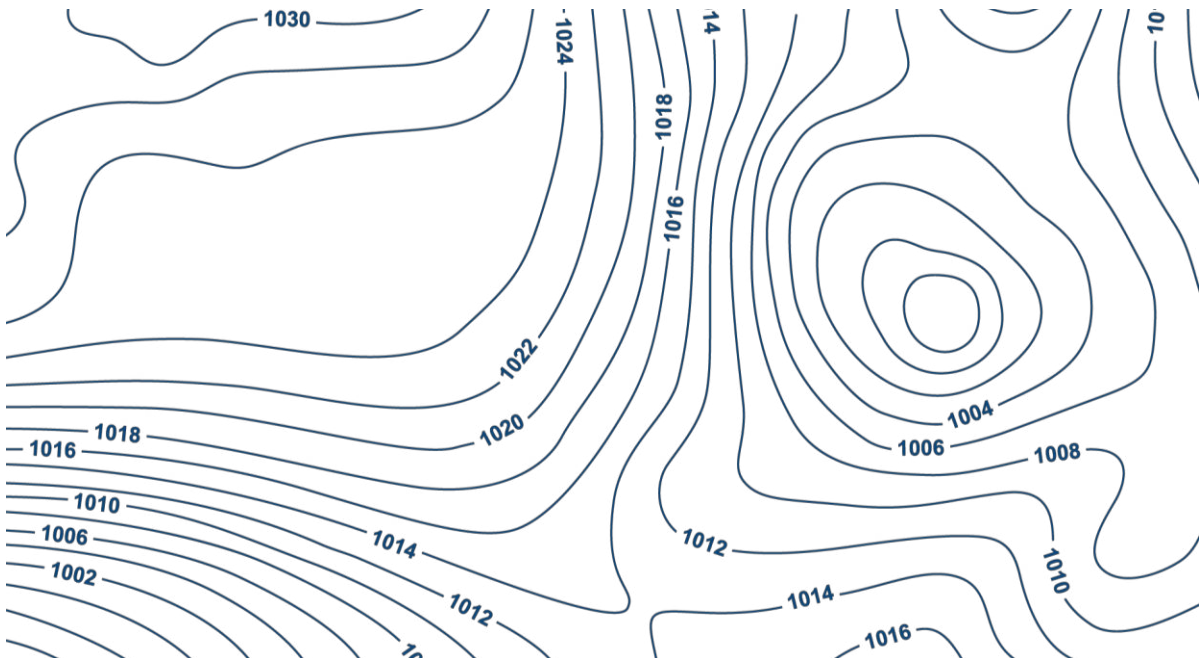


# Endurskoðun á ofanflóðahættumati fyrir Bolungarvík eftir byggingu varnargarða og keilna undir Traðarhyrnu DRÖG með tillögu að hættumatskorti

Tómas Jóhannesson  
Magni Hreinn Jónsson



Skýrsla

VÍ 2026-0xx

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

|                 |                                                                                                            |
|-----------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Höfundar        | Tómas Jóhannesson, Magni Hreinn Jónsson                                                                    |
| Unnið fyrir     | Bolungarvíkurkaupstað                                                                                      |
| Verkefnisstjóri | Tómas Jóhannesson                                                                                          |
| Yfirfarið af    | Sigríði Sif Gylfadóttur                                                                                    |
| Samþykkt af     | Hörpu Grímsdóttur, deildarstjóra Snjóflóða og skriðufalla á Þjónustu og rannsóknarsviði Veðurstofu Íslands |

### Veðurstofa Íslands / Icelandic Meteorological Office

|              |               |
|--------------|---------------|
| Númer        | VÍ 2026-0xx   |
| ISSN         | 1670-8261     |
| Dagsetning   | Júlí 2026     |
| Dreifing     | Opin          |
| Fjöldi síðna | 44 + 13 kort  |
| Upplag       | Rafræn útgáfa |
| Verknúmer    | 4754-0-0002   |
| Málsnúmer    | 2020-0222     |
| DOI númer    | 10.33112/xxx  |

## Útdráttur

Ofanflóðahættumat fyrir Bolungarvík hefur verið endurskoðað eftir byggingu varnargarða og keilna undir Traðarhyrnu, sem draga mikið úr snjóflóðahættu í byggðinni. Hættumatslína C færist 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 u.þ.b. 75 m nær hliðinni utar í byggðinni neðan minni varnargarðsins undir Ufsum. Þrjú íbúðarhús á hvoru svæði eru á hættusvæði B skv. endurskoðaða matinu. A-lína færist ofar þannig að A-svæði í endurskoðuðu hættumati 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 50 íbúðarhús og aðrar byggingar á A-svæði endurskoðaða matsins. 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 snjóflóðavarnarvirkjana. 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 hætta á yfirflæði iðufalds af völdum snjóflóða úr Traðarhyrnu, einkum undir Traðargili og Ytragili. Einnig reiknast ákveðin hætta 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 sem ná til efsta hluta byggðarinnar undir varnargörðunum. Til greina kemur að fyrsta stig viðbúnaðar verði að lýsa yfir hættustigi og senda þau tilmæli til íbúa að þeir dveljist ekki í herbergjum með glugga eða dyraop sem snúa upp í hliðina. Jafnframt verði gætt varúðar í sambandi við umferð að og frá húsum á reitunum. Rýmingarreitir verða einnig skilgreindir sem ná til alls hættusvæðis A eins og það er skilgreint í endurskoðuðu hættumati og til greina kemur að rýma undir mjög sjaldgæfum aftakaaðstæðum.

# Efnisyfirlit

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| <b>1 Inngangur</b> .....                                | 4  |
| 1.1 Aðferðafræði og reglugerðarrámmi .....              | 4  |
| 1.2 Óvissa .....                                        | 6  |
| <b>2 Staðhættir</b> .....                               | 8  |
| <b>3 Snjóflóðasaga</b> .....                            | 10 |
| 3.1 Snjóflóð eftir 2002 .....                           | 10 |
| 3.2 Snjóflóðin 21. febrúar 1997 .....                   | 10 |
| <b>4 Varnarvirki</b> .....                              | 12 |
| <b>5 Hættumat</b> .....                                 | 14 |
| 5.1 Tíðni snjóflóða .....                               | 14 |
| 5.2 Tvívíðir líkanreikningar með SamosAT/AvaFrame ..... | 15 |
| 5.3 Þrívíðir líkanreikningar með Open-μ(I) .....        | 16 |
| 5.4 Hönnun þvergarða og keilna .....                    | 18 |
| 5.5 Endurskoðun hættumats undir Traðarhyrnu .....       | 20 |
| <b>6 Niðurstaða</b> .....                               | 28 |
| <b>7 Heimildir</b> .....                                | 29 |
| <b>I Tæknileg hugtök og skilgreiningar</b> .....        | 33 |
| <b>II Snjóflóð</b> .....                                | 36 |
| <b>III Kort</b> .....                                   | 43 |



# 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 & NGI, 1999; Orion, VA & NGI, 1999). Tillaga að vörnum fyrir eystri hluta byggðarinnar undir Ufsum var lögð fram 2009 (EFLA & 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, sem nefndir hafa verið *Vörður* og *Vaki*, og alls átta brattar keilur, fjórar neðan Traðargils og fjórar neðan Ytragils. Verkleig 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 hættumatslínum frá 2009 og 2010, sem kynntar voru fyrir bæjarstjórn árið 2010, og hefur verið til hliðsjónar við skipulagsgerð í Bolungarvík síðan þá. Hættumatið undir varnargörðunum í Bolungarvík er þáttur í endurskoðun hættumats undir varnargörðum sem unnið hefur verið að á Veðurstofu Íslands síðan 2022 fyrir nokkur bæjarfélög þar sem reist hafa verið varnavirki á úthlaupssvæðum snjóflóða. Það byggir m.a. á snjóflóðalíkanreikningum sem unnir voru á árunum 2022 og 2023.

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 ( $\alpha$ -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 varnavirkja 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,

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 <sup>1</sup> og húsnæði þar sem viðvera er lítil.                                                                                                                                           | Engar nýbyggingar nema frístundahús <sup>1</sup> 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 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.                                      |

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

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.

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 verji um 75% af tíma sínum á heimilum og um 40% í atvinnuhúsnæði. Samkvæmt reglugerð um hættumat (umhverfissráðuneytið, 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 atvinnuhúsnæði 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 Jónsson 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 umhverfisráðuneytisins 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 upptakasvæði 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. Óvissumatínu 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 línum er metin 1 eða 2 þá gætu þær legið á bili sem nemur 1 eða 2 línubílum frá dregnum línum. 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 hættumat á öðrum stöðum.

Óvissuflokkar fyrir hættumat 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 lítt 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 snjóflóða-aðstæðum sem koma við sögu við endurskoðun hættumatsins.

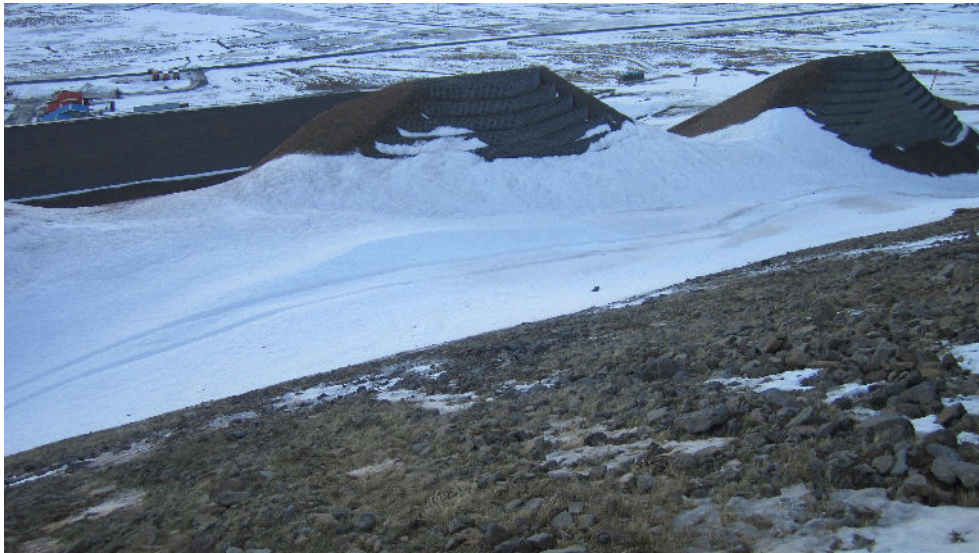
Kaupstaðurinn Bolungarvík stendur norðan við samnefnda vík sem er yst við Ísafjarðardjúp vestanvert. Norðan við víkina er Bolafjall og austasti hluti þess heitir Traðarhyrna. Mestur hluti byggðarinnar stendur á hallalitlu landi milli víkurinnar og Traðarhyrnu. Þrír dalir liggja upp frá Bolungarvík. Sunnan 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 Erni 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 1950 voru íbúar Bolungarvíkur 784, árið 1980 voru þeir 1266, árið 2003 930, og nú (árið 2026) er íbúafjöldinn 985. 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 nefnist Vörður og er 22 m hár þar sem hann er hæstur. Hliðin sem snýr upp í fjallið er brött. Keilur ofar í hliðinni eru 12 m háar og snúa brattri hlið á móti flóðstefnunni. Þeim er ætlað að hægja á snjóflóðum áður en þau lenda á varnargarðinum. Ljós.: Jóhann Hannibals-son, 15. febrúar 2020.



Mynd 2. Tunga snjóflóðs úr Traðargili, sem féll 29./30. desember 2012, þar sem hún hefur hrannast upp að keilum undir gilin. Ljós.: Jóhann Hannibalsson, 20. janúar 2013, um þremur vikum eftir að flóðið féll. Snjóa hefur leyst að nokkru leyti og grófur flóðsnjórninn 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 snjóflóðin 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 aðdraganda 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 aðdraganda flóðsins. Mjög áköf logndrífa hafði verið í sólarhring þegar flóðin féllu. Þessi aðdragandi passar ekki við að mikið frost sé 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

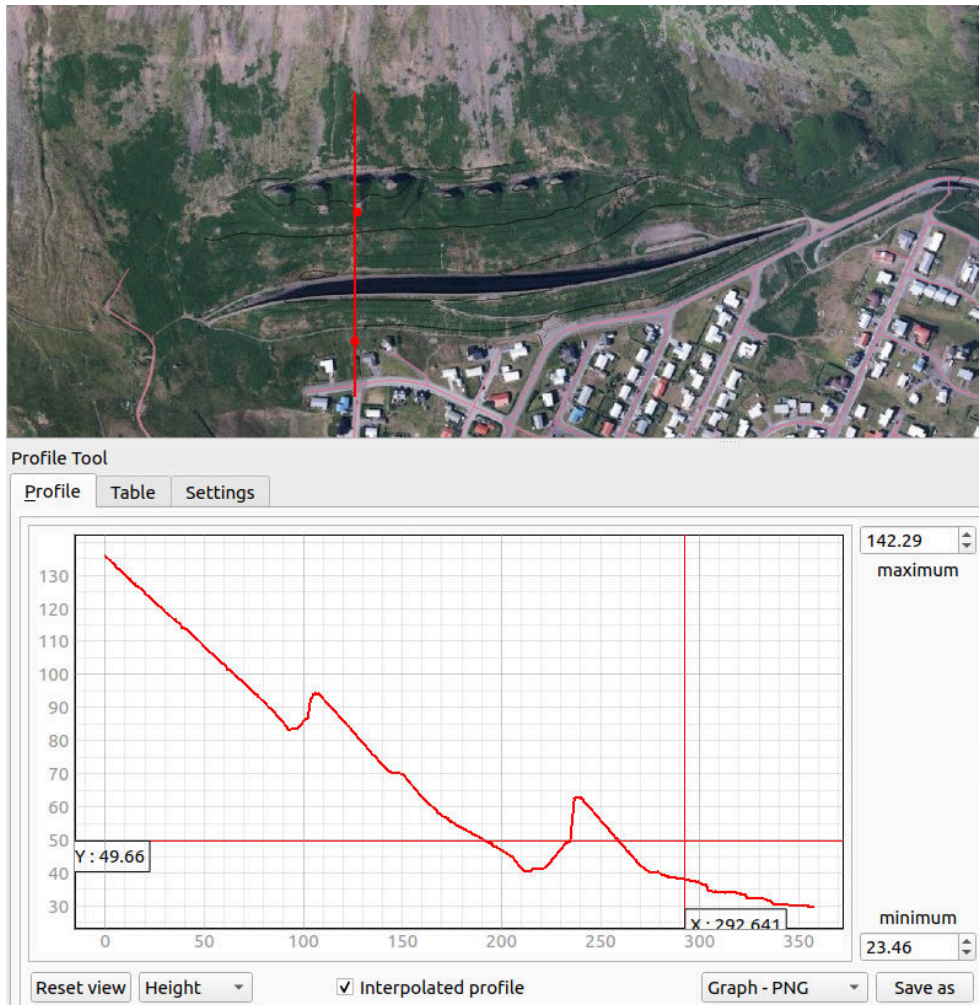
Vinna við undirbúning snjóflóðavarna í Bolungarvík hófst 1999 með frumathugun á varnarvirkjum fyrir innri hluta byggðarinnar undir Traðarhyrnu (Hnit og NGI, 1999; Orion, VA og NGI, 1999, 2001). Frumathugun fyrir ytri hluta byggðarinnar fór fram tíu árum síðar (Efla og Landmótun, 2009; Orion, 2010a,b). Mat á umhverfisáhrifum vegna varnarvirkjana var unnið af Náttúrustofu Vestfjarða (NV, 2002). Í tengslum við báðar frumathuganirnar fóru fram ýmsar athuganir á útfærslu varnarvirkjana, 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, sem nefndur hefur verið Vörður, og 210 m langan þvergarð ofan ytri hluta byggðarinnar, sem nefnist Vaki. 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. Langsnið í gegnum keiluröðina og þvergarðinn undir Traðargili er sýnt á mynd 3 og sést vel hversu brattir efstu u.þ.b. 8 m keilnanna og efstu 12 m garðsins eru.

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 höfðu verið reistir 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 skullu 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 varnarvirkjana 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



Mynd 3. Langsnið í gegnum keiluröð og stærri varnargarðurinn undir Traðargili. Þvergarðurinn er um 22 m hár og keilurnar um 12 m háar. Efstu u.þ.b. 12 m garðsins eru brattir en neðri hluti hans er með jarðvegshalla. Rauð lína á loftmyndinni sýnir staðsetningu sniðsins.

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 óheppi- leg snjósöfnun ofan garðanna eða við keilurnar sem áhrif hefur á virkni þeirra.

## 5 Hættumat

Við endurskoðun hættumats undir varnargörðum og öðrum varnarvirkjum á úthlaups-svæðum þarf að meta áhrif varnarvirkjanna til þess að draga úr hættu í byggðinni af völdum hins þetta kjarna snjóflóða. Einnig þarf að huga að möguleikanum á aukinni hættu á svæðum þar sem leiðigarðar kunna að beina öflugri streng snjóflóða samsíða garðinum en annars væri, eða þvergarðar og keilur breyta stefnu snjóflóðsins, og hættu af völdum yfirflæðis iðufalds og kófs (sjá nánari umfjöllun hér að neðan) sem skapað getur hættu þrátt fyrir að hinn þétti 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 Traðargili 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 rúm 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 keilanna 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 4–8 snjóflóð, sem náð hefðu niður undir efstu hús eða lengra, kunni að hafa fallið úr þessum tveimur giljum síðan um 1980 þegar efstu hús á svæðinu voru reist. Endurskoðað tíðnimat á grundvelli styttri flóða er því  $F_{10-11} \approx 0.05-0.1$  á ári fyrir hvort gil, eða  $F_{13} \approx 0.005-0.01$  á ári fyrir hvort gil, ef gert er ráð fyrir u.þ.b. tíföldum tíðnimun á flóðum sem ná rennslisstig 10–11 og rennslisstigi 13. Ætla má að efri mörkin séu líklegri sökum þess að ósennilegt má telja að flóðin eftir 2009 hefðu öll stöðvast ofan byggðarinnar eins og hún var fyrir tilkomu varnarvirkjanna. Þetta tíðnimat 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 aðeins betra innra samræmi fyrir lengri og styttri flóð en fyrra mat vegna þess að tíðni, sem svarar til lengri flóðanna, er ekki eins frábrugðin því sem leiðir af fjölda styttri flóða, og áður var. Endurskoðað tíðnimat má þannig segja að sé  $F_{13} = 0.01-0.02$  á ári fyrir hvort gil, með óvissu upp á ca. faktor tvo. Nokkur munur er 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, en flóðasagan gefur þó til kynna nokkru hærri tíðni flóða úr Traðargili (sjá kort 2) eins og nánar verður vikið að síðar. Allmörg flóð með rennslisstig á bilinu 8–10 eru skráð úr bæði Traðargili og Ytragili á síðari árum og gefa þau til kynna að uppfærða tíðnimatið sem færð eru rök fyrir hér að framan sé nærri lagi.

Til samanburðar má nefna að tíðni á bilinu  $F_{13} = 0.05-0.1$  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 2.5–10 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 samræmi við að endurkomutími snjóflóða nærri B-línu hættumats sé um 1000 ár, sem er oft haft til viðmiðunar í hættumati (Hættumatsnefnd Bolungarvíkur, 2003), 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/AvaFrame

Tvívíða SamosAT snjóflóðalíkanið<sup>1</sup>, sjá viðauka I, var keyrt fyrir tvívíð rennslisstig á bilinu 13–19 á landlíkani án varnavirkja, sjá kort 3. 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 lengst undir Traðargili og skemmst undir Ystagili. B-lína fyrra hættumats er u.þ.b. í tvívíðu rennslisstigi 17 undir Traðargili, rennslisstigi 18 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.

<sup>1</sup>SamosAT snjóflóðalíkanið hefur verið endurforritað og er aðgengilegt sem opinn hugbúnaður og gengur þá undir nafninu AvaFrame, sjá viðauka I. Reiknilíkanið er það sama og er nafnið SamosAT oftast notað hér um þetta líkan til einföldunar og ekki gerður greinarmunur á því hvort líkanið var notað, nema í skýringum við kort þar sem nafnið AvaFrame er notað þar sem það á við.

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 snjódýpt 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 nokkurn veginn í 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 Þrívíðir líkanreikningar með Open- $\mu(I)$

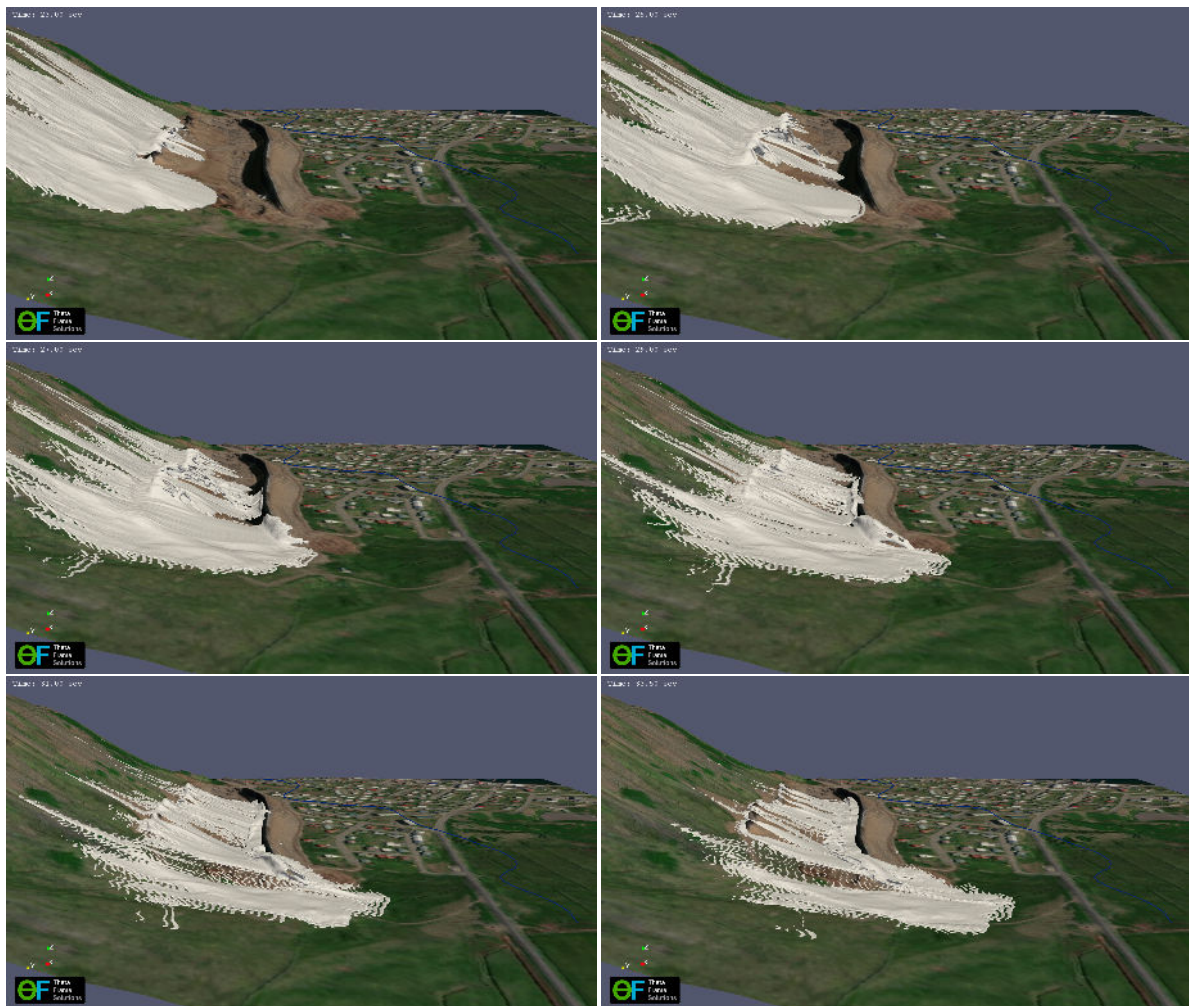
Þrívíða snjóflóðalíkanið Open- $\mu(I)$ , sjá nánari lýsingu í viðauka I, var keyrt með snjódýpt á upptakasvæðum og viðnámsgildi sem stíllt voru af þannig að snjóflóðið stöðvaðist u.þ.b. á B-línu hættumats fyrir tilkomu varnargarða og keilna, sjá snjódýpt í lok keyrslanna á korti 4 og myndband 1 (sem sýnir keyrsluna fyrir Innra-, Traðar- og Ytragil). Viðnámsstuðlarnir í keyrslunum voru  $\mu_s = 0.11$  og  $\mu_d = 0.75$  og snjódýpt þvert á hlíð 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 voru af stað úr upptakasvæðunum var 66, 65, 52, 49 og 39 þús. m<sup>3</sup> (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 þykktina skammt ofan garðanna er um 2 m. Fyrir þrívíða snjóflóðalíkanreikninga er eðlilegast að miða hér við yfirborðshraða fremur en dýpsheildaðan 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 hraði snjóflóðs úr Ytragili reiknast heldur lægri með Open- $\mu(I)$  en með SamosAT og lægri en það sem miðað var við í frumathugun.

Open- $\mu(I)$  líkanið var síðan keyrt með sömu inntaksgildum á landlíkani með görðum 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 líkja eftir snjóhulu ofan garðsins þegar flóðið fellur, sjá mynd 4 og myndbönd 2, 3 og 4. Þessi snjódýpt ofan varnavirkjanna 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 snjópungt 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 ( $p_{\max} = \rho u_{s_{\max}}^2$ ) 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 reikn-

að 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 úthlaups-svæðum 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.



Mynd 4. Nokkur tímaskref í líkanreikningum á snjóflóði sem lendir á keilum og varnargarði neðan Traðarhyrnu við Bolungarvík með þvíða 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. Tími frá upphafi keyrslunnar er ritaður í efra vinstra horn hvers ramma.



Endurskoðað hættumat verður því lítið sem ekkert breytt neðan við þar sem garðarnir mætast.

#### 5.4 Hönnun þvergarða og keilna

Miðað er við það hérlandis 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 Traðarhyrnu (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. Snjó-dýpt 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. Er annars vegar um að ræða kröfu um að garðurinn og keilurnar komi í veg fyrir að snjóflóðið geti streymt óhindrað yfir garðinn í stríðu (e. supercritical) streymi og hins vegar kröfu um að þykkt streymis neðan straumstökks við garðinn sé minni en garðhæðin. Miðað er við orkutapsstuðulinn  $k = 0.75$  í árekstrinum við garðinn í reikningum á yfirflæði í stríðu streymi eins og mælt er með í viðmiðunarreglunum fyrir bratta garða með halla yfir  $60^\circ$  á hliðinni sem veit mót fjallshlíðinni. Garðhæð er reiknuð með og án keilna ofan garðsins 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. Reyndist ýmist hæðin sem nauðsynleg er til þess að koma í veg fyrir óhindrað streymi yfir garðinn, eða þykkt flóðsins neðan straumstökks, ráðandi um garðhæðina.

Evrópsku viðmiðunarreglurnar taka einvörðungu tillit til hins þétta kjarna snjóflóðsins. Hætta af völdum yfirflæðis iðufalds og kófs er rædd í sérstökum undirkafla hér að neðan.

Evrópsku viðmiðunarreglurnar um hönnun snjóflóðagarða byggja á ýmsum einföldunum um flæði snjóflóða og lögun varnargarðsins og þegar þær voru þróaðar voru möguleikar á straumfræðilegum líkanreikningum ekki jafn öflugir og nú er orðið. M.a. er gengið út frá því að straumstökk myndist strax við árekstur snjóflóðs við varnargarð en í raun er flæðið fyrst eftir að snjóflóð rekst á fyrirstöðu miklu flóknara og flóð getur náð að streyma yfir leiðigarða og aðra varnargarða svolitla stund meðan flæðið er að breyta um stefnu við leiðigarð eða stöðvast næst ofan þvergarðs. Open- $\mu(I)$  snjóflóðalíkanið er þróað til þess að herma árekstur snjóflóðs við varnargarða og aðrar fyrirstöður betur en hefðbundin snjóflóðalíkön. Það getur tekið tillit til flókinna lögunar varnargarða, t.d. breytilegrar sveigju á lögun leiðigarðs, og það reiknar streymið í upphafi árekstrar út frá eðlisfræðilegum og straumfræðilegum forsendum og getur þannig leitt í ljós veikleika í hönnun varnargarða sem ekki er unnt að greina með aðferðunum sem evrópsku viðmiðunarreglurnar byggja á.

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

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  $\varphi_h$  í láréttu plani ( $90^\circ$  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  $\psi$  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 straumstökks, garðhæð þvert á hlíð sem þarf til þess að koma í veg fyrir yfirflæði í stríðu streymi áður en straumstökk myndast annars vegar ( $H_{cr} + h_{cr} + h_s$ ) og vegna flóðþykktar neðan straumstökks hins vegar ( $h_2 + h_s$ ), og að lokum lóðréttu garðhæð  $H_D$ , sem samsvarar hámarki  $H_{cr} + h_{cr}$  og  $h_2$ , að viðbættri snjódýpt á jörðu  $h_s$ . Síðasti dálkurinn  $H_m$  sýnir hæð garðsins skv. mælingu Svarma í maí 2021. Eingöngu er tekið tillit til þetta kjarna snjóflóðsins.

|                       | $\varphi_h$                 | $u_1$<br>(m/s) | $h_1$<br>(m) | $Fr_1$<br>(-)   | $h_s$<br>(m) | $\psi$     | $\psi_\perp$ | $H_{cr} + h_{cr}$<br>(m) | $u_2$<br>(m/s) | $h_2$<br>(m) | ... |
|-----------------------|-----------------------------|----------------|--------------|-----------------|--------------|------------|--------------|--------------------------|----------------|--------------|-----|
| Traðargil, án keilna  | $90^\circ$                  | 34             | 2            | 7.7             | 3.5          | $10^\circ$ | $10^\circ$   | 32.4                     | 0              | 23.0         | ... |
| Ytragil, án keilna    | $90^\circ$                  | 29             | 2            | 6.6             | 3.5          | $10^\circ$ | $10^\circ$   | 23.6                     | 0              | 19.8         | ... |
| Traðargil, með keilum | $90^\circ$                  | 21             | 2            | 4.8             | 3.5          | $10^\circ$ | $10^\circ$   | 12.7                     | 0              | 14.7         | ... |
| Ytragil, með keilum   | $90^\circ$                  | 18             | 2            | 4.1             | 3.5          | $10^\circ$ | $10^\circ$   | 9.5                      | 0              | 12.8         | ... |
| Ystagil               | $90^\circ$                  | 26             | 2            | 5.9             | 3.5          | $5^\circ$  | $5^\circ$    | 18.8                     | 0              | 17.8         | ... |
|                       | $H_{cr} + h_{cr} + h_s$ (m) |                |              | $h_2 + h_s$ (m) |              | $H_D$ (m)  |              | $H_m$ (m)                |                |              |     |
| Traðargil, án keilna  | 35.9                        |                |              | 26.5            |              | 34.2       |              | 21.5                     |                |              |     |
| Ytragil, án keilna    | 27.1                        |                |              | 23.3            |              | 25.9       |              | 22                       |                |              |     |
| Traðargil, með keilum | 16.2                        |                |              | 18.2            |              | 17.3       |              | 21.5                     |                |              |     |
| Ytragil, með keilum   | 13.0                        |                |              | 16.3            |              | 15.5       |              | 22                       |                |              |     |
| Ystagil               | 22.3                        |                |              | 21.3            |              | 21.9       |              | 11                       |                |              |     |



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 hærra 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,  $\lambda$  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  $\psi$  er landhalli 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  $\psi$  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.

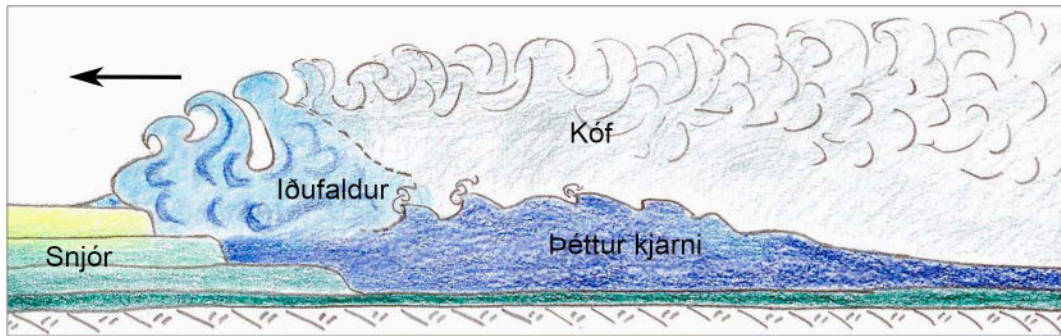
Hættumatið neðan garðanna var endurskoðað í ljósi niðurstaðna greiningar og líkanreikninga sem lýst er hér að framan, sjá kort 9. C-lína var færð upp að garðfætinum nema í Morðingjamýri neðan við staðinn þar sem garðarnir mætast og hæð þeirra er lítil. Þar breytast hættulínur ekki og er því tunga í endurskoðaða 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 styttesti á móta mikið og skriðlengd hönnunarflóðsins en það er forsendan að baki orkuhliðruninni. C-línan er dregin rétt ofan B-línunnar, eins og víða er gert í hættumati neðan varnargarða hér á landi. Aðferðafræði við hættumat neðan varnargarða gefur ekki tilefni til þess að reikna legu C-línu ofan B-línunnar á þessu svæði með neinu öryggi. Þar sem talið er óráðlegt að reisa nýjar byggingar ofan B-línunnar vegna almennrar óvissu um forsendur hættumatsins felst ákveðin varkárni í þessari legu C-línunnar. 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 fyrir tilkomu varnarvirkja 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). Í þessum reikningum er lítið á snjóflóðið sem ósamþjappanlegt efni og er við því að búast að hætta á yfirflæði í fyrsta fasa árekstrar við brattar fyrirstöður sé ofmetin. Rétt er að nefna að álag um og undir 5 kPa getur brotið glugga og dyr og því fylgir þess vegna hætta á slysum og tjóni. Hins vegar eru dánarlíkur af völdum slíks álags svo lágar ( $\lesssim 2\%$ ) (sjá Kristján Jónasson o.fl., 1999) að þetta yfirflæði hefur ekki áhrif á forsendur hættumats skv. hættumatsreglugerð. Hætta vegna yfirflæðis af þessum toga rúmast því innan B- og A-svæðis sem skilgreint er neðan garðsins, sjá umfjöllun í næsta undirkafla. 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 hættumatslínum nær fjallinu með orkuhliðrun sem byggir á garðhæðinni, að frádreginni 3.5 m snjódýpt 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 kom í ljós í flóðunum 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 5. Eðlisþyngd iðufalds hefur verið metin 35–100 kg/m<sup>3</sup> (Issler o.fl., 2020), en dæmigerð eðlisþyngd þetta kjarnans er 250–400 kg/m<sup>3</sup> (Sovilla o.fl., 2015). Mestur massi í iðufaldi er talinn ferðast í neðstu nokkrum metrum flæðisins (Issler o.fl., 2020) en í þessum hluta snjóflóðsins hafa mælst stórir hvirflar sem geta verið um og yfir 10 m að stærð (Sovilla o.fl., 2018). 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 endurskoðaðri frumathugun snjóflóða á Flateyri (Verkís, 2023) er hraði iðufaldsins metinn 30% meiri en þetta kjarnans og eðlisþyngdin um 50 kg/m<sup>3</sup>. Ýmissa upplýsinga var aflað um iðufald og áhrif hans í snjóflóðunum á Flateyri 2020 og öðrum íslenskum og erlendum snjóflóðum í framhaldi af flóðunum á Flateyri (Óliver Hilmarsson o.fl., 2020; Kristín Martha Hákonardóttir, 2022a,b,c,d; Kristín Martha Hákonardóttir o.fl., 2024; Ragnar Lárusson & Haukur Elvar Hafsteinsson, 2021; Darri Kristmundsson & Haukur Elvar Haf-



Mynd 5. 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 þýngstur í sér, ferðast neðst og samanstendur af snjóköggjum og snjókornum sem eru meira og minna í snertingu sín á milli. Iðufaldur, sem fylgir sumum en ekki öllum snjóflóðum, er hraðfara og berst á undan og að hluta til ofan á þétta kjarnanum. Hann einkennist af óreglulegri hreyfingu og iðuköstum og samanstendur af snjóköggjum sem kastast stöðugt hver af öðrum og svífa nokkurn spöl milli árekstra. Iðufaldurinn nærast á þurrum, köldum snjó sem flóðið hrífur með sér á leið niður hlíðina og einnig á snjó af yfirborði þétta kjarnans. Kófið er blanda af lofti og snjókornum og litlum snjóköggjum sem berast með loftinu og rekast miklu sjaldnar hvert á annað en í þétta kjarnanum og iðufaldinum.

steinsson, 2022; Tómas Jóhannesson o.fl., 2024). 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. Iðufaldur getur borist að hluta yfir varnargarða og þannig skapað hættu, þó garðarnir beini þétta kjarnanum frá byggð eða stöðvi hann ofan byggðarinnar. Einnig getur snjór úr þétta 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 nágrannalöndum og lagðar fram tillögur að reglum um nýtingu hættusvæða neðan snjóflóðavarnarvirkja með það í huga að stuðla að öryggi byggðanna (Tómas Jóhannesson & Magni Hreinn Jónsson, 2024).

Iðufaldur getur borist hundruð metra eftir að hann missir tengsl við þétta 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 þétta 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 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 snjó 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**

Hættu af völdum iðufalds og kófs er einkum að vænta undir stórum upptakasvæðum sem liggja hátt, þar sem iðufaldur getur náð mestum hraða í langri fallbraut, sér í lagi þegar mikið framboð er á köldum snjó. Einnig er hættu af völdum iðufalds að vænta úr farvegum þar sem snjóflóð eru tíð og langskreið (ef litið er til byggðar á sambærilegum hættusvæðum) vegna þess að hraðfara flóðum með mikla skriðlengd fylgir kröftugastur iðufaldur. Rúmmál flóða er hins vegar ekki ráðandi þáttur vegna þess að öflugur iðufaldur getur verið samfara tiltölulega efnislitlum flóðum, sbr. snjóflóðin í fyrri hluta hrinunnar í Neskaupstað í mars 2023. Undir lágum hliðum getur verið mikil snjóflóðahætta í byggð sem stendur nærri fjallshlíð en þar er rétt að gera ráð fyrir að iðufaldur og kóf séu ekki eins stór þáttur í hættunni og undir farvegum þar sem upptakasvæði liggja hátt. Þetta er þó ekki einhlítt vegna þess að heimildir eru um tjón af völdum snjóflóða úr tiltölulega lágum upptakasvæðum þar sem iðufaldur kom líklega við sögu, t.d. mannskaðasnjóflóðið á Grund í Reykhólasveit í janúar 1995. Engu að síður er rétt að gera ráð fyrir því að almennt sé hættu af völdum iðufalds meiri undir háum upptakasvæðum þar sem snjóflóð eru tíð.

### **Bratti varnargarðs fjallsmegin**

Ummerki eftir flóð með öflugum iðufaldi á Flateyri í janúar 2020 benda til þess að iðufaldur geti borist yfir háa varnargarða með jarðvegshalla á þeirri hlið sem að flóðinu snýr<sup>2</sup>. Brattir þvergarðar og keilur sem snjóflóð lentu á í Neskaupstað í mars 2023 virðast hafa brotið upp iðufald og dregið úr krafti hans þannig að ekki varð álag af völdum þessara flóða í byggð neðan við varnirnar. Einkum benda ummerki snjóflóðs úr Skágili þann 27. mars 2023 á keilum og þvergarði undir Drangagili til þess að brött varnarvirki hafi áhrif til þess að draga úr hættu af völdum iðufalds.

### **Fjarlægð frá varnargarði**

Það dregur úr krafti iðufalds með fjarlægð frá varnargarði eða öðrum fyrirstöðum sem beina þetta kjarnanum frá byggð eða hægja á honum, en almennt er gert ráð fyrir að iðufaldur hægi á sér og deyi út þegar hann fer fram úr þetta kjarnanum (Sovilla o.fl., 2018). Hins vegar er erfitt er að setja fram ákveðin viðmið um það hversu langt iðufaldur getur borist yfir varnargarða og ekki er unnt að styðjast við líkanreikninga um það. Snjóflóðin á Flateyri í janúar 2020 gefa til kynna að öflugur iðufaldur geti borist hundruð metra yfir varnargarða með jarðvegshalla flóðmegin. Næst neðan varnargarða má gera ráð fyrir öflugustum iðuköstum, þar sem áhrifa árekstrarins gætir mest, en fjær dregur úr þessari hættu. Hér verður miðað við að mest hættu sé í 100–200 m fjarlægð neðan við bratta varnargarða, og einkum í efstu einni til tveimur húsaröðum í byggðinni. Fyrir varnargarða með jarðvegshalla þarf að leggja mat á aðstæður í hverju tilviki. Þar sem byggð er tiltölulega samfelld má ætla að hús neðan við efstu húsaröð njóti einhvers skjóls af byggingum sem standa ofar. Ekki

<sup>2</sup>Halli flóðhliðarinnar er 1:1.25 á Flateyri. Þar virðast garðarnir ekki einu sinni hafa haft áhrif á stefnu yfirflæðisins í janúar 2020.

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 hættu á yfirflæði af völdum þetta kjarnans sjálfs, þarf að meta hvort tilefni er til þess að skilgreina B-svæði undir varnargörðum og öðrum varnavirkjum. Þau væru til viðbótar við A-svæði sem alla jafna er látið ná til hættusvæðis C í fyrri hættumati m.a. vegna margvíslegrar óvissu í hættumati og um áhrif varnavirkja á flæði snjóflóða.

Traðarhyrna 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 Traðarhyrnu 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 hættu 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 hættu á öflugum flóðum en utar í bygginni. Hliðar keilna og þvergarða sem vita upp í hlíðina í Bolungarvík eru mjög brattar, sjá langsnið á mynd 3, og má því ætla að þessi varnavirki dragi verulega úr hættu af völdum iðufalds í byggðinni, sbr. það sem sagt er um brött varnavirki hér að framan. 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 húsinn.

### **Skipulag byggðar á hættusvæði neðan varnargarðanna**

Í tillögu Veðurstofunnar að reglum um nýtingu hættusvæða neðan snjóflóðavarnavirkja (Tómas Jóhannesson & Magni Hreinn Jónsson, 2024) er talið rétt að farið sé varlega í uppbyggingu nýrra húsa næst undir varnavirkjum þannig að heimildarákvæði í reglugerð um byggingu nýrra, óstyrktra íbúðarhúsa á A-svæðum í fyrirliggjandi byggð nái ekki til efstu lóða á svæðum sem varin hafa verið með varnavirkjum. Þar er einnig lagt til að ákveðin svæði undir varnavirkjum séu sérstaklega afmörkuð á hættumatskorti og tilgreint að þar sé þétting byggðar óæskileg. Markmiðið með þessari tillögu er koma í veg fyrir að sú öryggisbót sem fæst með byggingu varnavirkja sé tekin til baka að vissu marki með því að fjölga umtalsvert íbúðum á fyrri hættusvæðum eða færa byggðina nær fjallinu. Á korti 9 sem sýnir endurskoðað hættumat er afmarkað svæði undir varnargörðunum með grænum lit þar sem þétting byggðar er óæskileg. Þar er um að ræða u.þ.b. efstu tvær húsaraðirnar undir varnargörðunum og einnig hættusvæði í Morðingjamýri og yst í byggðinni utan við minni varnargarðinn þar sem garðarnir hafa lítil eða engin áhrif. Í Bolungarvík er nægt landrými utan hættusvæða til skipulagningar á nýrri byggð og því ekki ástæða til þess að nýta hættusvæði undir vörnum til þróunar á nýrri byggð.

## 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 varnarvirkja. Rétt er að fara nokkrum orðum í hættumati um rýmingarviðbúnað sem eðlilegur er neðan varnarvirkja í ljósi þeirra upplýsinga sem hættumatið byggir á, en rýmingarviðbúnað fyrir svæði undir varnarvirkjum 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 á svæðum sem ekki hafa verið varin með varnarvirkjum.

- I. Reitir sem miðast við þekkt ofanflóð og hætta getur skapast á við *hóflegan aðdraganda*, t.d. snjósöfnun eða úrkomu sem talið er að geti átt sér stað á nokkurra ára fresti. Reitirnir ná e.t.v. ekki eins langt niður og ofanflóðasagan greinir ef heimildir eru um að lengri flóð hafi fallið við aftakaaðstæður, svo sem í kjölfar aftakaveðurs eða í tengslum við mikla snjósöfnun eða aftakaúrkomu. Rýmdir verða reitir í nágrenni helstu snjóflóðafarvega þar sem búast má við flóðum 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 hætta 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 eða aftakaúrkomu*. Ekki verður rýmt nema spáð sé veðri sem reynsla sýnir að hafi mikla ofanflóðahættu í för með sér eða mælingar vöktunarkerfa gefa til kynna yfirvofandi hættu.
- III. Reitir þar sem mjög stór snjóflóð eða skriðuföll, 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 við sérlega óhagstæð skilyrði í hlíðinni ofan við reitina, eða ef mælingar vöktunarkerfa og aðrar vísbendingar eru um yfirvofandi hættu. Á stigi III verða einnig rýmdir reitir þar sem ofanflóðahætta 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 rýmingarreita á stigi III falla í flestum tilvikum saman við hættumatslínu, þ.e. neðri mörk hættusvæða A skv. hættumati. Í undantekningartilvikum getur rýming á stigi III náð niður fyrir hættusvæði A þar sem snjóflóðahætta er talin lítil og til rýmingar kemur við aðstæður sem eru mjög ólíklegar skv. hættumati.

Þar sem reist hafa verið varnarvirki er stuðst við sérstaka stigskiptingu. Þar verður miklu sjaldnar gripið til rýmingar en á óvörðum svæðum. Sérstakir rýmingarreitir eru skilgreindir undir varnavirkjum sem ekki uppfylla hönnunarforsendur, t.d. vegna plássleysis eða erfiðra aðstæðna. Einnig eru skilgreindir rýmingarreitir sem ná til u.þ.b. efstu tveggja húsa-raða og hugsaðir eru til þess að bregðast við hættu á yfirflæði iðufalds eða hluta þetta kjarnans. Þar kemur til greina að fyrsta stig viðbúnaðar sé að lýsa yfir hættustigi og senda þau tilmæli til íbúa að þeir dveljist ekki í herbergjum með glugga eða dyraop sem snúa upp í hliðina en slíkar öryggisráðstafanir eru viðhafðar víða í Alpalöndum.

V-I. Fyrsta rýming þar sem varnir uppfylla ekki hönnunarskilmála.

V-II. Hætta er talin geta skapast á stórum snjóflóðum þar sem iðufaldur getur hugsanlega flætt yfir varnavirki, efstu hús.

V-III. Hætta er talin geta skapast á stórum snjóflóðum þar sem iðufaldur getur hugsanlega flætt yfir varnavirki, næstu hús.

V-IV. Hætta er talin á aftakaflóði sem kann að flæða yfir varnargarða. Sérstök hætta kann að skapast ef stoðvirki eru á kafi, fyrri flóð hafa hlaðist upp að gördum eða keilum, eða vísbendingar eru um að nálæg flóð hafi skapað mikla hættu.

Rýmingarstig V-II og V-III eru skilgreind miðað við að fyrstu viðbrögð við snjóflóðahættu geti verið að mæla með því að íbúar á reitum V-II dveljist ekki í herbergjum með glugga eða dyraop upp í hliðina. Ef þörf er talin á frekari viðbúnaði yrðu hús á reitum V-II rýmd en tilmæli um að dveljist ekki í herbergjum glugga eða dyraop upp í hliðina send til íbúa á reitum V-III. Frekari viðbúnaður getur svo falist í að rýma einnig hús á reitum V-III.

Eðlilegast er í ljósi þess sem að framan greinir að rýming á stigi V-IV undir varnavirkjum 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 upptakastoðviki 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 varnavirkja til greina, en fyrri hættusvæði eru sýnd á endurskoðuðu hættumatskorti, m.a. af þessari ástæðu.

Undir Traðarhyrnu er talin nokkur hætta á yfirflæði iðufalds, einkum undir Traðargili og Ytragili, en síður undir Ystagili. Undir Traðargili og Ytragili er því rétt að skilgreina rýmingarsvæði á stigi V-II og V-III sem ná til efstu tveggja húsa-raða undir stóra varnargarðinum.

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 V-I sem nær til efstu tveggja húsa-raða 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 hliðina. 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 rýmingarreitum undir Giljunum innar í bænum.

## **Óvissa**

Óvissa í endurskoðaða hættumatinu neðan varnargarðanna er talin vera 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 varnavirkjanna. 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 u.þ.b. 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 50 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 aftakaaðstæður 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 aftakaaðstæðum, 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 ýms- um vandkvæðum er bundið að meta áhrif þeirra á áhættu fólks í byggð neðan varnavirkja. Í sumum löndum Evrópu er hættumati neðan varnavirkja ekki breytt eftir byggingu þeirra og takmarkanir á nýtingu landsvæða neðan varnavirkja standa því óbreyttar eftir að varnir hafa verið reistar. Hér á landi á skv. reglugerð um hættumat að leggja mat á áhrif varnavirkja til minnkunar áhættu og breyta legu hættumatslína í samræmi við það. Slíkt mat verður óhjákvæmilega mjög óvissu vegna fyrrnefndra takmarkana á skilningi á áhrifum varnavirkja 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 varnavirkja 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 varnavirkjum 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 varnavirkjum. Það felur m.a. í sér að nýta land á hættusvæðum undir varnavirkjum 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.
- Blatny, L., J. M. Gray & J. Gaume (2024). A critical state  $\mu(I)$ -rheology model for cohesive granular flows. *Journal of Fluid Mechanics*, **997**, A67, doi: 10.1017/jfm.2024.643.
- 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 & Landmótun (2009). *Snjóflóðavarnir í Bolungarvík – framhald. Möguleikar á vörn-um 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> (sjá einnig v10/11/12/13; og jafnframt <https://www.openfoam.com>).
- Halldór Björnsson (2002). *Veður í aðdraganda snjóflóðahrina á norðanverðum Vestfjörðum*. Veðurstofa Íslands, greinarg. 02019.
- Hnit & 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 hættumatskorti*. 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.
- Jarosch, A. H., Tómas Jóhannesson, Kristín Martha Hákonardóttir, Hafþór Örn Pétursson (2022). Full three-dimensional simulations of snow-avalanche flow with two-phase, incompressible, granular  $\mu(I)$  rheology using OpenFOAM / interFoam, EGU General Assembly 2022, Vienna, Austria, 23–27 May 2022, EGU22-7984, doi: 10.5194/egu-sphere-egu22-7984.
- 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 – lðuflaldur 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. 271911.
- 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.
- Kristín Martha Hákonardóttir, Ragnar Lárusson, Árni Kristjánsson & Gunnlaugur Pétursson (2024). Loading on structures from fluidized avalanche fronts overflowing deflecting dams at Flateyri, Iceland, January 2020. Í: *Proceedings of the International Snow Science Workshop ISSW 2024, Tromsø, Norway, 23–27 Sept. 2024* (ritstj. Gisnås, K. G., P. Gauer, H. Dahle, M. Eckerstorfer, A. Mannberg & K. Müller). Montana State University.
- Kristján Jónasson, Sven Þ. Sigurðsson & Þorsteinn Arnalds (1999). *Estimation of Avalanche Risk*. Veðurstofa Íslands, rit 99001.
- Lied, K., & S. Bakkehøi (1980). Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographical parameters. *J. Glaciol.*, **26**(94), 165–177.
- NV (2002). *Snjóflóðavarnir í Bolungarvík – Traðarhyrna. Mat á umhverfisáhrifum*. Bolungarvík, Náttúrustofan Vestfjarðar, skýrsla NV-1-02.
- Orion, VA & NGI (1999). *Bolungarvík. Traðarhyrna. Mat á snjóflóðahættu og frumhönnun varnarmannvirkja. Áfangaskýrsla 2*. Reykjavík, Orion ráðgjöf, Verkfræðistofa Austurlands og Norges Geotekniske Institutt, skýrsla BOL0199SK1/VA9913.
- Orion, VA & NGI (2001). *Bolungarvík. Traðarhyrna. Mat á snjóflóðahættu og frumhönnun varnarmannvirkja. 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 [I] 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 Skollahvilt og Innra-Bæjargili 14. janúar 2020*. Veðurstofa Íslands, skýrsla 2020-010.

- Perla, R., T. T. Cheng and D. M. McClung (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. *J. Glaciol.*, **26**(94), 197–207.
- 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.
- SLF (2025). *Three dimensional simulations of the interaction between a snow avalanche and a dam using the Material Point Method and an elastoplastic  $\mu(I)$  rheology model. Case location: Siglufjörður, Iceland*. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF Report G2025.01 (höfundar J. Gaume, L. Blatny, M. Kyburz, S. Margreth).
- 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.
- Sven Sigurðsson, Kristján Jónasson & Thorsteinn Arnalds (1998). Transferring avalanches between paths. Í. *25 years of snow avalanche research* (ritstj. Hestnes, E.) Ósló, NGI, Publikation nr. 203, 259–263.
- Tómas Jóhannesson (1998a). *A topographical model for Icelandic avalanches*. Veðurstofa Íslands, greinarg. 98003.
- Tómas Jóhannesson (1998b). Icelandic avalanche runout models compared with topographic models used in other countries. Í: *25 years of snow avalanche research*. Skýrsla nr. 203, Erik Hestnes, ritstj., 43–52, Ósló, NGI.
- 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-TóJ-2002-04.
- Tómas Jóhannesson (2010). *Áhrif varnarvirkja í Bolungarvík á legu hættumatslína undir Ufsum*. Veðurstofa Íslands, minnisbl. ÚR-TóJ-2010-01.
- Tómas Jóhannesson & Eiríkur Gíslason (2010). *Hættumat neðan varnarvirkja undir Ufsum í Traðarhyrnu við Bolungarvík*. Veðurstofa Íslands, minnisbl. ÚR-TóJ-EG-2010-04.
- Tómas Jóhannesson, P. Gauer, P. Issler & 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 nýtingu hættusvæða vegna ofanflóða*, Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 2024-03-14, málsnr. 2024-0093.
- Tómas Jóhannesson, Harpa Grímsdóttir, Kristín Martha Hákonardóttir, Sveinn Brynjólfsson, Óliver Hilmarsson & Alexander H. Jarosch (2024). Lessons from several aval-

- anches impacting avalanche protective structures in Iceland in January 2020 and March 2023. Í: *Proceedings of the International Snow Science Workshop ISSW 2024, Tromsø, Norway, 23–27 Sept. 2024* (ritstj. Gisnås, K. G., P. Gauer, H. Dahle, M. Eckersforfer, A. Mannberg & K. Müller). Montana State University.
- Tómas Jóhannesson, A. H. Jarosch & Magni Hreinn Jónsson (2025). Three-dimensional simulations of snow-avalanche flow for assessing the effectiveness of protections measures in the run-out zone. Í *International Symposium on Mitigation Measures against Snow Avalanches and Other Rapid Gravity Mass Flows. Ísafjörður, Iceland, September 30 – October 3, 2025* (ritstj. Árni Jónsson o.fl.). Reykjavík, Verkfræðingafélag Íslands.
- 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 mótvægisáðgerðir 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

**$\alpha$ -horn:** Sjónarhorn frá stöðvunarstað snjóflóðs upp að efri brún upptakasvæðis (sjá mynd 6).

**$\beta$ -horn:** Sjónarhorn frá stað í snjóflóðafarvegi þar sem landhalli er 10 upp að efri brún upptakasvæðis (sjá mynd 6).

**$\alpha/\beta$ -líkan:** Staðfræðilegt líkan notað til þess að spá fyrir um úthlaupslengd snjóflóða og til þess að færa snjóflóð á milli farvega. Líkanið notar  $\beta$ -horn til þess að spá fyrir um  $\alpha$ -horn lengsta skráða snjóflóðs í viðkomandi farvegi og á rætur sínar að rekja til Lied & 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  $\sigma$  er staðalfrávik úthlaupshornsins. Snjóflóð með úthlaupshorn  $n\sigma$  lægra en útreiknað  $\alpha$ -gildi er táknað sem snjóflóð með úthlaupslengd  $\alpha - n\sigma$  og  $\alpha + n\sigma$  þegar  $\alpha$ -hornið er hærra en útreiknaða gildið sem fæst með formúlunni hér að ofan. Takið eftir að  $\alpha$ -hornið verður lægra eftir því sem úthlaupslengdin verður meiri þ.a.  $\alpha - \sigma$  jafngildir snjóflóði með lengri úthlaupslengd en svarar til úthlaupshornsins  $\alpha$ .

**PCM-líkan:** Einvítt eðlisfræðilíkan notað til þess að líkja eftir flæði snjóflóða. Líkanið hefur tvo stuðla,  $\mu$ , 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 (Jarosch o.fl., 2022; Tómas Jóhannesson o.fl., 2025). Snjóflóðið er hermt sem blanda af kornóttu efni og lofti sem aflagast skv. svokallaðri  $\mu(I)$  hnigfræði (rheólógíu) (Jop o.fl., 2006; Barker og Gray, 2017). Viðnámslýsing líkansins hefur tvo stuðla,  $\mu_s$  og  $\mu_d$ , 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 snjóflóðalíkön. 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 sveigja 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). Niðurstöður Open- $\mu(I)$ -líkansins hafa verið bornar saman við niðurstöður annars þrívíðs snjóflóðalíkans, sk. MPM líkans (Blatny o.fl., 2024), fyrir snjóflóð úr Strengsgiljum á Siglufirði sem lendir á leiðigarðinum Stóra-Bola (SLF, 2025). Líkönunum ber í aðalatriðum vel saman um flæði snjóflóðsins í árekstrinum við leiðigarðinn.

**Rennslisstig:** Úthlaupslengd 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

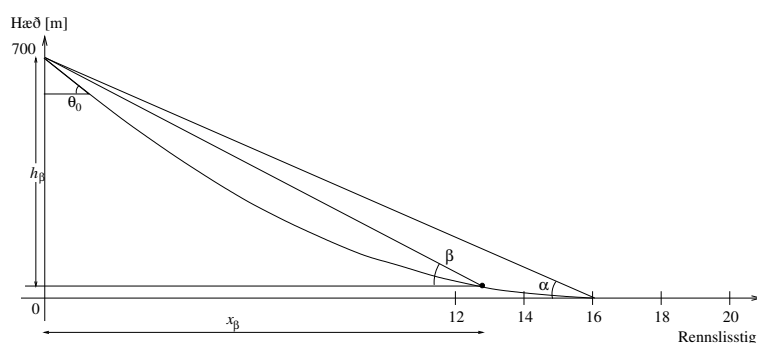
með rennslisstig  $r_0$  er táknað sem snjóflóð með  $r = r_0$ . Aðferð þessi var þróuð af Kristjáni Jónassyni o.fl. (1999).

**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/AvaFrame snjóflóðalíkaninu (Sampl & Granig, 2009; <https://docs.avaframe.org>). 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 | $d$ (m) | $\mu$ |
|--------------|---------|-------|
| 10           | 0.250   | 0.349 |
| 11           | 0.439   | 0.313 |
| 12           | 0.667   | 0.292 |
| 13           | 0.939   | 0.259 |
| 14           | 1.251   | 0.230 |
| 15           | 1.604   | 0.201 |
| 16           | 2.000   | 0.171 |
| 17           | 2.439   | 0.147 |
| 18           | 2.917   | 0.135 |
| 19           | 3.439   | 0.124 |
| 20           | 4.000   | 0.117 |



Mynd 6. Staðalbrekka.  $\alpha$ -hornið er væntigildi úthlaupshorns snjóflóðs samkvæmt  $\alpha/\beta$ -líkani.

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            |
|----------|-----------------|-------------------|
| $\rho$   | 300             | kg/m <sup>3</sup> |
| $\tau_0$ | 0               | Pa                |
| $R_{s0}$ | 0.22            | 1                 |
| $K_D$    | 10 <sup>8</sup> | 1                 |
| $R_D$    | 0.05            | m                 |
| $B_D$    | 15              | 1                 |



## 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,  $\beta = 30.7^\circ$ , rst = 6.9.

**Veður:** 12. des snjóaði í logni 5–8 cm en um kvöldið kvessti af NNA. Fyrir var gamall harður 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 m<sup>3</sup>

Flóðið stöðvaðist við brunnhús ofan við Tröð.

**Braut:** bolu14aa,  $\beta = 30.7^\circ$ , rst = 9.9.

**Veður:** NNA snjökoma.

**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 ( $\alpha$ ): 33°

**Upptök:** Hæð yfir sjó: 550 m Mældur halli ( $\theta$ ): 45°

Orsök: Lausamjöll ofan á ummynduðum snjó.

**Tunga:** Hæð yfir sjó: 47 m Mældur halli ( $\tau$ ): 20°

Þykkt: Meðaltal: 0.4 m

Meðalbreidd: 175 m Lengd: 135 m Rúmmál: 10000 m<sup>3</sup>

Flóðið stöðvaðist um 20 m ofan við Dísarland 14.

**Braut:** bolu15aa,  $\beta = 30.8^\circ$ , rst = 9.1.

**Veður:** Þverfjall kl. 13: Vindátt 235°, vindhraði 4 m/sek., frost  $-7^\circ\text{C}$  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:** Kafsnjór var og erfitt að sjá flóðið.

Þunnur, 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 ( $\theta$ ): 40°

Orsök: Nýr snjór á hjarni.

**Tunga:** Mældur halli ( $\tau$ ): 29°

Þykkt: Meðaltal: 0.3 m

Meðalbreidd: 75 m Lengd: 400 m Rúmmál: 9000 m<sup>3</sup>

115 m frá efstu húsum.

**Veður:** Það byrjaði að snjóa 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 ( $\alpha$ ): 34°

**Upptök:** Hæð yfir sjó: 560 m Mældur halli ( $\theta$ ): 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,  $\beta = 30.7^\circ$ , 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 tréstauro 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 12–15 cm 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 ( $\pm 0.1$ ) m

**Tunga:** Hæð yfir sjó: 94 m

Þykkt: Meðaltal: 0.5 m

Meðalbreidd: 17 m

**Athugasemdir:** Um 20cm lækkun sást á bergmálsmaeli 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 ( $\pm 0.5$ ) 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 m<sup>3</sup>

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 ( $\theta$ ): 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  
Þykkt: 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 ( $\alpha$ ): 34°

**Upptök:** Hæð yfir sjó: 600 m    Breidd: 50 m    Mældur halli ( $\theta$ ): 38°

**Tunga:** Hæð yfir sjó: 90 m    Mældur halli ( $\tau$ ): 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 ( $\alpha$ ): 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 m að þykkt, annars þunnt og dreifist um stórt svæði.

-----

**Númer:** 61486    **Tegund:** Þurrt flekahlaup

**Staðsetning:** Traðargil

**Tími:** 13.3.2026, 10:15

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

**Fylgigögn:** Ljósmynd/ir.

**Lýsing:** Stærðarfl.: 2.5

**Tunga:** Flóðið stöðvaðist á keilunum.

**Athugasemdir:** SM4 í Traðargili sýndi skyndilega lækkun milli 10:10 og 10:20 föstudaginn 13. mars. Talið er að flóðið hafi farið af stað þá.

### 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.** Hámarksdýpt snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknuð með SamosAT snjóflóðalíkaninu á landi án varnargarðs og keilna fyrir tvívítt rennslisstig 17 úr Innra-Gili og Traðargili, rennslisstig 18 úr Ytragili og rennslisstig 16 úr Ystagili. Skriðlengd snjóflóðanna er nærri B-línu hættumats (blá lína á korti) fyrir tilkomu varnargarðanna.
- Kort 5.** Hámarkshraði snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknuð með SamosAT snjóflóðalíkaninu á landi án varnargarðs og keilna fyrir tvívítt rennslisstig 17 úr Innra-Gili og Traðargili, rennslisstig 18 úr Ytragili og rennslisstig 16 úr Ystagili. Skriðlengd snjóflóðanna er nærri B-línu hættumats (blá lína á korti) fyrir tilkomu varna.
- Kort 6.** Lokadýpt í tungum snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknuð með 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.** Hámarksdýpt snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknuð með Open- $\mu(I)$  snjóflóðalíkaninu á landi án varnargarða og keilna. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að þau nær u.þ.b. að B-línu hættumats (blá lína á korti) fyrir tilkomu varna.
- Kort 8.** Hámarksyfirborðshraði snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknaður með 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 9.** Lokadýpt í tungum snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknuð með 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 10.** Hámarksástreymisþrýstingur sem svarar til yfirborðshraða snjóflóða úr Traðarhyrnu reiknaður með 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 11). 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 11.** Endurskoðað hættumat fyrir Bolungarvík eftir byggingu varnarvirkja (A4). Kortið sýnir bæði fyrra hættumat frá 2003 (slitnar línur) og endurskoðaða matið (heil-dregnar línur).

**Myndband 1.** Open- $\mu(I)$  líkankeyrsla á snjóflóðum úr upptakasvæðum í innanverðri Traðarhyrnu á landlíkani án varnargarða og keilna<sup>1</sup>. Skriðlengd snjóflóðanna er stillt af þannig að þau ná u.þ.b. að B-línu hættumats fyrir tilkomu varnarvirkja. Niðurhalsslóð myndbandsins er:

<https://www.vedur.is/gogn/snjoflod/haettumat/bo/bolungarvik-open-mul-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 falla<sup>1</sup>. 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-mul-RA1a2a3-dam-snow-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 falla<sup>1</sup>. 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-mul-RA6a7-dam-snow-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 falla<sup>1</sup>. 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-mul-RA6a7-dam-no-snow-anim-landscape.mp4>

---

<sup>1</sup>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.

Kort 1  
Yfirlitskort, hættumetið svæði

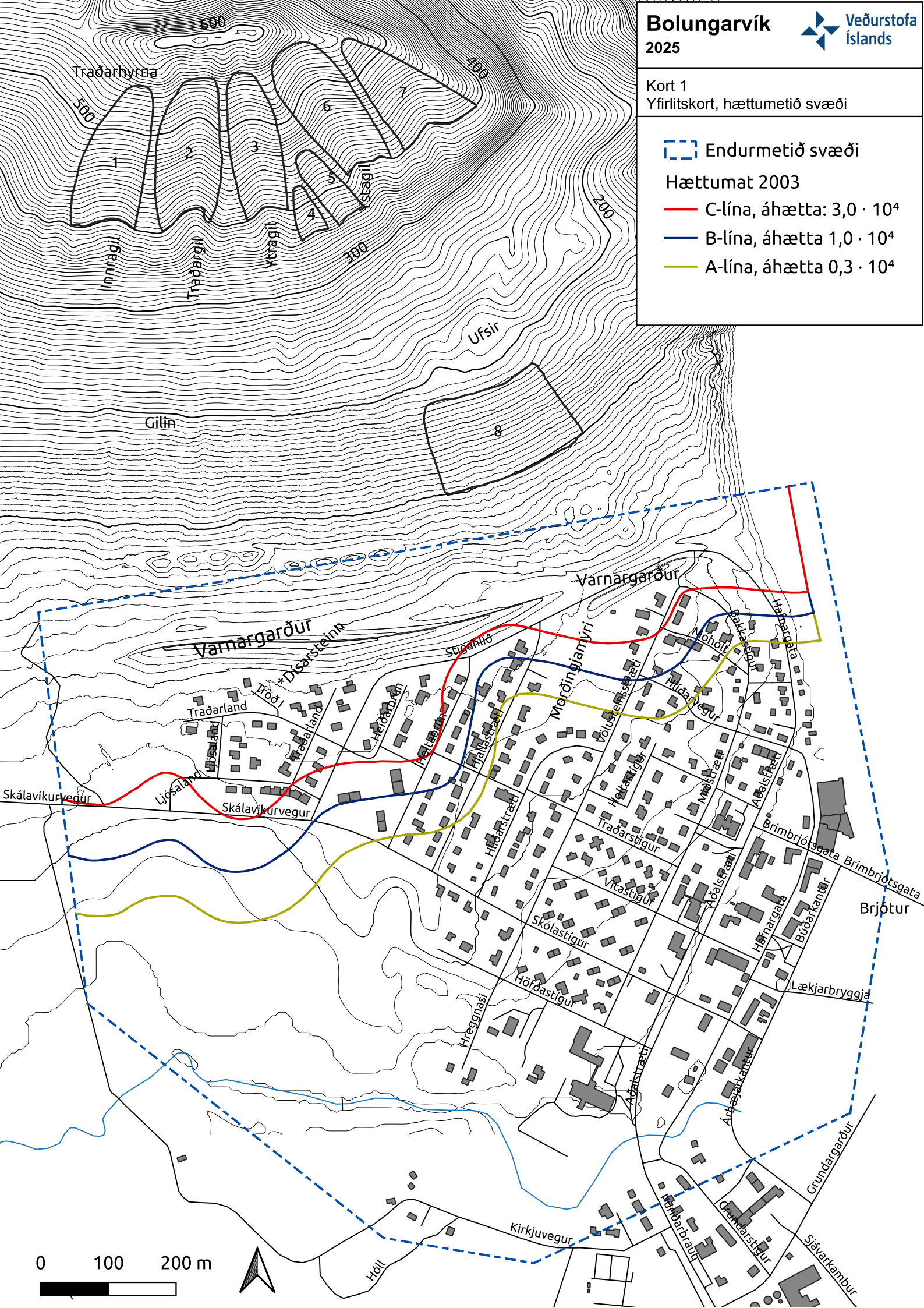
Endurmetið svæði

Hættumat 2003

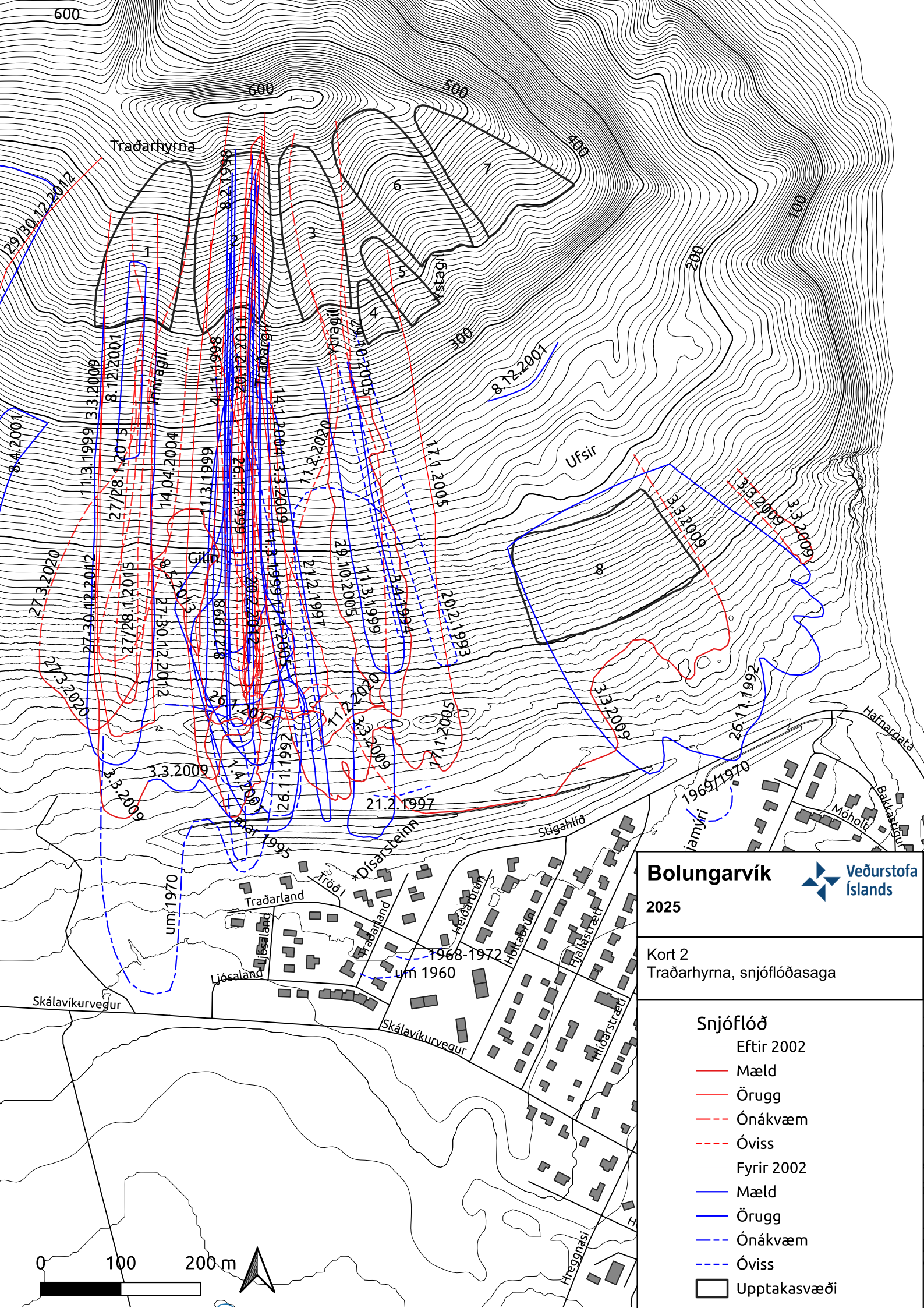
C-lína, áhætta:  $3,0 \cdot 10^4$

B-lína, áhætta  $1,0 \cdot 10^4$

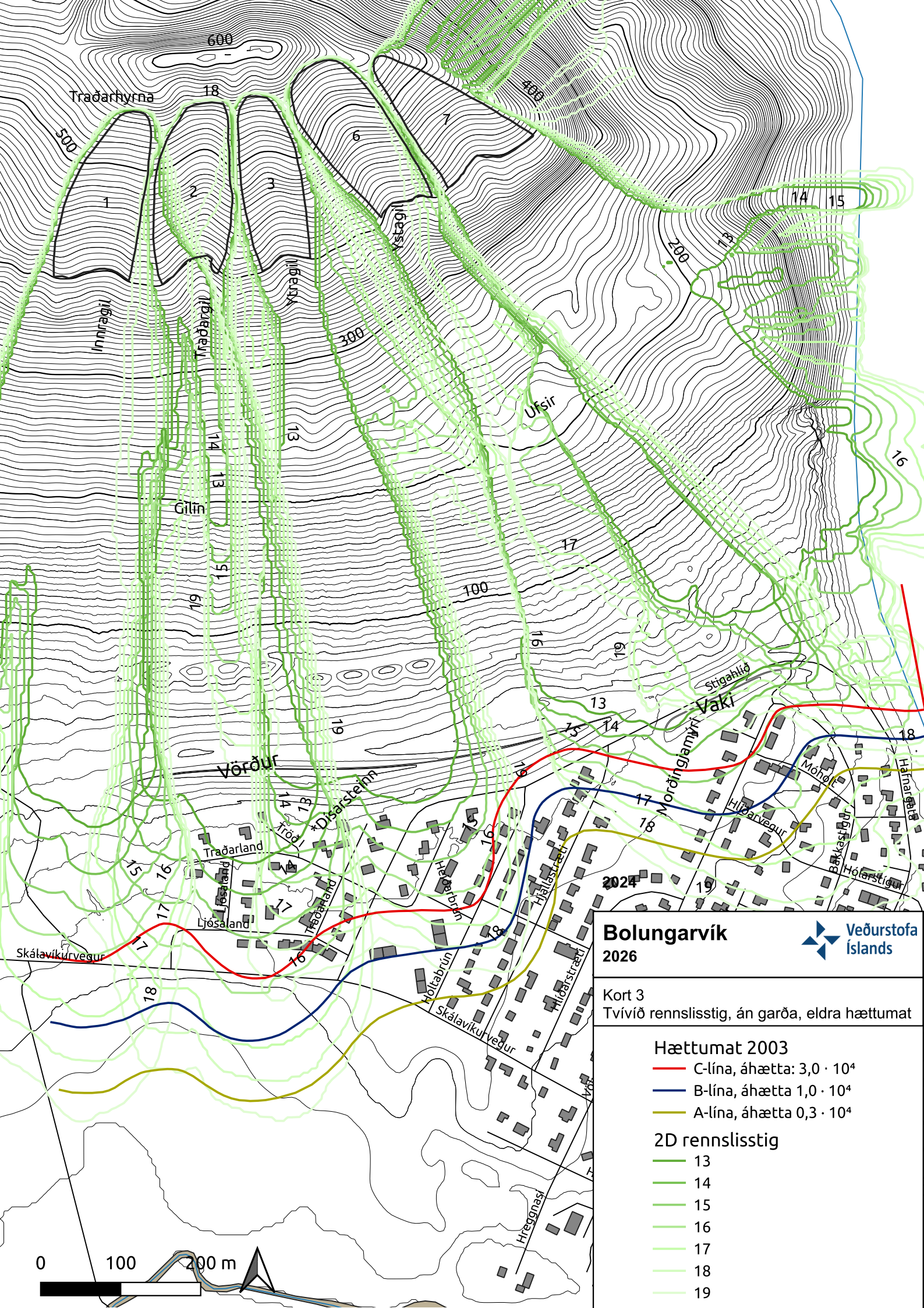
A-lína, áhætta  $0,3 \cdot 10^4$











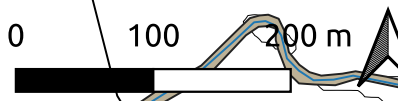
**Bolungarvík**  
2026



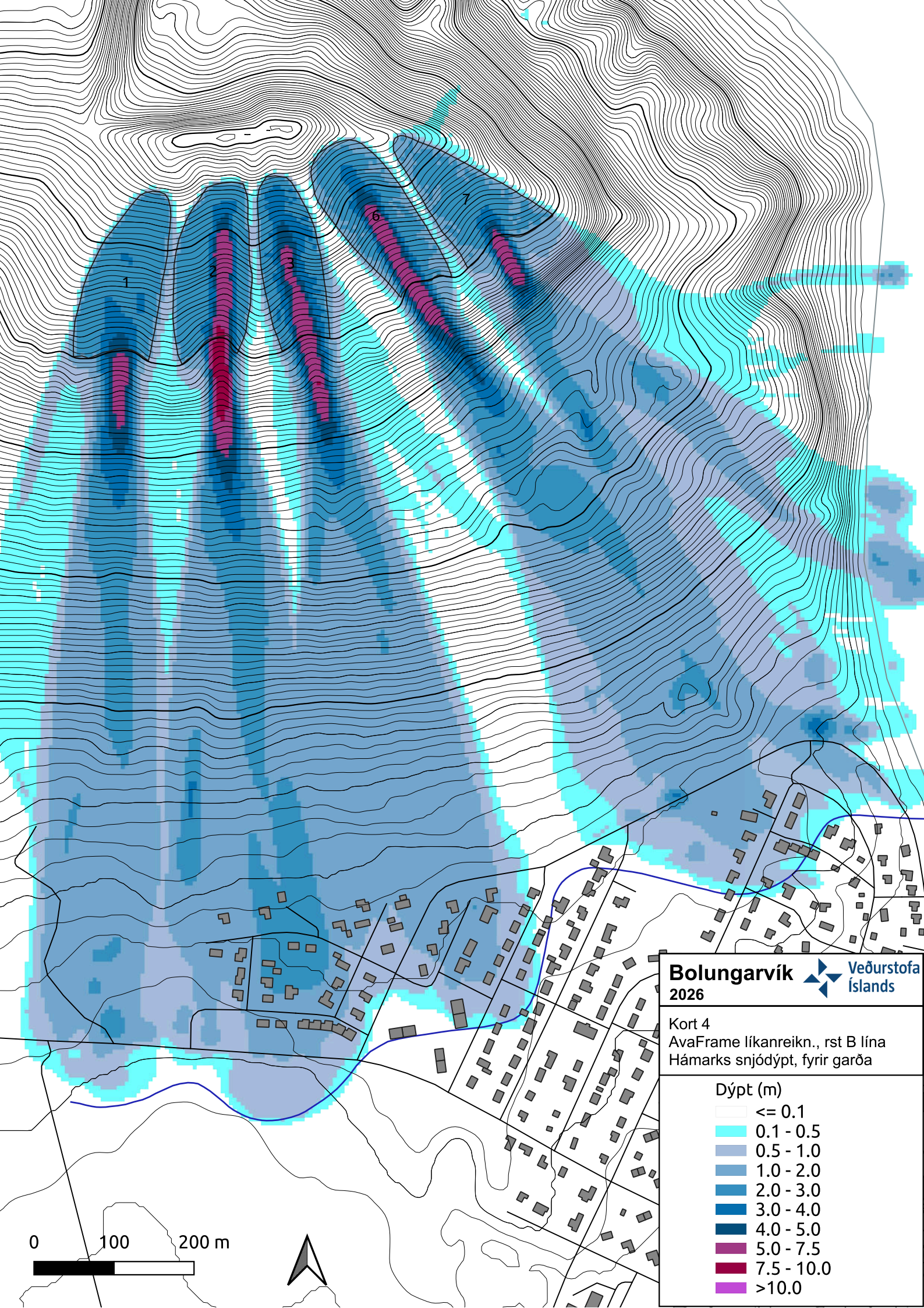
Kort 3  
Tvívíð rennslisstig, án garða, eldra hættumat

- Hættumat 2003**
- C-lína, áhætta  $3,0 \cdot 10^4$
  - B-lína, áhætta  $1,0 \cdot 10^4$
  - A-lína, áhætta  $0,3 \cdot 10^4$

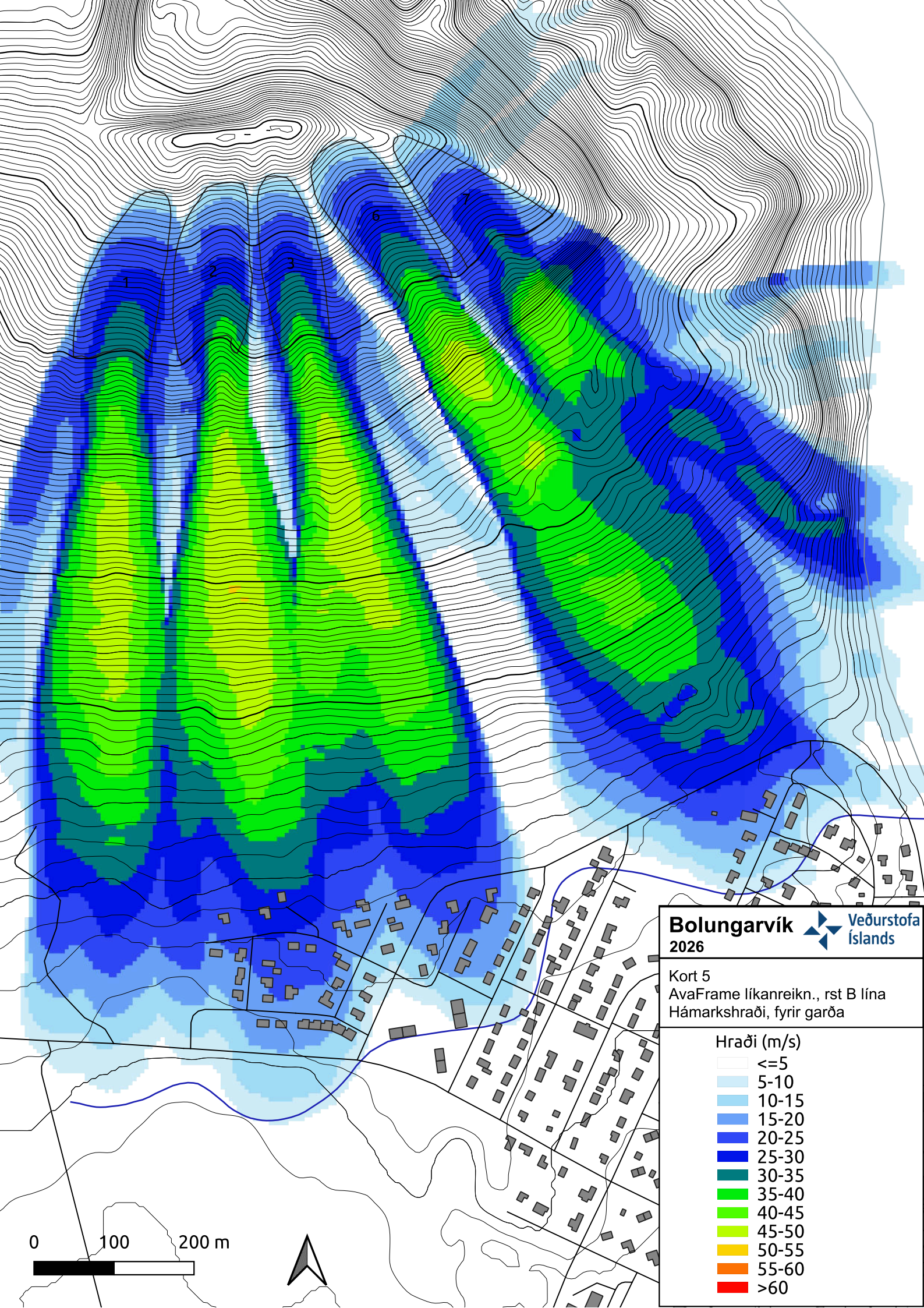
- 2D rennslisstig**
- 13
  - 14
  - 15
  - 16
  - 17
  - 18
  - 19



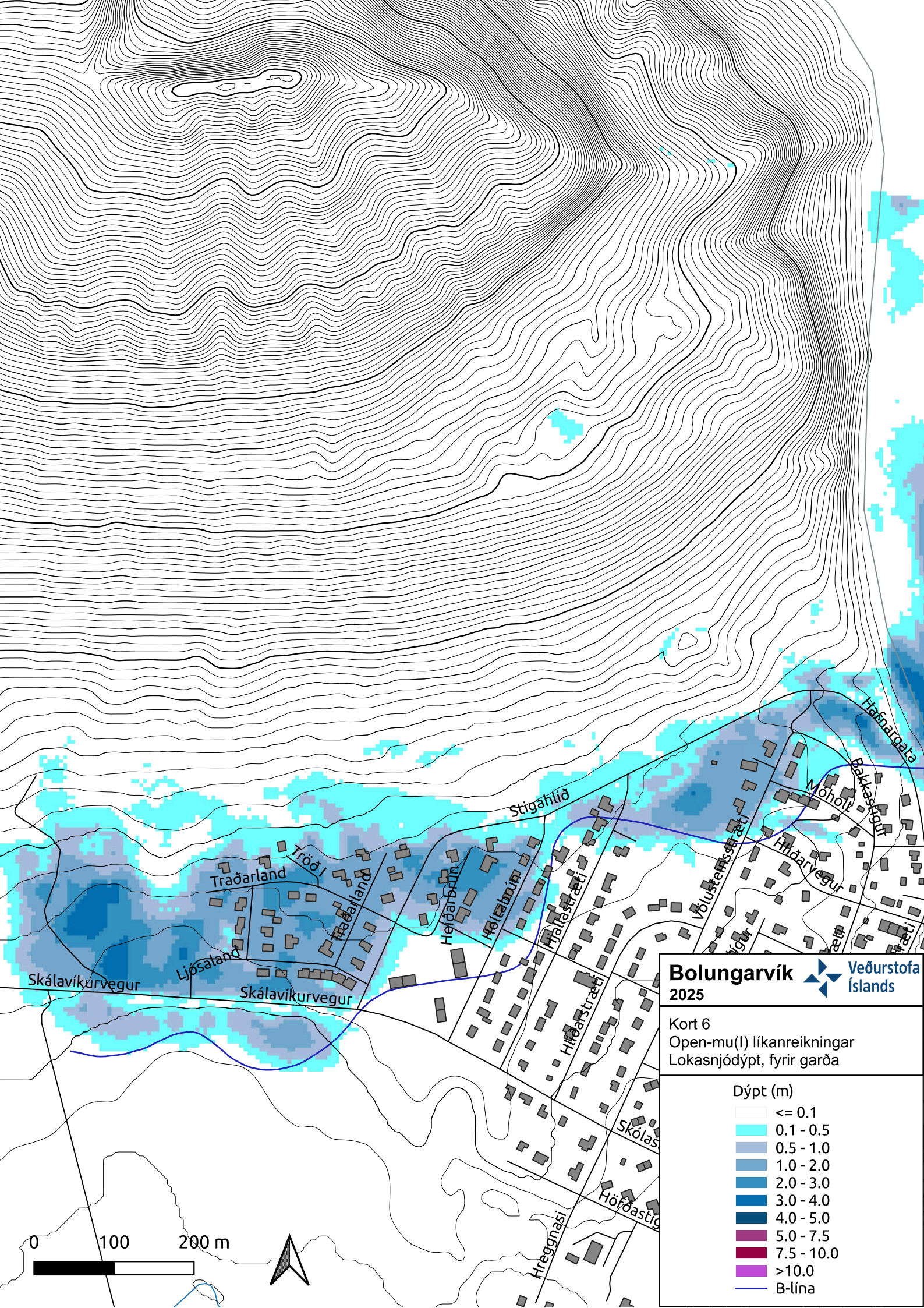




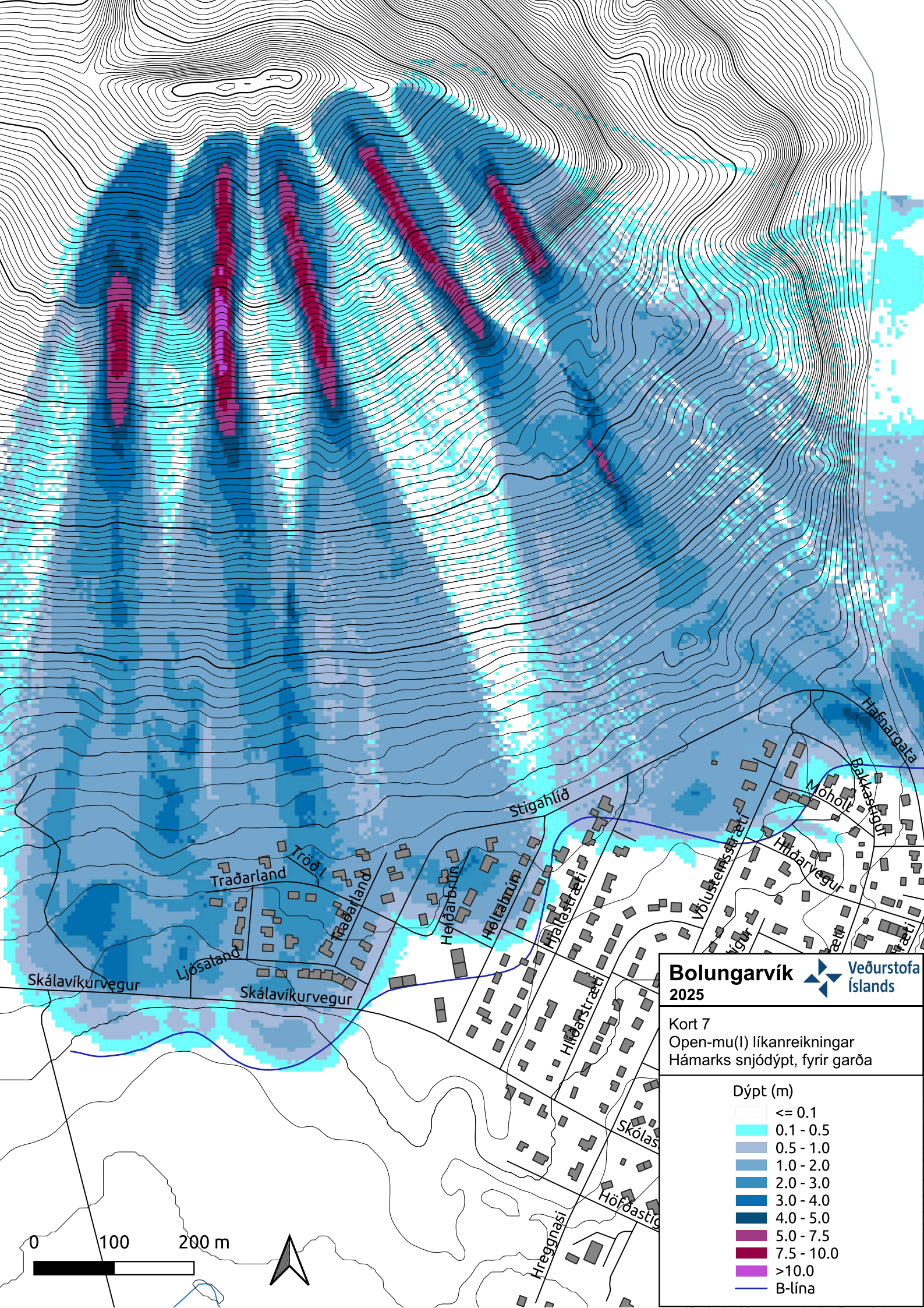










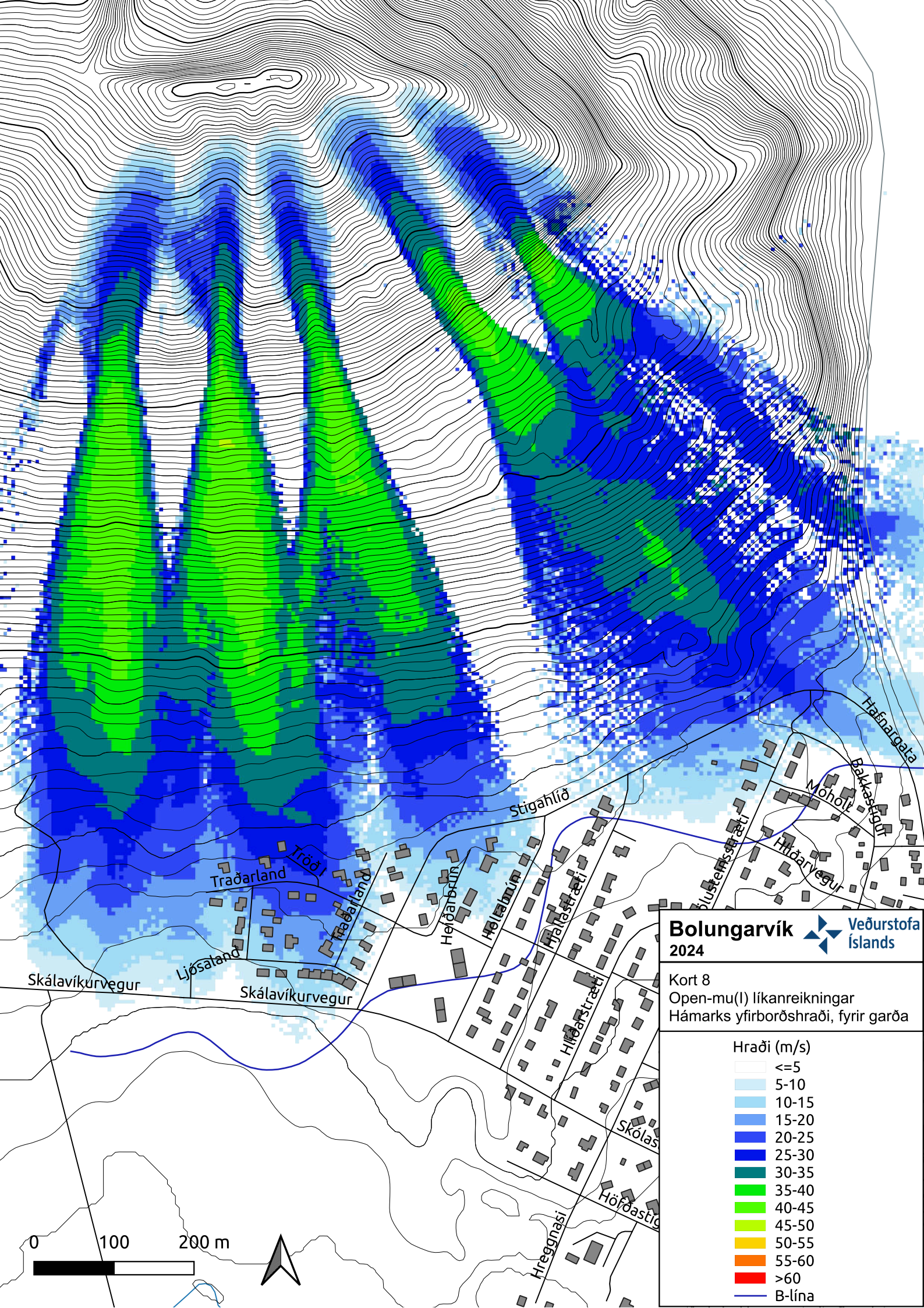


**Bolungarvík**  **Veðurstofa Íslands**  
2025

Kort 7  
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**  **Veðurstofa Íslands**

**2024**  
Kort 8  
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



