

Endurskoðun á ofanflóðahættumati fyrir Bolungarvík eftir byggingu varnargarða og keilna undir Traðarhyrnu

DRÖG til yfirlestrar

Tómas Jóhannesson
Magni Hreinn Jónsson

Endurskoðun ofanflóðahættumati fyrir Bolungarvík eftir byggingu varnargarða og keilna undir Traðarhyrnu DRÖG með tillögu að hættumatskorti

Tómas Jóhannesson
Magni Hreinn Jónsson

Lykilsíða

Skýrsla nr. VI-2024-0xx	Dags. Júní 2024	ISSN 1670-8261	Dreifing: Opín ☒ Lokuð ☐
			Skilmálar:
Heiti skýrslu: Endurskoðun ofanflóðahættumati fyrir Bolungarvík eftir byggingu varnargarða og keilna undir Traðarhyrnu. DRÖG til yfirlestrar			Upplag: x
			Fjöldi síðna: 41 + kort
			Framkvæmdastjóri sviðs: Matthew James Roberts
Höfundar: Tómas Jóhannesson og Magni Hreinn Jónsson			Verkefnisstjóri: Tómas Jóhannesson
			Verknúmer: 4754-0-0002
Gerð skýrslu/verkstíg:			Málsnúmer: 2020-222
Unnið fyrir: Bolungarvíkurkaupstað			
Samvinnuaðilar:			
Útdráttur: Ofanflóðahættumat fyrir Bolungarvík hefur verið endurskoðað eftir byggingu varnargarða og keilna undir Traðarhyrnu, sem draga mikið úr snjóflóðahættu í byggðinni. Hættumatslína C færir upp fyrir byggðina skv. endurskoðaða matinu. Hættumatslína B færir 200–225 m nær fjallinu í innri hluta byggðarinnar neðan stóra varnargarðsins undir Traðargili og Ytragili og um ca. 75 m nær hlóðinni utar í byggðinni neðan minni varnargarðsins undir Ufsum. Þrjú íbúðarhús á hvoru svæði eru á hættusvæði B skv. endurskoðaða matinu. A-lína færir ofar þannig að A-svæði í endurskoðaða hættumatinu nær u.þ.b. til C-svæðis skv. fyrra mati undir stóra garðinum en u.þ.b. til B-svæðis skv. fyrra mati undir minni garðinum. Forsendur um tíðni snjóflóða úr Traðarhyrnu hafa ekki breyst frá fyrra hættumati Veðurstofu Íslands árið 2003 né forsendur um hraða snjóflóða sem lagðar voru til grundvallar við hönnun snjóflóðavarnarvirkjanna. Líkanreikningar með nýju þrívíðu snjóflóðalíkani benda til þess að varnargarðarnir og keilurnar virki eins og til er ætlast og stöðvi að mestu hönnunarflóð úr giljunum ofan innanverðrar byggðarinnar og dragi úr skriðlengd hönnunarflóðs ofan utanverðrar byggðarinnar undir Ufsum. Talin er nokkur hættu á yfirflæði iðufalds af völdum snjóflóða úr Traðarhyrnu, einkum undir Traðargili og Ytragili. Einnig reiknast ákveðin hættu á flæði hins þétta kjarna hönnunarflóðs yfir minni varnargarðinn undir Ufsum en þar var ekki pláss til þess að reisa garð í fullri hæð. Skilgreindir verða rýmingarreitir á svokölluðu stigi II sem ná til efstu tveggja húsaáða undir varnargörðunum. Rýming þessara reita feli í sér að efstu hús yrðu yfirgefin þegar hættu er talin skapast en íbúar húsa neðar á reitunum beðnir að dvelja ekki í herbergjum með gluggum og dyraopum sem snúa upp í hlóðina. Jafnframt verði gætt varúðar í sambandi við umferð að og frá húsum á reitunum. Rýmingarreitir á stigi III, sem til greina kemur að rýma undir mjög sjaldgæfum aftakaaðstæðum, ná til alls hættusvæðis A eins og það er skilgreint í endurskoðuðu hættumati.			
Lykilorð: Bolungarvík, ofanflóð, snjóflóð, hættumat, ofanflóðavarnir		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs:	
		Undirskrift verkefnisstjóra:	
		Yfirfarið af: Sigríði Sif Gylfadóttir	

Efnisyfirlit

1	Inngangur	6
1.1	Aðferðafræði og reglugerðarrámmi	6
1.2	Óvissa	8
2	Staðhættir	10
3	Snjóflóðasaga	12
3.1	Snjóflóð eftir 2002	12
3.2	Snjóflóðin 21. febrúar 1997	12
4	Varnarvirki	14
5	Hættumat	16
5.1	Tíðni snjóflóða	16
5.2	Tvívíðir líkanreikningar með SamosAT	17
5.3	Þrívíðir líkanreikningar með Open- $\mu(I)$	17
5.4	Hönnun þvergarða og keilna	18
5.5	Endurskoðun hættumats undir Traðarhrynu	20
6	Niðurstaða	26
7	Heimildir	27
I	Tæknileg hugtök og skilgreiningar	30
II	Snjóflóð	32
III	Kort	40

1 Inngangur

Þessi skýrsla lýsir endurskoðun ofanflóðahættumats fyrir Bolungarvík eftir byggingu varnargarða og keilna undir Traðarhyrnu, sjá afmörkun hættumetins svæðis á korti 1. Hættumatið var unnið fyrir Bolungarvíkurkaupstað af Veðurstofu Íslands samkvæmt reglugerð nr. 505/2000 um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða með síðari breytingum.

Undirbúningur að byggingu snjóflóðavarna fyrir Bolungarvík hófst samhliða vinnu við hættumat vegna ofanflóða (Kristján Ágústsson o.fl., 2002; Hættumatsnefnd Bolungarvíkur, 2003) sem staðfest var með undirritun ráðherra í september 2003. Frumathugun varnarkosta fyrir svæðið undir Traðargili og Ytragili fór fram árið 1999 og er gerð grein fyrir niðurstöðunum í skýrslum frá verkfræðistofunum Hnit hf. Orion ehf., Verkfræðistofu Austurlands og Norsku jarðtæknistofnuninni NGI (Hnit og NGI, 1999; Orion, VA og NGI, 1999). Tillaga að vörnum fyrir eystri hluta byggðarinnar undir Ufsum var lögð fram 2009 (EFLA og Landmótun, 2009). Þessar tillögur voru ræddar og útfærðar nánar í allmörgum áföngum á árunum 2002–2011 (sjá yfirlit í heimildaskrá). Niðurstaðan var að reisa tvo þvergarða og alls átta brattar keilur, fjórar neðan Traðargils og fjórar neðan Ytragils. Verklef framkvæmd var boðin út hjá Framkvæmdasýslu Ríkisins 2008 og framkvæmdir fóru fram á árunum 2008–2012.

Þeir sem komu að hættumatinu fyrir svæðið sem hér er til umfjöllunar voru Tómas Jóhannesson og Magni Hreinn Jónsson. Alexander H. Jarosch, hjá austurríska fyrirtækinu ThetaFrame Solutions, vann snjóflóðalíkanreikninga með líkaninu Open- $\mu(I)$ sem hann þróaði í samstarfi við Veðurstofuna. Endurskoðun hættumatsins byggir á tillögu að endurskoðuðum hættumatslínunum frá 2009 og 2010, sem kynntar voru fyrir bæjarstjórn árið 2010, og hefur verið til hliðsjónar við skipulagsgerð í Bolungarvík síðan þá. Endurskoðun hættumatsins byggir einnig á snjóflóðalíkanreikningum sem unnir voru á árunum 2022 og 2023 fyrir nokkur bæjarfélög þar sem reist hafa verið varnarmirki á úthlaupssvæðum snjóflóða.

Í fyrsta hluta skýrslunnar er stutt samantekt um staðhætti, snjóflóðaaðstæður og snjóflóðasögu í og undir Traðarhyrnu í köflum 2 og 3. Varnargörðum og keilum er lýst í kafla 4 og lagt er fram hættumat fyrir byggðina neðan þeirra í kafla 5. Að lokum eru helstu niðurstöður hættumatsins dregnar saman í kafla 6.

Skýrslunni fylgja þrír viðaukar. Viðauki I inniheldur lýsingu á tæknilegum hugtökum og skammstöfunum. Þar er m.a. um að ræða einvíð og tvívíð rennslisstig (r) og úthlaupshorn (α -horn) snjóflóða. Í viðaukanum er einnig stutt lýsing á snjóflóðalíkaninu Open- $\mu(I)$ sem þróað hefur verið í samvinnu við Veðurstofu Íslands og notað er til þess að meta áhrif varnarmirka á úthlaupssvæðum á flæði snjóflóða. Í viðauka II er listi yfir skráð snjóflóð úr Traðarhyrnu síðan hættumat fyrir Bolungarvík var gefið út 2002 og stutt lýsing á þeim og í viðauka III eru kort, þ.m.t. hættumatskort.

1.1 Aðferðafræði og reglugerðarrammi

Ofanflóðahættumat er unnið skv. reglugerð nr. 505 sem umhverfisráðuneytið gaf út í júlí árið 2000, með breytingum í reglugerðum nr. 495 frá maí 2007, nr. 309 frá mars 2010, nr. 1017 frá desember 2010, nr. 343 frá mars 2014 og nr. 176 frá janúar 2017, og byggir á lögum nr. 49 frá 1997, með áorðnum breytingum, um snjóflóð og skriðuföll. Hér að neðan er helstu atriðum reglugerðarinnar lýst.

Tafla 1. Skilgreining hættusvæða.

Svæði	Neðri mörk staðaráhættu	Efri mörk staðaráhættu	Leyfilegar byggingar á þegar byggðum svæðum	Leyfilegar byggingar á áður óbyggðum svæðum
C	$3 \cdot 10^{-4}$ á ári	–	Engar nýbyggingar nema frístundahús ¹ og húsnæði þar sem viðvera er lítil.	Engar nýbyggingar nema frístundahús ¹ og húsnæði þar sem viðvera er lítil.
B	$1 \cdot 10^{-4}$ á ári	$3 \cdot 10^{-4}$ á ári	Atvinnuhúsnæði má byggja án sérstakra styrkinga. Byggja má íbúðarhús og byggja við hús þar sem búist er við miklum mannsöfnuði (svo sem fjölbýlishús, sjúkrahús, skóla) með sérstökum styrkingum.	Engar nýbyggingar nema frístundahús ¹ og húsnæði þar sem viðvera er lítil.
A	$0.3 \cdot 10^{-4}$ á ári	$1 \cdot 10^{-4}$ á ári	Heimilt er að reisa nýtt íbúðar- og atvinnuhúsnæði án sérstakra styrkinga nema hvað styrkja þarf hús þar sem búist er við miklum mannsöfnuði (svo sem fjölbýlishús, skóla, sjúkrahús) og íbúðarhús með fleiri en fjórum íbúðum.	Atvinnuhúsnæði má byggja án sérstakra styrkinga.

¹Ef staðaráhætta er minni en $5 \cdot 10^{-4}$ á ári.

Hættumat á Íslandi miðast við *einstaklingsbundna áhættu*. Hún er skilgreind sem árlegar líkur á því að einstaklingur, sem býr á tilteknum stað, farist í ofanflóði. Flokkun hættusvæða byggir á *staðaráhættu* en hún er skilgreind sem árlegar líkur á að einstaklingur, sem dvelur allan sólarhringinn í húsi sem ekki er sérstaklega styrkt, farist í ofanflóði. Með því að taka tillit til líkinda á því að einstaklingur sé í húsi þegar ofanflóð fellur og til þess hve sterkt húsið er fæst mat á *raunáhættu*. Ekki er tekið tillit til rýminga eða annarra tímabundinna varúðarráðstafana við gerð hættumats. Yfirvöld hafa ákveðið að áhættan $0.2 \cdot 10^{-4}$ á ári eða minni sé viðunandi (ásættanleg). Með því er átt við að áhættan sé svo lítil að ekki sé ástæða til að grípa til neinna aðgerða til þess að auka öryggi. Staðaráhætta sem svarar til þessa gildis getur verið mismunandi vegna breytilegrar gerðar og styrks bygginga og mismunandi dvalartíma fólks í þeim. Að öðru jöfnu er reiknað með að fólk dvelji um 75% af tíma sínum á heimilum og um 40% í atvinnuhúsnæði. Samkvæmt reglugerð um hættumat (umhverfisráðuneytið, 2000, með síðari breytingum) skal afmarka þrenns konar hættusvæði sem lýst er í töflu 1.

Viðmiðunarreglurnar um nýtingu svæða í töflu 1 miða að því að ásættanleg áhætta sem nemur

$0.2 \cdot 10^{-4}$ á ári náist þegar tekið er tillit til líklegrar viðveru og styrkingar húsa. Ásættanleg áhætta í atvinnuhúsnaði er eitthvað meiri en þar er gert ráð fyrir að börn dveljist ekki að staðaldri.

Ekki er heimilt að skipuleggja íbúðarbyggð, frístundabyggð eða svæði fyrir atvinnustarfsemi á áður óbyggðum svæðum nema tryggt sé að áhætta fólks sé viðunandi skv. skilgreiningu hættumatsreglugerðarinnar. Á þegar byggðum svæðum er heimilt að reisa ný hús og byggja við þau sem fyrir eru með skilyrðum sem fram koma í töflu 1. Varnir gegn ofanflóðum eru eingöngu reistar til þess að auka öryggi fólks á svæðum sem eru í byggð. Ef öryggiskröfum er ekki fullnægt án sérstakra varnarvirkja gegn ofanflóðum er óheimilt að skipuleggja ný áður óbyggð svæði fyrir íbúðarbyggð, frístundabyggð eða atvinnustarfsemi.

Þær aðferðir, sem notaðar eru til þess að meta snjóflóðaáhættu, voru þróaðar við Háskóla Íslands og á Veðurstofu Íslands á árunum 1995–1998. Þeim er lýst í riti eftir Kristján Jónasson o.fl. (1999). Aðferðirnar voru lagaðar að hættumati undir lágum brekkum af Tómasi Jóhannessyni (2009).

Hættumatið vegna ofanflóða tekur til snjóflóða, krapaflóða, aurskriðna, grjóthruns, berghlaupa og annars framskriðs úr hlíðum, svo og aurblandaðra krapa- og vatnsflóða í bröttum farvegum (sbr. Tómas Jóhannesson & Kristján Ágústsson, 2002). Ekki er hins vegar tekið tillit til vatnsflóða í ám, sjávarflóða eða jökulhlaupa og annarra flóða og skriðna sem tengjast eldgosum. Aðferðir við hættumat vegna skriðufalla hafa ekki verið þróaðar með sambærilegum hætti og fyrir snjóflóð. Hættumat vegna skriðufalla byggist því að miklu leyti á mati á aðstæðum án þess að unnt sé að vísa til eiginlegra reikninga á áhættu. Þó er stuðst við hina almennu aðferðafræði við snjóflóðahættumat sem lýst er í reglugerðum umhverfisstjórnuneytisins sem fyrr voru nefndar.

Að lokum er vísað til greinar 10 í reglugerð nr. 505/2000 og nr. 495/2007 um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða. Sú grein fjallar m.a. um hættumat á svæðum þar sem gögn vantar til þess að unnt sé að meta áhættu með formlegum útreikningum: „Þar sem ekki er unnt að framkvæma áhættureikninga vegna ónógra upplýsinga skal engu að síður gera hættumatskort, sbr. 12. gr., og skal við gerð þess reynt að leggja mat á áhættu.“

1.2 Óvissa

Mjög víða er mat á ofanflóðahættu erfitt. Það gildir einkum um svæði þar sem landfræðileg skilyrði fyrir ofanflóð eru til staðar en ofanflóð hafa ekki verið skráð. Byggðasaga margra þéttbýlisstaða er stutt og oftast einnig það tímabil sem skráning ofanflóða nær til. Þar sem svona stendur á er ógjörningur að útiloka ofanflóð. Því verður að meta þessa hættu þannig að bæði sé tekið tillit til þess að engin ofanflóð hafi verið skráð á ákveðnu tímabili og einnig möguleikans á því að flóð falli.

Þá þarf að meta hættu á snjóflóðum úr hlíðum og brekkum þar sem ekki eru dæmigerðir snjóflóðafarvegir. Flest stór snjóflóð sem skráð hafa verið hafa fallið úr 500–800 m hæð og upptaka-svæði þeirra eru oftast víðáttumikil. Snjóflóð úr lægri hlíðum og snjóflóð þar sem upptakasvæði eru óvenjuleg hafa ekki verið mikið rannsökuð.

Þar sem hættusvæði eru afmörkuð er áætluð óvissa á matið. Óvissumatinu er skipt í þrjú stig sem gefa til kynna ónákvæmni í legu hættumatslína. Óvissa upp á $\frac{1}{2}$ táknar að lega hættumatslína sé ónákvæm sem nemur hálfu bilinu á milli þeirra í báðar áttir. Áhætta þrefaldast á milli hættumatslína og því er hlutfallsleg óvissa á áhættunni $\sqrt{3}$ þar sem óvissa á legu línu er $\frac{1}{2}$. Á sama hátt

gildir að þar sem óvissa á línunum er metin 1 eða 2 þá gætu þær legið á bili sem nemur 1 eða 2 línubilum frá dregnum línunum. Hliðstæð hlutfallsleg óvissa á áhættu er þá 3 þar sem óvissa er 1 og 3^2 þar sem óvissa er 2. Óvissumatið er að nokkru huglægt og hefur ekki beina tölfræðilega merkingu. Hins vegar byggir það á reynslu þeirra sem vinna matið og í því felst þekking og mat á aðstæðum á viðkomandi stað en ekki síður samanburður við hättumat á öðrum stöðum.

Óvissuflokkar fyrir hättumat vegna snjóflóða eru skilgreindir á eftirfarandi hátt:

- $\frac{1}{2}$ Mörg snjóflóð hafa fallið og farvegurinn er stór og að öllu leyti dæmigerður.
- 1 Einhverjar upplýsingar eru til um snjóflóð en upptakasvæði er lítið eða farvegur óvenjulegur.
- 2 Engar upplýsingar eru til um snjóflóð en landfræðilegar aðstæður benda til þess að snjóflóð geti fallið.

Á svæðum þar sem varnarvirki hafa verið byggð er óvissan skilgreind á bilinu 1 til 2.

Mat á óvissu vegna annarra ofanflóða en snjóflóða er að sama skapi erfitt. Fyrir utan óvissa tíðni og umfang skriðna og grjóthruns eru áhrif þeirra og eyðileggingarmáttur illa þekkt.

2 Staðhættir

Í fyrri skýrslum Veðurstofunnar um hættumat og ofanflóðasögu Bolungarvíkur er gerð grein fyrir landfræðilegum aðstæðum og jarðfræði svæðisins, veðurfari, snjósöfnun í upptakasvæði, ofanflóðasögu og veðuraðdraganda ofanflóða (Tómas Jóhannesson o.fl., 2001; VÍ 2002; Halldór Björnsson, 2002; Kristján Ágústsson o.fl., 2002). Vísað er til þessara skýrslna, sem aðgengilegar eru á hættumatsvef Veðurstofunnar, um nánari upplýsingar en látið duga hér að taka saman stutta lýsingu á landslagi, örnefnum og snjóflóðaaðstæðum sem koma við sögu við endurskoðun hættumatsins.

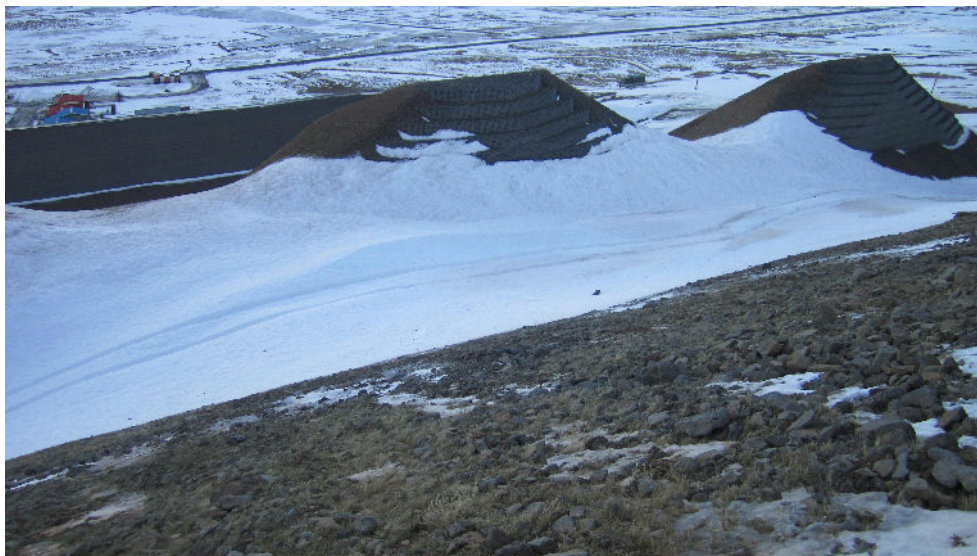
Kaupstaðurinn Bolungarvík stendur norðan við samnefnda vík sem er yst við Ísafjarðardjúp sunnanvert. Norðan við víkina er Bolafjall og austasti hluti þess heitir Traðarhyrna. Mestur hluti byggðarinnar stendur á hallalitlu landi milli víkurinnar og Traðarhyrnu. Þrír dalir liggja upp frá Bolungarvík. Sunnan Bolafjalls er Hlíðardalur. Næsti dalur er Tungudalur sem hefur VSV læga stefnu. Milli hans og Hlíðardals er Tunguhorn. Þá er Syðridalur og skilur fjallið Ernir hann og Tungudal. Hann hefur SSV læga stefnu og er sýnu stærstur dalanna. Nyrst undir er hverfi hesthúsa og í hlíðarfæti eru raflínur.

Talið er að byggð hafi verið samfelld í Bolungarvík frá landnámsöld. Framan af voru þar sex bæir auk hjáleigna. Sjósókn var mikil í Bolungarvík og dvaldi þar fjöldi sjómanna yfir vertíðina. Á síðasta áratug 19. aldar hófst þéttbýlismyndun. Fólksfjöldi óx hratt og um 1910 voru yfir 1000 manns heimilisfastir í Bolungarvík og nágrenni. Árið 1945 voru íbúar Bolungarvíkur um 700, árið 1980 um 1270, árið 2003 voru þeir 930, og nú (árið 2023) er íbúafjöldinn 953. Elsti hluti byggðar er ofan við höfnina. Smám saman byggðust upp svæði fjær sjó og efstu hús sem eru í brekkufæti við Traðarhyrnu eru byggð á árunum 1973–1982.

Endurskoðun hættumatsins nú miðast við byggðina undir Traðarhyrnu á svæði sem afmarkað er á korti 1 þar sem hafa verið reistir tveir þvergarðar og keilur sem sjá má á mynd 1.



Mynd 1. Stærri varnargarðurinn undir Traðarhyrnu við Bolungarvík er 22 m hár þar sem hann er hæstur og hliðin sem snýr upp í fjallið er brött. Ljósmynd úr myndasafni sem fylgir varnargarðaskýrslu Eflu o.fl. (2017).



Mynd 2. Tunga snjóflóðs úr Traðargili, sem féll 29./30. desember 2012, þar sem hún hefur hrannast upp að keilum undir gilinu. Ljós.: Jóhann Hannibalsson, 20. janúar 2013, um þremur vikum eftir að flóðið féll. Snjóa hefur leyst að nokkru leyti og grófur flóðsnjórinn sést því vel.

3 Snjóflóðasaga

3.1 Snjóflóð eftir 2002

Gerð er grein fyrir sögu snjóflóða í Bolungarvík til ársins 2002 í skýrslunni „Snjóflóðasaga Bolungarvíkur“ (VÍ, 2002). Upplýsingar um snjóflóð úr Traðarhyrnu eftir 2002 úr ofanflóðagagnasafni Veðurstofu Íslands koma fram í viðauka II og útlínur margra þeirra eru sýndar á korti 2 ásamt útlínunum eldri flóða á þessu svæði.

Frá því fyrir 2002 eru skráð 30 snjóflóð úr Traðarhyrnu utan Bollagils en 20 eftir 2002, samtals 50 snjóflóð. Stærstu flóðin eftir 2002 féllu í mars 2009 en þá féll breitt flóð úr Ytra- og Ystagili. Flóðið hefði að öllum líkindum fallið á ystu 3–4 húsin við Dísarland hefði ekki verið búið að rífa þau vegna byggingar varnargarðsins. Einnig féll snjóflóð úr Innragili niður á skíðasvæðið og minna flóð úr Ufsum. Þessi flóð voru öll mun minni en stærstu skráðu flóð úr hlíðinni. Önnur snjóflóð sem skráð hafa verið eftir 2002 eru flest tiltölulega lítil, miðað við flóð sem ógnað hefðu byggðinni áður en varnarvirkin komu til, og mörg þeirra litlar spýjur, og sæta því ekki tíðindum. Mynd 2 sýnir tungu flóðs sem féll úr Traðargili í desember 2012, sem stöðvaðist að mestu á keilunum. Tunga úr flóðinu rann niður á milli tveggja keilna en stöðvaðist áður en að varnargarðinum kom. Þessi flóð staðfesta að snjóflóð úr hlíðinni ofan byggðarinnar eru alls ekki fátíð og fjöldi þeirra og skriðlengd er í grófu samræmi við tíðnimatið sem gert var í tengslum við fyrra hættumat eins og nánar er fjallað um í kafla um hættumat hér á eftir.

3.2 Snjóflóðin 21. febrúar 1997

Stærstu snjóflóðið sem fallið hafa úr Traðarhyrnu síðan snjóathugunarmaður tók til starfa í Bolungarvík féllu 21. febrúar 1997 og lenti annað þeirra á húsinu að Dísarlandi 14 og hitt á húsunum Dísarlandi 8 og 10 og stöðvuðust flóðin skammt neðan húsanna. Flóð þessi eru athyglisverð í

ljósi flóða sem fallið hafa á síðustu árum á Flateyri í janúar 2020 og í Neskaupstað í mars 2023 þar sem vísbendingar eru um að svokallaður iðufaldur hafi komið við sögu, eins og nánar er fjallað um í kafla um hættumat hér á eftir, er því rétt að fara um þau nokkrum orðum.

Fyrri flóðið, sem lenti á Dísarlandi 14, olli ekki tjóni á húsinu en íbúum brá í brún og voru næstu hús við götuna yfirgefin í kjölfarið. Síðara flóðið olli talsverðum skemmdum á Dísarlandi 8 og 10 og þótti mildi að íbúar höfðu yfirgefið þau í tíma áður en flóðið féll. Í lýsingu snjóathugunarmanns á fyrri flóðinu er nefnt að um kóf kunni að hafa verið að ræða sem fylgdi flóði sem þá hefur stöðvast nokkru ofan hússins. Í blaðafregnum um þessi flóð kemur fram að snjór hafi þeyst í gegnum húsin, splundrað rúðum og milliveggjum og fyllt herbergi af snjó. Þessar lýsingar eru ekki ósvipaðar lýsingum á snjóflóðunum sem lentu á húsum á Flateyri 2020 og í Neskaupstað 2023. Þar er talið að svokallaður iðufaldur hafi lent á húsunum en ekki hinn eiginlegi þétti kjarni flóðanna sem líklegt er að hefði valdið meira tjóni og skilið eftir sig þykkari snjóflóðstungur. Ef þetta er tilfellið fyrir flóðin 1997 úr Traðarhyrnu bendir það til þess að hafa þurfi hættu af völdum iðufalds í huga við hættumat fyrir byggðina undir varnargörðunum í Bolungarvík, en iðufaldur getur kastast yfir varnargarða þó hinn þétti kjarni stöðvist ofan þeirra.

Það er athyglisvert að í adraganda þessara snjóflóða í febrúar 1997 var ekki mjög kalt. Hiti við sjávarmál var við frostmark eða lítillega undir því daginn sem flóðin féllu en á Þverfjalli í 740 m h.y.s. var frost milli 5 og 8 stig í adraganda flóðsins. Mjög áköf logndrifa hafði verið í sólarhring þegar flóðin féllu. Þessi adragandi passar ekki við að mikið frost er talið stuðla að myndun iðufalds í snjóflóðum en áköf snjókoma í fremur lygnu veðri gæti hafa stuðlað að því að mikið framboð var af léttum, þurrum snjó í farvegi flóðanna en það er talið auka hættu á myndun iðufalds.

4 Varnarvirki

Vinna við undirbúning snjóflóðavarna í Bolungarvík hófst 1999 með frumathugun á varnarvirkjum fyrir innri hluta byggðarinnar undir Traðarhyrnu (Hnit og NGI, 1999; Orion, VA og NGI, 1999, 2001). Frumathugun fyrir ytri hluta byggðarinnar fór fram tíu árum síðar (Efla og Landmótun, 2009; Orion, 2010a,b). Mat á umhverfisáhrifum vegna varnarvirkjanna var unnið af Náttúrustofu Vestfjarða (NV, 2002). Í tengslum við báðar frumathuganirnar fóru fram ýmsar athuganir á útfærslu varnarvirkjanna, m.a. á vandamálum sem skapast gætu vegna snjósöfnunar við varnargarða, og er gefið yfirlit um skýrslur og minnisblöð um þessar athuganir í heimildaskrá. Til athugunar kom að grafa djúpa gryfju í fjallsrótunum til þess að stöðva snjóflóð og einnig kom leiðigarður vestan byggðarinnar til skoðunar.

Niðurstöður frumathugana frá 1999, 2001 og 2009 og greiningar og vangaveltna í framhaldi af þeim var að reisa 710 m langan þvergarð ofan innri hluta byggðarinnar og 210 m langan þvergarð ofan ytri hluta byggðarinnar. Báðir garðarnir eru brattir, halli flóðhliðanna er 4:1 (lóðrétt:lárétt) og þær byggðar upp af netgrindum. Jafnframt voru reistar átta brattar keilur í 110–130 m fjarlægð frá garðinum, fjórar neðan Traðargils og fjórar neðan Ytragils. Innri garðurinn er í 30–50 m h.y.s. og um 22 m hár þar sem hann er hæstur neðan giljanna en ytri garðurinn er í 20–30 m h.y.s. og um 11.5 m hár þar sem hann er hæstur (Efla o.fl., 2017). Keilurnar eru í 60–90 m h.y.s., um 12 m háar og um 15 m breiðar í toppinn. Framkvæmdir við innri garðinn og keilurnar stóðu á árunum 2008–2012 en ytri garðurinn var reistur 2011–2012 (FSR, 2016). Ýmis frágangur, m.a. gróðursetning á framkvæmdasvæði, stóð til ársins 2014.

Vegna plássleysis fyrir garða ofan byggðarinnar var ákveðið að kaupa upp og rífa sex íbúðarhús við Dísarland til þess að unnt væri að koma fyrir þvergarði af þeirri hæð sem lögð var til í frumathugun. Uppkaupin voru hluti af framkvæmdum við varnir byggðarinnar.

Í frumathugun Orion (2010b) er mælt með 15 m háum þvergarði undir Ufsum og í minnisblaði Veðurstofunnar frá febr. 2010 (Tómas Jóhannesson, 2010) er gengið út frá 14 m háum garði. Vegna takmarkaðs pláss ofan byggðarinnar varð niðurstaðan sú að reisa 11.5 m háan garð sem leiðir til þess að hættumatslínur í byggðinni neðan garðsins færast ekki eins mikið upp og ef reistur hefði verði jafn hár garður og mælt var með í frumathugun eins og nánar er rætt í kafla um hættumat.

Eftir að varnargarðarnir voru risnir kom til umræðu hvort þeir hefðu áhrif á vindafar í byggðinni fyrir neðan og var sett upp veðurstöð neðan garðanna í febrúar 2016 til þess að fylgjast með vindafari þar. Nokkrir íbúar höfðu eftir að garðarnir komu til orðið varir við sterka vindgusti sem skulu á húsum þannig að fólki innandyra brá í brún. Líkanreikningar voru unnir til þess að greina áhrif garðanna á vindafar og gefa þeir til kynna að varnargarðarnir hafi áhrif á vindafar í byggðinni „... og staðfesta frásagnir af upplifun íbúa að einhverju leyti“ (Vatnaskil, 2021). Á grundvelli reikninganna voru settar fram tillögur um skjólveggi ofan garðanna til þess að draga úr óheppilegum áhrifum varnarvirkjanna á vindafar (Vatnaskil, 2021, 2022; Hnit, 2021). Í upphafi yrði reist 150 m löng og 5–7 m há vindgirðing, sem svo er kölluð, og áhrif hennar könnuð. Í framhaldinu kæmi svo til greina að reisa viðbótargirðingu að fenginni reynslu af þeirri fyrri. Þessar tillögur eru til athugunar hjá bæjarstjórn Bolungarvíkur og Ofanflóðanefnd.

Síðan garðarnir og keilurnar voru reist hefur verið fylgst með snjósöfnun á svæðinu ofan garðanna þegar snjóathugunarmenn hafa farið um svæðið til þess að fylgjast með snjóflóðahættu,

lesa af snjódýptarstikum og skrá snjóflóð. Ekki hefur komið í ljós óheppileg snjósöfnun ofan garðanna eða við keilurnar sem áhrif hefur á virkni þeirra.

5 Hættumat

Við endurskoðun hættumats undir varnargörðum og öðrum varnarvirkjum á úthlaupssvæðum þarf að meta áhrif varnarvirkjanna til þess að draga úr hættu af völdum snjóflóða í byggðinni af völdum hins þetta kjarna snjóflóða. Einnig þarf að huga að möguleikanum á aukinni hættu á svæðum þar sem garðar eða keilur kunna að beina öflugri streng snjóflóðsins en ella væri, og hættu af völdum yfirflæðis iðufalds og kófs (sjá nánari umfjöllun hér að neðan) sem skapað getur hættu þrátt fyrir að hinn þékki kjarni stöðvist ofan byggðarinnar eða beinist frá henni. Jafnframt þarf að ákveða hvort ástæða er til þess að endurskoða að einhverju leyti þær forsendur sem lagðar voru til grundvallar í fyrra hættumati og við snjótæknilega hönnun varnarvirkjanna, einkum ef nokkuð er um liðið frá vinnu við hættumat og frumhönnun. Liðin eru yfir 20 ár frá því að hættumat fyrir Bolungarvík (Kristján Ágústsson o.fl., 2002) var unnið og ofanflóðasaga svæðisins könnuð (VÍ, 2002), og um 25 ár frá því að vinna við frumathugun varnarvirkja fyrir Bolungarvík hófst (Hnit og NGI, 1999). Því er rétt að yfirfara forsendur um tíðni snjóflóða, hættumat og hönnunarforsendur varnarvirkjanna nú. Í heimildaskrá er listi yfir nokkrar aðrar skýrslur sem tengjast fyrra ofanflóðahættumati fyrir Bolungarvík og hönnun varnarvirkja fyrir byggðina undir Traðarhyrnu.

5.1 Tíðni snjóflóða

Eins og nefnt var í kafla um ofanflóðasögu breyta flóð, sem fallið hafa síðan fyrra hættumat var gert, ekki í grundvallaratriðum mati á tíðni snjóflóða eða öðrum forsendum hættumats og hönnunar varnarvirkja. Ekki hafa heldur orðið þær breytingar á aðferðafræði við ofanflóðahættumat hér á landi á þessu tímabili að það gefi tilefni til breytinga.

Í fyrra hættumati var tíðnimat miðað við tvö skráð snjóflóð með (einvítt) rennslisstig $r > 14$ og þrjú með rennslisstig $r > 13$ úr giljunum þremur á ca. 40 árum sem gaf tíðnina $F_{13} = 0.025-0.04$ á ári fyrir hvert gil. Tíðnimat byggt á fjórum styttri flóðum sem náð hafa að efstu húsum í byggðinni undir Traðagili og Ytragili síðan um 1980, en þau eru u.þ.b. í rennslisstigi 10–11, gaf hins vegar til kynna lægri tíðni eða $F_{13} = 0.01$ á ári fyrir hvort gil. Ekki hafa fallið flóð með rennslisstig yfir 13 síðan eldra hættumat var unnið en áhorfstíminn hefur lengst um 20 ár. Því má endurskoða tíðnimat byggt á lengri flóðunum þannig að það verður $F_{13} = 0.015-0.03$ á ári fyrir hvert gil. Nokkur flóð úr Traðargili og Ytragili hafa fallið niður undir fjallsrætur síðan 2002 og stöðvast á keilunum eða fallið niður á milli þeirra og stöðvast milli keilnanna og garðsins. Ekki er unnt að segja með vissu hvort þau hefðu náð rennslisstigi 10–11 á landslagi hlíðarinnar fyrir byggingu varnarvirkja en gróflega má segja að um 5 snjóflóð, sem náðu hefðu niður undir efstu hús eða lengra, kunni að hafa fallið úr þessum tveimur giljum síðan 2002. Þetta gefur endurskoðað tíðnimat á grundvelli styttri flóða upp á $F_{13} \approx 0.01$ á ári fyrir hvort gil, sem er nokkru lægra en endurskoðaða matið m.t.t. lengri flóða, en er í bærilegu samræmi við það þegar litið er til almennrar óvissu um matið sem byggir óhjákvæmilega á fáum skráðum flóðum. Uppfærða tíðnimatið er í betra innra samræmi fyrir lengri og styttri flóð en fyrra mat vegna þess að munurinn milli tíðninnar, sem svarar til lengri flóðanna og þess sem leiðir af fjölda styttri flóða, er minni en var. Endurskoðað tíðnimat má þannig segja að sé $F_{13} = 0.02$ á ári fyrir hvort gil, með óvissu upp á faktor tvo. Nokkur munur á fjölda skráðra flóða í Traðargili og Ytragili en þau eru 12 frá 2002 og 26 í heildina í Traðargili og 4 frá 2002 og 11 í heildina í Ytragili. Ekki er þó marktækur munur á fjölda stórra flóða úr giljunum tveimur, í báðum eru skráð þrjú flóð með

rennslisstig hærra en 11. Því þykir eðlilegt að meta tíðnina saman fyrir gilin tvö eins og var gert í fyrra hættumati.

Til samanburðar má nefna að tíðni á bilinu $F_{13} = 0.05\text{--}0.1$ á ári hefur verið notuð í hættumati fyrir nokkuð hættulega snjóflóðafarvegi víða á landinu, t.d. í norðanverðum Hnífsdal, fyrir Seljalandshlíð utan Seljalandsmúla, og fyrir helstu snjóflóðafarvegi í Neskaupstað. Endurskoðaða tíðnimatið fyrir Bolungarvík gefur til kynna 3–5 sinnum lægri tíðni snjóflóða sem ná rennslisstigi 13 úr innri giljunum þremur í Traðarhyrnu. B-lína hættumats undir Traðargili og Ytragili er í (einvíðu) rennslisstigi 15–15.5. Ofangreint endurskoðað tíðnimat er í grófu samræmi við að endurkomutími snjóflóða nærri B-línu hættumats sé um 1000 ár og því er ekki tilefni til endurskoðunar á hættumatinu.

Úr utanverðri hlíðinni hafa ekki fallið umtalsverð flóð síðan fyrra hættumat var unnið. Undir Ufsum er því ekki talið tilefni til endurskoðunar á fyrra hættumati, sem byggir á mati sérfræðinga fremur en eiginlegum reikningum. Þar sem áhorfstíminn hefur lengst má e.t.v. segja að hættumatið fyrir þetta svæði kunni að vera í varkárari kantinum.

5.2 Tvívíðir líkanreikningar með SamosAT

Tvívíða SamosAT snjóflóðalíkanið, sjá viðauka I, var keyrt fyrir tvívíð rennslisstig á bilinu 13–19 á landlíkani án varnavirkja, sjá kort 3, og reyndust niðurstöður í stórum dráttum í samræmi við áður gerða SAMOS líkanreikninga fyrir Bolungarvík (Tómas Jóhannesson o.fl., 2001) sem fyrra hættumat byggir á. Snjóflóð með tvívítt rennslisstig 13–15 stöðvast í ofanverðri byggðinni, og ná neðst undir Traðargili og skemmst undir Ystagili. B-lína fyrra hættumats er u.þ.b. í tvívíðu rennslisstigi 16.5 undir Traðargili, neðan við rennslisstig 19 undir Ytragili, og u.þ.b. í rennslisstigi 16 undir Ystagili. Það gefur til kynna að hættumatið fyrir svæðið undir Ytragili sé í svartsýnni kantinum miðað við hættumatið utar og innar. Snjóflóð úr giliinu utan Ystagils út undir fjallsbrúninni (sjá kort 1) reiknast falla svo mikið til austurs að þau lenda ekki á varnargarðinum undir Ufsum og ógna ekki byggðinni og er sú niðurstaða í samræmi við aðra líkanreikninga. Snjóflóð úr þessu gili koma því ekki við sögu í hættumati eða hönnun varnavirkja.

Nokkru ofan keilnanna reiknaðist hraði flóðs sem nær u.þ.b. niður að B-línu úr Traðargili um 45 m/s og um 39 m/s fyrir flóð úr Ytragili. Skammt ofan garðsins reiknast hraðinn 34, 27 og 27 m/s fyrir þessi gil í sömu röð. Þykktin er víða um 2 m en fer upp í 2.5–3 m í miðju flóðanna. Í frumathugun frá 1999 og 2001 (Hnit og NGI, 1999; Orion, VA og NGI, 1999, 2001) var miðað við hraða um 40 m/s við keilurnar undir Traðargili og Ytragili og um 33 m/s á svæðinu næst ofan við garðinn, og flóðþykkt og snjódypt á jörðu ca. 2 m hvort um sig (í frumathugun er ekki tilgreindur hraði hönnunarflóða fyrir Ystagil, þ.e. svæðið undir Ufsum, þar sem ytri garðurinn var reistur). Niðurstöður SamosAT á landlíkani fyrir byggingu varnavirkjanna eru því í grófu samræmi við fyrri hraðagildi og þykktina úr frumathuguninni. Hér að neðan verður gengið út frá hraðanum sem reiknast með SamosAT í greiningu á garðhæðinni.

5.3 Prívíðir líkanreikningar með Open- $\mu(I)$

Prívíða snjóflóðalíkanið Open- $\mu(I)$, sjá nánari lýsingu í viðauka I, var keyrt með snjódypt á upptakasvæðum og viðnámsgildi sem stillt voru af þannig að snjóflóðin náðu u.þ.b. að B-línu hættumats fyrir tilkomu varnargarða og keilna, sjá snjódypt í lok keyrslanna á korti 4 og myndband 1 (sem sýnir keyrsluna fyrir Innra-, Traðar- og Ytragil). Viðnámsstuðlarnir í keyrslunum

voru $\mu_s = 0.11$ og $\mu_d = 0.75$ og snjódýpt þvert á hlið á upptakasvæðunum var á bilinu 2.9–3.1 m á svæðum 1, 2 og 3 en 2.1–2.2 m á svæðum 6 og 7 (sjá kort 3). Rúmmál snjóflóðanna sem sett var af stað úr upptakasvæðunum var 66, 65, 52, 49 og 39 þús. m³ (í þessari röð, svæði 1–3, annars vegar, og 6 og 7, hins vegar, voru keyrð saman).

Hámarksyfirborðshraði og hámarksdýpt í þessum keyrslum eru sýnd á kortum 5 og 6 og reiknast yfirborðshraðinn við keilurnar um 40 m/s undir Traðargili og 32 m/s undir Ytragili. Skammt ofan þvergarðanna reiknast hraðinn 31 m/s undir Traðargili, 25 m/s undir Ytragili og um 25 m/s undir Ystagili. Þykkt flóðanna reiknast 1–3 m víðast hvar, dæmigert gildi fyrir þykkina skammt ofan garðanna er um 2 m. Fyrir þrívíða snjóflóðalíkanreikninga er eðlilegast að miða hér við yfirborðshraða fremur en dýpisheildaðan meðalhraða vegna þess að efri hluti flóðsins streymir með hraða nærri yfirborðshraðanum á talsverðu dýptarbili og lægri hraði nær botninum dregur ekki úr möguleikum á yfirflæði efri hlutans. Þessi gildi eru tiltölulega nærri niðurstöðum SamosAT og því sem gengið var út frá í frumathugun á sínum tíma, nema hvað hraði snjóflóðs úr Ytragili reiknast heldur lægri með Open- $\mu(I)$ en með SamosAT og það sem miðað var við í frumathugun.

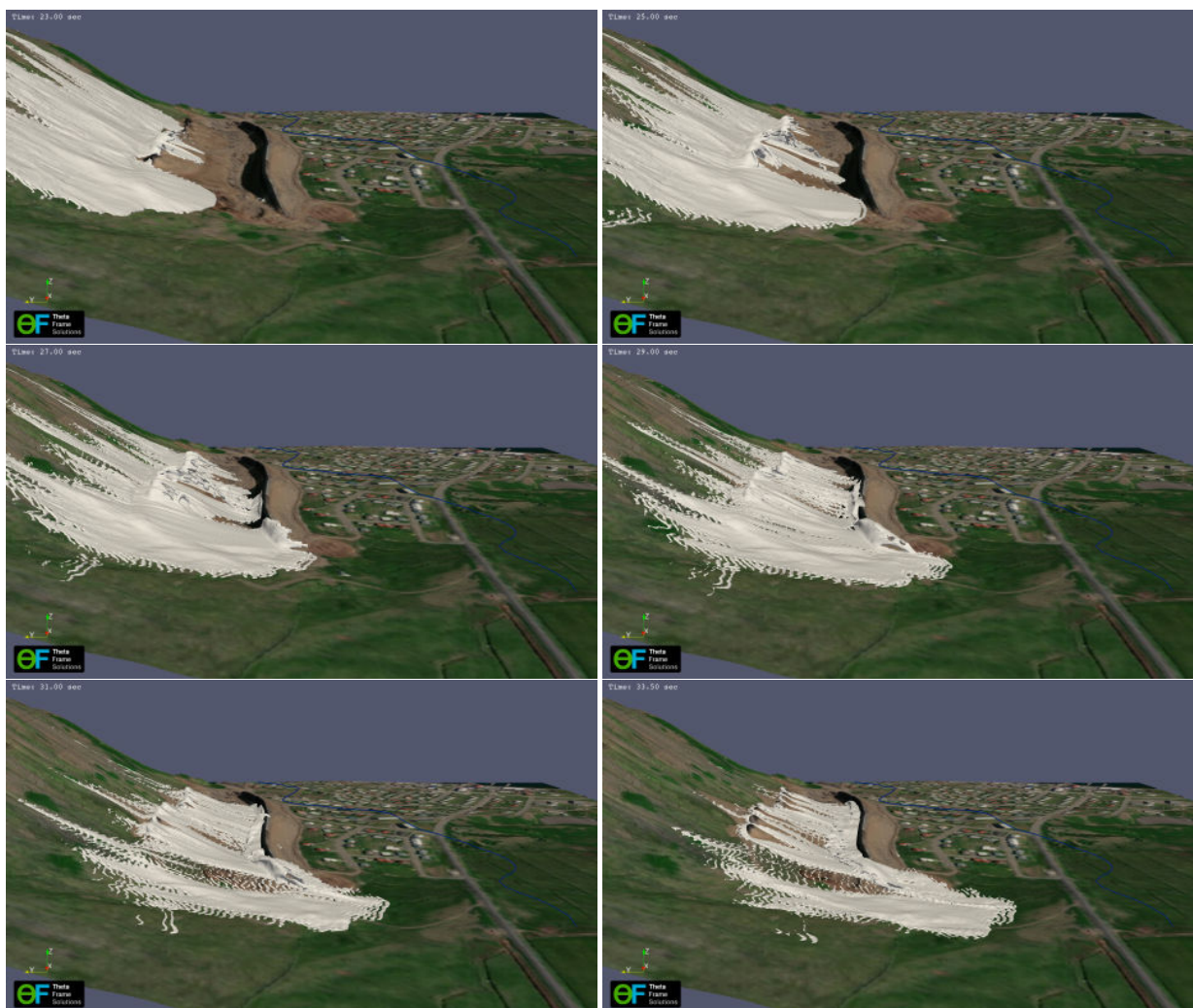
Open- $\mu(I)$ líkanið var síðan keyrt með sömu inntaksgildum á landlíkani með gördum og keilum, bæði á snjólausu landlíkani og á líkani þar sem land hafði verið hækkað um $h_s = 3.5$ m ofan garðsins til þess að taka tillit til snjódýptar ofan garðsins þegar flóðið fellur, sjá mynd 3 og myndbönd 2, 3 og 4. Þessi snjódýpt ofan varnarvirkjanna er nokkru meiri en miðað var við í frumathugun, þar sem miðað var við u.þ.b. 2 m snjódýpt ofan stóra garðsins, vegna þess að mjög snjóþungt getur verið nærri rótum Traðarhyrnu og dæmi eru um að hús fenni á kaf efst í byggðinni í miklum snjóavetrum. Kort 7 og 8 sýna annars vegar snjódýpt í tungu flóðanna í lok keyrslanna og hins vegar hámarksástreymisþrýsting sem svarar til yfirborðshraða ($p_{\max} = \rho u_{s\max} u_{s\max}$) fyrir keyrslurnar með snjó á jörðu ofan garðanna. Sjá má að snjóflóðin úr Traðargili og Ytragili hægja á sér á keilunum og stöðvast að langmestu leyti á þvergarðinum. Flóðið úr Ystagili reynist kastast aðeins yfir ytri þvergarðinn þegar reiknað er með snjó á jörðu ofan garðsins en það stöðvast á garðinum í keyrslunni á snjólausu landi (sú keyrsla er ekki sýnd á kortum í skýrslunni, en myndband 4 sýnir hana).

Sjá má að innri jaðar hönnunarsnjóflóðsins úr Ystagili flæðir niður á milli varnargarðanna og að B-línu fyrra hættumats á óbyggðu svæði við svokallaða Morðingjamýri þar sem snjóflóð er talið hafa stöðvast árið 1969 eða 1970 (sjá kort 2). Open- $\mu(I)$ líkanið hefur tilhneigingu til þess að breiða úr snjóflóðum þegar þau eru u.þ.b. að stöðvast á úthlaupssvæðum vegna þess að $\mu(I)$ hniglíkanið (e. rheology) skortir samloðun (e. cohesion) sem snjóflóð hafa þegar þau eru nærri því að stöðvast. Því má ætla að flæði snjóflóðsins inn fyrir enda ytri garðsins og niður í mýrina sé ofmetið í líkanreikningunum. Ljóst er hins vegar að varnargarðarnir draga ekki umtalsvert úr hættu þar sem þeir mætast vegna þess að innri garðurinn lækkar til eystri endans yfir talsverðra vegalengd áður en að ytri garðinum kemur. Því draga garðarnir ekki úr skriðlengd snjóflóða á nokkrum kafla á þessu svæði. Endurskoðað hættumat verður því lítið sem ekkert breytt neðan við þar sem garðarnir mætast.

5.4 Hönnun þvergarða og keilna

Miðað er við það hér á landi að varnarvirki á úthlaupssvæðum uppfylli kröfur í evrópskum viðmiðunarreglum um hönnun snjóflóðagarða (Tómas Jóhannesson o.fl., 2009) en þær eru yngri en frumathugunin frá 1999–2001 sem liggur til grundvallar hönnun varnarvirkjanna undir Traðar-

hyrnu (Hnit og NGI, 1999; Orion, VA og NGI, 1999, 2001). Hér er miðað við hönnunarsnjóflóð sem stöðvast við B-línu hættumatsins frá 2003 (Kristján Ágústsson o.fl., 2002) en það er talið hafa um 1000 ára endurkomutíma eins og áður var nefnt. Snjóflóði á jörðu ofan garðanna fyrir flóð er valin 3.5 m, eins og nefnt var að framan, og þykkt flóðsins ofan garðanna 2 m á grundvelli líkanreikninga með bæði SamosAT og Open- $\mu(I)$. Í töflu 2 er gerð grein fyrir niðurstöðum útreikninga á nauðsynlegri hæð þvergarða skv. viðmiðunarreglunum og er annars vegar um að ræða skilyrði um að garðurinn og keilurnar komi í veg fyrir að snjóflóðið geti streymt óhindrað yfir garðinn í stríðu (e. supercritical) streymi og hins vegar krafa um að þykkt streymis neðan straumstöcks við garðinn sé minni en garðhæðin. Bæði er reiknuð garðhæð með og án keilna ofan garðs undir Traðargili og Ytragili. Gert er ráð fyrir að keilurnar hægi á flóðinu þannig að hraðinn lækki um 20% í árekstrinum, eins og tilgreint er í viðmiðunarreglunum, og að viðnám í flæðinu neðan keilnanna sé eins og í reikningum á landi án keilna. Reynist ýmist hæðin sem



Mynd 3. Líkanreikningar á snjóflóði sem lendir á keilum og varnargarði neðan Traðarhyrnu við Bolungarvík með þrívíða snjóflóðalíkaninu Open- $\mu(I)$. Sjá má að snjóflóðið kastast í loft upp við áreksturinn við keilurnar og að svokallað straumstökk myndast í flæðinu ofan við varnargarðinn þar sem flóðið hrannast upp.

nauðsynleg er til þess að koma í veg fyrir óhindrað streymi yfir garðinn eða þykkt flóðsins neðan straumstökkis ráðandi um garðhæðina.

Tafla 2. Hönnun þvergarða undir Traðarhyrnu, hönnunarflóð og hæð garðs, hönnunarforsendur skv. evrópskum viðmiðunarreglum um hönnun snjóflóðagarða (Tómas Jóhannesson o.fl., 2009). Taflan sýnir leiðihorn φ_h í láréttu plani (90° fyrir þvergarð), hraða u_1 , þykkt h_1 og Froude tölu Fr_1 hönnunarflóðs ofan garðs, snjódýpt á jörðu h_s ofan garðsins fyrir flóð, landhalla Ψ ofan garðsins og halla þvert á garðstefnuna $\Psi_\perp$, rishæð þvert á land í stríðu streymi $H_{cr} + h_{cr}$, þar sem H_{cr} og h_{cr} eru krítísk garðhæð og þykkt flóðs, sjá skýringar í ofangreindum viðmiðunarreglum, hraða u_2 (0 fyrir þvergarð) og þykkt h_2 streymis meðfram garði neðan straumstökkis og lóðréttu garðhæð H_D , sem samsvarar hámarki $H_{cr} + h_{cr}$ og h_2 að viðbættri snjódýpt á jörðu h_s . Eingöngu er tekið tillit til þetta kjarna snjóflóðsins.

	φ_h	u_1 (m/s)	h_1 (m)	Fr_1 (-)	h_s (m)	Ψ	$\Psi_\perp$	$H_{cr} + h_{cr}$ (m)	u_2 (m/s)	h_2 (m)	H_D (m)
Traðargil, án keilna	90°	34	2	7.7	3.5	10°	10°	32.4	0	23.0	34.2
Ytragil, án keilna	90°	27	2	6.1	3.5	10°	10°	20.5	0	18.5	22.9
Traðargil, með keilum	90°	21	2	4.8	3.5	10°	10°	12.7	0	14.7	17.3
Ytragil, með keilum	90°	14	2	3.2	3.5	10°	10°	6.2	0	10.2	13.1
Ystagil	90°	27	2	6.1	3.5	5°	5°	20.3	0	18.4	23.3

Niðurstöður í töflu 2 sýna að án keilna er óraunhæft að stöðva hönnunarflóð úr Traðargili en 23 m háan garð þyrfti undir Ytragili ef ekki væru keilur. Með keilum lækkar hraðinn við garð mikið og reiknast nauðsynleg garðhæð rúmlega 17 m undir Traðargili og 13 m undir Ytragili sem er vel undir hæð stóra þvergarðsins sem er 22 m undir þessum giljum eins og fram kemur í kafla um varnargarðana. Þessir reikningar á garðhæð sýna nokkru minni hæð en miðað var við í frumathugun á sínum tíma sem þýðir að borð er fyrir báru um virkni stóra garðsins.

Reiknuð garðhæð undir Ystagili er yfir 20 m sem er mun hærri en ytri garðurinn undir Ufsum sem er 11.5 m hár. Við því var að búast vegna þess að þar var sökum plássleysis reistur lægri garður en mælt var með í frumathugun og þarf að taka tillit til þessa við endurskoðun hættumats undir Ufsum.

5.5 Endurskoðun hættumats undir Traðarhyrnu

Við endurskoðun hættumats undir þvergörðum hér á landi hefur stundum verið stuðst við svokallaða „orkuhliðrun“ (sjá umfjöllun í evrópskum viðmiðunarreglunum sem fyrr voru nefndar, Tómas Jóhannesson o.fl., 2009). Þá er áhættulínum í hættumati undir varnargörðum hliðrað að hámarki skv. eftirfarandi formúlu

$$\Delta l = \frac{\lambda H_v + \frac{1-k^2}{2g} u_k^2}{\mu - \tan \Psi},$$

þar sem H_v er hæð garðs yfir snjó, λ er orkutapsstuðull í árekstri við þvergarð, $\lambda = 2$ fyrir brattan garð, u_k er hraði við keilur á landi án varna, $k = 0.8$ er hlutfallsleg minnkun á hraða snjóflóðs sem fellur í gegnum keiluröð, og Ψ er landhalla á úthlaupssvæðinu neðan garðsins. Í þessari

jöfnu er tekið tillit orkutaps við það að snjóflóð fellur á keilur sem hægja á flóðinu. Hér verður miðað við $\mu = 0.25$ og gert ráð fyrir flötu landi á úthlaupssvæðinu sem leiðir til tiltölulega lítillar hliðrunar (áhrif landhallans ψ geta verið talsvert mikil ef $\psi = 10^\circ$ eða meira sem ekki er talið trúverðugt). Þessi formúla leiðir til hliðrunar upp á ca. 300 m neðan Traðargils, ca. 260 m neðan Ytragils og ca. 75 m undir Ufsum.

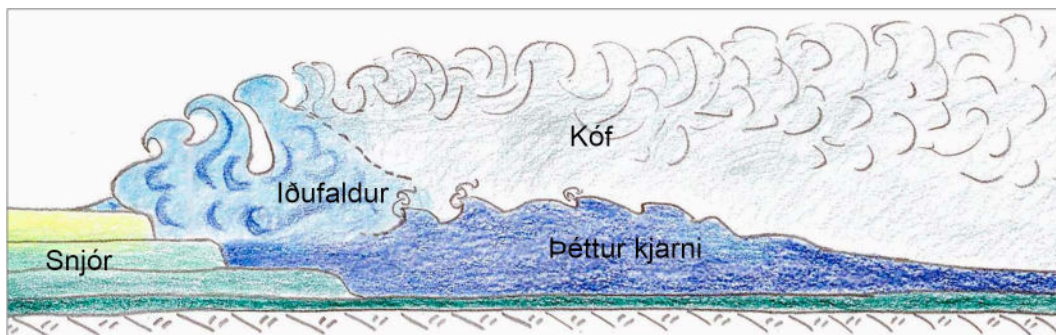
Hættumatið neðan garðanna var endurskoðað í ljósi niðurstaðna greiningar og líkanreikninga sem lýst er hér að framan, sjá kort 9. C-lína var færð upp að garðfætinum nema í Morðingjamýri neðan við staðinn þar sem garðarnir mætast og hæð þeirra er lítil. Þar breytast hættulínur ekki og er því tunga í endurskoðaða hættumatinu sem nær til óbyggðs svæðis í og við Morðingjamýri. B-lína var færð upp um ca. 225 m undir Traðargili, um ca. 200 m undir Ytragili og um ca. 75 m undir Ystagili. Undir Traðargili og Ytragili er færsla hættulínanna nokkru minni en skv. orkuhliðruninni sem lýst er að ofan og er það til þess að taka tillit til hættu vegna yfirflæðis iðufalds sem rædd er í næsta kafla. Þessi staðsetning B-línunnar byggir á þeirri forsendu að skriðlengd stærri flóða en hönnunarflóðs styttest á móta mikið og skriðlengd hönnunarflóðsins en það er forsendan að baki orkuhliðruninni. Þrjú íbúðarhús undir Traðargili og þrjú efstu hús undir Ufsum eru á hinu endurskoðaða B-svæði. Ákveðið var að skilgreina ekki B-svæði efst í byggðinni undir Ytragili vegna þess að SamosAT líkanreikningarnir gefa til kynna að hættumatið þar sé tiltölulega svartsýnt og snjóflóðasagan gefur einnig til kynna heldur lægri tíðni flóða þar. A-lína var færð ofar þannig að A-svæði í endurskoðaða hættumatinu nær u.þ.b. til C-svæðis skv. fyrra mati undir Traðargili og Ytragili en u.þ.b. til B-svæðis skv. fyrra mati undir Ufsum.

Open- $\mu(I)$ -líkanreikningarnir gefa til kynna smávægilegt flæði hönnunarflóða úr Traðargili og Ytragili yfir stóra garðinn, sjá myndband 2. Þetta yfirflæði er lítið og reiknuð gildi fyrir flóðþykkt, hraða og ástreymisþrýsting í byggðinni eru lág ($\lesssim 0.5$ m, $\lesssim 5$ m/s, $\lesssim 5$ kPa). Líkanreikningarnir gefa til kynna að varnargarðurinn virki vel gagnvart hinum þetta kjarna snjóflóða og brött garðhliðin virðist gefast vel til þess að stöðva hönnunarflóðið.

Open- $\mu(I)$ -líkanreikningarnir gefa til kynna nokkurt flæði þetta kjarna hönnunarflóðs úr Ystagili yfir litla garðinn undir Ufsum þegar reiknað er með snjó á jörðu þegar flóðið fellur, sjá myndband 3. Þegar reiknað er með snjólausu landi er yfirflæðið hins vegar óverulegt, sjá myndband 4, þannig að þessi bratti garður virkar nokkuð vel til þess að hægja á hönnunarflóðinu þrátt fyrir að hæðin sé ófullnægjandi. Brugðist er við þessu yfirflæði með því að hliðra hættumatslínunum nær fjallinu með orkuhliðrun sem byggir á garðhæðinni, að frádreginni 3.5 m snjódypt á jörðu, eins og lýst var hér að framan. Þrjú íbúðarhús næst garðfætinum eru á B-svæði hins endurskoðaða hættumats.

Hætta af völdum iðufalds og kófs

Snjóflóðin á Flateyri í janúar 2020 eru áminning um að ákveðin hætta er í byggð neðan snjóflóðavarnarvirkja þó varnarvirkin dragi mikið úr hættu þar sem þau hafa verið reist eins og skýrt kom í ljós í snjóflóðunum á Flateyri og ekki síður í Neskaupstað í mars 2023. Samfara sumum snjóflóðum getur verið hraðfara iðufaldur, sem svo hefur verið nefndur. Hann er eðlisléttari og ferðast hraðar en hinn þétti kjarni flóðanna en er eðlisþyngri en kóf og honum fylgir óreiða og iðuköst, sbr. mynd 4. Eðlisþyngd iðufalds hefur verið metin 35–100 kg/m³ (Issler o.fl., 2020), en dæmigerð eðlisþyngd þetta kjarnans er 250–400 kg/m³ (Sovilla o.fl., 2015). Hraði iðufalds hefur verið mældur eða metinn allt að tvöfaldur á við hraða þetta kjarnans í einhverjum tilvikum (Sovilla o.fl., 2015), og allt að 60% meiri en þetta kjarnans í öðrum tilvikum (Sovilla o.fl., 2018). Í endur-



Mynd 4. Einfölduð skýringarmynd af snjóflóði (íslenskuð útg. af mynd 1 í Sovilla o.fl., 2018) sem sýnir hina þrjá mismunandi hluta flóðsins. Þétti kjarninn, sem er þyngstur í sér, ferðast neðst og samanstendur af snjóköggjum og snjókornum sem eru meira og minna í snertingu sín á milli. Íðufaldur, sem fylgir sumum en ekki öllum snjóflóðum, er hraðfara og berst á undan og að hluta til ofan á þetta kjarnanum. Hann einkennist af óreglulegri hreyfingu og iðuköstum og samanstendur af snjóköggjum sem kastast stöðugt hver af öðrum og svífa nokkurn spöl milli árekstra. Íðufaldurinn nærast á þurrum, köldum snjó sem flóðið hrífur með sér á leið niður hlíðina og einnig á snjó af yfirborði þetta kjarnans. Kófið er blanda af lofti og snjókornum og litlum snjóköggjum sem berast með loftinu og rekast miklu sjaldnar hvert á annað en í þetta kjarnanum og iðufaldinum.

skoðaðri frumathugun snjóflóða á Flateyri (Verkís, 2023) er hraði iðufaldsins metinn 30% meiri en þetta kjarnans og eðlisþyngdin um 50 kg/m^3 . Ýmissa upplýsinga var aflað um iðufald og áhrif hans í snjóflóðunum á Flateyri 2020 og öðrum íslenskum og erlendum snjóflóðum og voru teknar saman í framhaldi af flóðunum á Flateyri (Óliver Hilmarsson o.fl., 2020; Kristín Martha Hákonardóttir, 2022a,b,c,d; Ragnar Lárusson & Haukur Elvar Hafsteinsson, 2021; Darri Kristmundsson & Haukur Elvar Hafsteinsson, 2022). Mestar líkur eru taldar á að snjóflóðum fylgi iðufaldur ef tiltölulega kalt er í aðdraganda flóðanna og léttur, kaldur snjór á upptakasvæðum, sérstaklega ef þurr, léttur snjór hylur einnig fallbraut og úthlaupssvæði. Íðufaldur getur borist að hluta yfir varnargarða og þannig skapað hættu, þó garðarnir beini þetta kjarnanum frá byggð eða stöðvi hann ofan byggðarinnar. Einnig getur snjór úr þetta kjarnanum kastast yfir varnargarða í iðuköstum í upphafsárekstri snjóflóðs þannig að hætta skapist. Eftir snjóflóðin á Flateyri 2020 hafa verið teknar saman upplýsingar um hættumat undir varnargörðum í nokkrum nágrennalöndum og lagðar fram tillögur að reglum um nýtingu hættusvæða neðan snjóflóðavarnarvirkja með það í huga að stuðla að öryggi byggðanna (Tómas Jóhannesson og Magni Hreinn Jónsson, 2024).

Íðufaldur getur borist hundruð metra eftir að hann missir tengsl við þetta kjarnann (Issler o.fl., 2019) og/eða hættir að taka upp kaldan, þurran snjó og hann getur flætt yfir varnargarða sem eru nægilega háir til þess að beina þetta kjarnanum frá hinu varða svæði eða stöðva hann. Ekki eru tiltæk líkön sem herma iðufald og líkön fyrir kóf eru ófullkomin. Því þarf skilgreining hættusvæða neðan varnavirkja að byggjast á mati sérfræðinga fremur en á líkanreikningum. Í þessu mati er rétt að huga að eftirfarandi atriðum.

Framboð á þurrum, köldum snjó á upptakasvæðum og í farvegi. Snjóflóðaaðstæður sem skapa hættu á viðkomandi svæði geta verið mismunandi eftir landsvæðum, hæð upptakasvæða yfir sjó og viðhorfi. Hætta af völdum iðufalds og kófs er mest í farvegum sem vita

mót suðri þar sem snjóflóð falla í norðan hríðarveðrum og vænta má þess að oft eða oftast snjóí í verulegu frosti til fjalla, sérstaklega í tiltölulega háum farvegum. Minni hættu er að vænta í farvegum með viðhorfi til norðurs þar sem hætta skapast í suðlægum áttum vegna þess að þar má gera ráð fyrir að hlýrra veður sé í aðdraganda flóða, einkum í tiltölulega lágum farvegum.

Tíðni flóða og stærð farvegar. Mestrar hættu af völdum iðufalds og kófs er að vænta í stórum farvegum þar sem snjóflóð eru tíð vegna þess að stórum hraðfara flóðum fylgir kröftugastur iðufaldur. Undir lágum hlíðum getur verið mikil snjóflóðahætta í byggð sem stendur nærri fjallshlíð en þar er hægt að gera ráð fyrir að iðufaldur og kóf séu ekki stór þáttur í hættunni.

Fjarlægð frá varnargarði. Það dregur úr krafti iðufalds með fjarlægð frá varnargarði eða öðrum fyrirstöðum sem koma í veg fyrir að hann hrífi óhindrað með sér snjó úr snjóþekjunni eða bæti við sig efni úr þetta kjarnanum. Næst neðan varnargarða má gera ráð fyrir öflugustum iðuköstum, þar sem áhrifa árekstrarins gætir mest, en fjær dregur úr þessari hættu. Hér er miðað við að mest hætta sé í 100–200 m fjarlægð frá varnargörðum, og einkum í efstu einni til tveimur húsaröðum í byggðinni. Þar sem byggð er tiltölulega samfelld má ætla að hús neðan við efstu húsaröð njóti einhvers skjóls af byggingum sem standa ofar. Ekki er gert ráð fyrir því í hættumatsreglugerð að tekið sé tillit til slíks skjóls í afmörkun hættusvæða, en eðlilegt er að tekið sé tillit til þess í rýmingarviðbúnaði.

Á grundvelli þessara atriða, og almennt eftir því hvort talin er veruleg hætta á yfirflæði af völdum þetta kjarnans sjálfs, þarf að meta hvort tilefni er til þess að skilgreina B-svæði undir varnargörðum og öðrum varnarvirkjum til viðbótar við A-svæði sem alla jafna er látið ná til hættusvæðis C í fyrra hættumati m.a. vegna margvíslegrar óvissu í hættumati og um áhrif varnarvirkja á flæði snjóflóða.

Traðarhryna snýr mót suðri en snjóflóðahætta í byggðinni neðan hennar virðist ekki hafa skapast í alvarlegum snjóflóðahrinum á norðanverðum Vestfjörðum þegar snjóflóð falla í mörgum farvegum með svipað viðhorf, t.d. þegar mannskaðaflóðin féllu í Súðavík og á Flateyri í janúar og október 1995. Fyrir snjóflóðin í febrúar 1997 hafði verið áköf logndrifa í u.þ.b. í sólarhring. Upptakasvæðin í ofanverðri Traðarhrynu eru í svipaðri hæð og upptakasvæði í helstu snjóflóðafarvegum landsins og telja verður hættu á að þar geti safnast kaldur, léttur snjór sem leiðir til hættu á snjóflóðum með kröftugum iðufaldi. Því verður að miða við að hætta geti skapast af völdum iðufalds og kófs á svæðinu næst undir varnargörðunum í Bolungarvík, einkum í byggðinni undir Traðargili og Ytragili en þar er meiri hætta á öflugum flóðum en utar í bygginni. Vegna hættu á yfirflæði iðufalds þótti tilefni til þess að efstu hús í byggðinni undir Traðargili, sem eru í innan við 100 m fjarlægð frá garðinum, yrðu á B-svæði í endurskoðuðu hættumati þó orkuhliðrun, sem eingöngu tekur tillit til þetta kjarnans, gæfi til kynna að unnt væri að færa B-línuna upp fyrir húsín.

Rýmingarviðbúnaður

Hættusvæði undir varnarvirkjum kalla á rýmingarviðbúnað til þess að tryggja betur öryggi fólks en varnirnar einar leiða til. Í hættumatsreglugerð (20. gr.) er áskilið að varanleg varnarvirki skuli reist fyrir íbúðarhús á hættusvæðum C en heimilt er að tryggja öryggi fólks með eftirliti og rýmingu á hættusvæðum B og A. Neðan varnarvirkja er almennt skilgreint hættusvæði A, eins

og nefnt var hér að framan, sem oft nær til hættusvæðis C í fyrra hættumati. Á nokkrum stöðum hefur jafnframt verið skilgreint B-svæði neðan varnarsvæðis. Rétt er að fara nokkrum orðum í hættumati um rýmingarviðbúnað sem eðlilegur er neðan varnarsvæðis í ljósi þeirra upplýsinga sem hættumatið byggir á, en rýmingarviðbúnað fyrir svæði undir varnarsvæðum þarf að uppfæra í framhaldi af hættumati fyrir slík svæði.

Rýmingaráætlanir Veðurstofunnar og almannavarna byggja á reitaskiptingu þar sem reitum er skipt í þrjá flokka.

- I. Reitir sem miðast við þekkt snjóflóð og hætta getur skapast á við hóflega snjósöfnun sem talið er að geti átt sér stað á nokkurra ára fresti. Reitirnir ná e.t.v. ekki eins langt niður og snjóflóðasagan greinir ef heimildir eru um að lengri flóð hafi fallið í aftakaveðri, í kjölfar aftakaveðurs eða í tengslum við mikla snjósöfnun. Rýmdir verða reitir í nágrenni helstu snjóflóðafarvega þar sem búast má við snjóflóðum við margvíslegar aðstæður. Reitirnir verða rýmdir mun oft en reitir á stigi II og III. Rýmingarreitir á stigi I falla að öllu leyti innan hættusvæða C í hættumati og ná til svæða þar sem snjóflóðahætta er talin koma oftast upp innan þeirra.
- II. Reitir sem miðast að mestu við þekkt flóð eins og þau ná lengst og önnur svæði sem talin eru sambærileg. Á þessum reitum skapast hætta við mikla snjósöfnun á upptakasvæðum. Ekki verður rýmt nema spáð sé veðri sem reynsla sýnir að hafi mikla snjóflóðahætta í för með sér.
- III. Reitir þar sem mjög stór flóð, svonefnd aftakaflóð, eru hugsanleg við verstu aðstæður. Ritaðar heimildir þurfa ekki að geta um snjóflóð á eða í grennd við viðkomandi reit. Reitirnir verða einungis rýmdir þegar ætla má af veðurspá og öðrum vísbendingum að mjög mikill snjór hlaðist upp í aftakaveðri eða við sérlega óhagstæð skilyrði í hlífðinni ofan við reitina. Á stigi III verða einnig rýmdir reitir þar sem snjóflóðahætta er talin geta skapast við mjög ólíklegar aðstæður þó ekki sé um eiginleg aftakaflóð að ræða. Víðast mun líða áratugur eða margir áratugir milli þess sem rýma þarf húsnæði á reitum á stigi III. Neðri mörk rýmingarreitna á stigi III falla í flestum tilvikum saman við hættumatslínu, þ.e. neðri mörk hættusvæða A skv. hættumati. Þó kemur fyrir í undantekningartilvikum að rýming á stigi III nái út fyrir hættusvæði A þar sem snjóflóðahætta er lítil og til rýmingar kemur við aðstæður sem taldar eru mjög ólíklegar í hættumati.

Neðan varnarsvæðis sem uppfylla hönnunarviðmið kemur ekki til rýmingar reita á stigi I, en ákveða þarf í ljósi endurskoðað hættumats hvort tilefni er til rýmingar reita á stigi II eða III. Eðlilegast er í ljósi þess sem að framan greinir að rýming á stigi III undir varnarsvæðum nái til alls hættusvæðis A eins og það er skilgreint í endurskoðuðu hættumati. Við algerar undantekningaraðstæður kemur rýming stærra svæðis til greina, t.d. ef fyrri flóð hafa hlaðið snjó að varnargörðum og keilum eða ef upptakastöðviki eru komin á kaf og hríðarveður og skafrenningur halda áfram þannig að aðstæður versna enn. Í slíku tilfelli kemur rýming á upprunalegu hættusvæði fyrir tilkomu varnarsvæðis til greina, en fyrri hættusvæði eru sýnd á endurskoðuðu hættumatskorti af þessari ástæðu.

Rétt er í varúðarskyni að gera ráð fyrir rýmingu á stigi II í byggð næst undir varnarsvæðum þar sem veruleg hætta er talin á yfirflæði iðufalds eða hluta þetta kjarnans, og að í hættumatsskýrslu sé gefin umsögn um umfang rýmingar sem unnt er að ganga út frá við endurskoðun

rýmingaráætlunar. Víðast er miðað við að slík rýming nái til efstu einnar eða tveggja húsaraða en nánari útfærsla ræðst af staðbundnum aðstæðum. Í einhverju tilvikum getur rýmingaráætlun miðast við að efstu hús á rýmingarreit séu rýmd en íbúar neðar á reitnum varaðir við og beðnir að dvelja ekki í herbergjum með gluggum og dyraopum sem snúa upp í hlíðina, en slíkar öryggisráðstafanir eru viðhafðar víða í Alpalöndum. Þar sem þetta er talið koma til greina er þess getið í hættumatsskýrslu.

Undir Traðarhyrnu er talin nokkur hætta á yfirflæði iðufalds, einkum undir Traðargili og Ytragili, en síður undir Ystagili. Undir Traðargili og Ytragili er rétt að skilgreina rýmingarsvæði á stigi II sem nær til efstu tveggja húsaraða undir stóra varnargarðinum. Þar yrði miðað við að efstu hús á reitnum yrðu yfirgefin þegar hætta er talin skapast en íbúar húsa neðar á rýmingarreitnum beðnir að dvelja ekki í herbergjum með gluggum og dyraopum sem snúa upp í hlíðina.

Undir Ufsum er talin minni hætta á yfirflæði iðufalds en þar er nokkur hætta á yfirflæði þetta kjarnans vegna þess að garðurinn uppfyllir ekki hönnunarforsendur. Þar er rétt að skilgreina rýmingarreit á stigi II sem nær til efstu tveggja húsaraða undir varnargarðinum, sem eru við og ofan við B-línu. Eins og undir Giljunum, væri miðað við að efstu hús á reitnum yrðu yfirgefin þegar hætta er talin skapast en íbúar húsa neðar á reitnum beðnir að dvelja ekki í herbergjum með gluggum og dyraopum sem snúa upp í hlíðina. Snjóflóðasagan gefur til kynna að mun ólíklegra sé að hætta skapist undir Ufsum en innar í bænum. Það er því rökrétt að mun sjaldnar yrði gripið til rýmingar í byggðinni undir Ufsum en á rýmingarreitnum undir Giljunum innar í bænum.

Óvissa

Óvissa í endurskoðaða hættumatinu neðan leiðigarðsins er talin á bilinu 1–2 eins og víðast fyrir svæði neðan varnarvirkja.

6 Niðurstaða

Byggðin undir Traðarhyrnu í Bolungarvík hefur verið varin með byggingu þvergarða og keilna, sem draga mikið úr snjóflóðahættu. Ofanflóðahættumat hefur verið endurskoðað að teknu tilliti til áhrifa varnarvirkjanna. Hættumatslína C færist alfarið upp fyrir byggðina skv. endurskoðaða matinu. Hættumatslína B færist 200–225 m nær fjallinu í innri hluta byggðarinnar neðan stóra varnargarðsins undir Traðargili og Ytragili og um ca. 75 m nær hlíðinni utar í byggðinni neðan minni varnargarðsins undir Ufsum. Þrjú íbúðarhús á hvoru svæði eru á hættusvæði B skv. endurskoðaða matinu. A-lína var færð ofar þannig að A-svæði í endurskoðaða hættumatinu nær u.þ.b. til C-svæðis skv. fyrra mati undir stóra garðinum en u.þ.b. til B-svæðis skv. fyrra mati undir minni garðinum. Alls eru ? íbúðarhús og ? aðrar byggingar á A-svæði endurskoðaða matsins.

Talin er nokkur hætta á yfirflæði iðufalds af völdum snjóflóða úr Traðarhyrnu, einkum undir Traðargili og Ytragili en síður utar í bænum undir Ufsum. Einnig reiknast ákveðin hætta á flæði hins þetta kjarna hönnunarflóðs yfir minni varnargarðinn undir Ufsum en þar var ekki pláss til þess að reisa garð í fullri hæð. Gert er ráð fyrir að við aftakaðstæður verði í öryggisskyni viðhafður ákveðinn rýmingarviðbúnaður í byggðinni undir Traðargili, Ytragili og Ystagili, og að rýmingaráætlun fyrir Bolungarvík verði uppfærð í framhaldi af staðfestingu endurskoðaða hættumatsins. Skilgreindir verði rýmingarreitir á svokölluðu stigi II sem ná til efstu tveggja húsaraða undir varnargörðunum. Rýming þessara reita feli í sér að efstu hús yrðu yfirgefin þegar hætta er talin skapast en íbúar húsa neðar á reitunum beðnir að dvelja ekki í herbergjum með gluggum og dyraopum sem snúa upp í hlíðina. Jafnframt verði gætt varúðar í sambandi við umferð að og frá húsum á reitunum. Rýmingarreitir á stigi III, sem til greina kemur að rýma undir mjög sjaldgæfum aftakaðstæðum, nái til alls hættusvæðis A eins og það er skilgreint í endurskoðuðu hættumati.

Fræðilegur skilningur á áhrifum varnargarða og keilna á snjóflóð er takmarkaður og ýmsum vandkvæðum er bundið að meta áhrif þeirra á áhættu fólks í byggð neðan varnarvirkja. Í sumum löndum Evrópu er hættumati neðan varnarvirkja ekki breytt eftir byggingu þeirra og takmarkanir á nýtingu landsvæða neðan varnarvirkja standa því óbreyttar eftir að varnir hafa verið reistar. Hér á landi á skv. reglugerð um hættumat að leggja mat á áhrif varnarvirkja til minnkunar áhættu og breyta legu hættumatslína í samræmi við það. Slíkt mat verður óhjákvæmilega mjög óvísst vegna fyrrnefndra takmarkana á skilningi á áhrifum varnarvirkja á flæði snjóflóða, þó framfarir hafi orðið í líkanreikningum af flæði snjóflóða á varnargarða og aðrar fyrirstöður á síðustu árum eins og að framan er rætt. Hættu af völdum yfirflæðis hraðfara iðufalds og kófs er jafnframt erfitt að meta eins og einnig er rætt að framan. Hættumat neðan varnarvirkja byggist að talsverðu leyti á huglægu mati sérfræðinga sem það vinna, en matið er einnig byggt á tölfræðilegum og eðlisfræðilegum reikningum. Þeir sem nota hættumat undir varnarvirkjum við skipulagsgerð eða önnur störf í viðkomandi byggðarlögum þurfa að vera meðvitaðir um þessa óhjákvæmilegu óvissu í hættumatinu. Sveitarfélögum ber skv. reglugerð um hættumat að „stýra skipulagsgerð og þróun byggðar með tilliti til ofanflóðahættu“ á svæðum sem varin hafa verið með varnarvirkjum. Það felur m.a. í sér að nýta land á hættusvæðum undir varnarvirkjum sem mest undir aðra starfsemi en frekari íbúðarbyggð.

7 Heimildir

- Barker, T., & J. M. N. T. Gray (2017). Partial regularisation of the incompressible $\mu(I)$ -rheology for granular flow. *Journal of Fluid Mechanics*, **828**, 5–32, doi: 10.1017/jfm.2017.428.
- Darri Kristmundsson & Haukur Elvar Hafsteinsson (2022). *Simulating the impact of the fluidized region of an avalanche on a stationary vehicle*. Vatnaskil, minnisblað dags. 2022-08-31, nr. 22.11.
- Efla og Landmótun (2009). *Snjóflóðavarnir í Bolungarvík – framhald. Möguleikar á vörnum austan núverandi garðs*. Reykjavík, Efla og Landmótun, minnisbl. dags. 15. janúar 2009.
- Efla o.fl. (2017). *Ástandsmat varnargarða*. Reykjavík, Efla, Mannvit og Verkís, skýrsla dags. 19. janúar 2017.
- FSR (2016). *Snjóflóðavarnir Bolungarvík. Skilamat*. Reykjavík, Framkvæmdasýsla ríkisins, skýrsla dags. í desember 2016.
- Gísli Steinn Pétursson, Haukur Elvar Hafsteinsson & Sveinn Óli Pálmarsson (2019). Analyzing and mitigating the impact of avalanche protection structures on their local wind climate. Í *International Symposium on Mitigation Measures against Snow Avalanches and Other Rapid Gravity Mass Flows. Siglufjörður, Iceland, April 3–5, 2019 (ritstj. Tómas Jóhannesson o.fl.)*. Reykjavík, Verkfræðingafélag Íslands.
- Greenshields, C. (2021). OpenFOAM v9 User Guide, The OpenFOAM Foundation, London, UK, <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v9>.
- Halldór Björnsson (2002). *Veður í aðdraganda snjóflóðahrina á norðanverðum Vestfjörðum*. Veðurstofa Íslands, greinarg. 02019.
- Hnit og NGI (1999). *Bolungarvík. Traðarhyrna. Mat á snjóflóðahættu og frumhönnun varnarvirkja. Áfangaskýrsla*. Reykjavík, Verkfræðistofan Hnit og Norges Geotekniske Institutt, skýrsla 69-80-SK-01.
- Hnit (2022). *Snjótæknileg athugun á hugmyndum vegna vindvarna. Snjóflóðavarnir Bolungarvík*. Reykjavík, Verkfræðistofan Hnit, skýrsla dags. í maí 2022.
- Hættumatsnefnd Bolungarvíkur (2003). *Mat á hættu vegna ofanflóða í Bolungarvík. Greinargerð með hættumatskortu*. Reykjavík, 9 bls.
- Issler, D., P. Gauer, M. Schaer & S. Keller (2020). Inferences on mixed snow avalanches from field observations. *Geosciences*, **10**, 2, doi: 10.3390/geosciences10010002.
- Jop, P., Y. Forterre & O. Pouliquen (2006). A constitutive law for dense granular flows. *Nature*, **441**, 727–730, doi: 10.1038/nature04801.
- Kristján Ágústsson, Tómas Jóhannesson, Siegfried Sauermoser & Þorsteinn Arnalds (2002). *Hazard zoning for Bolungarvík*. Veðurstofa Íslands, greinarg. G02031.
- Kristín Martha Hákonardóttir (2022a). *Ofanflóðavarnir Flateyri – Flóðin 2020 – Viðtöl við íbúa húsa við Ólafstún 14, 9 og 3 og hafnarvörð*. Verkís, minnisblað dags. 2022-01-04, nr. 137172.
- Kristín Martha Hákonardóttir (2022b). *Flateyri – Rannsóknir á yfirflæði – Iðuflaldur og mælingar og túlkun á SLF*. Verkís, minnisblað dags. 2022-01-05, nr. 192516.
- Kristín Martha Hákonardóttir, Árni Kristjánsson & Gunnlaugur Pétursson (2022c). *Ofanflóðavarnir á Flateyri – Flóðin 2020 – Bakreiknaður þrýstingur á mannvirki frá iðufaldi í snjóflóðum á Flateyri 2020*. Verkís, minnisblað dags. 2022-06-13, nr. 271811.
- Kristín Martha Hákonardóttir (2022d). *Ofanflóðavarnir á Flateyri – Frumathugun, endurskoðun 2020 – Tillaga að hættumati með tilkomu endurbættra varna á Flateyri*. Verkís, minnisblað dags. 2022-12-30, nr. 314981.

- Kristján Jónasson, Sven Þ. Sigurðsson & Þorsteinn Arnalds (1999). *Estimation of Avalanche Risk*. Veðurstofa Íslands, rit 99001.
- NV (2002). *Snjóflóðavarnir í Bolungarvík – Traðarhyrna. Mat á umhverfisáhrifum*. Bolungarvík, Náttúrustofan Vestfjarðar, skýrsla NV-1-02.
- Orion, VA og NGI (1999). *Bolungarvík. Traðarhyrna. Mat á snjóflóðahættu og frumhönnun varnarvirkja. Áfangaskýrsla 2*. Reykjavík, Orion ráðgjöf, Verkfræðistofa Austurlands og Norges Geotekniske Institutt, skýrsla BOL0199SK1/VA9913.
- Orion, VA og NGI (2001). *Bolungarvík. Traðarhyrna. Mat á snjóflóðahættu og frumhönnun varnarvirkja. Áfangaskýrsla 3*. Reykjavík, Orion ráðgjöf, Verkfræðistofa Austurlands og Norges Geotekniske Institutt, skýrsla BOL0100SK1.
- Orion (2005). *Bolungarvík. Snjóflóðavarnir. Hugleiðingar um varnarkosti og breytingar á þeim*. Orion ráðgjöf, minnisbl. dags. 21. júní 2005.
- Orion (2006). *Bolungarvík. Snjóflóðavarnir. Yfirferð á útfærslu Línuhönnunar á snjóflóðavarnarmannvirkjum [í] Bolungarvík*. Orion ráðgjöf, minnisbl. dags. 20. október 2006.
- Orion (2010a). *Snjóflóðavarnir í Bolungarvík. Verkefnislýsing og forsendur snjótæknilegs mats á fyrirliggjandi varnartillögu fyrir eystri hluta byggðar í Bolungarvík*. Orion ráðgjöf, minnisbl. ORION-2010-BOL0901-MI02, dags. 18.1.2010.
- Orion (2010b). *Snjóflóðavarnir í Bolungarvík. Snjótæknilegt mat á fyrirliggjandi varnartillögu fyrir eystri hluta byggðar í Bolungarvík*. Orion ráðgjöf, minnisbl. ORION-2010-BOL0901-MI03, dags. 8.2.2010.
- Óliver Hilmarsson, Tómas Jóhannesson & Harpa Grímsdóttir (2020). *Snjóflóðin úr Skollahvilft og Innra-Bæjargili 14. janúar 2020*. Veðurstofa Íslands, skýrsla 2020-010.
- Ragnar Lárusson & Haukur Elvar Hafsteinsson (2021). *Vehicle damage and transport and possible shock wave formation in the Innra-Bæjargil ravine avalanche in Flateyri in January 2020*. Vatnaskil, minnisblað dags. 2021-12-22, nr. 21.42.
- Sampl, P., & M. Granig (2009). Avalanche Simulation with SAMOS-AT. *International Snow Science Workshop, Davos 2009, Proceedings*, 519–523.
- Sovilla, B., J. N. McElwaine & M. Y. Louge (2015). The structure of powder snow avalanches. *Comptes Rendus Physique*, **16**(1), 97–104, doi: 10.1016/j.crhy.2014.11.005
- Sovilla, B., J. N. McElwaine & A. Köhler (2018). The intermittency regions of powder snow avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth surface*, **123**, 2525–2545, doi: 10.1029/2018JF004678.
- Tómas Jóhannesson, Þorsteinn Arnalds & Leah Tracy (2001). *Results of the 2D avalanche model SAMOS for Bolungarvík and Neskaupstaður*. Veðurstofa Íslands, greinarg. 01011.
- Tómas Jóhannesson (2002). *Áhrif varnarvirkja í Bolungarvík á legu hættumatslína*. Veðurstofa Íslands, minnisbl. ÚR-T6J-2002-04.
- Tómas Jóhannesson (2010). *Áhrif varnarvirkja í Bolungarvík á legu hættumatslína undir Ufsum*. Veðurstofa Íslands, minnisbl. ÚR-T6J-2010-01.
- Tómas Jóhannesson & Eiríkur Gíslason (2010). *Hættumat neðan varnarvirkja undir Ufsum í Traðarhyrnu við Bolungarvík*. Veðurstofa Íslands, minnisbl. ÚR-T6J-EG-2010-04.
- Tómas Jóhannesson, P. Gauer, P. Issler og K. Lied (ritstj.) (2009). *The design of avalanche protection dams. Recent practical and theoretical developments*. Brussels, Directorate-General for Research, Environment Directorate, European Commission, Rit EUR 23339, 195 bls., doi: 10.2777/12871.
- Tómas Jóhannesson & Magni Hreinn Jónsson (2024). *Túlkun laga og reglugerða varðandi nýt-*

- ingu hættusvæða vegna ofanflóða*, Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 2024-03-14, málsnr. 2024-0093.
- Umhverfissráðuneytið (2000). *Reglugerð nr. 505/2000 um hættumat vegna ofanflóða, flokkun og nýtingu hættusvæða og gerð bráðabirgðahættumats*.
- Umhverfissráðuneytið (2007). *Reglugerð nr. 495/2007 um breytingu á reglugerð um hættumat vegna ofanflóða, flokkun og nýtingu hættusvæða og gerð bráðabirgðahættumats* (eftir þessa breytingu heitir reglugerðin: *Reglugerð um hættumat vegna ofanflóða og flokkun og nýtingu hættusvæða*).
- Vatnaskil (2021). *Snjósöfnun við mótvægisadgerðir til lækkunar vinds nærri ofanflóðavörnum í Bolungarvík*. Reykjavík, Verkfræðistofan Vatnaskil, minnisbl. MB-21.43, 10 bls.
- Vatnaskil (2022). *Bolungarvík. Skjólveggir til mótvægis við vindafarsáhrif ofanflóðagarða*. Reykjavík, Verkfræðistofan Vatnaskil, skýrsla nr. 22.06, 31 bls.
- Verkís (2023). *Snjóflóðavarnir á Flateyri – Endurskoðun frumathugunar*. Verkís, skýrsla 291189.
- VÍ (2002). *Ofanflóð í Bolungarvík*. Veðurstofa Íslands, greinarg. 02037.
- VÍ (2003). *Bolungarvík. Hættumatskort*. Veðurstofa Íslands, kort undirritað af umhverfissráðherra í september 2003.
- VS (2002). *Athugun á líklegri snjósöfnun við fyrirhugaðar snjóflóðavarnir undir Traðarhyrnu í Bolungarvík*. Verkfræðistofa Siglufjarðar, minnisbl. dags. í maí 2002.
- VS (2009). *Athugun á líklegri snjósöfnun við fyrirhugaðar snjóflóðavarnir undir Bólum í Traðarhyrnu í Bolungarvík*. Verkfræðistofa Siglufjarðar, minnisbl. dags. í mars 2009.
- VS (2010a). *Athugun á líklegri snjósöfnun við fyrirhugaðar snjóflóðavarnir undir Bólum í Traðarhyrnu í Bolungarvík. Endurskoðun á skýrslu frá mars 2009, eftir breytingu á garði*. Verkfræðistofa Siglufjarðar, minnisbl. dags. í mars 2010.
- VS (2010b). *Snjósöfnun við garð á Bolungarvík*. Verkfræðistofa Siglufjarðar, minnisbl. dags. 25. mars 2010.
- VS (2010c). *Útreikningur á skriðlengd snjóflóða úr Traðarhyrnu á Bolungarvík. Útreikningur á tveim mismunandi kortgrunnum*. Verkfræðistofa Siglufjarðar, minnisbl. dags. í júní 2010.

I Tæknileg hugtök og skilgreiningar

α -horn: Sjónarhorn frá stöðvunarstað snjóflóðs upp að efri brún upptakasvæðis (sjá mynd 5).

β -horn: Sjónarhorn frá stað í snjóflóðafarvegi þar sem landhalli er 10° upp að efri brún upptakasvæðis (sjá mynd 5).

α/β -líkan: Staðfræðilegt líkan notað til þess að spá fyrir um úthlaups lengd snjóflóða og til þess að færa snjóflóð á milli farvega. Líkanið notar β -horn til þess að spá fyrir um α -horn lengsta skráða snjóflóðs í viðkomandi farvegi og á rætur sínar að rekja til Lied og Bakkehøi (1980). Útgáfa líkansins sem notuð er í þessu hættumati var þróuð af Tómasi Jóhannessyni (1998a, b) og stuðst var við gögn um 45 íslensk snjóflóð. Formúla líkansins er

$$\alpha = 0.85 \cdot \beta, \quad \sigma = 2.2^\circ$$

þar sem σ er staðalfrávik úthlaupshornsins. Snjóflóð með úthlaupshorn $n\sigma$ lægra en útreiknað α -gildi er táknað sem snjóflóð með úthlaups lengd $\alpha - n\sigma$ og $\alpha + n\sigma$ þegar α -hornið er hærra en útreiknaða gildið sem fæst með formúlunni hér að ofan. Takið eftir að α -hornið verður lægra eftir því sem úthlaups lengdin verður meiri þ.a. $\alpha - \sigma$ jafngildir snjóflóði með lengri úthlaups lengd en svarar til úthlaupshornsins α .

PCM-líkan: Einvítt eðlisfræðilíkan notað til þess að líkja eftir flæði snjóflóða. Líkanið hefur tvo stuðla, μ , viðnámsstuðul Coulombs, og M/D -stuðul. Líkanið var þróað af Perla o.fl. (1980).

Open- $\mu(I)$ -líkan: Þrívítt, tveggja fasa eðlisfræðilíkan notað til þess að líkja eftir flæði snjóflóða. Snjóflóðið er hermt sem blanda af kornóttu efni og lofti sem aflagast skv. svokallaðri $\mu(I)$ hnigfræði (rheológíu) (Jop o.fl., 2006; Barker og Gray, 2017). Viðnámslýsing líkansins hefur tvo stuðla, μ_s og μ_d , sem mestu skipta, og nokkra aðra stuðla sem snúa að tölulegri uppsetningu líkansins (Barker og Gray, 2017). Líkanið getur hermt árekstur snjóflóðs við varnargarða og aðrar fyrirstöður betur en hefðbundin snjóflóðalíkon. Það ræður m.a. við að herma snjóflóð sem ferðast í loftköstum eftir slíkan árekstur, og það getur tekið tillit til flókinnar lögunar varnargarða, t.d. þegar einungis hluti efri hliðar varnargarðs er brött eða þegar sveiga er á lögun leiðigarðs. Líkanið var þróað af Alexander H. Jarosch við ThetaFrame Solutions í Austurríki í samvinnu við Veðurstofu Íslands í OpenFOAM / interFOAM straumfræðihugbúnaðarkerfinu (Greenshields, 2021).

Rennslisstig: Úthlaups lengd snjóflóðs, mæld í hektómetrum, sem *flutt* (Sven Sigurðsson o.fl., 1998) hefur verið í *staðalbrekku* með ákveðinni aðferð. Rennslisstig í þessari skýrslu eru fengin með PCM-líkani með stuðlum sem liggja á ákveðnu bili. Snjóflóð með rennslisstig r_0 er táknað sem snjóflóð með $r = r_0$. Aðferð þessi var þróuð af Kristjáni Jónassyni o.fl. (1999).

Tvívíð rennslisstig: Útlína (eða skriðlengd) snjóflóða reiknuð með tvívíðu reiknilíkani. Stuðlar líkansins fyrir rennslisstig r_0 hafa verið valdir þannig að ef samsvarandi snjóflóð er keyrt í farvegi með lögun staðalbrekkunnar þá staðnæmist það í fjarlægðinni $r = r_0$ (mæld í hektómetrum) frá upptökum. Tvívíð rennslisstig sem notuð eru í þessari skýrslu eru reiknuð með SamosAT snjóflóðalíkaninu (Sampl & Granig, 2009). Stuðlar líkansins sem eru breytilegir fyrir mismunandi rennslisstig eru viðnámsstuðullinn, $\mu = \tan \delta$, og snjódýpt

þvert á land, d , á upptakasvæðum í upphafi keyrslu, sjá töflu 3. Aðrir stuðlar eru þeir sömu og ákvarðaðir hafa verið fyrir keyrslu líkansins í Austurríki (Sampl & Granig, 2009) og koma þeir fram í töflu 4.

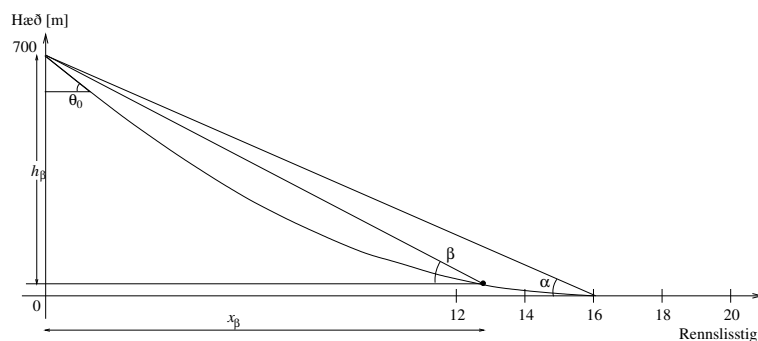
$F_{r_0}(F_{13})$: Mat á tíðni snjóflóða með rennslisstig hærra eða jafnt r_0 . Gildið F_{13} er mest notað, þ.e. tíðni í rennslisstigi $r_0 = 13$.

Tafla 3. Breytilegir stuðlar SamosAT líkansins fyrir mismunandi rennslisstig.

Rennslisstig	μ	d (m)
10	0.250	0.290
11	0.438	0.270
12	0.667	0.240
13	0.938	0.195
14	1.250	0.170
15	1.604	0.135
16	2.000	0.092
17	2.438	0.088
18	2.917	0.080
19	3.438	0.080
20	4.000	0.081

Tafla 4. Fastir stuðlar SamosAT líkansins, sjá Sampl & Granig (2009) þar sem er að finna skýringar á stuðlunum og skilgreiningu hinna mismunandi stærða sem koma við sögu í viðnámsskilgreiningu líkansins.

Stuðull	Gildi	Eining
ρ	300	kg/m^3
τ_0	0	Pa
R_{s0}	0.22	1
K_D	0.43	1
R_D	0.05	m
B_D	4.13	1



Mynd 5. Staðalbrekka. α -hornið er væntigildi úthlaupshorns snjóflóðs samkvæmt α/β -líkani.

II Snjóflóð

Í viðauka þessum er að finna upplýsingar um snjóflóð sem fallið hafa úr hlíðum Traðarhyrnu við Bolungarvík síðan snjóflóðasaga Bolungarvíkur (VÍ, 2002) var tekin saman í tengslum við fyrra hættumat Veðurstofunnar (Kristján Ágústsson o.fl., 2003). Staðsetning snjóflóðanna er sýnd á korti 2. Upplýsingarnar eru úr ofanflóðagagnasafni Veðurstofu Íslands. Númer fremst í færslum eru einkvæm númer viðkomandi snjóflóðs í ofanflóðagagnasafninu.

Númer: 8134 **Tegund:** Þurrt lausasnjóflóð

Staðsetning: Traðargil

Tími: 13.12.2003, aðfaranótt

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 1 **Fylgigögn:** GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 1

Upptök: Upptök ekki greinanleg.

Tunga: Hæð yfir sjó: 95 m

Þykkt: Meðaltal: 0.3 m Mest: 1.2 m

Meðalbreidd: 12 m Lengd: 110 m

Braut: bolu14aa, $\beta = 30.7^\circ$, $\text{rst} = 6.9$.

Veður: 12. des snjóaði í logni 5–8 cm en um kvöldið kvessti af NNA. Fyrir var gamall hafrðu snjór í gilskorningum.

Athugasemdir: Lítið snjóflóð féll úr Traðargili.

— — — — —

Númer: 8136 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Traðargil

Tími: 14.1.2004

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 1 **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 2

Upptök:

Tunga: Hæð yfir sjó: 46 m

Meðalbreidd: 70 m Lengd: 200 m Rúmmál: 4000 m³

Flóðið stöðvaðist við brunnhús ofan við Tröð.

Braut: bolu14aa, $\beta = 30.7^\circ$, $\text{rst} = 9.9$.

Veður: NNA snjókoma.

Athugasemdir: Snjór í tungu var óhreinn.

— — — — —

Númer: 8157 **Tegund:** Snjóflóð

Staðsetning: Innragil.

Tími: 14.04.2004

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson

Lýsing: Stærðarfl.: 2.5

Upptök: Hæð yfir sjó: 450 m

Tunga: Hæð yfir sjó: 100 m
Meðalbreidd: 50 m

Númer: 8173 **Tegund:** Þurrt lausasnjóflóð

Staðsetning: Gilin, Traðarhyrnu.

Tími: 17.1.2005

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 1 **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 2 Lengd: 750 m Mælt úthl.horn (α): 33°

Upptök: Hæð yfir sjó: 550 m Mældur halli (θ): 45°

Orsök: Lausamjöll ofan á ummynduðum snjó.

Tunga: Hæð yfir sjó: 47 m Mældur halli (τ): 20°

Þykkt: Meðaltal: 0.4 m

Meðalbreidd: 175 m Lengd: 135 m Rúmmál: 10000 m³

Flóðið stöðvaðist um 20 m ofan við Dísarland 14.

Braut: bolu15aa, $\beta = 30.8^\circ$, $\text{rst} = 9.1$.

Veður: Þverfjall kl. 13: Vindátt 235°, vindhraði 4 m/sek., frost -7°C og snjókoma. Bolungarvík kl. 13: Vindátt 17°, vindhraði 7 m/sek., frost $-1,6^\circ\text{C}$ og snjókoma. Um hádegið hafði snjóað 30 sm jafnfallið um morguninn í hægum vindi. Fyrir var snjór sem hafði blotnað í miklum hlákum um 14. jan. og frosið aftur að einhverju leyti.

Athugasemdir: Kafsnejór var og erfitt að sjá flóðið.

Punnur, laus snjór sem ekki náði að grafa sig niður í eldri lög. Ekki sást brotstál og hugsanlega var þetta lausasnjóflóð.

Númer: 8175 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Ytragil

Tími: 29.10.2005

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 1 **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** GPS-mæling.
Gryfja.

Lýsing: Stærðarfl.: 2.5

Upptök: Mældur halli (θ): 40°

Orsök: Nýr snjór á hjarni.

Tunga: Mældur halli (τ): 29°

Þykkt: Meðaltal: 0.3 m

Meðalbreidd: 75 m Lengd: 400 m Rúmmál: 9000 m³

115 m frá efstu húsum.

Veður: Það byrjaði að snjó á hádegi miðvikudaginn 26. okt. N 15–20 á Þverfjalli föstudaginn 28. okt. og daginn eftir (29. okt) var 12 m/s meðalvindur og 27 m/s í hviðum á Þverfjalli.

Athugasemdir: Snjóflóð úr Ytragili stöðvaðist rúma 100 m frá efstu húsum.

Númer: 8183 **Tegund:** Vott lausasnjóflóð

Staðsetning: Traðargil

Tími: 20.4.2006, 15–16

Skráning: Útlína: Öruggr **Fylgigögn:** Ljósmynd/ir.

Lýsing: Stærðarfl.: 2.5 Lengd: 670 m Mælt úthl.horn (α): 34°

Upptök: Hæð yfir sjó: 560 m Mældur halli (θ): 48°

Orsök: Sólskin og hækkandi hitastig.

Flóðið virtist hafa byrjað í einum punkti við kletta utan til í gílinu.

Tunga: Hæð yfir sjó: 100 m

Meðalbreidd: 20 m

Stöðvaðist á keilunni.

Braut: bolu14aa, $\beta = 30.7^\circ$, $\text{rst} = 7.2$.

Veður: Sólskin var og hækkandi hitastig eftir eljagang næstu daga þar á undan.

Athugasemdir: Flóðið virtist hafa byrjað í einum punkti og tekið með sér bara nýjasta snjóinn. Í klettum fyrir miðju gílinu náði það að rífa sig niður á hjarnið, bara á þeim stað.

— — — — —

Númer: 7858 **Tegund:** Snjóflóð

Staðsetning: Bollagil. Við skíðalyftu.

Tími: 23.1.2008

Skráning: **Fylgigögn:** Ljósmynd/ir. Gryfja. HG og JH fóru á staðinn.

Heimildir: Yfirlit snjóflóðavaktar. Færsla 72 og 74 úr bloggi vaktar 2007–8.

Lýsing: **Upptök:**

Tunga: Lenti á endamastri og niður að næsta staur fyrir neðan.

Athugasemdir: Snjóflóð féll á skíðalyftuna í Bolungarvík.

— — — — —

Númer: 8819 **Tegund:** Snjóflóð

Staðsetning: Bolungarvík. Ytragil og Ufsir.

Tími: 3.3.2009

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Mæld

Fylgigögn: GPS-mæling. GPS.

Lýsing: Stærðarfl.: 2.5

Upptök: Óljós upptök en greinileg ummerki hátt í Ytragili.

Tunga: Hæð yfir sjó: 40 m

Meðalbreidd: 475 m

Flóðið hefði fallið á 3–4 ystu húsin í Dísarlandi ef ekki væri búið að fjarlægja þau.

Athugasemdir: Útlínur eru óvissar þar sem flóðið var þunnt og laust í sér og hafði fokið burt á köflum.

— — — — —

Númer: 8823 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Ufsir, neðri hluti

Tími: 3.3.2009

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Mæld
Fylgigögn: GPS-mæling. GPS.

Lýsing: Stærðarfl.: 1.5

Upptök:

Tunga: Hæð yfir sjó: 62 m
Stöðvaðist að hluta á Hnjúk.

Athugasemdir: Ummerki um flóðið voru óljós.

— — — — —

Númer: 8817 **Tegund:** Snjóflóð

Staðsetning: Innragil

Tími: 3.3.2009

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Mæld
Fylgigögn: GPS-mæling. GPS.

Lýsing: **Upptök:** Upptök óviss.

Tunga: Hæð yfir sjó: 48 m
Meðalbreidd: 50 m

Athugasemdir: Snjóflóðið lenti á efsta tréstaur sem var notaður sem ljósastaur meðan lyftan var í notkun og var hann fannbarinn í 3 metra hæð frá yfirborði snævar. Snjódýpt við staurinn var 0,8m.s Snjóflóðið var þéttara í sér heldur en hin flóðin í Traðarhyrnunni frá sama tíma.

— — — — —

Númer: 50250 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Traðargil

Tími: 20.12.2011, 11:50

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Ónákvæm
Fylgigögn: Ljósmynd/ir.

Lýsing: Stærðarfl.: 1.5

Upptök: Hæð yfir sjó: 590 m Breidd: 100 m

Tunga: Þykkt: Meðaltal: 0.6 m

Meðalbreidd: 20 m

Stöðvaðist á vegi ofan við snjóflóðakeilur.

Veður: Suðvestan eljaveður.

Athugasemdir: Rétt fyrir kl 12 sýndi snjódýptarmælir í Traðargili 12–15cm skyndilega lækkun á snjódýpt. Sennilega hefur flóðið komið þá.

— — — — —

Númer: 50422 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Traðargil

Tími: 26.1.2012, 00–06

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** Ljósmynd/ir.
GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 2.5

Upptök:

Tunga: Hæð yfir sjó: 80 m

Þykkt: Meðaltal: 30 m Mest: 1.2 m

Meðalbreidd: 140 m

stöðvaðist á snjóvarnar keilum.

Veður: sjá hrinulýsingu.

Athugasemdir: Snjóflóð féll úr Traðargili í Bolungarvík.

— — — — —

Númer: 50473 **Tegund:** Snjóflóð

Staðsetning: Traðargil

Tími: 20.2.2012, 10:15:00

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Ónákvæm

Fylgigögn: Ljósmynd/ir. útlína.

Tjón: Mælir sm4 eyðilagðist í flóðinu. Kapall mælisins hafði slitnað, líklega vegna skriðs í snjónum og svo snjóflóðsins en hann var innan upptakasvæðisins.

Lýsing: Stærðarfl.: 1.5 Lengd: 700 m

Upptök: Hæð yfir sjó: 570 m Breidd: 30 m

Brot: Mest þykkt: 0.5 (± 0.1) m

Tunga: Hæð yfir sjó: 94 m

Þykkt: Meðaltal: 0.5 m

Meðalbreidd: 17 m

Athugasemdir: Um 20cm lækkun sást á bergmálsmæli í Traðargili.

— — — — —

Númer: 50919 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Innragil

Tími: 27–30.12.2012, 00:00:00

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** Ljósmynd/ir. GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 2.5 Lengd: 660 m

Upptök: Hæð yfir sjó: 520 m Breidd: 65 m

brotstál sést í Breiðhillu.

Tunga: Hæð yfir sjó: 75 m

Þykkt: Meðaltal: 0.3 m Mest: 1.2 m

Meðalbreidd: 55 m Lengd: 90 m

Athugasemdir: 30.12. sást tunga niður á milli tveggja innstu snjóflóðakeila og hálfa leið þaðan niður í snjóflóða garðinn. (viðbót) sú tunga er úr Traðargili.

— — — — —

Númer: 51007 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Traðargil

Tími: 29/30.12.2012, 00:00:00

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** Ljósmynd/ir.
GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 3 Lengd: 840 m

Upptök: Hæð yfir sjó: 590 m Breidd: 45 m

Brot: Mest þykkt: 1 (± 0.5) m

Brotstál sást rétt neðan við brún en var ekki hægt að meta þykkt.

Tunga: Hæð yfir sjó: 58 m

Þykkt: Meðaltal: 0.5 m Mest: 4.5 m

Meðalbreidd: 70 m Lengd: 100 m Rúmmál: 9500 m³

Flóðið fór á milli keilna 1 og 2 og stöðvaðist í brekkunni skammt neðan við keilurnar.

Athugasemdir: Snjóflóð féll úr Traðargili og fór yfir næst innstu snjóflóðakeiluna (keilu 2) og milli keilna 1 og 2.

— — — — —

Númer: 51008 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Bollagil

Tími: 29/30.12.2012, 00:00:00

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** Ljósmynd/ir.
GPS-mæling.

Tjón: Lítilsháttar tjón á girðingum.

Lýsing: Stærðarfl.: 3.5 Lengd: 970 m

Upptök: Hæð yfir sjó: 450 m Breidd: 215 m

Ekki sást brotstál með neinni vissu.

Tunga: Hæð yfir sjó: 50 m

Þykkt: Meðaltal: 0.7 m Mest: 1.8 m

Meðalbreidd: 240 m Lengd: 390 m

Aðaltungan stöðvaðist 115 m ofan Meirihlíðarhúsa og minni tunga fór innan við skíðalyftu.

Athugasemdir: Snjóflóð féll úr Bollagili. Aðaltungan stöðvaðist 115 m ofan Meirihlíðarhúsa og minni tunga fór innan við skíðalyftu. Lítilsháttar tjón varð á girðingum.

— — — — —

Númer: 51481 **Tegund:** Vott flekahlaup

Staðsetning: Traðargil

Tími: 8.5.2013, 15:00:00

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Teg. skýrslu:** 10 **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** Ljósmynd/ir.
GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 1.5 Lengd: 185 m

Upptök: Hæð yfir sjó: 230 m Breidd: 50 m Mældur halli (θ): 33°

Brot: Mest þykkt: 0.6 (nákvæm þykkt) m

Brotstál náði niður í þunnt gamalt lag 8–10cm undir nýja snjónum. Upptök innan og ofan við stiku nr 7.

Tunga: Hæð yfir sjó: 115 m
Pykkt: Meðaltal: 0.6 m Mest: 1.5 m
Meðalbreidd: 20 m Lengd: 120 m

Veður: sól og logn.

Athugasemdir: Snjóflóð féll í Traðargili.

— — — — —

Númer: 52576 **Tegund:** Vott flekahlaup

Staðsetning: Traðargil

Tími: 27/28.1.2015

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 1.5

Upptök:

Athugasemdir: Lítið vott flekaflóð féll í Traðargili.

— — — — —

Númer: 52577 **Tegund:** Vott flekahlaup

Staðsetning: Innragil

Tími: 27/28.1.2015

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 1

Upptök: Orsök: Sólbráð.

Athugasemdir: Sólbráðarspýja féll í Innragili.

— — — — —

Númer: 55596 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Ytragil

Tími: 11.2.2020

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** Ljósmynd/ir. GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 2.5 Lengd: 760 m Mælt úthl.horn (α): 34°

Upptök: Hæð yfir sjó: 600 m Breidd: 50 m Mældur halli (θ): 38°

Tunga: Hæð yfir sjó: 90 m Mældur halli (τ): 19°

Meðalbreidd: 110 m Lengd: 100 m

Féll og skvettist yfir keilu í snjóflóðavörnum fyrir ofan Bolungarvík.

Athugasemdir: Þurrt flekalfóð féll í Traðargili fyrir ofan Bolungarvík. Flóðið nam staðar á snjóflóðavörnum og skvettist yfir eina keiluna.

— — — — —

Númer: 55914 **Tegund:** Þurrt flekahlaup

Staðsetning: Innragil

Tími: 27.3.2020

Skýrslu skráði: Jóhann Hannibalsson **Útlína:** Mæld **Fylgigögn:** GPS-mæling.

Lýsing: Stærðarfl.: 2.5 Lengd: 680 m Mælt úthl.horn (α): 32.3°

Upptök: Hæð yfir sjó: 500 m Breidd: 80 m

Tunga: Hæð yfir sjó: 70 m

Meðalbreidd: 100 m Lengd: 360 m

Athugasemdir: Brotstál e.t.v. um m² þykkt, annars þunnt og dreifist um stórt svæði.

III Kort

Kort 1. Yfirlitskort af Bolungarvík með helstu örnefnum og mörkum svæðis þar sem hættumat Veðurstofunnar frá 2003 er nú endurskoðað eftir byggingu varnarvirkja (A4). Utan þessa svæðis er hættumatið frá 2003 óbreytt. Upptakasvæði sem afmörkuð voru í fyrra hættumati Veðurstofunnar (Kristján Ágústsson o.fl., 2002) eru sýnd með númeruðum flákum. Kortið sýnir einnig áhættulínur fyrra hættumats Veðurstofunnar.

Kort 2. Útlínur skráðra snjóflóða úr Traðarhyrnu við Bolungarvík (A4). Snjóflóð sem fallið hafa síðan ofanflóðasaga Bolungarvíkur var gefin út (VÍ, 2002) eru dregin með rauðum lit til aðgreiningar en eldri flóð með bláum. Upptakasvæði sem afmörkuð voru í fyrra hættumati Veðurstofunnar (Kristján Ágústsson o.fl., 2002) eru sýnd með númeruðum flákum.

Kort 3. Tvívíð rennslisstig á bilinu 13–19 reiknuð með SamosAT snjóflóðalíkaninu fyrir upptakasvæði 1, 2, 3, 6 og 7 í Traðarhyrnu. Kortið sýnir einnig fyrra hættumat Veðurstofunnar (Kristján Ágústsson o.fl., 2002) til samanburðar við hinar líkanreiknuðu tungur snjóflóðanna.

Kort 4. Lokadýpt í tungum snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknuð með $\text{Open-}\mu(I)$ snjóflóðalíkaninu á landi án varnargarða og keilna. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að þau nema u.þ.b. við B-línu hættumats (blá lína á korti) fyrir tilkomu varna.

Kort 5. Hámarksyfirborðshraði flóða úr Traðarhyrnu reiknaður með $\text{Open-}\mu(I)$ snjóflóðalíkaninu á landi án varnargarða og keilna. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að þau nema u.þ.b. við B-línu hættumats (blá lína á korti) fyrir tilkomu varna.

Kort 6. Hámarksdýpt flóða úr Traðarhyrnu reiknuð með $\text{Open-}\mu(I)$ snjóflóðalíkaninu á landi án varnargarða og keilna. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að þau nema u.þ.b. við B-línu hættumats (blá lína á korti) fyrir tilkomu varna.

Kort 7. Lokadýpt í tungum snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknuð með $\text{Open-}\mu(I)$ snjóflóðalíkaninu á landi með varnargörðum og keilum. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að á landi án garða og keilna ná þau u.þ.b. að B-línu hættumats (blá lína á korti) fyrir tilkomu varna.

Kort 8. Hámarksástreymisþrýstingur sem svarar til yfirborðshraða snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknaður með $\text{Open-}\mu(I)$ snjóflóðalíkaninu á landi með varnargörðum og keilum. Kortið sýnir einnig fyrra hættumat Veðurstofunnar frá 2003 og hið endurskoðaða hættumat til samanburðar (sjá skýringar á korti 9). Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að á landi án varnargarða og keilna ná þau u.þ.b. að B-línu hættumats fyrir tilkomu varna.

Kort 9. Endurskoðað hættumat fyrir Bolungarvík eftir byggingu varnarvirkja (A4). Kortið sýnir bæði fyrra hættumat frá 2003 (slitnar línur) og endurskoðaða matið (heildregnar línur).

Myndband 1. $\text{Open-}\mu(I)$ líkankeyrsla á snjóflóðum úr upptakasvæðum í innanverðri Traðarhyrnu á landlíkani án varnargarða og keilna¹. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að þau ná u.þ.b. að B-línu hættumats fyrir tilkomu varnarvirkja. Niðurhalsslóð myndbandsins er

¹ Athugið að á mörgum tölvum þarf að hlaða myndbandinu niður fyrst og spila það síðan með því að smella á mp4-skrána. Best er að nota spilarann VLC.

„<https://www.vedur.is/gogn/snjoflod/haettumat/bo/-bolungarvik-open-muI-RA1a2a3-bline-anim-landscape-vel.mp4>“.

Myndband 2. Open- $\mu(I)$ líkankeyrsla á snjóflóðum úr upptakasvæðum í innanverðri Traðarhyrnu á landlíkani með varnargörðum og keilum og 3.5 m snjó á jörðu ofan þvergarðsins þegar flóðin falla¹. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að á landi án varnarvirkja ná þau u.þ.b. að B-línu hættumats fyrir tilkomu varnarvirkjanna. Niðurhalsslóð myndbandsins er

„<https://www.vedur.is/gogn/snjoflod/haettumat/bo/-bolungarvik-open-muI-RA1a2a3-dam-anim-landscape-splash.mp4>“.

Myndband 3. Open- $\mu(I)$ líkankeyrsla á snjóflóðum úr upptakasvæðum í utanverðri Traðarhyrnu á landlíkani með varnargarði og 3.5 m snjó á jörðu ofan þvergarðsins þegar flóðin falla¹. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að á landi án varnarvirkja ná þau u.þ.b. að B-línu hættumats fyrir tilkomu varnarvirkjanna. Niðurhalsslóð myndbandsins er

„<https://www.vedur.is/gogn/snjoflod/haettumat/bo/-bolungarvik-open-muI-RA6a7-dam-anim-landscape.mp4>“.

Myndband 4. Open- $\mu(I)$ líkankeyrsla á snjóflóðum úr upptakasvæðum í utanverðri Traðarhyrnu á landlíkani með varnargarði og snjólausu landi þegar flóðin falla¹. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að á landi án varnarvirkja ná þau u.þ.b. að B-línu hættumats fyrir tilkomu varnarvirkjanna. Niðurhalsslóð myndbandsins er

„<https://www.vedur.is/gogn/snjoflod/haettumat/bo/-bolungarvik-open-muI-RA6a7-dam-no-snow-anim-landscape.mp4>“.

Kort 1

Yfirlitskort, hættumetið svæði

Upptakasvæði

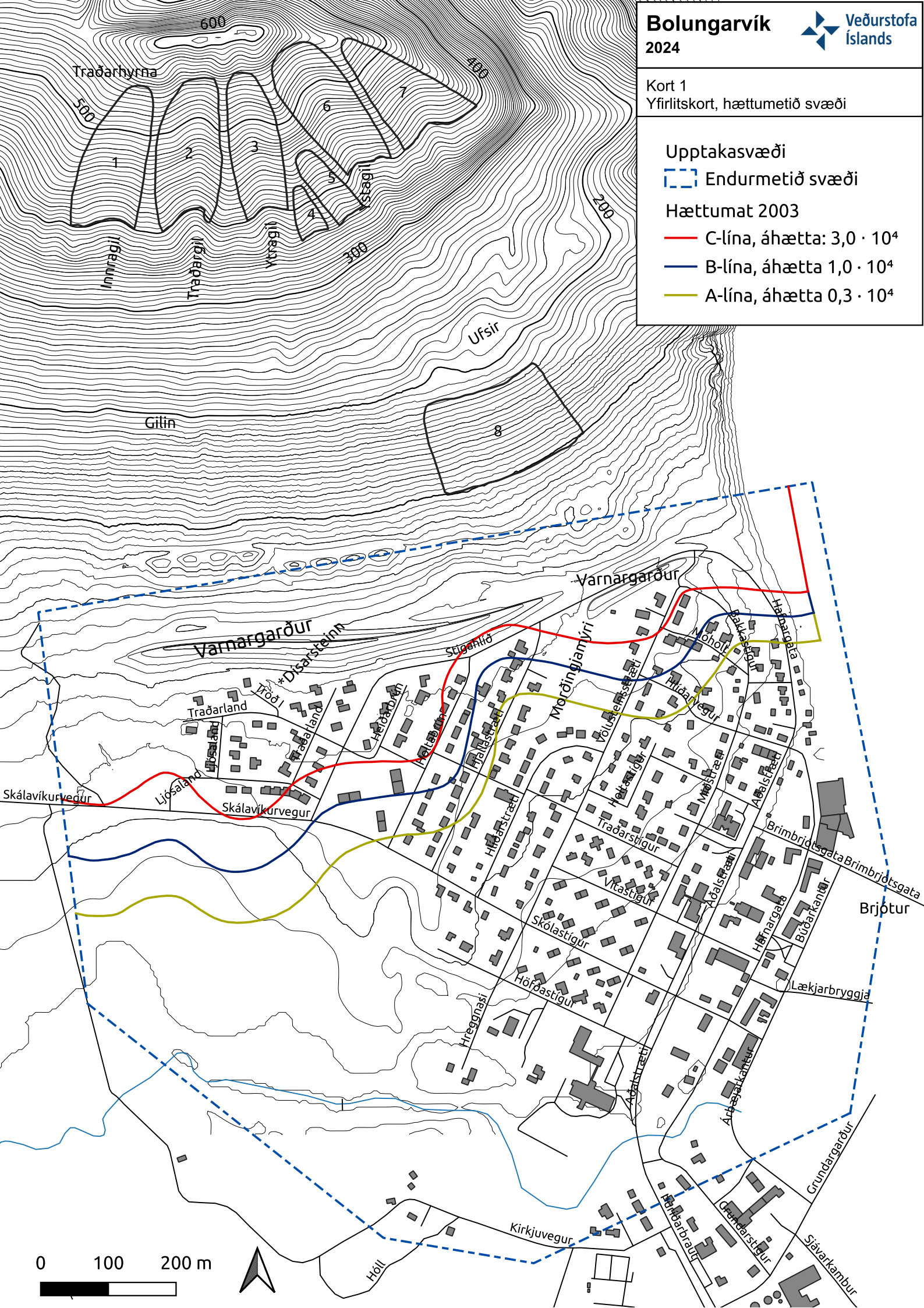
Endurmetið svæði

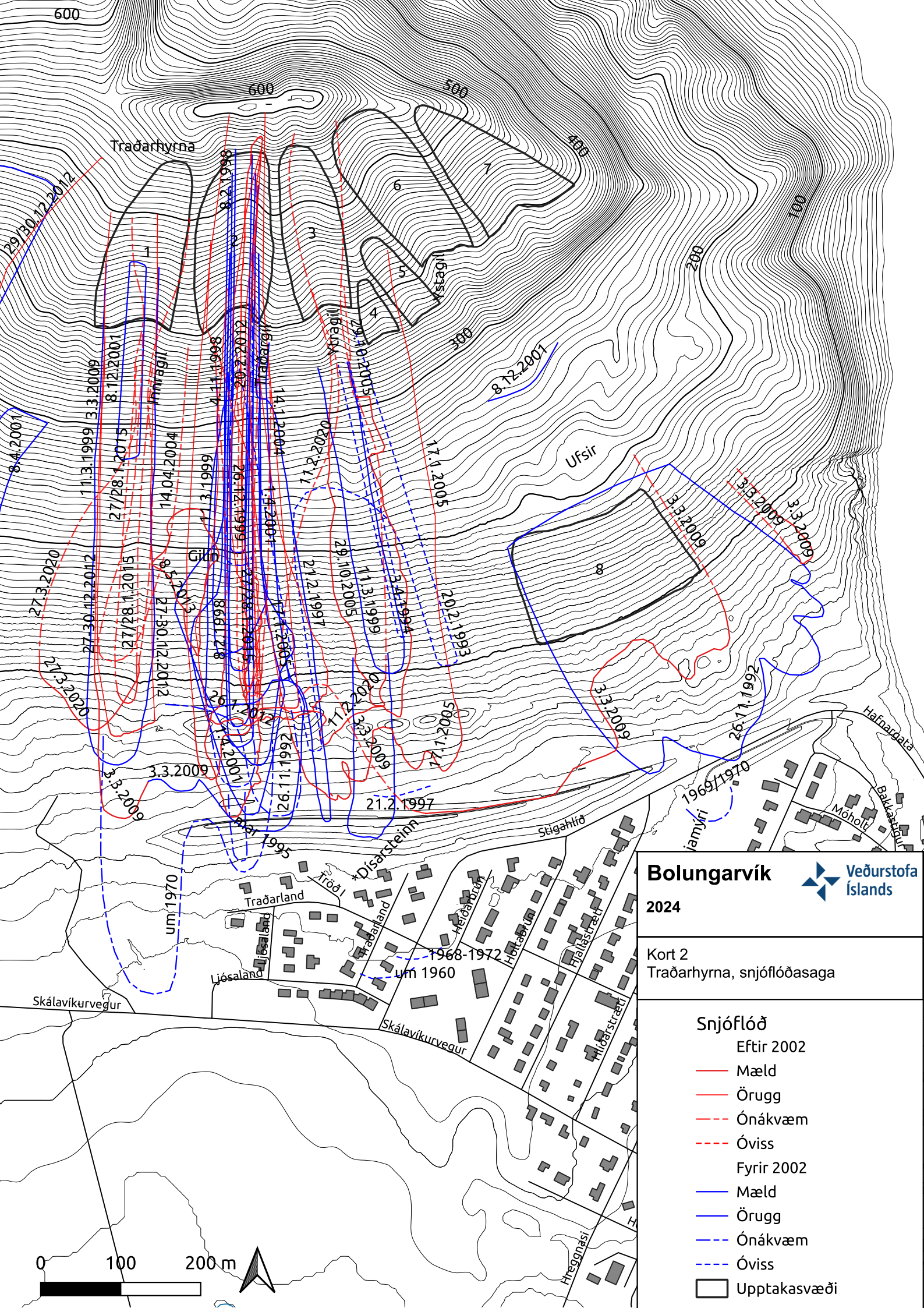
Hættumat 2003

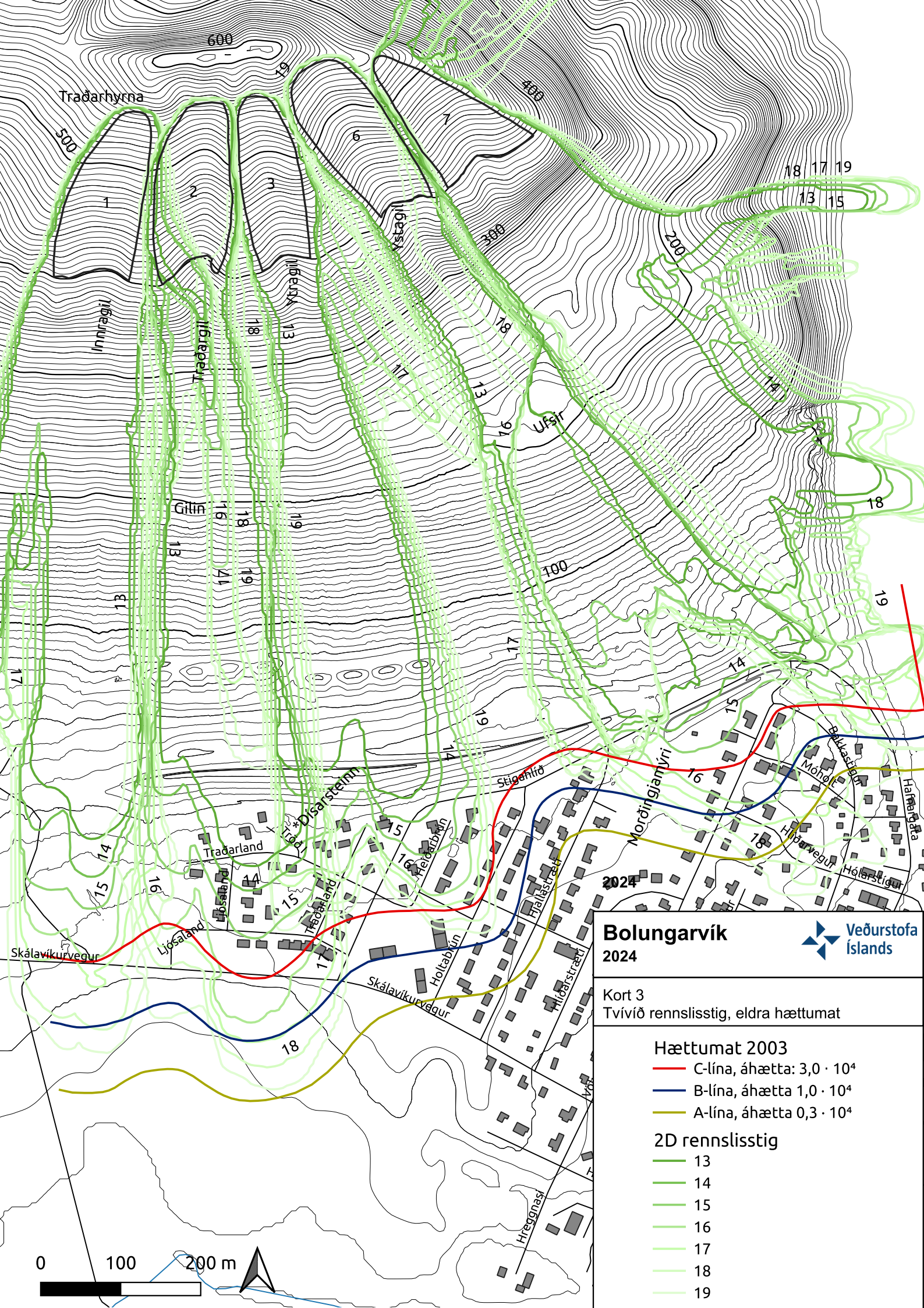
C-lína, áhætta: $3,0 \cdot 10^4$

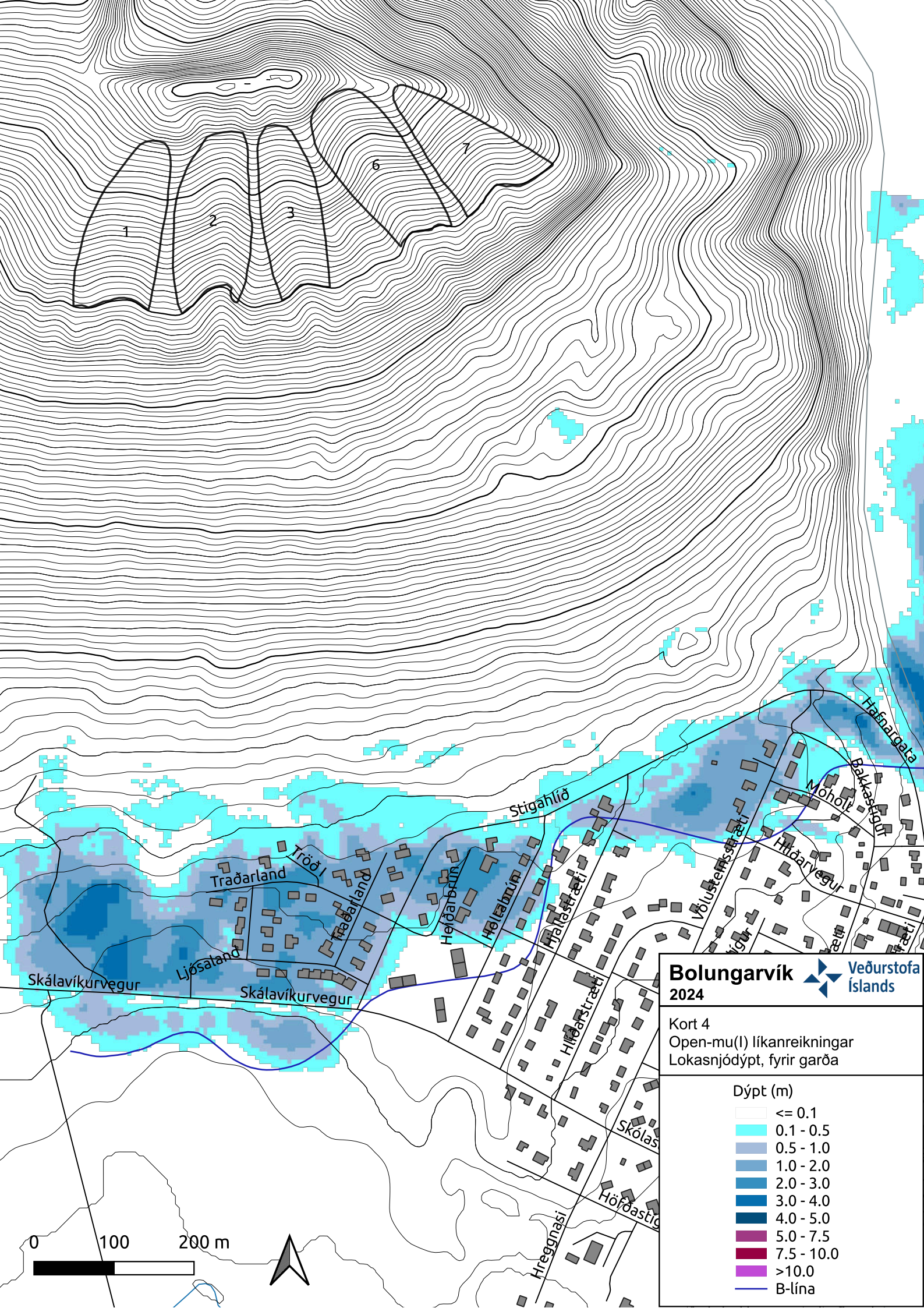
B-lína, áhætta: $1,0 \cdot 10^4$

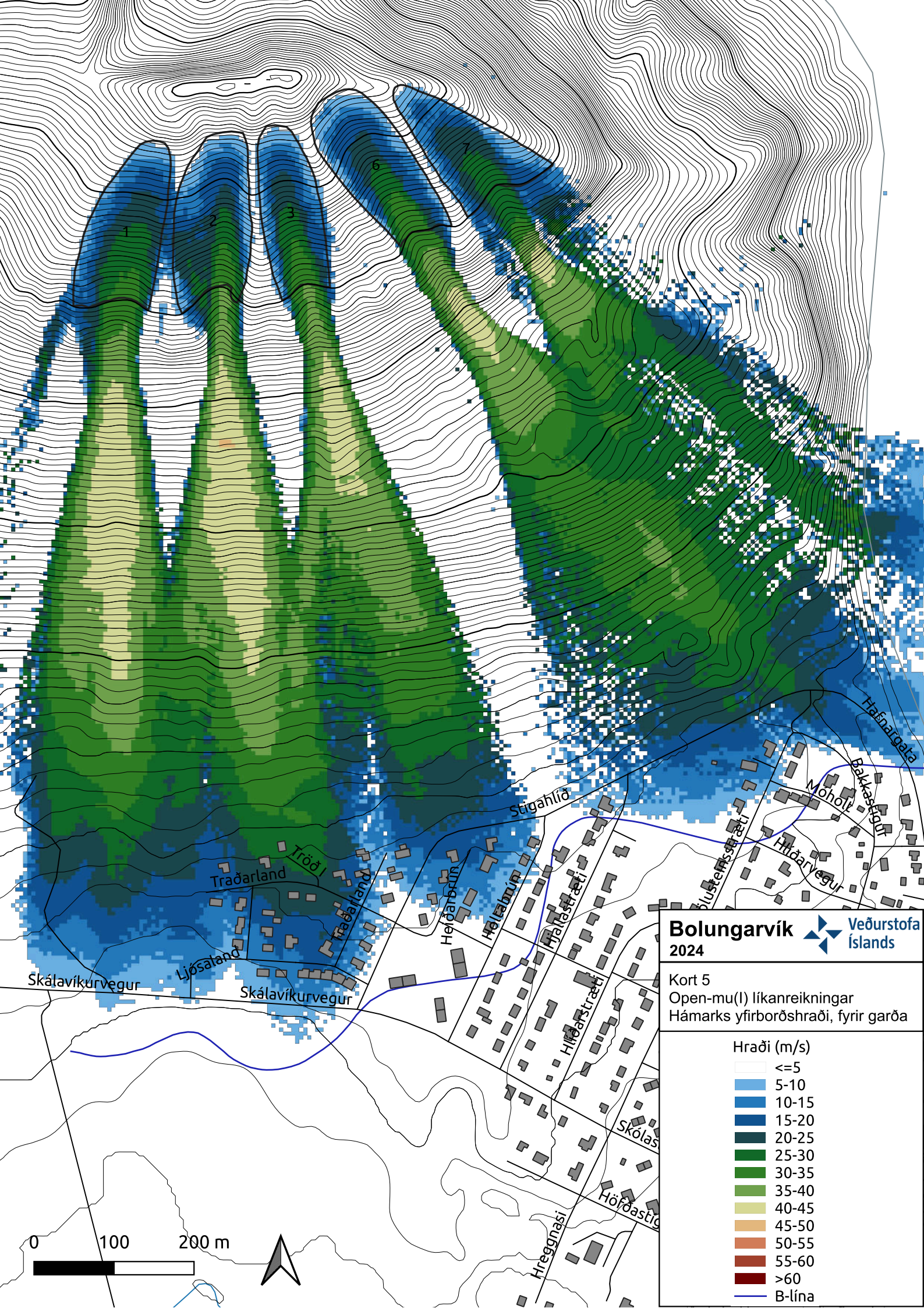
A-lína, áhætta: $0,3 \cdot 10^4$









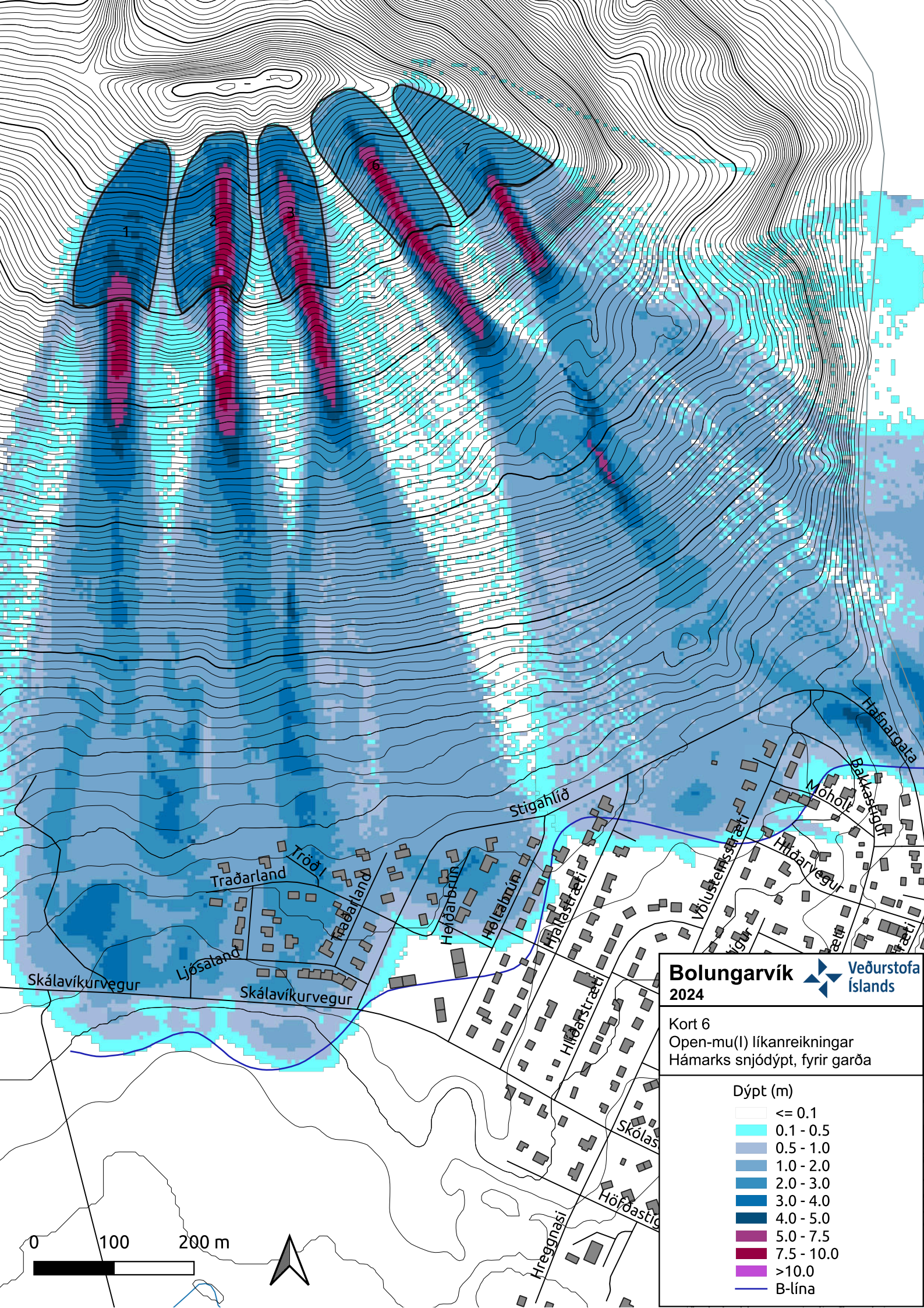


Bolungarvík **Veðurstofa Íslands**
2024

Kort 5
Open-mu(l) líkanreikningar
Hámarks yfirborðshraði, fyrir garða

Hraði (m/s)

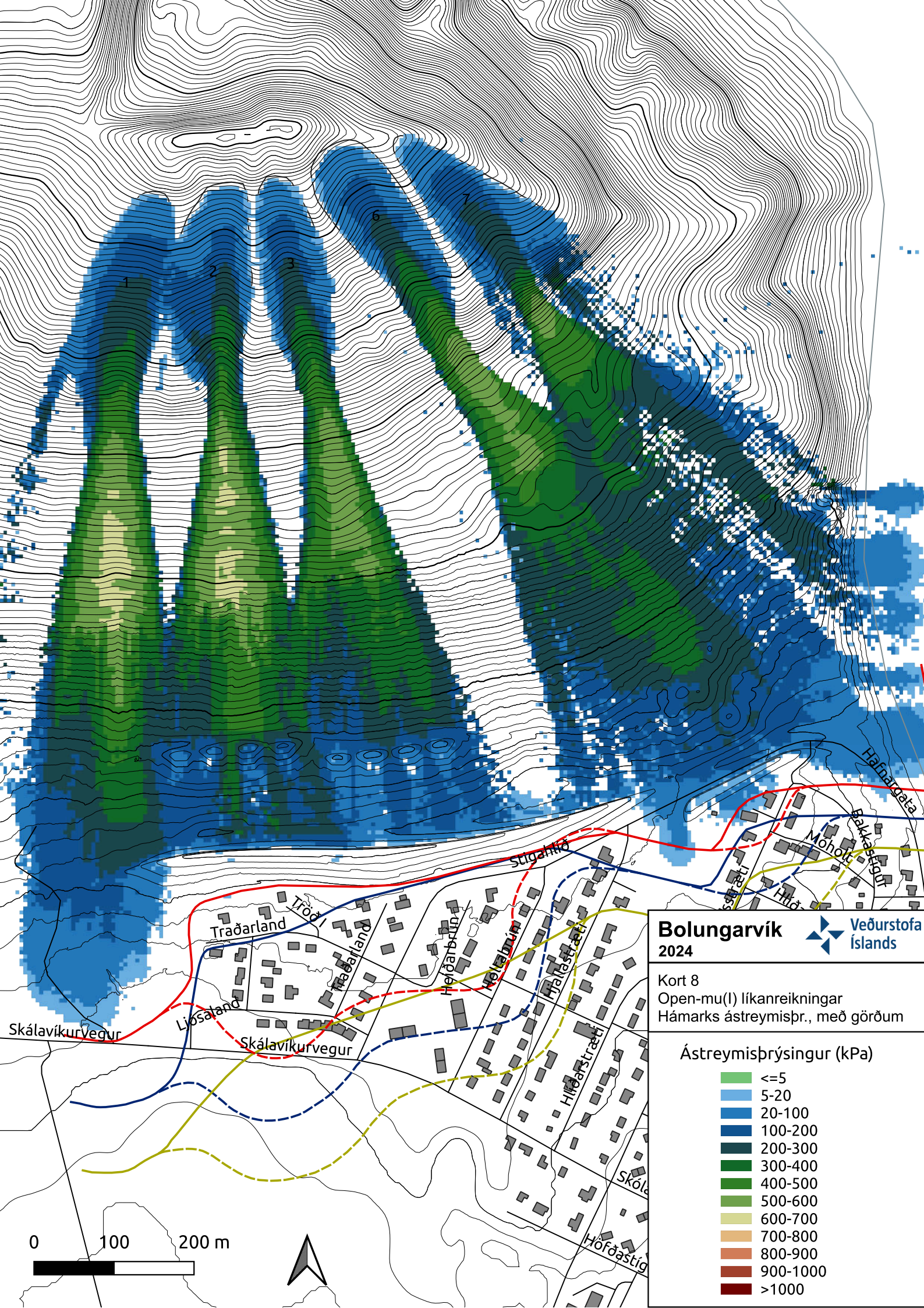
-  <=5
-  5-10
-  10-15
-  15-20
-  20-25
-  25-30
-  30-35
-  35-40
-  40-45
-  45-50
- 50-55
- 55-60
- >60
- B-lína



Bolungarvík **Veðurstofa Íslands**
2024

Kort 6
Open-mu(I) líkanreikningar
Hámarks snjódýpt, fyrir garða

Dýpt (m)	
	<= 0.1
	0.1 - 0.5
	0.5 - 1.0
	1.0 - 2.0
	2.0 - 3.0
	3.0 - 4.0
	4.0 - 5.0
	5.0 - 7.5
	7.5 - 10.0
	>10.0
	B-lína



Bolungarvík 2024



Kort 8
Open-mu(l) líkanreikningar
Hámarks ástreymisþr., með gördum

Ástreymisþrýsingur (kPa)

- <=5
- 5-20
- 20-100
- 100-200
- 200-300
- 300-400
- 400-500
- 500-600
- 600-700
- 700-800
- 800-900
- 900-1000
- >1000

