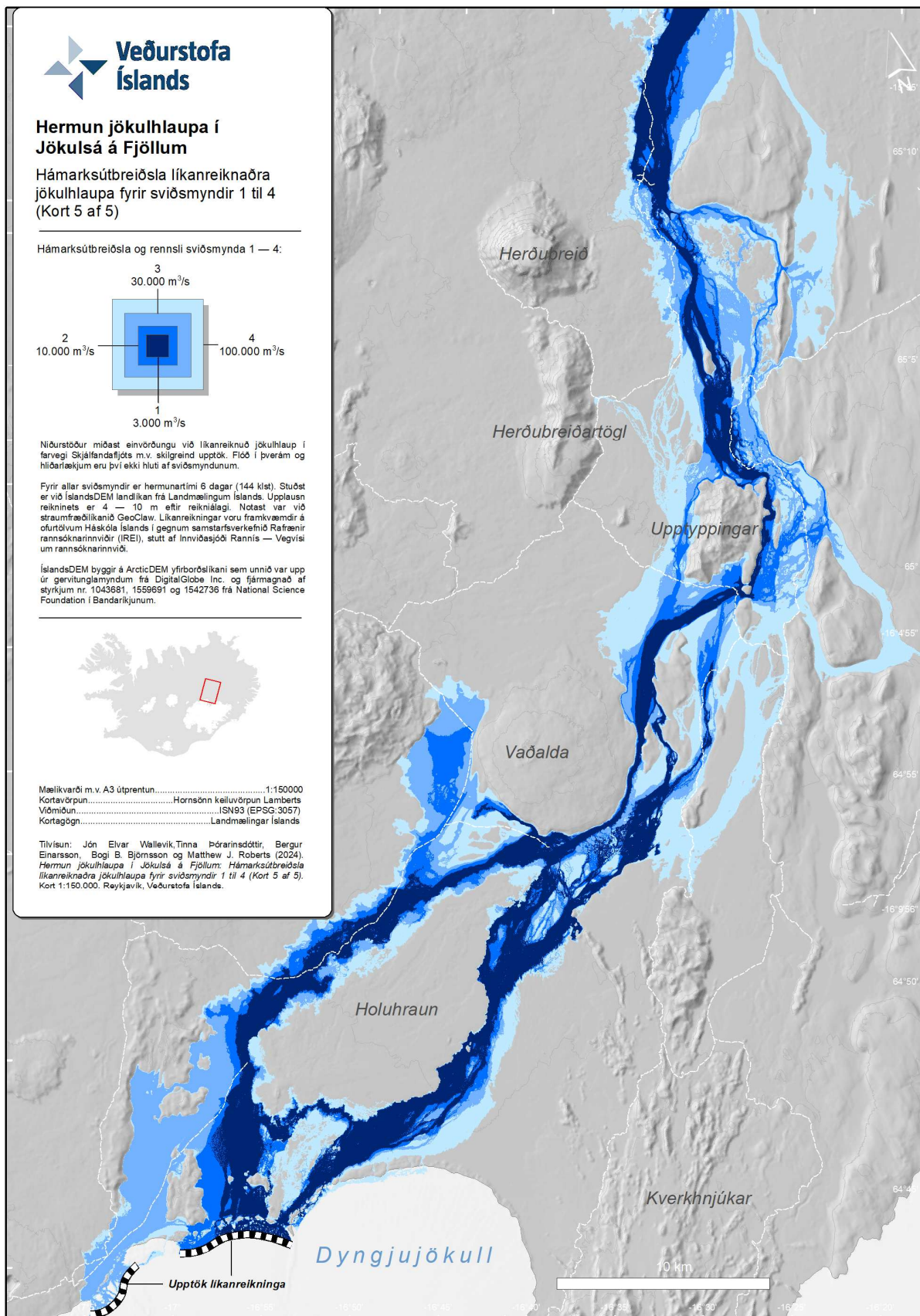
Viðauki B, Kort 1. Hámarksútbreiðsla líkanreiknaðra jökulhlaupa fyrir sviðsmyndir 1 til 4: Kort 1 af 5 – neðra svæði.



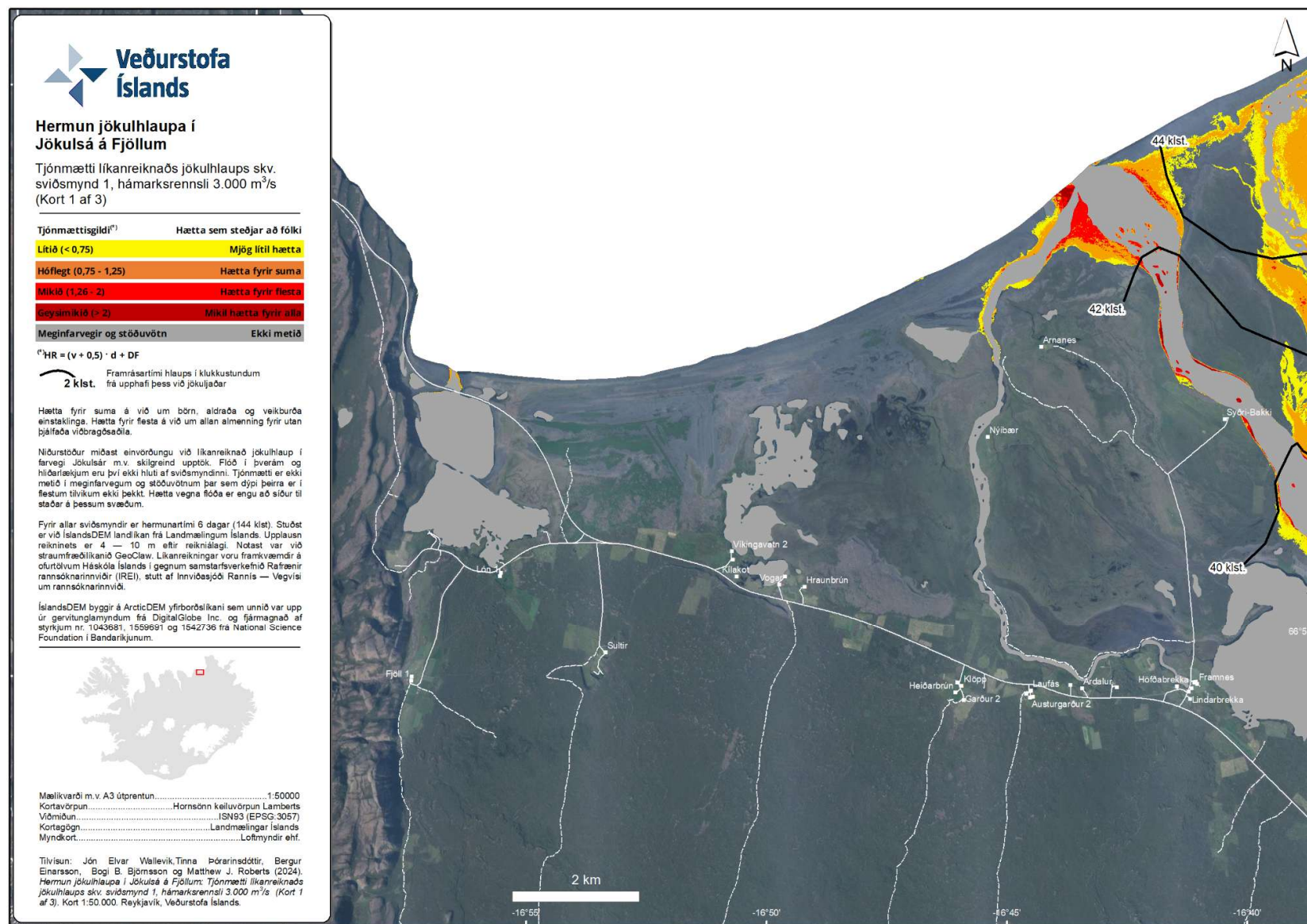
Viðauki B, Kort 3. Hámarksútbreiðsla líkanreiknaðra jökulhlaupa fyrir sviðsmyndir 1 til 4: Kort 3 af 5 – miðsvæði.



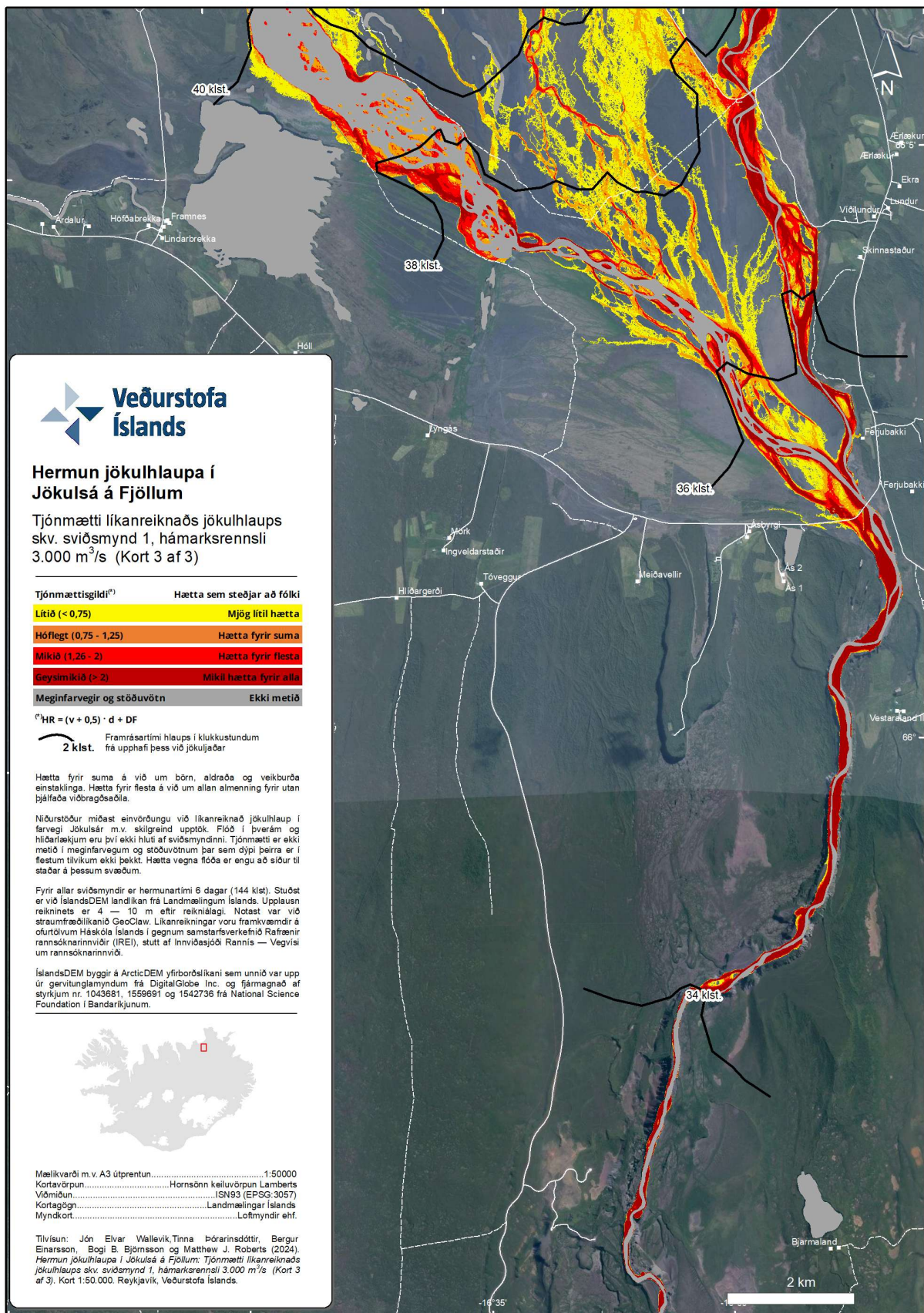
Viðauki B, Kort 4. Hámarksútbreiðsla líkanreiknaðra jökulhlaupa fyrir sviðsmyndir 1 til 4: Kort 4 af 5 – efra svæði.



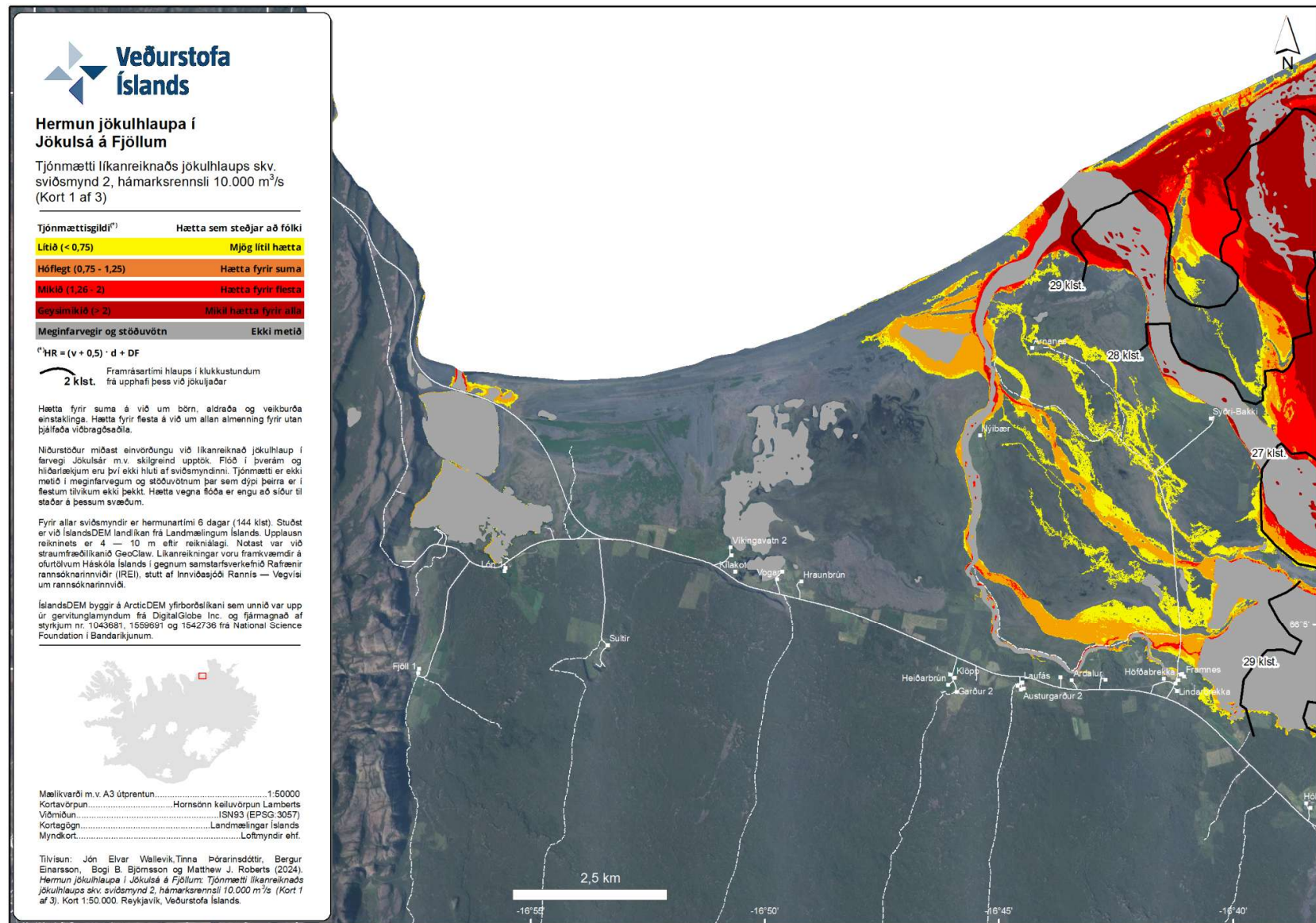
Viðauki B, Kort 5. Hámarksútbreiðsla líkanreiknaðra jökulhlaupa fyrir sviðsmyndir 1 til 4: Kort 5 af 5 – efra svæði.



Viðauki B, Kort 6. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 1 (3.000 m³/s): Kort 1 af 3 – neðra svæði.



Viðauki B, Kort 8. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 1 (3.000 m³/s): Kort 3 af 3 – miðsvæði.



Viðauki B, Kort 9. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 2 (10.000 m³/s): Kort 1 af 3 – neðra svæði.



Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum

Tjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd 2, hámarksrennsli 10.000 m³/s (Kort 2 af 3)

Tjónmættisgildi ⁽¹⁾	Hætta sem steðjar að fólki
Lítið (< 0,75)	Mjög lítil hætta
Hófllegt (0,75 - 1,25)	Hætta fyrir suma
Mikið (1,25 - 2)	Hætta fyrir flesta
Þvösumikluð (> 2)	Mikil hætta fyrir alla
Meginfarvegir og stöðuvötn	Ekki metið

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

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

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

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

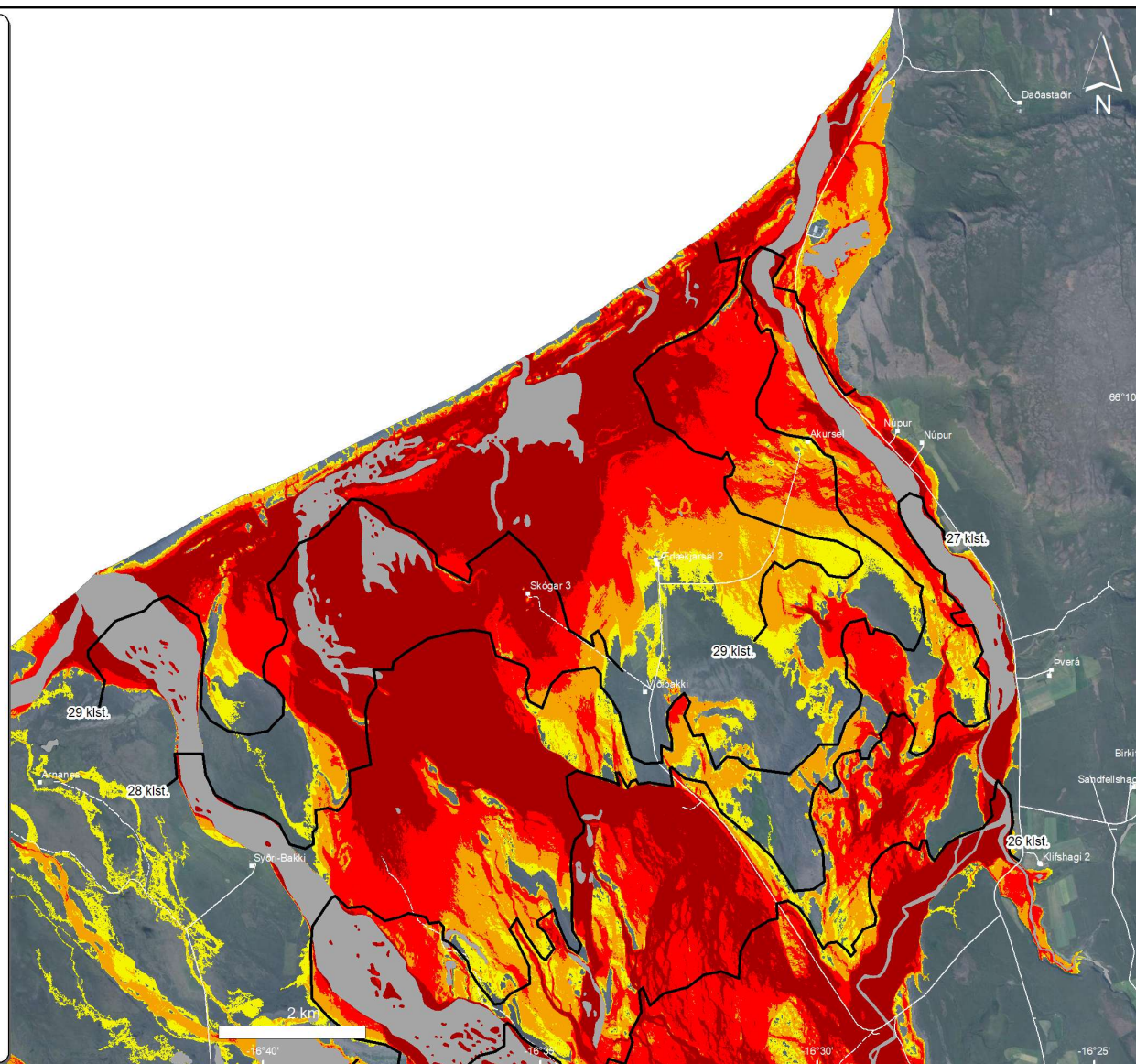
Fyrir allar sviðsmyndir er hermunartími 6 dagar (144 klst.). Stuðst er við ÍslandsDEM landlíkan frá Landmælingum Íslands. Upplausn reikningsins er 4 — 10 m eftir reiknlági. Notast var við straumfræðilíkanið GeoClaw. Líkanreikningar voru framkvæmdir á durtólum Háskóla Íslands í gegnum samstarfsverkefnið Rafrænnir rannsóknarinnviðir (IREI), stutt af Innviðsjóði Rannís — Vegvisi um rannsóknarinnvið.

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

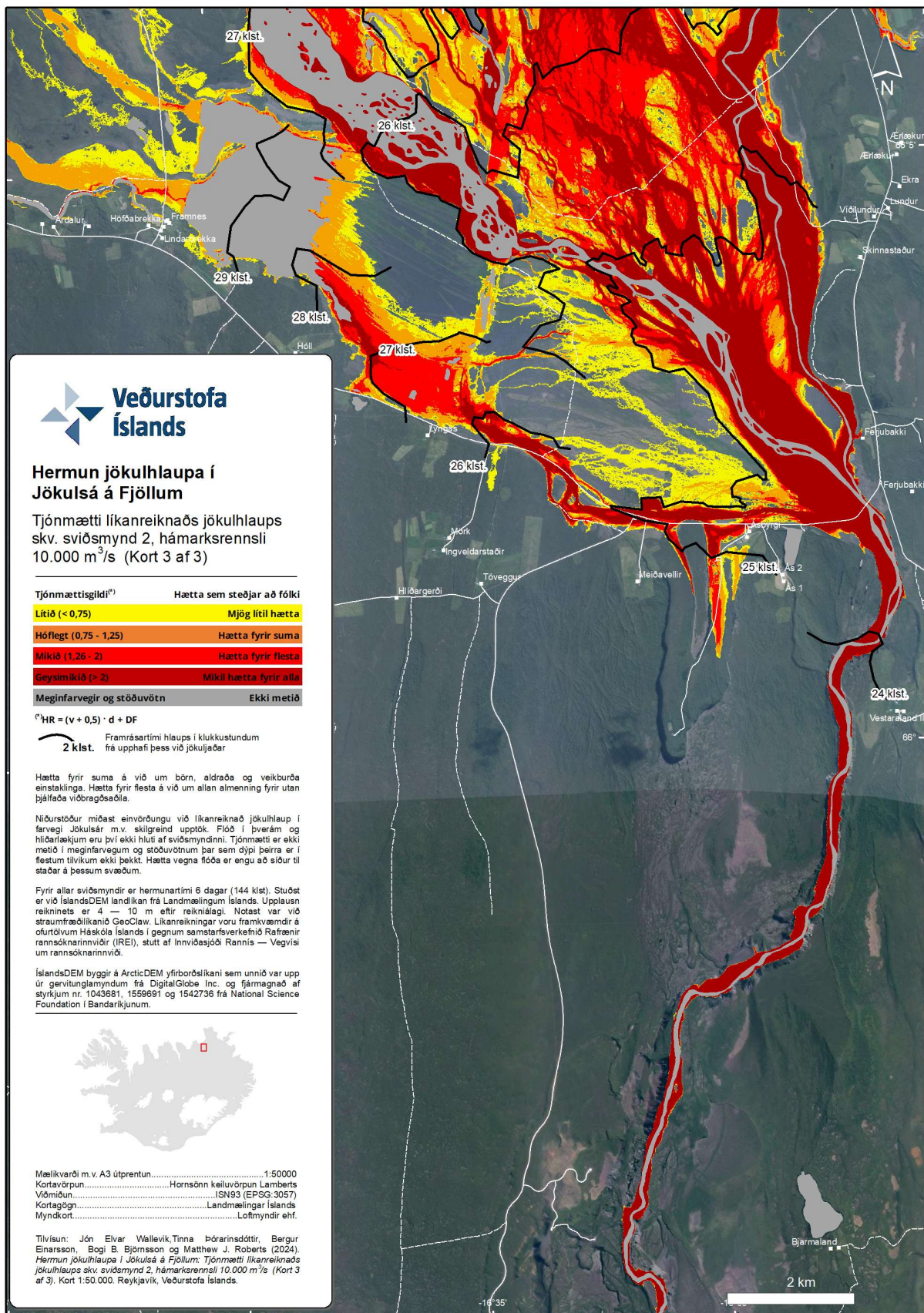


Mælikvarði m.v. A3 útprentun.....1:50000
Kortavörpun.....Hornsónn keiluvörpun Lamberts
Viðmiðun.....IGN93 (EPSG:3057)
Kortagögn.....Landmælingar Íslands
Myndkort.....Lofmyndir ehf.

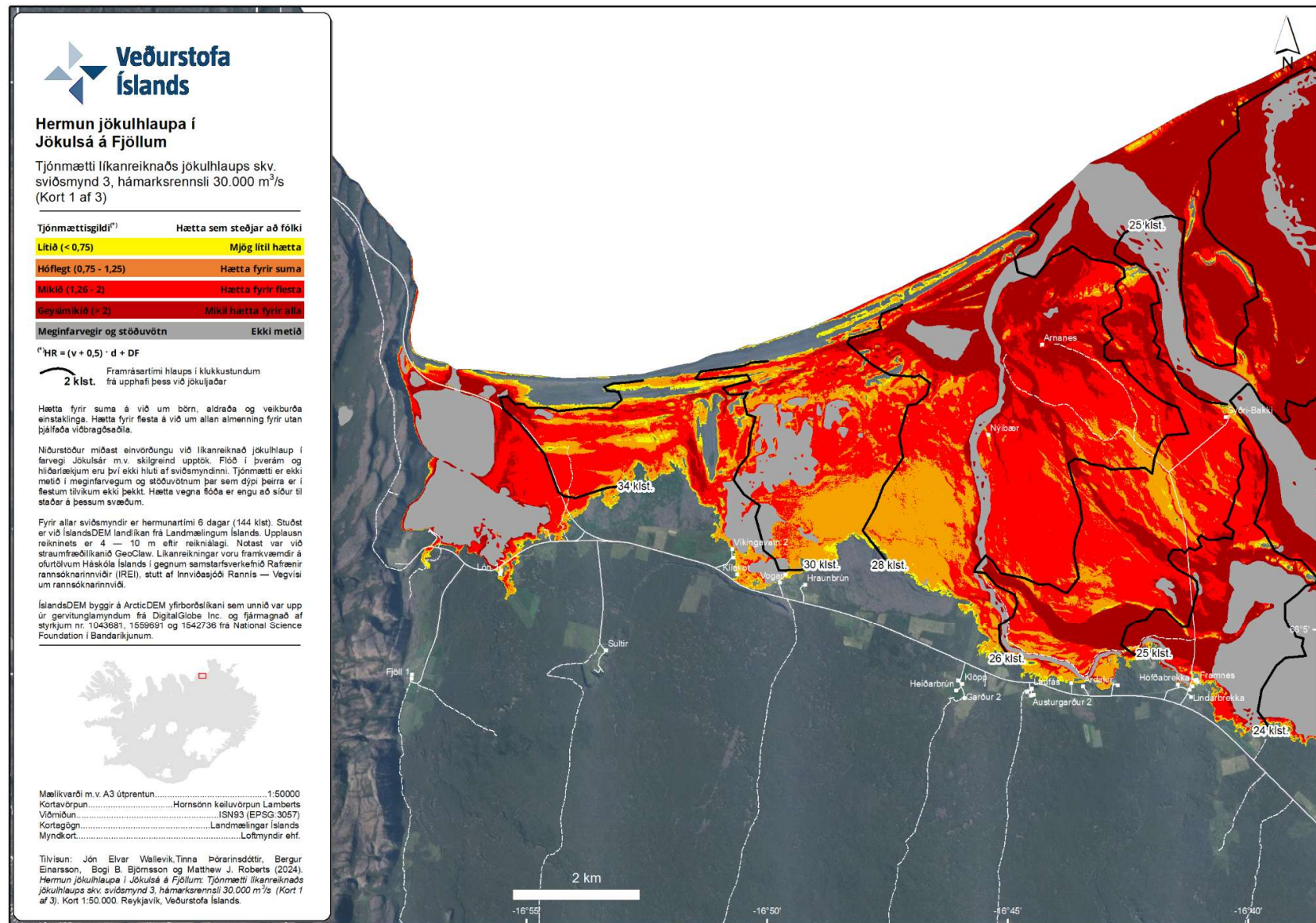
Tilvísun: Jón Elvar Walleik, Tinna Þórarínsdóttir, Bergur Einarsson, Bogi B. Björnsson og Matthew J. Roberts (2024). *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum: Tjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd 2, hámarksrennsli 10.000 m³/s* (Kort 2 af 3). Kort 1:50.000. Reykjavík, Veðurstofa Íslands.



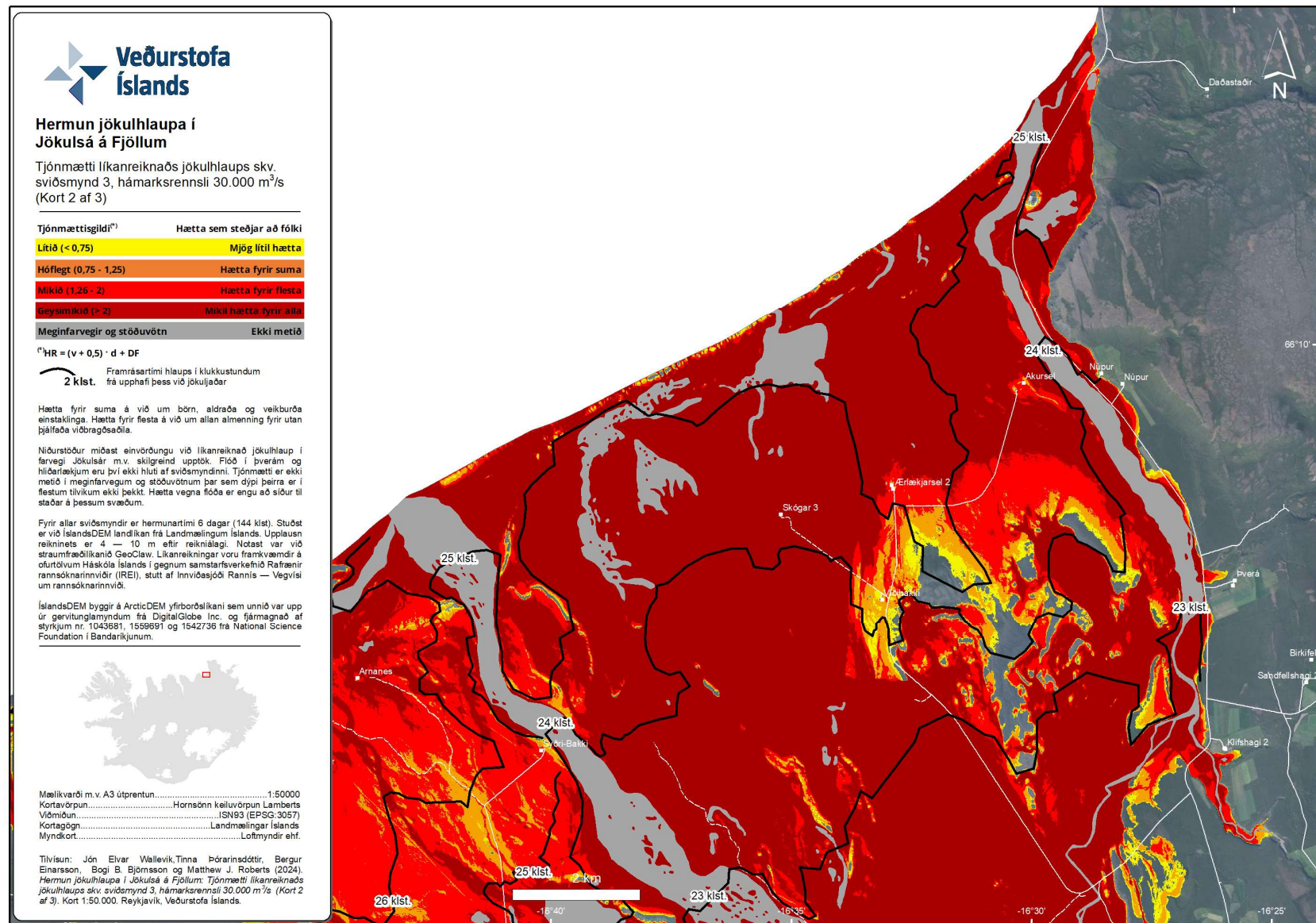
Viðauki B, Kort 10. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 2 (10.000 m³/s): Kort 2 af 3 – neðra svæði.



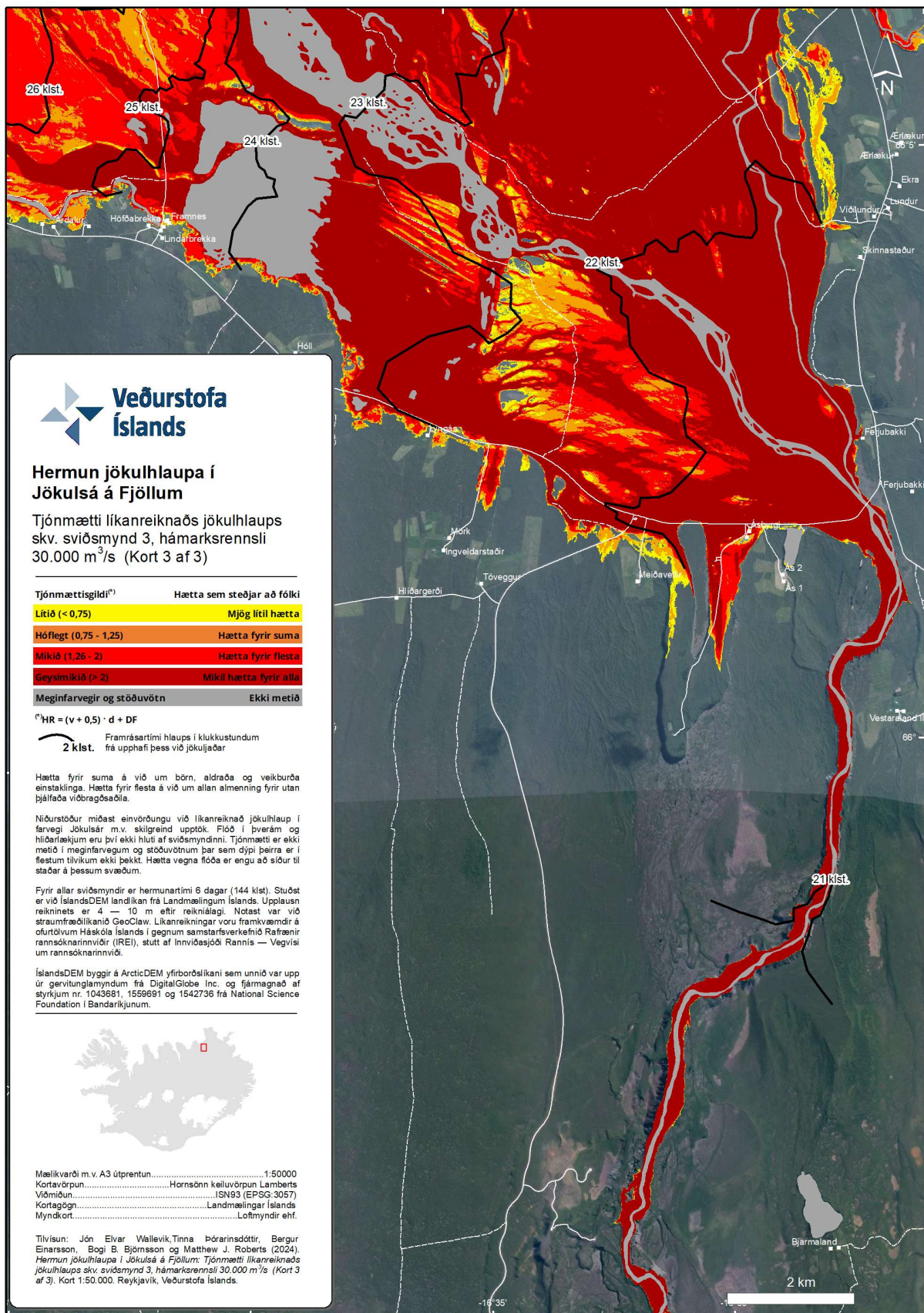
Viðauki B, Kort 11. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 2 (10.000 m³/s): Kort 3 af 3 – miðsvæði.



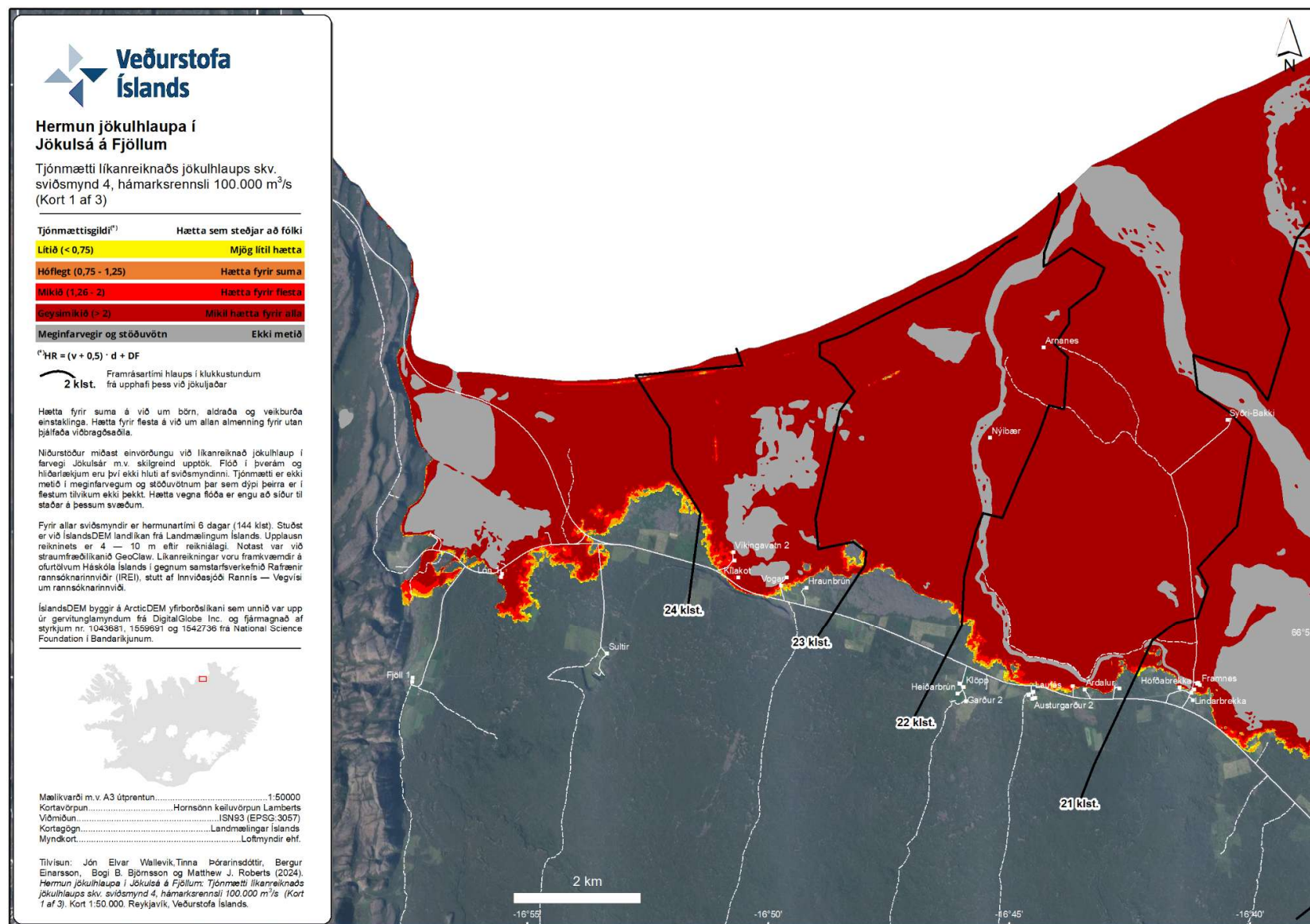
Viðauki B, Kort 12. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 3 (30.000 m³/s): Kort 1 af 3 – neðra svæði.



Viðauki B, Kort 13. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 3 (30.000 m³/s): Kort 2 af 3 – neðra svæði.



Viðauki B, Kort 14. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 3 (30.000 m³/s): Kort 3 af 3 – miðsvæði.



Viðauki B, Kort 15. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 4 (100.000 m³/s): Kort 1 af 3 – neðra svæði.



Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum

Tjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd 4, hámarksrennsli 100.000 m³/s (Kort 2 af 3)

Tjónmættisgildi ⁽¹⁾	Hætta sem steðjar að fólk
Lítið (< 0,75)	Mjög lítil hætt
Hóflægt (0,75 - 1,25)	Hætta fyrir suma
Mikið (1,26 - 2)	Hætta fyrir flesta
Þvösumikið (> 2)	Mikil hætt fyrir alla
Meginfarvegir og stöðuvötn	Ekki metið

$$^{(1)}HR = (v + 0,5) \cdot d + DF$$

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

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

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

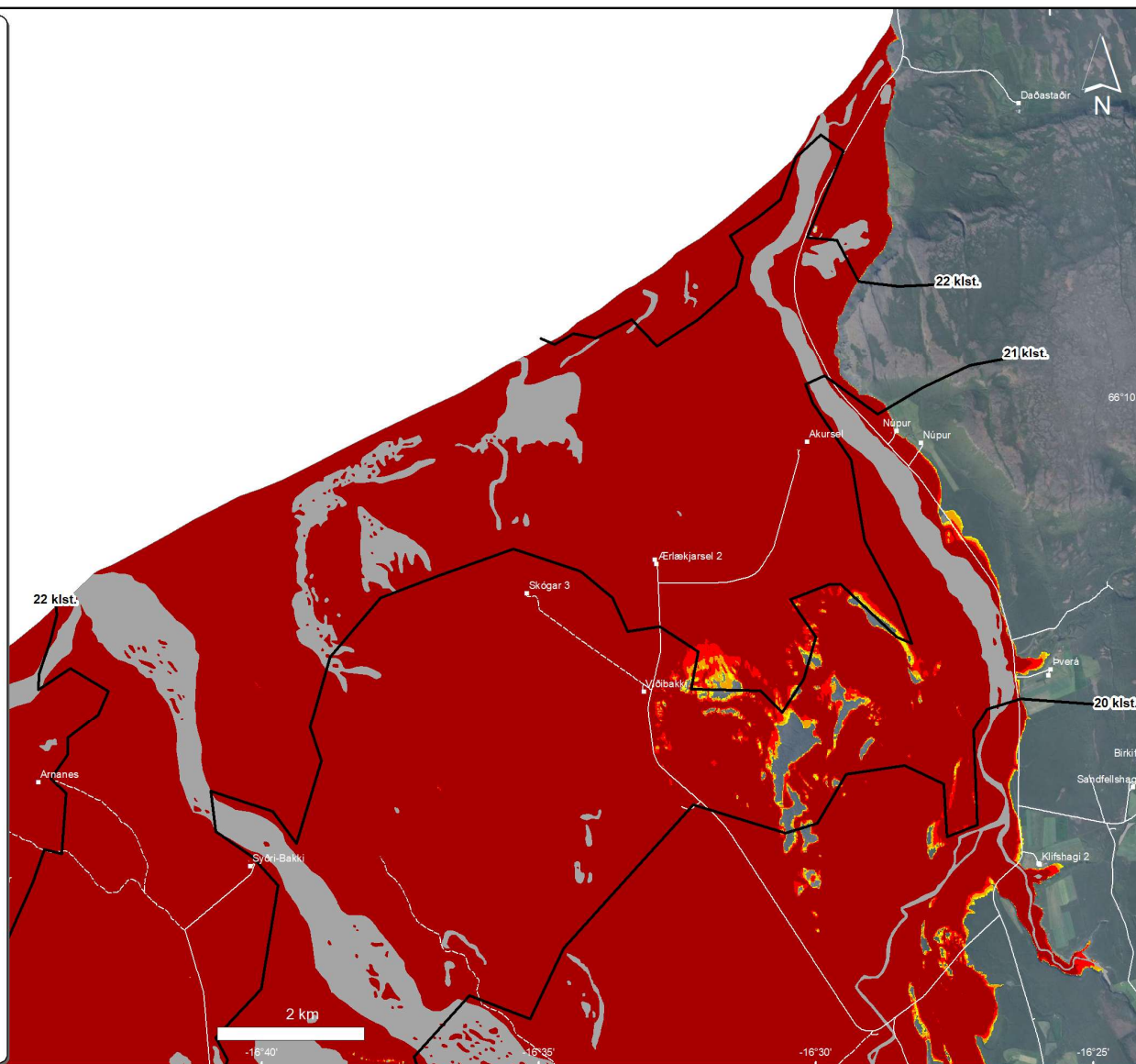
Fyrir allar sviðsmyndir er hermunartími 6 dagar (144 klst). Stuðst er við ÍslandsDEM landlíkan frá Landmælingum Íslands. Upplausn reikningsins er 4 — 10 m eftir reiknialagi. Notast var við straumfræðilíkanið GeoClaw. Líkanreikningar voru framkvæmdir á durtólum Háskóla Íslands í gegnum samstarfsverkefnið Rafrænnir rannsóknarinnviðir (IREI), stutt af Innviðasjóði Rannís — Vegvisi um rannsóknarinnviðir.

ÍslandsDEM byggir á ArcticDEM yfirborðslíkani sem unnið var upp úr gervitunglamyndum frá DigitalGlobe Inc. og fjármagnað af styrkjum nr. 1043561, 1559691 og 1542736 frá National Science Foundation í Bandaríkjunum.

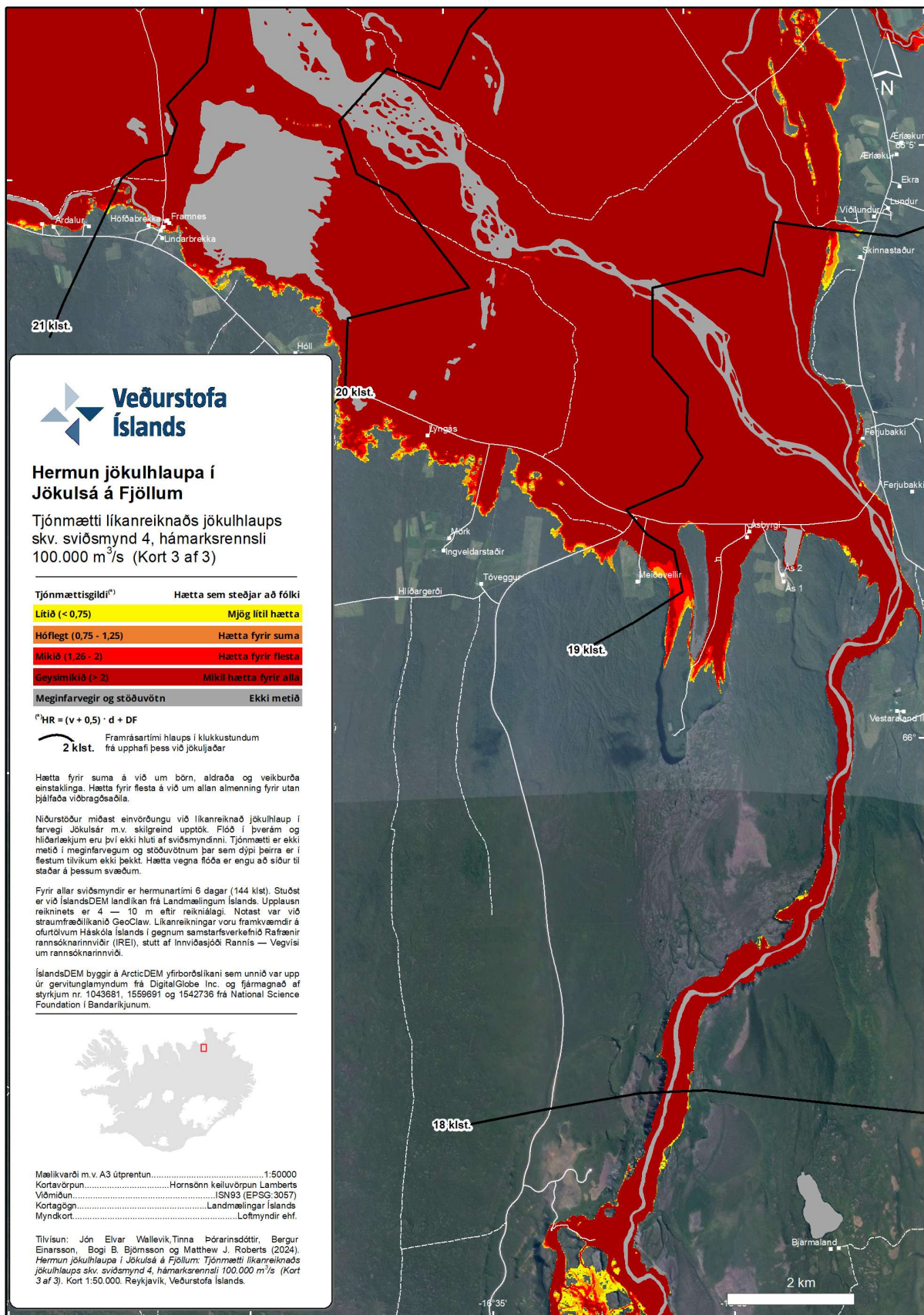


Mælikvarði m.v. A3 útprentun	1:50000
Kortavörpun	Hornsónn kúluvörpun Lamberts
Víðniðun	ISN93 (EPSG:3057)
Kortagögn	Landmælingar Íslands
Mýndkort	Löfmyndir ehf.

Tilvísun: Jón Elvar Walleik, Tinna Þórarinsdóttir, Bergur Einarrson, Bogi B. Björnsson og Matthew J. Roberts (2024). *Hermun jökulhlaupa í Jökulsá á Fjöllum: Tjónmætti líkanreiknaðs jökulhlaups skv. sviðsmynd 4, hámarksrennsli 100.000 m³/s* (Kort 2 af 5). Kort 1:50.000. Reykjavík, Veðurstofa Íslands.



Viðauki B, Kort 16. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 4 (100.000 m³/s): Kort 2 af 3 — neðra svæði.



Viðauki B, Kort 17. Hámarks tjónmætti jökulhlaupa fyrir sviðsmynd 4 (100.000 m³/s): Kort 3 af 3 – miðsvæði.

