



Mat á endurkomutíma óveðursflóða reiknað með Delft3D-FM

Halldór Björnsson
Guðrún Elín Jóhannsdóttir
Angel Ruiz Angulo
Kevin Dubois
Emil Snorri Árnason

Mat á endurkomutíma óveðursflóða reiknað með Delft3D-FM

Halldór Björnsson
Guðrún Elín Jóhannsdóttir
Angel Ruiz Angulo
Kevin Dubois
Emil Snorri Árnason

Skýrsla nr. VÍ 2022-009	Dags. Desember 2022	ISSN 1670-8261	Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Mat á endurkomutíma óveðursflóða reiknað með Delft3D-FM		Upplag: Rafræn útgáfa Fjöldi síðna: 44	
		Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir	
Höfundar: Halldór Björnsson, Guðrún Elín Jóhannsdóttir, Angel Ruiz Angulo, Kevin Dubois og Emil Snorri Árnason		Verkefnisstjóri: Halldór Björnsson	
		Verknúmer: 4761-0-0003	
Gerð skýrslu/verkstíg:		Málsnúmer: 2019-0172	
Unnið fyrir: Ofanflóðasjóð			
Samvinnuaðilar: Vegagerðin, Háskóli Íslands, Háskólasetur Vestfjarða			
Útdráttur: Fyrsta mat á endurkomutíma sjávarflóða fyrir allt landið er kynnt. Þetta mat byggir á keyrslum með reiknilíkaninu Delft3D-FM frá hollensku Deltares stofnuninni. Líkanið var sett upp fyrir þétt reikninet á öllu landinu og reikniniðurstöður á 10 mín. fresti varðveittar í 90 reiknipunktum umhverfis landið fyrir tímabilið 1996–2017. Unnið var úr reikniniðurstöðum með aðferð almennrar aftakgreiningar og slembifasa, lagt ítarlegt mat á óvissuþætti í niðurstöðum, m.a. með samanburðarreikningum fyrir tímabilið 1980–1997. Byggt á þessum niðurstöðum var skilgreint viðmiðunarflóð sem reiknað var yfir í hæðarkerfi ÍslandsDEM og flóðahæð borin saman við nákvæmt hæðarlíkan af ströndinni. Þannig var hægt að leggja mat á hversu langt aftakaflóð væru líkleg til að ná inn á landið. Þessar niðurstöður voru kortlagðar og skýrslan ásamt fylgiskjali sýnir kort fyrir alla byggðarkjarna við strönd Íslands. Niðurstaða og óvissuþættir eru rædd frekar og gerð tillaga um framhald flóðamats.			
Lykilorð: Tölfræði, reiknifræði, sjávarflóð		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs: 	
		Undirskrift verkefnisstjóra: 	
		Yfirfarið af: SG, SigK	

Efnisyfirlit

Myndaskrá.....	5
Töfluskrá.....	6
1 Inngangur	7
2 Aðferðir	8
3 Niðurstöður.....	9
4 Umræða	23
5 Lokaorð	25
Heimildir.....	27
Viðauki A.....	30
A1 Uppsetning og keyrslur á Delft 3D-FM líkaninu	30
A2 Úrvinnsla á reikniniðurstöðum líkans	35
A2.1 Óvissa í mati á flóðahæð	35
A2.1.1 Þáttur loftþrýstings	36
A2.1.2 Óvissa vegna tímasetningar óveðursflóða og sjávarfalla	38
A2.1.3 Tölfræðileg óvissa í mati á stuðlum	42
A3 Kortlagning niðurstaðna.....	45
A3.1 Óvissa tengd kortlagningu niðurstaðna	45

Myndaskrá

Mynd 1 Viðmiðunarflóðið sem notað er í þessari skýrslu brúað umhverfis landið.....	10
Mynd 2 Hæð 100 ára viðmiðunarflóðs. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð á hverjum stað eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.....	11
Mynd 3 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á höfuðborgarsvæðinu.....	12
Mynd 4 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Álftanesi.	13
Mynd 5 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs í Hafnarfjarðarhöfn.....	14
Mynd 6 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs í miðbæ Reykjavíkur.....	14
Mynd 7 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Seltjarnarnesi og Eiðisgranda.....	15
Mynd 8 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Ísafirði.	16
Mynd 9 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs innst í Eyjafirði.....	17
Mynd 10 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Akureyri.	18
Mynd 11 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Eskifirði.....	19
Mynd 12 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Höfn í Hornafirði.....	20
Mynd 13 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs í Vík.....	21
Mynd 14 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs í Reykjanesbæ og á Vogum.....	22
Mynd A1 Reikninet Delft3D-FM umhverfis landið.	31
Mynd A2 Stöðvar þar sem gögnum var safnað úr líkaninu skv. lista frá Vegagerðinni.....	31
Mynd A3 Sjávarhæð á Húsavík í lok desember 2015 samkvæmt Delt3D-FM.....	32
Mynd A4 Samanburður á lofthjúpsþætti sjávarhæðar (veðurflóð) á Húsavík í lok desember 2015 og loftþrýstings..	33
Mynd A5 Útslag sjávarfallabylgju.....	34
Mynd A6 Hlutfallslegt útslag sjávarfalla miðað við útslagið í Reykavík.....	34
Mynd A7 Hæð h100, flóðs með 1% árslíkur á 90 stöðum umhverfis landið, reiknað með almennu aftakadreifingunni á árshámarks hveggja raðar. Myndin sýnir óveðursflóð án áhrifa sjávarfalla.	35
Mynd A8 Samband mestu sjávarhæðar hvers mánaðar (m) og minnsta loftþrýstings (hPa)	37
Mynd A9 Hæð flóðs ef loftþrýstingur væri 920 hPa.	38
Mynd A10 Hæð 100 ára flóðs í upphaflegu 21 árs keyrslu Delft3D-FM þar sem áhrif sjávarfalla og breytinga í lofthjúpi eru bæði tekin með í reikninginn.	39
Mynd A11 Miðgildi h100 fyrir 500 ólíkar staðgönguraðir með aðferðinni sem lýst er í textanum. ...	40
Mynd A12 Hæð hundrað ára flóðs miðað við 95% mörk dreifingarinnar.....	40
Mynd A13 Mismunur á miðgildi h100 þegar notað er miðgildi 500 staðgönguraða og upphaflegra reikniniðurstæðna Delft3D-FM (sjá mynd A5).	41
Mynd A14 Hækkun á hundrað ára flóði frá úrvinnslu 500 staðgönguraða í 95% hlutfallsmark raðanna.....	41
Mynd A 15 Samanburður á líkankeyrslum fyrir sameiginlega tímabilið 1996 og 1997.	43
Mynd A 16 Mismunur hæðar 100 ára flóðs þegar notaðar eru keyrslur 1996 - 2016 og þegar notaðar eru keyrslur 1980 til 2016.....	44
Mynd A 17 Breytingar á 100 ára hæð óveðursflóða þegar reiknað er með tímabilinu 1980 til 2017 .44	

Töfluskrá

Tafla A1. Þeir byggðarkjarnar sem sýndir eru nánar á viðmiðunarflóðskortum í fylgiskjali skýrslunnar.....	46
---	----

1 Inngangur

Í þessari skýrslu er lagt mat á aftakaflóð umhverfis landið. Reiknað er kort fyrir strandsvæði á landinu sem sýnir hæð flóða sem hafa 1% árslíkur, sk. 100-ára-flóð. Síðan eru einstakar byggðir skoðaðar sérstaklega. Þetta verkefni er hluti af stærra verkefni um áhættumat á strandflóðum við landið, og þetta mat er fyrsta skref í ítarlegri kortlagningu flóðahættu fyrir einstaka byggðarkjarna. Á grundvelli þess á að vera hægt að forgangsraða stöðum þar sem gera þarf ítarlegri úttekt.

Sjávarflóð valda reglulega tjóni og truflun á starfsemi í höfnum eða á öðrum strandsvæðum. Í nýlegri samantekt kemur fram að heimildir eru um 84 sjávarflóð á síðari helmingi 20. aldar (Guðrún E. Jóhannsdóttir, 2017), en í eldri samantekt kemur fram að um 6 markverð flóð verði á hverjum áratug (Páll Imsland og Þorleifur Einarsson, 1991). Ein af afleiðingum loftslagsbreytinga er hækkun sjávarstöðu. Á tímabilinu 1901–2018 hækkaði sjávarstaða í heiminum um 20.2 cm að meðaltali en hækkunin síðustu áratugi hefur verið um 3.6 cm á áratug (Kemper o.fl., 2021).

Til að meta hættu vegna sjávarflóða þarf að hafa góð gögn um hæð sjávarstöðu, helst byggða á langtímamælingum. Mælingar á hæð sjávarborðs hafa verið stundaðar í allmörgum höfnum á landinu. Þær ná yfir mismörg tímabil og eru ekki alls staðar heillegar. Best eru gögnin frá Reykjavíkurbænum þar sem samfelldar mælingar ná aftur til ársins 1956. Margir hafa spreytt sig á að vinna úr þeim gögnum (Sveinn Valdimarsson og Jónas Elíasson, 1993, Jónas Elíasson, 1996, Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, 2006, Matthías Á. Jónsson o.fl., 2017) og lagt mat á hæð þess flóðs sem hefur 1% árslíkur, þ.e. hins sk. 100-ára-flóðs, h_{100} .

Yfirlit um stöðu mælinga á sjávarhæð má finna í skýrslu um nýjar viðmiðunarreglur fyrir skipulag á lágsvæðum (Sigurður Sigurðarsson, 2018), en þar eru eldri viðmiðunarreglur frá því fyrir aldamót uppfærðar (Fjarhitun, 1992, 1995). Í skýrslunni er farið yfir fyrirbyggjandi gögn, útreikninga á h_{100} í Reykjavík, og bent á að ef sjávarhæð hækkar um 30 cm verða flóð sem nú hafa 100 eða 200 ára endurkomutíma mun algengari, eða með tveggja ára endurkomutíma.

Utan Reykjavíkur eru mælingar misgóðar og ná yfir skemmra tímabil. Þó unnið hafi verið úr þeim mæliröðum, fyllt í stutt göt og tímahliðranir leiðréttar (Guðjón Scheving Tryggvason, 2016, 2017) duga gögnin ekki til þess að meta hæð flóða með 100 ára endurkomutíma umhverfis landið. Á síðustu árum hefur verið stefnt að því að betrubæta mælingar á sjávarhæð umhverfis landið með það að markmiði að í framtíðinni verði til gögn til að byggja á mat á aftakaflóðum og sjávarstöðuhækkun. Nokkuð mörg ár munu þó líða áður en hægt verður að nýta nýtt mælinet til að leggja mat á sjávarstöðuhækkun eða flóðahættu (t.d. meta tölfræðilega hæð aftakaflóða h_{100} frá mælingum). Niðurstaðan er því sú að enn sem komið er er ekki hægt að byggja mat á núverandi flóðahættu á mæligögnum, en það stendur til bóta.

Hvað næstu áratugi varðar þarf áhættumat á sjávarflóðum umhverfis landið að bæta líklegum sjávarstöðubreytingum við mat á núverandi flóðahættu. Í skýrslu Vísindanefndar um loftslagsbreytingar (Halldór Björnsson o.fl., 2018) voru niðurstöður IPCC frá 2013 (Church o.fl., 2013) aðlagðar að íslenskum aðstæðum m.a. m.t.t. landhæðarbreytinga og lagt mat á hækkun sjávarborðs til loka aldarinnar að gefnum sviðsmyndum um 50–100 cm hnattræna hækkun sjávarstöðu. Unnið er að uppfærslu þessa mats m.a. með hliðsjón af skýrslu IPCC frá 2021 (Kemper o.fl., 2021).

Tilgangur þessarar skýrslu er að leggja mat á aftakaflóð við núverandi aðstæður og í framhaldi þess verður matið endurreiknað fyrir forsendur um hækkun sjávar. Þar sem mælingar eru enn ekki fullnægjandi fyrir slíkt mat umhverfis landið er hér unnið úr niðurstöðum strandlíkans og þær notaðar í stað mælinga.

Á Veðurstofu Íslands hefur um nokkurt skeið verið unnið að uppsetningu strandlíkansins Delft3D-FM (Deltares, 2020a, 2020b), m.a. með það að markmiði að geta spáð fyrir um sjávarflóð. Reikniniðurstöður eru notaðar til þess að leggja tölfraðilegt mat á hæð aftakaflóða og þær niðurstöður síðan reiknaðar yfir á landhæðarlíkan og gerð flóðakort, þ.e. skoðað á hvaða svæðum geti reynst flóðahætta. Þetta er fyrsta skref í að meta áhættu á sjávarflóðum. Síðar verður tekið tillit til sjávarstöðubreytinga vegna loftslagsbreytinga og á grunni niðurstaðna má velja staði sem brýnt er að skoða nánar hvað varðar flóðahættu, tjón og áhættu (Guðrún Elín Jóhannsdóttir, 2020).

Skipulag þessarar skýrslu er eftirfarandi. Í næsta kafla er farið stuttlega yfir aðferðir en nánari lýsing á þeim er í viðaukum. Að því loknu er farið yfir niðurstöður og flóðakort eru sýnd fyrir landið og nokkra þéttbýlisstaði. Flóðakort fyrir alla byggðarkjarna við strönd landsins eru í fylgiskjali. Skýrslunni lýkur með umræðukafla.

2 Aðferðir

Hæð óveðursflóða var reiknuð með Delft3D-FM (Deltares, 2020a, 2020b) strandlíkaninu. Það leysir hinar ólínulegu grunnvatnsjöfnur og prófanir hafa sýnt að því tekst vel að herma óveðursflóð á landinu. Tvenns konar reikningar voru gerðir fyrir tímabilið 1996–2016. Fyrst var líkanið keyrt með vindum og loftþrýstingi ásamt sjávarföllum, og svo voru reikningarnir endurteknir fyrir sjávarföllin eingöngu. Mismunur niðurstaðna er veðurþátturinn í sjávarstöðu og könnun leiddi í ljós að lágur loftþrýstingur var oftast orsök þess ef veðurdrifni þáttur flóðsins varð hár. Líkanið er þó ekki með innbyggðu öldulíkani sem þýðir að í þeim strandbyggðarkjörnum þar sem ölduþátturinn er ráðandi vanmetur líkanið hæð óveðursflóða. Þeir staðir þar sem vanmat á hæð óveðursflóða er sérstaklega áberandi eru Borgarnes, Grindavík og Vík í Mýrdal, en leiða má líkum að því að vanmat vegna skorts á öldulíkani sé einnig til staðar víðar við suðurströndina. Nánari lýsingu á líkaninu, uppsetningu þess og prófunum má finna í Viðauka A1.

Nokkrar aðferðir voru prófaðar við að meta aftakaflóð. Að lokum var aðferð almennra aftaka á árshámörk niðurstaðna beitt og 100 ára flóðahæð reiknuð. Óvissa í niðurstöðum var könnuð ítarlega, bæði með því að skoða mestu hæð óveðursflóða miðað við lægsta loftþrýsting sem mælst hefur á landinu og með því að kanna áhrif þess ef óveðursflóð hefðu hitt öðruvísi á sjávarföll. Loks voru niðurstöður sem fengnar voru með reikningum með lofthjúpsgögnum eingöngu fyrir tímabilið 1980–1995 notaðar til þess að leggja mat á tölfraðilega óvissu í mati á 100 ára hæð. Byggt á niðurstöðum óvissumats var hæð viðmiðunarflóðs miðuð við 95% óvissumörk, en nánar má lesa um aðferðir við úrvinnslu líkanreikninga í Viðauka A2.

Niðurstöður um hæð aftakaflóða voru aðlagðar að landshæðarkerfinu ÍslandsDEM og þær svo kortlagðar með splæsibrúun. Þannig var gert kort af viðmiðunarflóði sem borið var saman við landhæð í ÍslandsDEM hæðarlíkaninu. Skoðað var hvort vatnshæðin í viðmiðunarflóði væri hærri en landhæð í reikninetinu. Þetta var gert fyrir allt strandsvæði Íslands auk þeirra eyja þar sem fólk hefur fasta búsetu. Einnig var sérhver byggðarkjarni við ströndina kortlagður m.t.t. flóðahættu. Niðurstöður fyrir höfuðborgarsvæðið, Ísafjörð, Akureyri, Eskifjörð, Höfn í Hornafirði, Vík í Mýrdal, Reykjanesbæ og Voga eru ræddar í næstu grein. Niðurstöður fyrir ólíka landshluta og alla byggðarkjarna við ströndina (sjá yfirlit í töflu A1) má sjá í fylgiriti, en nánar er fjallað um aðferðir við kortlagningu í Viðauka A3.

3 Niðurstöður

Kort af viðmiðunarflóðinu er sýnt á mynd 1 sem sýnir hæð hundrað ára flóðs í hæðarkerfinu ISH2004 miðað við 95% mörk dreifingarinnar eftir brúun á milli reiknipunkta. Þessa flóðhæð má bera saman við ÍslandsDEM hæðarlíkanið og finna hvar hæð viðmiðunarflóðsins er meiri en landhæð. Þetta má sjá á mynd 2 sem sýnir kort af niðurstöðum fyrir allt landið. Gerð hafa verið kort af ólíkum landshlutum og öllum byggðarkjörnum við ströndina og þau má finna í fylgiskjali (sjá yfirlit í töflu A1). Í þessari skýrslu eru sýndar ítarlegri niðurstöður frá nokkrum þéttbýlisstöðum (sjá rauðregna ferhyrninga á mynd 2) og verða niðurstöður fyrir þá ræddar stuttlega hér.

Mynd 3 sýnir niðurstöður frá höfuðborgarsvæðinu (sjá nánar myndir 4–7), niðurstöður frá Ísafirði má sjá á mynd 8, Akureyri á myndum 9–10, Eskifirði á mynd 11, Höfn í Hornafirði á mynd 12, Vík í Mýrdal á mynd 13 og Reykjanesbæ og Vogum á mynd 14. Hér verður niðurstöðum fyrir ofangreinda staði lýst stuttlega, en nánari umfjöllun m.t.t. annmarka aðferðarinnar og þekktra flóða er að finna í kafla 4. Þessa þætti er mikilvægt að hafa í huga við túlkun niðurstaðna þar sem aðferðin sem hér er beitt reiknar ekki útbreiðslu einstakra flóða.

Mynd 3 sýnir hvar viðmiðunarflóðið er hærra en landhæð á höfuðborgarsvæðinu. Þar má m.a. sjá talsverða útbreiðslu flóðs á Álftanesi og Seltjarnarnesi, auk nokkurs flóðs í byggð við Eiðisgranda og í Hafnarfjarðar- og Reykjavíkurhöfnum. Þar sést líka hvernig flætt getur á landfyllingu á Kársnesi og að möguleiki er á að flæði yfir Hafnarfjarðarveg þar sem Kópavogslækurinn rennur út í Kópavog. Einnig er flóð innst í Leiruvogi þar sem flæðir m.a. yfir flugbraut Tungubakkaflugvallar. Nánar má sjá útbreiðslu viðmiðunarflóðsins á Álftanesi á mynd 4, í Hafnarfjarðarhöfn á mynd 5, í miðbæ Reykjavíkur á mynd 6 og á Seltjarnarnesi á mynd 7.

Mynd 8 sýnir að viðmiðunarflóðið er talsvert hærra en landhæðin víða á Ísafirði. Sjá má flóð á byggðu svæði á Skutulsfjarðareyri, flugvallarsvæðinu á Skipeyri og víðar. Einnig flæðir yfir vegi og hafnarsvæði.

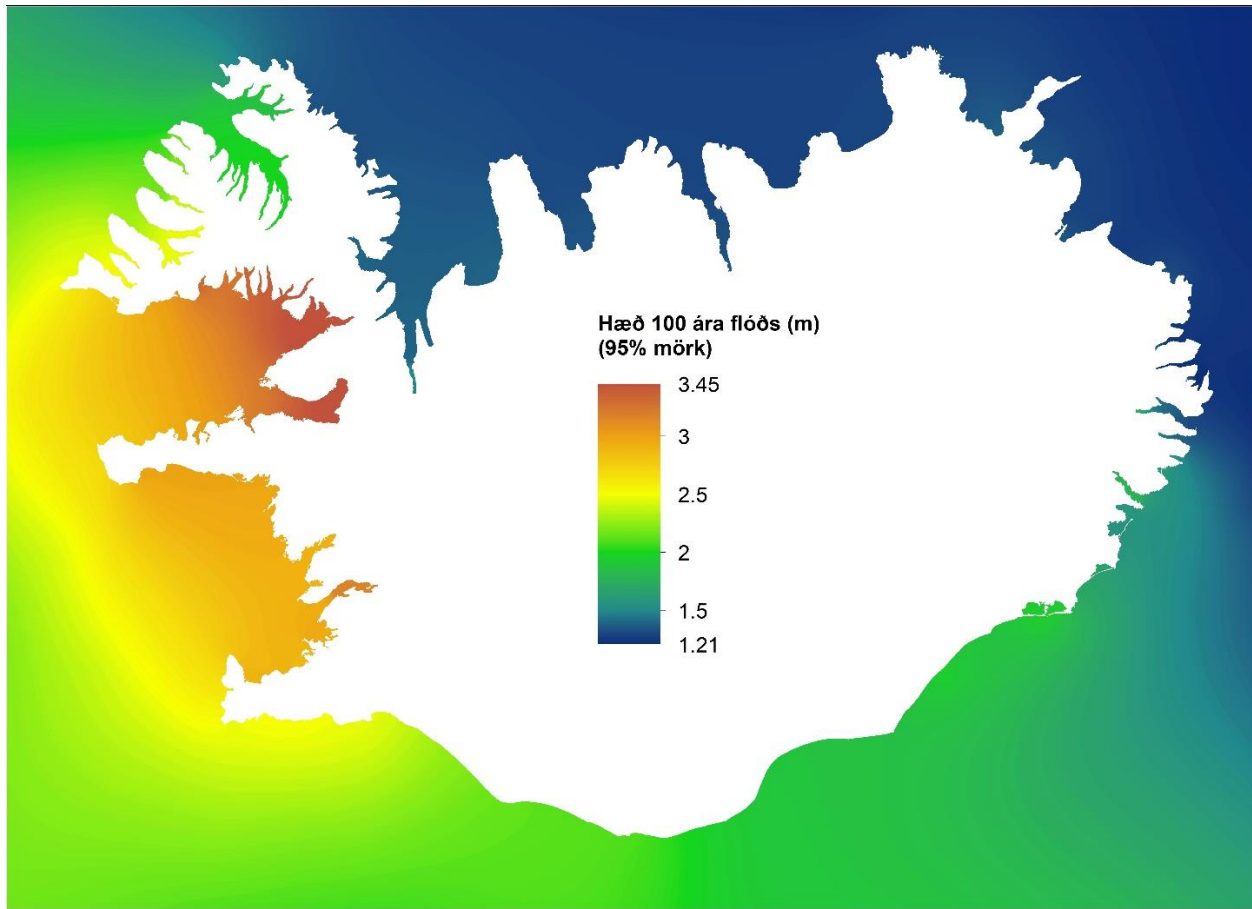
Mynd 9 sýnir hæð viðmiðunarflóðsins innst í Eyjafirði. Þar má sjá hvernig flæðir yfir Drottningarbraut og þjóðveg 1 þar sem hann þverar Eyjafjörð í framhaldi af Leiruvegi. Einnig flæðir yfir flugvallarsvæðið, áreyrarnar og upp með Eyjafjarðaránni. Talsvert flóð má sjá á Oddeyri, en það sést betur á stækkaðri mynd af Akureyri á mynd 10.

Á mynd 11 sést hvar viðmiðunarflóðhæðin er hærri en landhæðin á Eskifirði. Þar sést m.a. hvernig hús á Mjóeyri eru umflotin, auk þess sem það flæðir yfir vegi og talsvert á hafnarsvæðinu, leirunni og í kringum Eskifjarðarána.

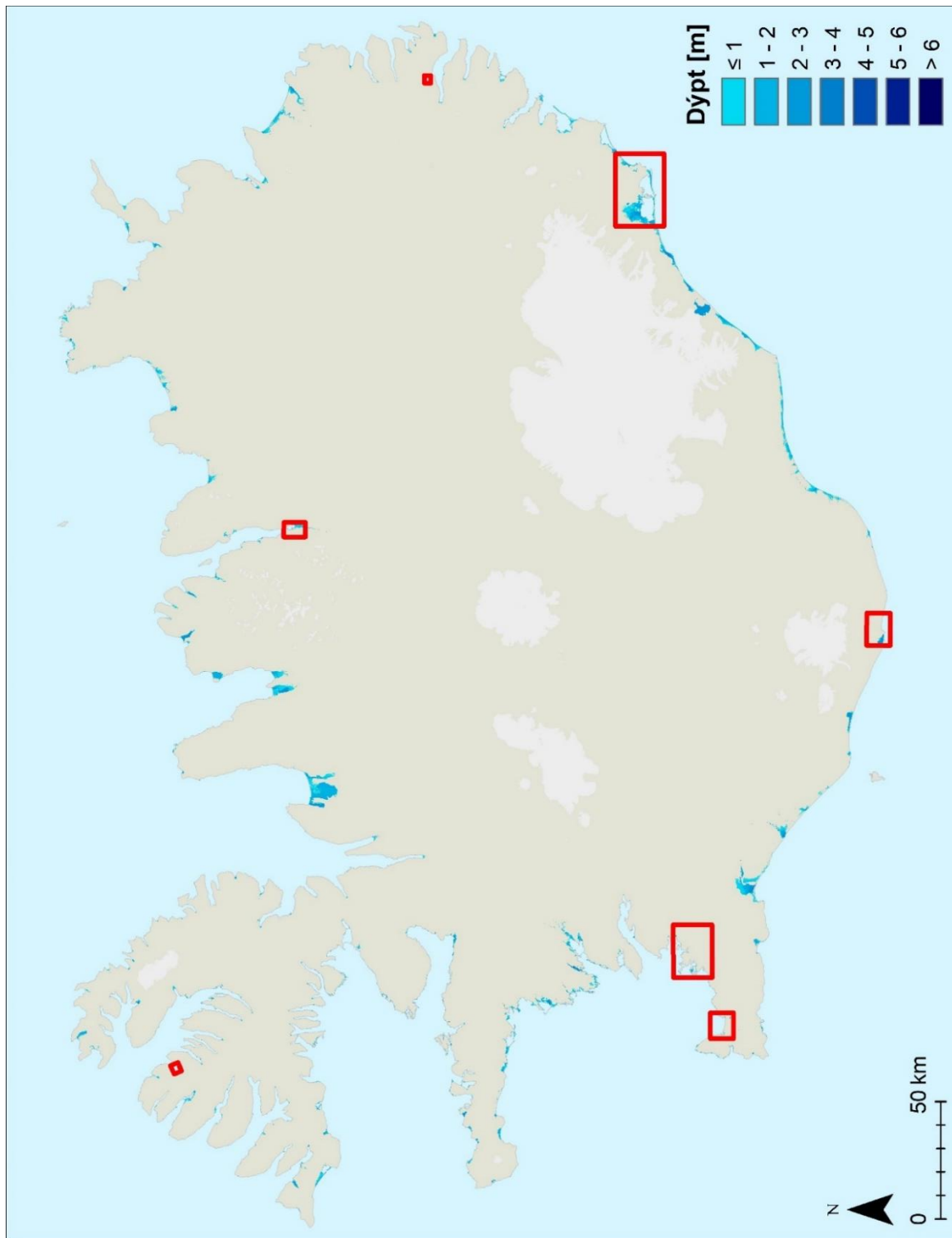
Á mynd 12 sést að stór svæði suðaustan Vatnajökuls eru lægri en viðmiðunarflóðhæðin. Þetta á einkum við í kring um Hornafjörð, en þar sjást umflotin hús auk þess sem það flæðir yfir vegi og flugbrautina. Samkvæmt kortinu einangrast Höfn þar sem viðmiðunarflóðhæðin er töluvert hærri en vegurinn sem þangað liggur og einnig er kortlagt flóð á þó nokkru svæði á Höfn. Flóð á þessu svæði eru rædd nánar í kafla 4, bæði með tilliti til þrenginga sem draga úr innflæði við ósinn og með hliðsjón af landrasi.

Á mynd 13 sést hvar viðmiðunarflóðhæðin er meiri en landhæð í kring um Vík í Mýrdal. Þar sést nokkurt flóð við Dyrhólaósinn og lítil svæði við ósa Uxafótarlækjar, Kerlingadalsár, Múlakvíslar og Miðkvíslar eru undir viðmiðunarflóðhæðinni. Niðurstöður gefa ekki til kynna flóð við Vík, en sérstaka umræðu um það má finna í kafla 4.

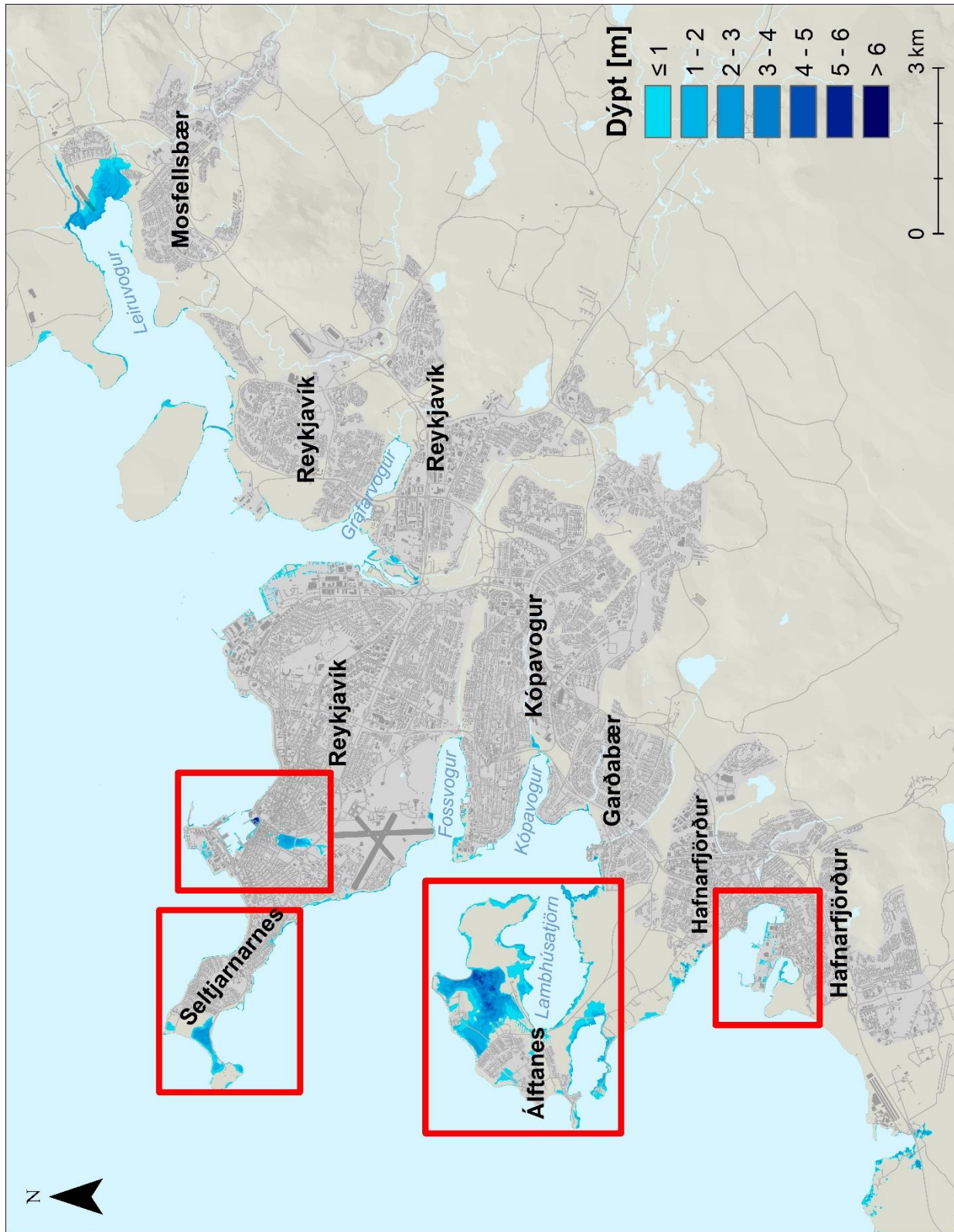
Mynd 14 sýnir svæði í Reykjanesbæ og Vogum sem eru undir viðmiðunarflóðhæðinni, en hafnarsvæðin í Njarðvík og Vogum koma einkum illa út. Einnig sést nokkurt flóð meðfram ströndinni og í höfnum Keflavíkur, og talsvert flóð í dreifbýli á Vatnsleysuströnd norðan Voga.



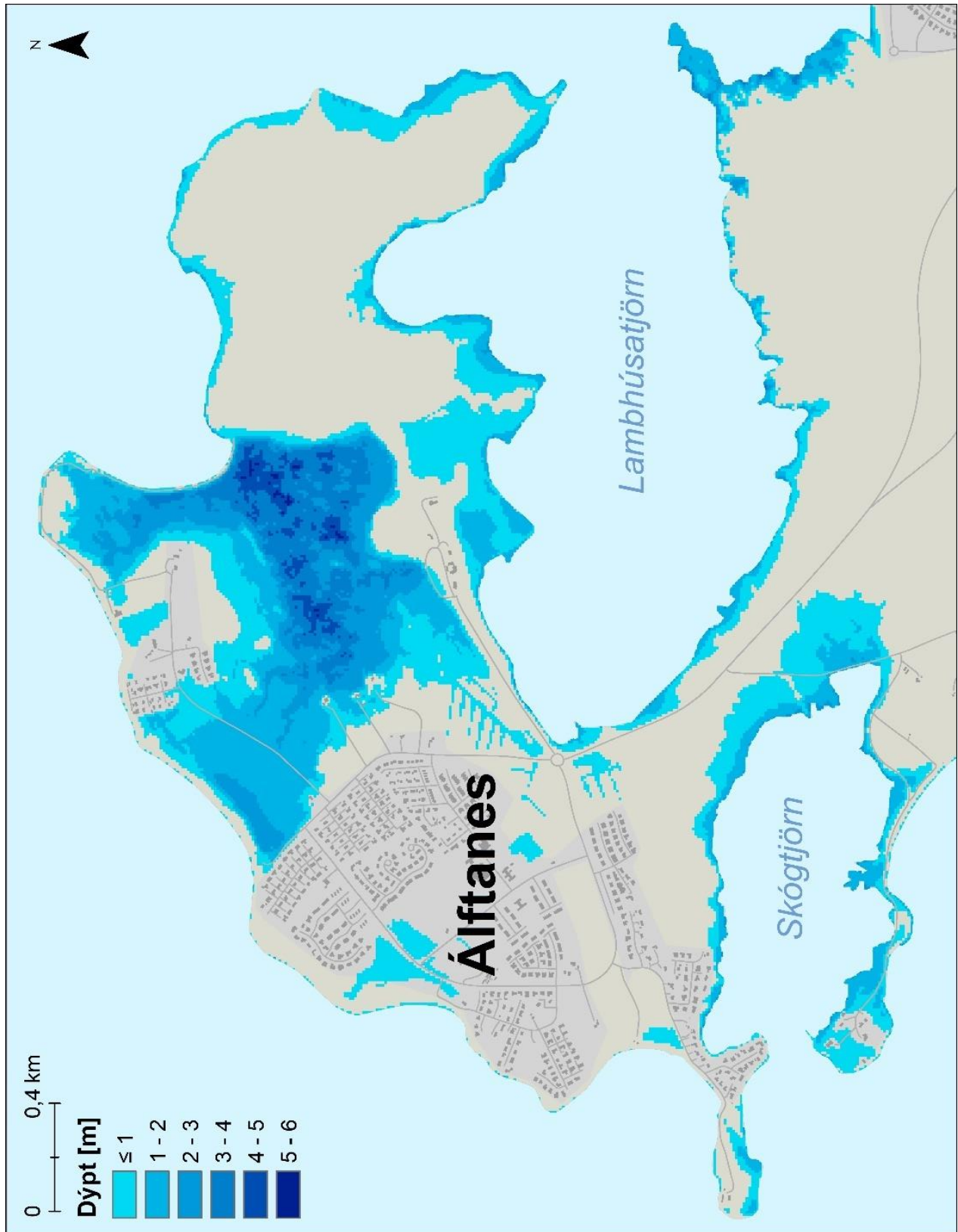
Mynd 1 Viðmiðunarflóðið sem notað er í þessari skýrslu brúað umhverfis landið. Hæð hundrað ára flóðs (m) í hæðarkerfinu ISH2004. Sjá viðauka A2 og A3 fyrir aðferðir.



Mynd 2 Hæð 100 ára viðmiðunaflóðs. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð á hverjum stað eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins. Þau svæði sem rædd eru sérstaklega eru merkt með rauðum ferhyrningi, en í fylgiskjali eru sýndar niðurstöður fyrir alla byggðarkjarna við ströndina.



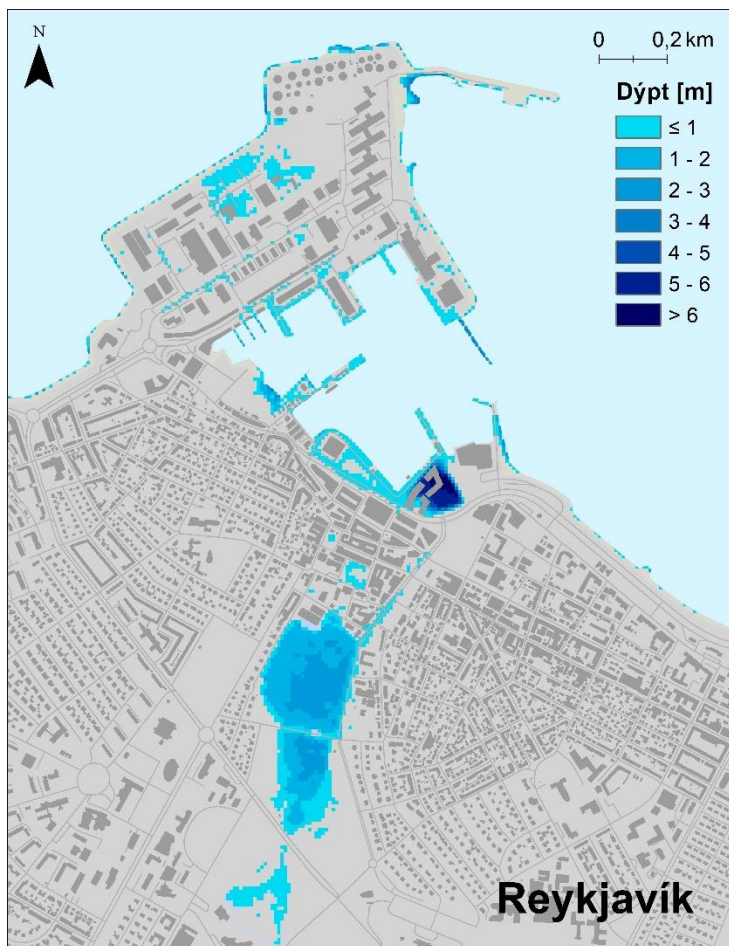
Mynd 3 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á höfuðborgarsvæðinu. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins. Stækkaðar myndir af svæðum innan rauðu ferhyrninganna má sjá á myndum 4 til 7.



Mynd 4 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Alftanesi. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



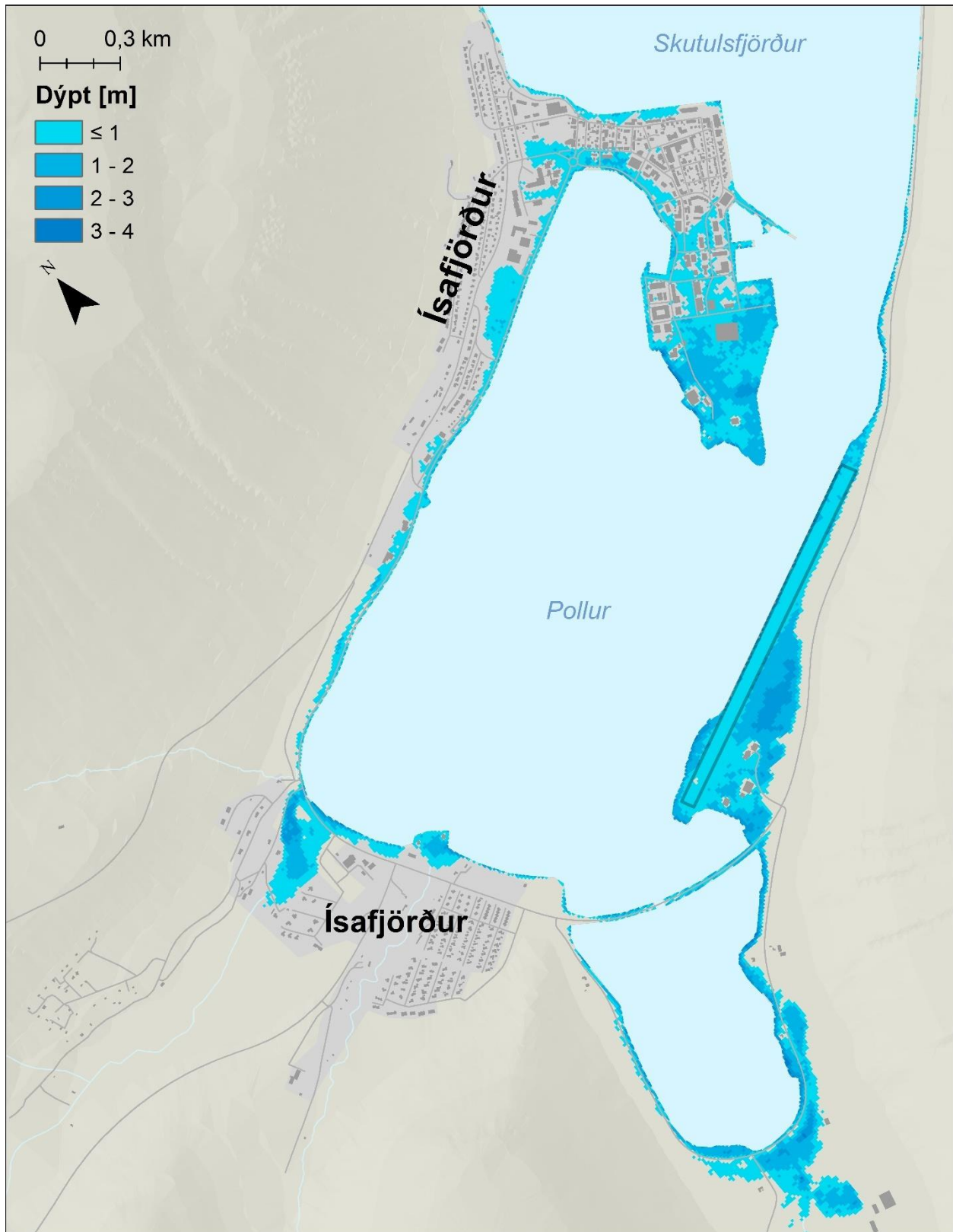
Mynd 5 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs í Hafnarfjarðarhöfn. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



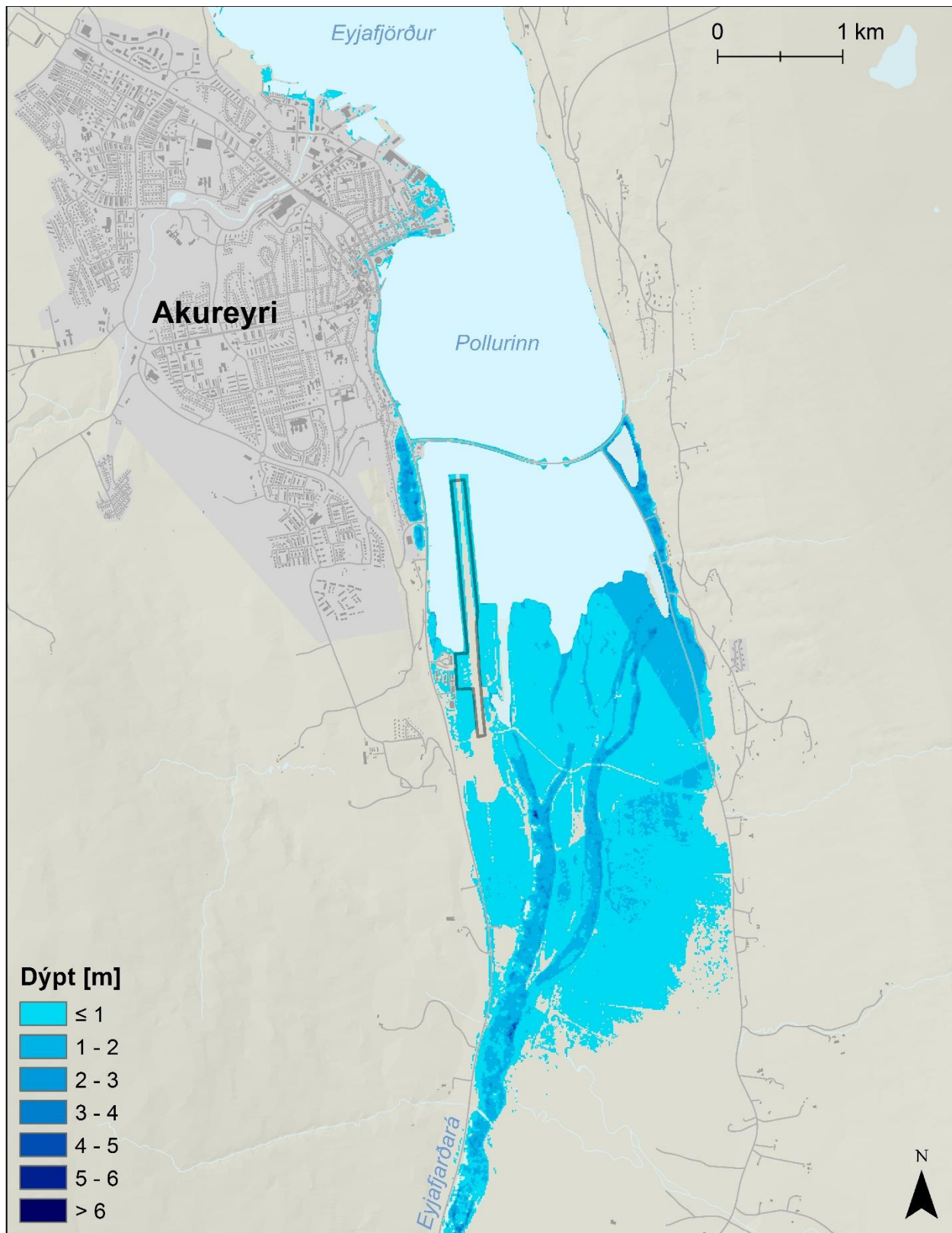
Mynd 6 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs í miðbæ Reykjavíkur. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



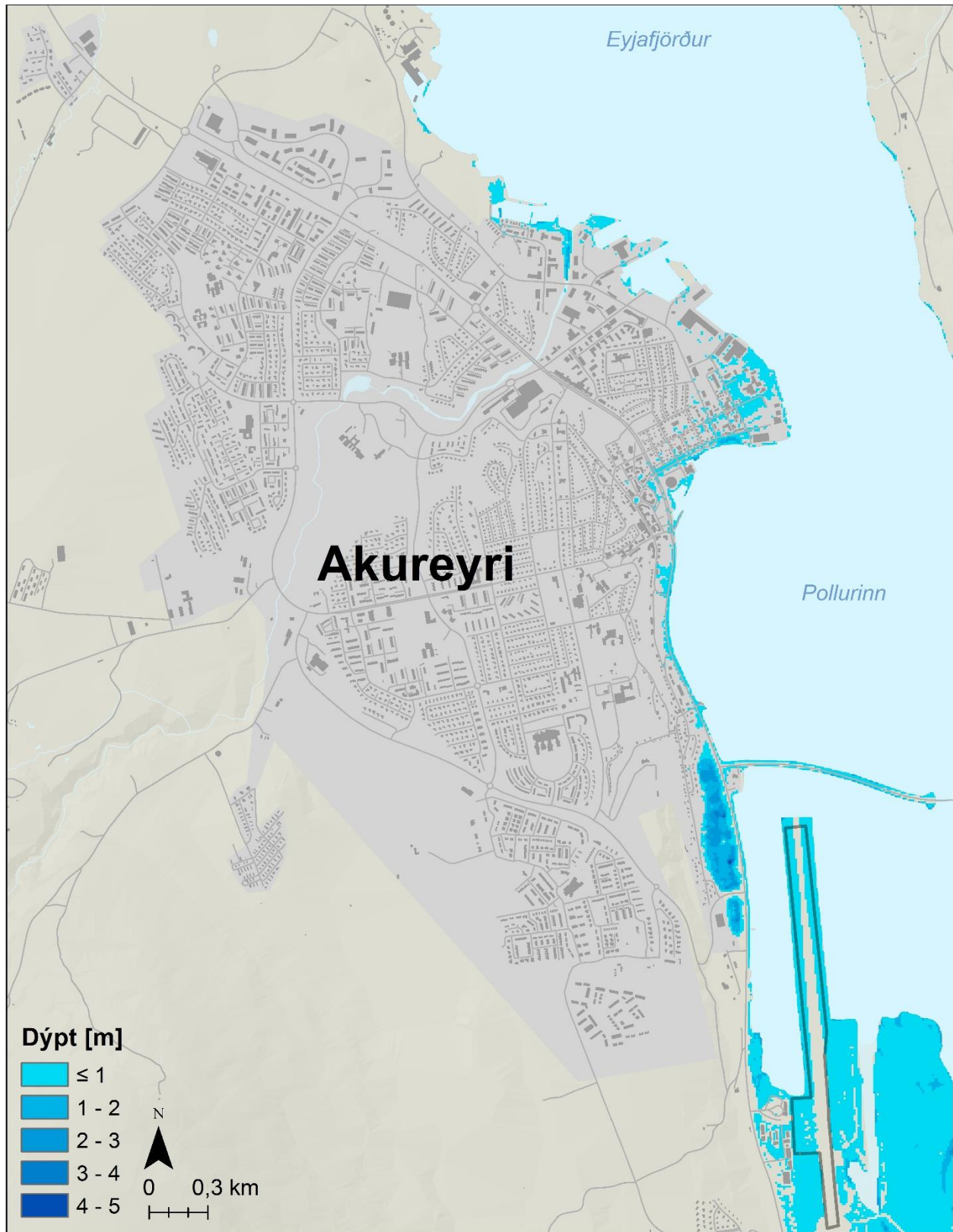
Mynd 7 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Seltjarnarnesi og Eiðisgranda. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



Mynd 8 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Ísafirði. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



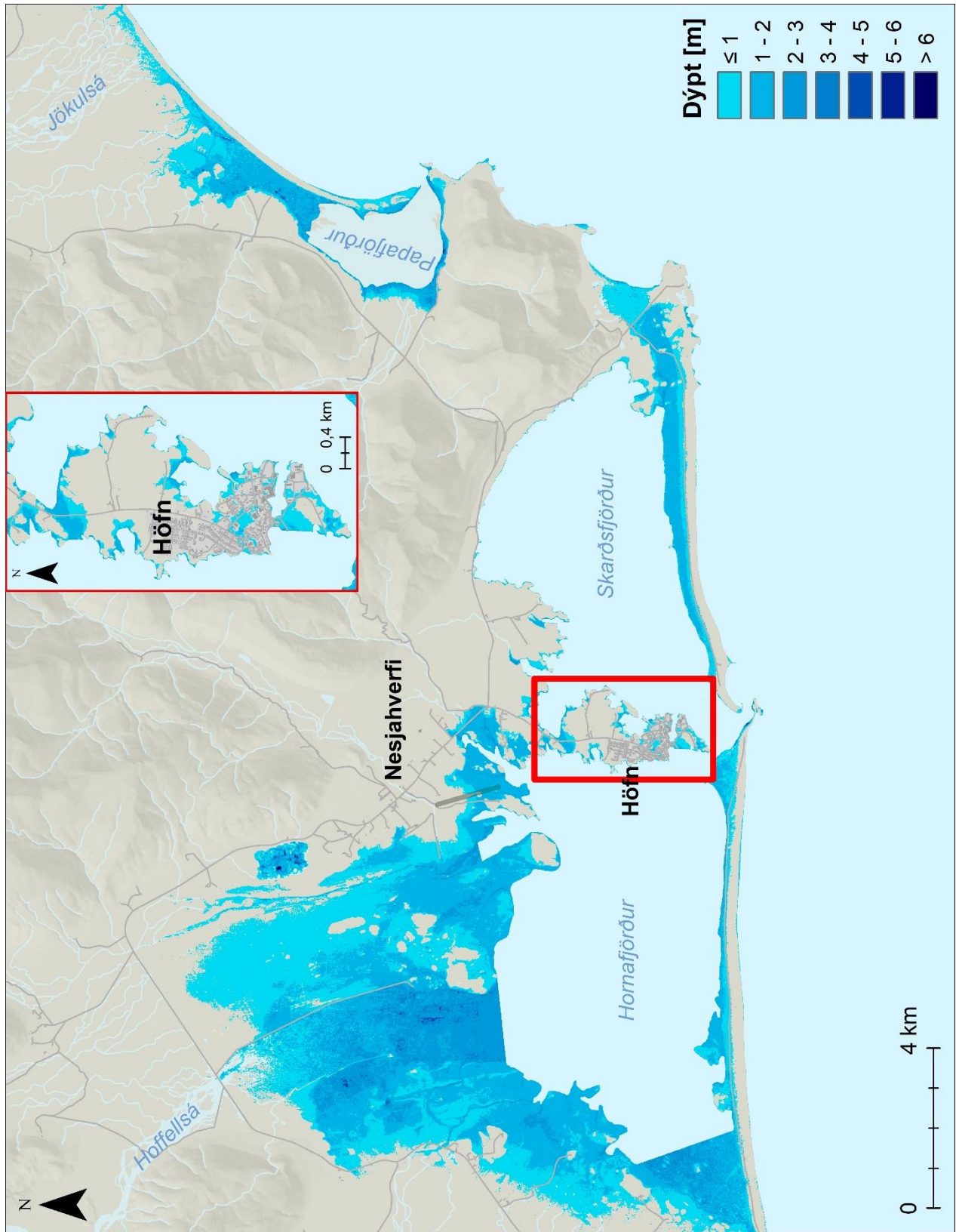
Mynd 9 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs innst í Eyjafirði. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



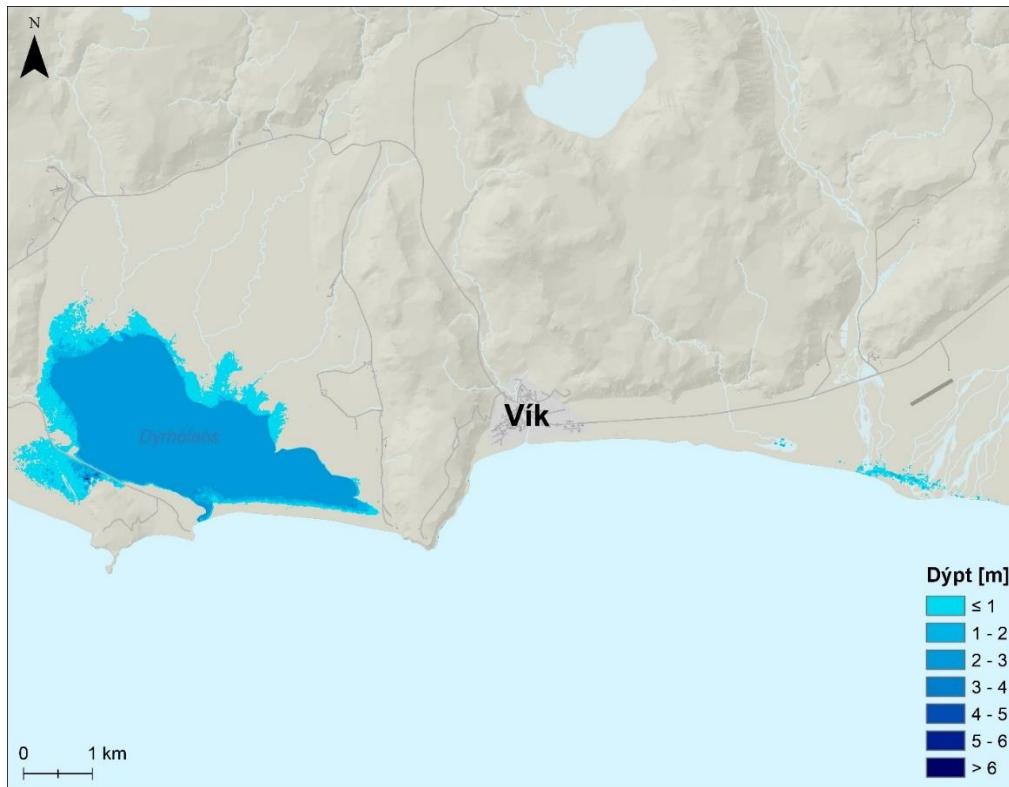
Mynd 10 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Akureyri. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



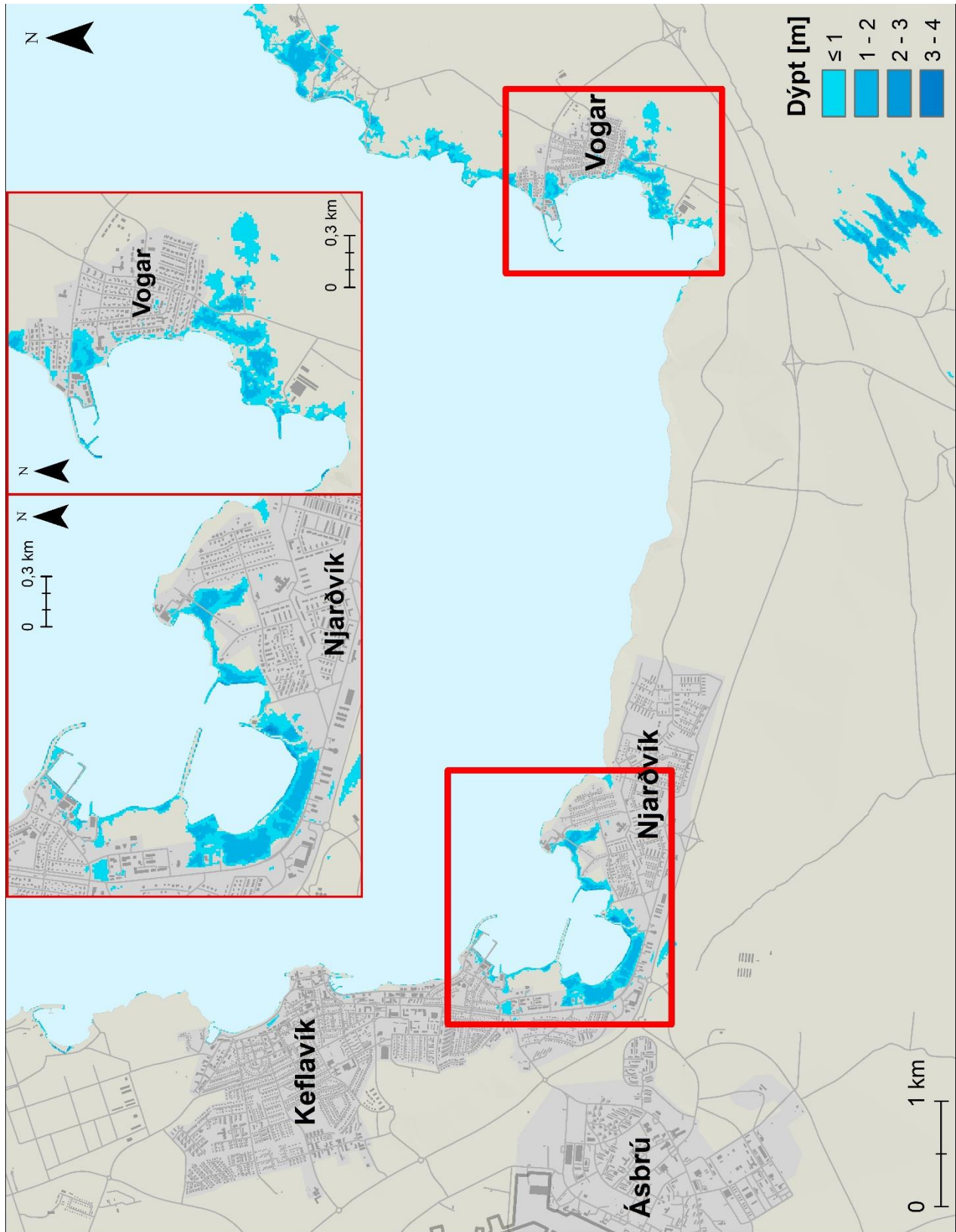
Mynd 11 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Eskifirði. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



Mynd 12 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs á Höfn í Hornafirði. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



Mynd 13 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs í Vík. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.



Mynd 14 Kort af hæð 100 ára viðmiðunarflóðs í Reykjanesbæ og í Vogum. Þau svæði sem liggja lægra en 100 ára flóð eru blá, litakvarðinn sýnir dýpt flóðsins.

4 Umræða

Markmið þessarar skýrslu er að kortleggja flóðahættu með sambærilegri aðferð fyrir alla strandlengju Íslands og geta fundið þau svæði þar sem sjávarflóðahætta kann að vera fyrir hendi við núverandi aðstæður. Í kjölfar þessa má svo gera nákvæmara flóðahættumat fyrir þau svæði. Þær aðferðir sem hér er beitt við útreikning sjávarflóða hafa bæði kosti og galla. Með því að bera saman hæð viðmiðunarflóðs og landhæð er flóknum og tímafrekum skrefum við hermun upphlaups flóða sleppt. Þannig eru útreikningarnir einfaldari, fljótlegri, ódýrari og krefjast ekki eins mikils reikniafls. Reikningar á uppgangi flóða taka tillit til skriðþunga þess sjávar sem gengur á land og viðnáms við landið. Slíkir útreikningar eru reikniþungir og eru ekki ráðlegir til þess að fá yfirlitsmynd af flóðahættu við strandlínu Íslands. Sú aðferð sem hér er beitt er ágætlega til þess fallin að finna þá staði þar sem flóðahætta er mest, en hún reiknar ekki trúlega útbreiðslu einstakra flóða. Niðurstöðurnar eru þó gagnlegar til að finna viðkvæmstu lágsvæðin og í framhaldinu má gera nánari úttekt og frekari hermanir á flóðum á þeim svæðum. Þá má taka tillit til staðbundinna þátta og fá raunhæfari mynd af smáatriðum útbreiðslu flóða.

Þó aðferðin við að kortleggja útbreiðslu viðmiðunarflóðs dugi vel til að finna þau lágsvæði þar sem flóðahætta er mest er mikilvægt að hafa í huga helstu takmarkanir hennar, og hvaða atriðum er litið framhjá þegar upphlaup er ekki reiknað og áhrifum öldugangs er sleppt. Dæmi um slíkt atriði er að tímaþróun upphlaups flóða er ekki skoðuð. Það tekur tíma fyrir sjó að flæða upp á land og í sumum tilfellum þar sem flóð er kortlagt langt inn á land er óljóst hvort flóðvatnið geti náð þeirri dýpt sem aðferðin reiknar, áður en flæðir frá, veðrinu slotar og flóð sjatnar. Dæmi um þetta er svæðið innst í Eyjafirði, nærri flugvellinum (sjá mynd 9). Þar þyrfti vatn að flæða yfir þjóðveg 1 þar sem hann þverar Pollinn, eða undir brúna á veginum og inn á hólma og flæðarnar meðfram Eyjafjarðará. Til að ná alla leið þyrfti flóð líklega að vara lengi, en á móti kemur að það gæti tekið langan tíma fyrir flóðið að sjatna því þrengingin við þjóðveginn takmarkar þá flæðið. Svipaða sögu má segja um Hornafjörð þar sem fjörur hamla vatnsflæðinu (sjá mynd 12).

Annar annmarki aðferðarinnar er að öll svæði sem eru undir viðmiðunarflóðhæðinni eru kortlögð undir vatni óháð því hvort fyrirstaða er milli strandar og svæðisins. Ekki er því alltaf raunhæft að vatn berist á kortlögð flóðasvæði, a.m.k. ekki ef flóðið varir stutt. Dæmi um það má t.d. sjá sunnan við Voga á mynd 14.

Mikilvægt er að árétta að viðmiðunarflóðhæðin sem skoðuð er hér tekur ekki tillit til öldugangs. Líkt og rætt er í viðauka A1 tekst líkaninu víða ágætlega að herma veðurflóð þó öldugangur geti aukið flóðaútbreiðsluna nokkuð. Undantekning eru staðir þar sem grynningar valda því að þáttur öldu verður hlutfallslega stærri, s.s. í Borgarnesi. Einnig kann að vera að aðferðin nái ekki staðbundnum vinddrifnum áhlaðanda á sumum stöðum sem getur aukið útbreiðslu flóða enn frekar en slíks gæti m.a. gætt við suðurströndina, t.d. í Grindavík og á Vík í Mýrdal. Loks má nefna að aðferðin gerir ráð fyrir að landhæð sé fasti. Þekkt er að miklum sjávarflóðum getur fylgt landrof sem breytir landslagi og stórfelldu landbroti getur fylgt aukin flóðahætta. Sem dæmi má nefna ef gat rofnaði í Suðurfjörur við Hornafjörð, en þá drægi verulega úr þeirri flóðavörn sem þær mynda fyrir Hornafjörð. Þá getur útbreiðsla flóða einnig aukist vegna annarra þátta, s.s. mikilla rigninga, leysinga og yfirþrýstings í fráveitum samfara hárrí sjávarstöðu. Til að skoða samsetta atburði af því tagi (Woo, 2021) er þó mikilvægt fyrsta skref að kortleggja fyrst hvern áhættuþátt eins og gert er hér fyrir sjávarflóð.

Með þessa annmarka í huga verður hér fjallað um niðurstöður fyrir ofangreinda þéttbýlisstaði, en finna má kort af fleiri stöðum í fylgiriti (sjá yfirlit í töflu A1).

Flóð af sömu stærðargráðu og viðmiðunarflóðið getur valdið nokkrum usla á höfuðborgarsvæðinu (sjá mynd 3), einkum á Álftanesi. Á mynd 4 sést hvernig Bessastaðatjörnin getur yfirfyllst þannig að vatn flæðir víða, m.a. í átt að Bessastöðum. Við það getur austasta hverfi Álftaness orðið umflotið og hið sama er uppi á teningnum á Hliðsnesi sunnan við Skógstjörn. Þegar kortið er skoðað er þó vert að hafa í huga að vindátt getur haft mikil áhrif á það hvar flæðir á Álftanesi, ólíklegt er að þar sé hámarksflóð á öllu svæðinu samtímis.

Á mynd 5 sjást áhrif viðmiðunarflóðsins í Hafnarfjarðarhöfn, en í Hafnarfirði virðist flóðahættan vera mest í höfninni en ekki valda eins miklum usla annars staðar. Í Reykjavík má sjá talsvert flóð í Reykjavíkurborg og á Granda, auk nokkurs flóðs við Sundahöfn og við Tjörnina í Reykjavík. Við nánari skoðun sést að þrátt fyrir að landhæð við Tjörnina sé lægri en viðmiðunarflóðhæðin er landhæðin á milli Tjarnarinnar og sjávar yfir viðmiðunarflóðinu. Útbreiðsla flóðs á svæðinu færi því eftir því hvernig fráveitukerfið næði að hamla vatnsflæðinu. Stækkaða mynd af miðbæ Reykjavíkur má sjá á mynd 6. Einnig er vert að benda á að breytingar á landhæð vegna framkvæmda á hafnarsvæðinu kunna að hafa breytt flóðahættu við Austurbakkann frá því sem sýnt er á myndinni. Vegna þess mikilvægis sem miðborgin hefur fyrir ýmsa efnahagsstarfsemi og þjóðhagslega mikilvæga innviði er brýnt að ítarlegt áhættumat sé unnið fyrir þetta svæði (Anna H. Eydísardóttir, 2015, VSO, 2016, Halldór Björnsson o.fl., 2018).

Á mynd 7 má sjá hvernig flætt getur inn í íbúðahverfi austarlega við Eiðisgranda, en bent hefur verið á þetta svæði áður í sambandi við flóðahættu (VSÓ, 2016). Einnig getur flætt yfir veginn sem liggur að suðurnesi Seltjarnarness og golfvöllurinn þar einangrast.

Ísafjörður er einn af þeim þéttbýlisstöðum sem koma hvað verst út úr kortlagningu viðmiðunarflóðsins. Á mynd 8 má sjá hvernig flætt getur yfir Skutulsfjarðareyrina og eins flæðir víða yfir vegi og flugbrautina. Á Ísafirði, svipað og á Álftanesi, þarf að kanna betur hvort hámarksflæði sé líklegt við alla strandlínu eyrarinnar. Einkum er líklegt að flóðið sé ofmetið í nágrenni sjúkrahússins þar sem það svæði er í nokkru skjóli. Það á einnig við um suðausturhluta Pollsins sunnan Djúpsvegs þar sem vegurinn skýlir honum að einhverju leiti, á svipaðan hátt og rætt var um þjóðveg 1 í Eyjafirði. Annars staðar getur flóðið hæglega verið vanmetið, s.s. á Norðurtanga þar sem líkur eru á að öldur og áhlaðandi séu veruleg ef vindur eða öldustefna eru inn fjörðinn.

Áður var stuttlega fjallað um kortlagningu viðmiðunarflóðsins innst í Eyjafirði (sjá mynd 9). Þar sést flóðasvæði langt upp með Eyjafjarðaránni og við flugvallarsvæðið. Eins og bent var á er ólíklegt að flóð næði jafn mikilli útbreiðslu sunnan við Pollinn og kortið gefur til kynna, þar sem þjóðvegurinn hamlar framgangi vatnsins. Jafnvel þó óveðursflóð kunni að vara meira en einn dag, varir háflæði vegna sjávarfalla mun skemur. Því geta óveðursflóð og sjávarföll samanlagt einungis valdið stórflóði í nokkrar klukkustundir í senn, nærri háflæði. Eftir sem áður er mikilvægt að hafa í huga að þjóðvegurinn getur líka haft þau áhrif að lengja þann tíma sem það tekur flóðið að sjatna. Stækkaða mynd af viðmiðunarflóðhæðinni á Akureyri má sjá á mynd 10. Þar sést t.d. talsvert flóð á Oddeyri og hvernig vegir meðfram Pollinum geta farið á kaf. Í sjávarflóði í september 2022 varð umtalsvert flóð á Oddeyri og truflanir urðu á samgöngum yfir Pollinn.

Þrátt fyrir að viðmiðunarflóðhæðin sé lægri austan við landið en vestan við það getur hún valdið talsverðum usla þar. Á mynd 11 er sýnt dæmi frá Eskifirði, en þar sést hvernig hús eru umflotin á Mjóeyri og talsvert flóð getur orðið á hafnarsvæðinu og við iðnaðarsvæðið. Líkt og á Ísafirði og Akureyri, liggur vegur innarlega í firðinum sem veitir einhverja flóðavörn. Flóð af stærðargráðu viðmiðunarflóðsins þarf því ekki að verða eins útbreitt við árósa Eskifjarðarár og sýnt er á kortinu. Þrátt fyrir það getur flóð valdið vandræðum á því svæði, auk þess sem öldugangur og frekari áhlaðandi geta bætt við flóðið á svæðinu, séu vindátt og öldustefna óheppileg.

Stór svæði undir suðausturhorni Vatnajökuls eru lægri en viðmiðunarflóðhæðin eins og sést á mynd 12. Þó er óvíst að flóð á svæðinu yrði mjög útbreitt. Suður- og Austurfjörur eru líklegar til að tálma flæði inn í Horna- og Skarðsfjörð á svipaðan hátt og rætt hefur verið fyrir þjóðveg 1 á Akureyri. Aftur á móti geta fjörurnar hægt á flæði út úr fjörðunum og þannig lengt tímann sem það tekur flóðið að sjatna ef mikið vatn nær að safnast þar fyrir. Til þess þyrfti þó flóðið líklega að standa lengi yfir, komi ekki til mikils rofs á fjörðunum. Líkt og rætt var fyrir Eyjafjörð, er stórflóð ólíklegt til að standa lengur en í nokkrar klukkustundir í senn, eða sem nemur varanda háflæðis sjávarfalla.

Dæmi um stað þar sem takmarkanir aðferðarinnar leggjast saman er Vík í Mýrdal. Einu svæðin í grennd við Vík þar niðurstöður sýna flóð eru við Dyrhólaós og lítil svæði við ósa Uxafótarlækjar, Kerlingadalsár, Múlavíslar og Miðkvíslar eru lægri en viðmiðunarflóðhæðin (mynd 13). Strandlínan í Vík er síbreytileg og því kann þar að vanta nýleg lágsvæði sem eru þó undir hæð viðmiðunarflóðs, en líklega munar þó mestu að engar öldur eru í líkaninu. Þáttur öldu er stór í sjávarflóðum á þessu svæði, en ölduálag framan við Vík er eitt það mesta sem orðið getur við Íslands strendur (Siglingastofnun, 2011). Þar sem öldur eru ekki teknar til greina við útreikninga viðmiðunarflóðhæðarinnar vanmetur aðferðin verulega flóðahættu á svæðinu. Mörg söguleg sjávarflóð eru þekkt í Vík (Guðrún E. Jóhannsdóttir, 2017), en ráðist hefur verið í ýmsar framkvæmdir á svæðinu á undanförunum árum til að verjast ágangi sjávar og stefnt er að frekari framkvæmdum (Vegagerðin, 2022). Af þessu er ljóst að Vík er dæmi um stað sem þörf er á að gert verði nákvæmt hættumat fyrir, þar sem uppgangur flóða er hermdur með líkani sem reiknar líka ölduþátt og tekið er tillit til aðstæðna á svæðinu. Ölduálag er einnig talsvert víða annars staðar við suðurströnd landsins og því gæti flóðahætta verið vanmetin á fleiri stöðum, s.s. við Stokkseyri og Eyrarbakka.

Talsverð flóðahætta er í Reykjanesbæ og Vogum eins og sést á mynd 14. Þekkt eru þónokkur söguleg flóð á Reykjanesi (Guðrún E. Jóhannsdóttir, 2017) og því kemur niðurstaðan ekki á óvart. Leiða má að því líkur að ölduþátturinn hafi nokkur áhrif á útbreiðslu flóða á svæðinu þar sem vitað er til þess að flætt hefur á stærra svæði en kortið á myndinni gefur til kynna. Á það m.a. við um flóð í febrúar 2020 og nóvember 2022. Þá var umfang flóðs meira en sýnt er á myndinni, t.a.m. við Ægisgötu í Keflavík þar sem sjór gekk yfir varnargarð (Halldór Björnsson og Kevin Dubois, 2020).

Öll miða kortin sem sýnd eru í þessari skýrslu við hundrað ára endurkomuhæð flóðs við núverandi aðstæður. Þegar sjávarflóðahætta og -áhætta eru metin þarf einnig að hafa í huga hvernig hættan og áhættan munu breytast í framtíðinni, eins og rætt er í næsta kafla.

5 Lokaorð

Eins og komið hefur fram í þessari skýrslu er markmið hennar á fá yfirlitsmynd af flóðahættu við strandlínu Íslands við núverandi aðstæður. Ekki er tekið tillit til hækkandi sjávarstöðu í þessu mati. Vel er þekkt að einn fylgifiskur loftslagsbreytinga er að sjávarstaða hækkar, sem eykur hættu á sjávarflóðum (Halldór Björnsson o.fl., 2018, Sigurður Sigurðarsson, 2018). Svæðisbundin áhrif sjávarstöðubreytinga eru hins vegar ekki einföld því massatap jökla aflagar þyngdarsvið jarðar þannig að sjávarstaða fellur nærri jöklinum, auk þess sem minnkandi jökulfarg veldur landrasi. Annars staðar gætir landsigs sem eykur við hækkun sjávarstöðu. Mælingar á landhæðarbreytingum á Íslandi sýna að landsig er víða við ströndina vestanlands og fyrir miðju Norðurlandi en inn til landsins er landris. Frá Austurlandi og vestur eftir suðurströndinni er landris sem er ákafast suðaustanlands, við Höfn í Hornafirði rís land t.d. um u.þ.b. 12 mm á ári. (Halldór Björnsson o.fl., 2018).

Næsta skref við mat á sjávarflóðahættu á Íslandi er því að leggja framtíðarsviðsmyndir af sjávarstöðuhækkun við viðmiðunarflóðið (sjá mynd 1) og skoða á hvaða svæðum sjávarflóðahætta kann að verða fyrir hendi árið 2150. Slíkt er mikilvægt fyrir ákvarðanatöku í skipulagsmálum. Einnig þarf að meta hvar gera þarf nánara hættumat þar sem tekið er tillit til öldupáttá, uppgangs flóða og annarra staðbundinna þátta sem ekki eru hermdir í þessari skýrslu. Eðlilegast væri að gera slíkt mat samfara víðtækara áhættumati þar sem einnig tekið er tillit til þeirrar samfélagslegu áhættu sem hugsanleg flóð geta valdið.

Heimildir

- Anna Heiður Eyðisardóttir (2015). Flóðavarnir fyrir Kvosina. Reykjavík: Verkfræðistofan Efla.
- Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W. & Køltzow, M. Ø. (2017). The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 1919-1935.
- Briggs, I. C. (1974). Machine contouring using minimum curvature, *Geophysics*, 39, 39-48.
- Brousseau, P., Berre, L., Bouttier, F. & Desroziers, G. (2011). Background-error covariances for a convective-scale data-assimilation system: AROME – France 3D-Var. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 137, 409-422.
- Carrere, L., Lyard, F., Cancet, M. & Guillot, A. (2015). FES 2014, a new tidal model on the global ocean with enhanced accuracy in shallow seas and in the Arctic region. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-5481-1.
- Church, J.A., Clark, P. U., Cazenave, A., Gregory, J. M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M. A., Milne, G. A., Nerem, R. S., Nunn, P. D., Payne, A. J., Pfeffer, W. T., Stammer, D. & Unnikrishnan, A. S. (2013). Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley P. M. (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- Coles, S. (2001). *An introduction to statistical modelling of extreme values*. London: Springer.
- Deltares (2020a). *D-Flow Flexible Mesh, Technical Reference Manual*. Delft, The Netherlands: Deltares.
- Deltares (2020b) *D-Flow Flexible Mesh User Manual*. Delft, The Netherlands: Deltares.
- ESRI (2020). *How Spline with Barriers works. ArcGIS Release 10.8 Redlands*, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Fjarhitun (1992). *Skipulags- og byggingarreglur á lágsvæðum þar sem hættu er á flóðum – 1. áfangi*. Reykjavík: Fjarhitun HF 1992 014/GÍ.
- Fjarhitun (1995). *Lágsvæði – 2. áfangi Skipulags- og byggingarráðstafanir og sjóvarnir*. Reykjavík: Fjarhitun HF ágúst 1995 20/G.
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Golledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A. B. A. & Yu, Y. (2021): Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V. P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K. E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. & Zhou, B. (eds.)], pp. 1211–1362, doi:10.1017/9781009157896.011. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.

- Guðjón Scheving Tryggvason (2016). *Sjávarborðsrannsóknir. Úrvinnsla sjávarborðsmælinga frá Grindavík, Landeyjarhöfn og Hornafirði*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Guðjón Scheving Tryggvason (2017). *Sjávarborðsrannsóknir. Sjávarborðsmælingar frá Reykjavík, Ólafsvík, Skagaströnd og Patrekshöfn*. Reykjavík: Vegagerðin.
- Guðmundur Valsson (2012). *Landhæðakerfi Íslands ISH 2004*. Akranes: Landmælingar Íslands.
- Guðrún Elín Jóhannsdóttir (2017). *Sjávarflóð á Íslandi*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, VI-2017-008.
- Guðrún E. Jóhannsdóttir (2019). *Methods for Coastal Flooding Risk Assessments: An Application in Iceland*. Uppsala: Uppsala University, Department of Earth Sciences.
- Guðrún Elín Jóhannsdóttir (2020). *Methods for Coastal Flooding Risk Assessments: An Overview of Methods used in Scandinavia and the UK and a discussion of their suitability for Iceland*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, VÍ 2020-005.
- Halldór Björnsson, Bjarni D. Sigurðsson, Brynhildur Davíðsdóttir, Jón Ólafsson, Ólafur S. Ástþórsson, Snjólaug Ólafsdóttir, Trausti Baldursson & Trausti Jónsson. (2018). *Loftslagsbreytingar og áhrif þeirra á Íslandi – Skýrsla visindanefndar um loftslagsbreytingar*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Halldór Björnsson & Kevin Dubois (2020). *Ummerki sjávarflóðs þann 14. febrúar 2020*. Óútgefið minnisblað, Reykjavík: Veðurstofa Íslands.
- Jónas Eliásson & Sveinn Valdimarsson (1993). *Flóðhæðir í Reykjavíkurböfn*. Reykjavík: Verkfræðistofnun Háskóla Íslands.
- Jónas Eliásson (1996). Probability of Tidal Surge Levels in Reykjavík, Iceland. *Journal of Coastal Research*, 12:1, 368-374.
- Kévin Dubois, Angel Ruiz-Angulo, Halldór Björnsson, Sigurður Sigurðarson & G. Orri Gröndal (2021). *Comparison of sea surface height measurements and calculations with the Delft3D-FM model and an analysis of forcing factors*. Report for 2021. Reykjavík: Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar.
- Kévin Dubois, Angel Ruiz-Angulo, Halldór Björnsson, Sigurður Sigurðarson & G. Orri Gröndal (2022). *Comparison of sea surface height measurements and calculations with the Delft3D-FM model and an analysis of forcing factors*. Report for 2022. Reykjavík: Rannsóknasjóður Vegagerðarinnar.
- Landmælingar Íslands (2020). *IslandDEM Útgáfa 1.0*. Lýsigagnagátt LMI.
- Matthías Ásgeir Jónsson, Tandri Gauksson & Halldór Björnsson (2017). *Öfgagreining á flóðhæðum í Reykjavík og Patreksfirði: Prófun á þröskuldaðferð og samlikum*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, VI 201-003.
- Nikolai Nawri, Bolli Pálmason, Guðrún Nína Petersen, Halldór Björnsson & Sigurður Þorsteinsson (2017). *The ICRA atmospheric reanalysis project for Iceland*. Reykjavík: Veðurstofa Íslands, VÍ 2017-005.
- Ólafur Guðmundsson & Páll Einarsson (2006). *Úrvinnsla sjávarfallagagna: Sjávarföll og hægfare sjávarborðsbreytingar í Reykjavíkurböfn*. Reykjavík: Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands.

Páll Imsland & Þorleifur Einarsson (1991). *Sjávarflóð á Eyrarbakka og Stokkeyri – um tíðni þeirra og orsakir og rannsóknir á strandjarðfræði hérlendis*. Reykjavík: Raunvísindastofa Háskóla Íslands, RH-01-91.

Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F. & Masson, V. (2011). The AROME-France convective-scale operational model. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 976-991.

Siglingastofnun Íslands (2011). *Yfirlitsskýrsla um sjóvarnir árið 2011*. Kópavogur: Siglingastofnun, desember 2011.

Sigurður Sigurðarsson (2018). *Lágsvæði – viðmiðunarreglur fyrir landhæð*. Reykjavík: Vegagerðin.

Smith, W. H. F. & Wessel, P. (1990). Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, 55(3), 293-305.

Terzopoulos, D. (1988). The computation of visible-surface representations, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 10, (4). 417–438.

Theiler, J., Galdrikian, B., Longtin, A., Eubank, S. & Farmer, J. D. (1992). Using Surrogate Data to Detect Nonlinearity in Time Series. Í M. Casdagli, & S. Eubank, (ritstj.), *Nonlinear Modelling and Forecasting*. Santa Fe: Santa Fe Institute, 163-188.

Trausti Jónsson (2007). *Lægsti loftþrýstingur á Íslandi. Íslensk veðurmet 5*. Veðurstofa Íslands <https://www.vedur.is/vedur/frodleikur/greinar/nr/1056>.

Vegagerðin (2022, 13. maí). *Vikurfjara hörfar í vetrarstormum*. Vegagerðin. <https://www.vegagerdin.is/upplýsingar-og-utgafa/frettir/vikurfjara-horfar-i-vetrarstormum>.

VSÓ (2016). *Hækkuð sjávarstaða á höfuðborgarsvæðinu Áhrif og aðgerðir*. Reykjavík: VSÓ fyrir Skipulagsstofnun.

Woo, G. (2021). A counterfactual perspective on compound weather risk. *Weather and Climate Extremes*, 32, 100314,

Zoraster, S. (2003). A surface modeling algorithm designed for speed and ease of use with all petroleum industry data. *Computers & Geosciences*, 29 (9), 175-182.

Viðauki A

A1 Uppsetning og keyrslur á Delft 3D-FM líkaninu

Strandlíkanið Delft3D-FM (Deltares, 2020a; 2020b) er ákaflega öflugt tól til að reikna sjávarföll og strandflóð. Líkanið leysir hinar ólínulegu grunnvatnsjöfnur í þéttu reiknineti, en eins og það er sett upp á Veðurstofunni er reikninetið 500 m við ströndina (Dubois o.fl., 2022, sjá mynd A1).

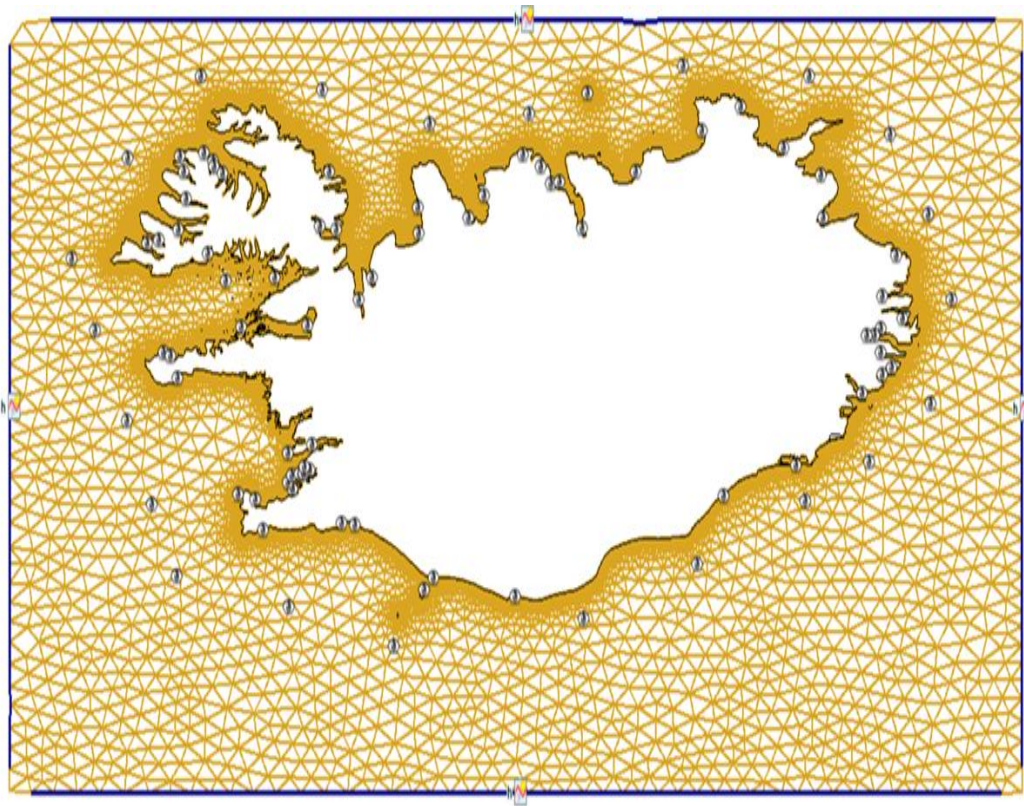
Þessi uppsetning líkansins hefur verið prófuð fyrir níu óveður á tímabilinu 1996 til 2016 og niðurstaðan fyrir 11 staði skoðuð sérstaklega (Dubois o.fl., 2022). Líkaninu tekst mjög vel að herma flóð samfara óveðrum á flestum stöðum. Undantekningar eru staðir þar sem öldur eða smákvarða víxlverkun innan hafnar hafa ráðandi áhrif, t.d. í Grindavík. Öldur eru ekki reiknaðar í þessu líkani, en hægt er að bæta öldulíkani við líkanið. Sambærilegar niðurstöður fengust í öðru verkefni þar sem líkanið var prófað fyrir einfaldari uppsetningu á SV hluta landsins og þrjú óveður (Dubois o.fl., 2021).

Líkanið var keyrt með lofthjúpsgögnum (vindum og loftþrýstingi) sem voru með klukkutíma upplausn og brúuð yfir á reikninet líkansins fyrir tímabilið 1996–2016. Þessi gögn komu úr ICRA greiningu Veðurstofunnar (Nawri o.fl., 2017) sem reiknuð var með Harmonie spákerfi Veðurstofunnar (Brousseau o.fl., 2011; Seity o.fl., 2011 & Bengtsson o.fl., 2017).

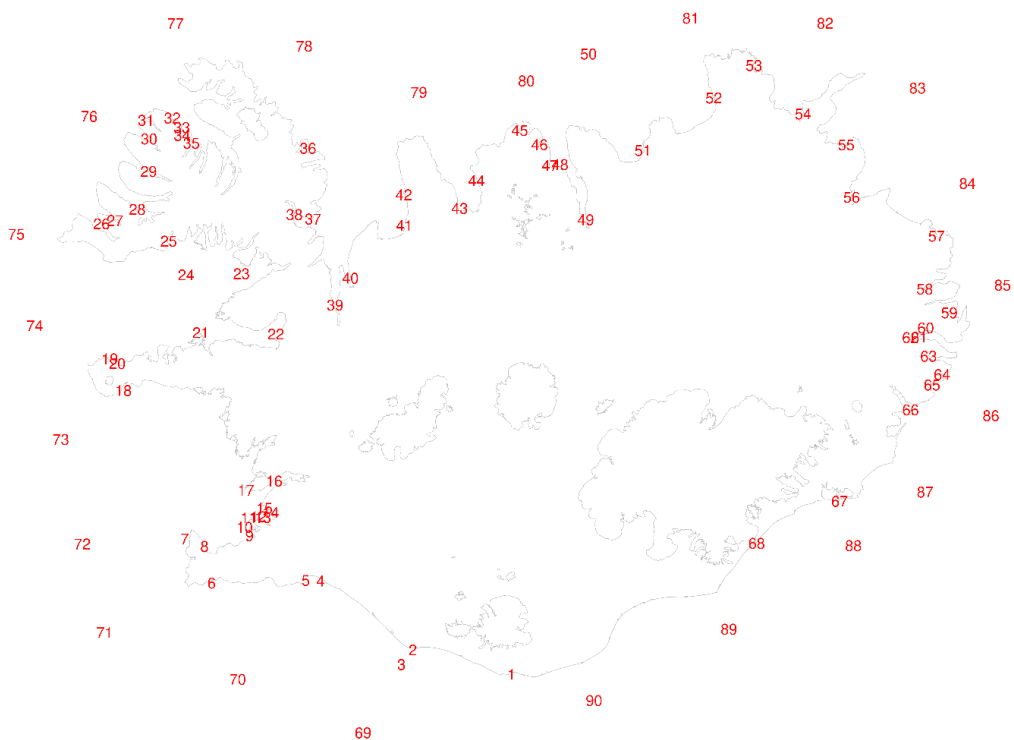
Tvær tegundir af líkanreikningum voru gerðar fyrir hvert ár. Fyrst var einungis notast við stjarnfræðilega flóðkrafta (Carrere o.fl., 2015) og að því loknu voru útreikningar endurteknir með lofthjúpsgögnum að auki. Reikniniðurstöður voru vistaðar á 10 mín. fresti fyrir 90 reiknistaði umhverfis landið (sjá mynd A2). Þessir reiknistaðir voru valdir í samráði við Siglingasvið Vegagerðarinnar og einnig notaðir í Dubois o.fl. (2022).

Niðurstaða þessara líkanreikninga voru tvær 21 árs langar tímaraðir fyrir hvern hinna 90 staða umhverfis landið. Mismunur þessara tímaraða gefur stærð sem hér er kölluð *óveðursflóð*, þ.e. framlag vinds og loftþrýstings til sjávarstöðu. Mynd A3 sýnir dæmi um útreikninga í lok janúar 2015 á Húsavík. Myndin sýnir útreikninga með sjávarföllum, en með og án breytinga í lofthjúpi. Einnig sýnir myndin mismun þessara tveggja þátta, þ.e. þann þátt sem ræðst af veðri. Klukkan 11 að morgni þann 30. desember náði óveðursflóðið um 0.74 m, en á háflæði um kl. 14 hafði það fallið um 0.1 m og því varð hámarkssjávarhæð lægri en ulla. Könnun leiddi í ljós að lágur loftþrýstingur var oftast örsök þess ef veðurdrifni þáttur flóðsins varð hár og mynd A4 sýnir því frekar dæmigerða niðurstöðu.

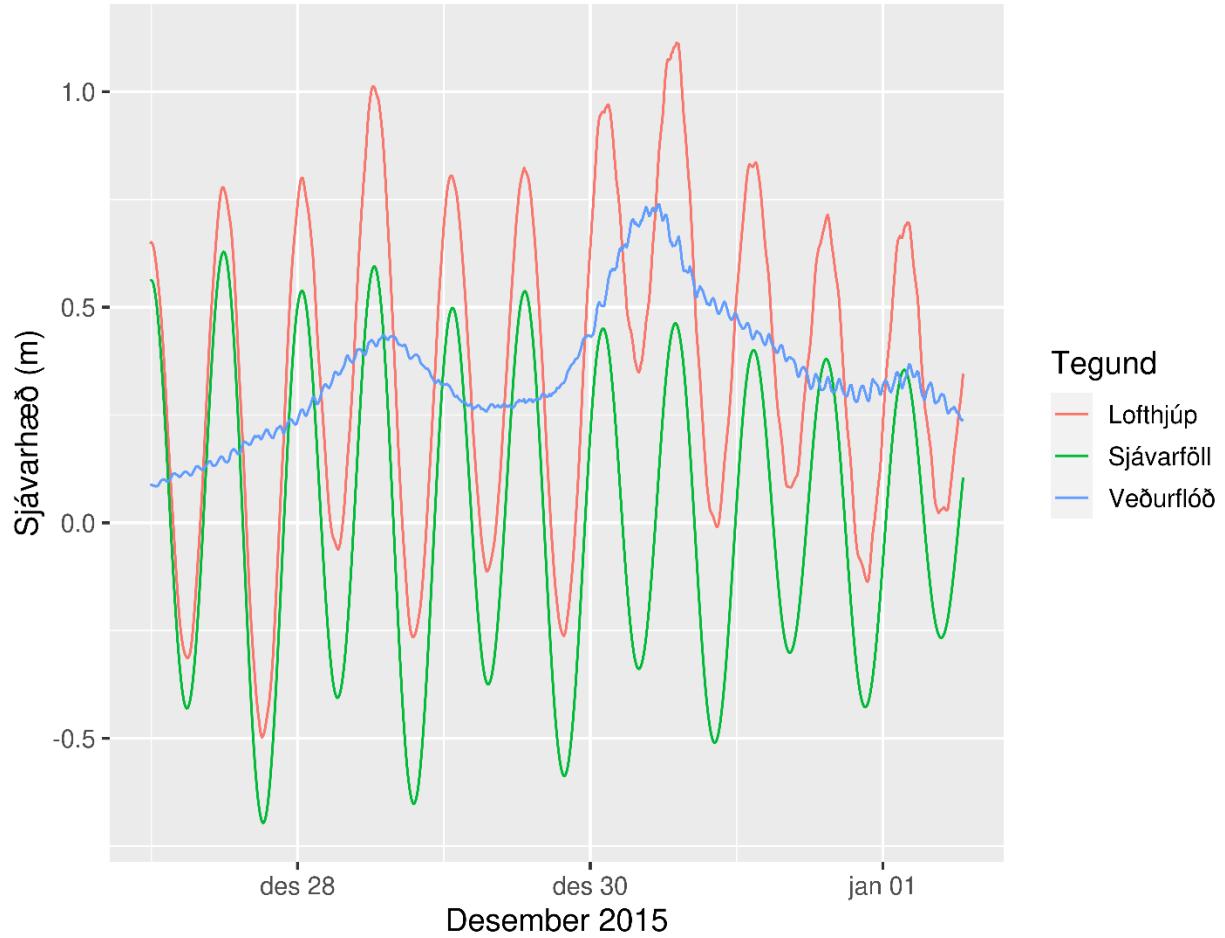
Eftir að búið var að reikna tímaraðir af óveðursflóðum var næsta skref að reikna verstu aftakaflóð, og er því lýst í næstu grein. Rétt er að minnast á að þegar óveðursflóðin eru reiknuð á þennan hátt skiptir nákvæmni í tímasetningum sjávarfalla ekki öllu máli, heldur einungis að sömu sjávarföllin verði í báðum útreikningum. Í grunnvatnsjöfnunum er útbreiðsluhraði bylgna háður dýpt vökvans, en þó hafðýpt breytist lítillega vegna sjávarfalla og/eða loftþrýstingsbreytinga, hefur slíkt mjög lítil áhrif á útbreiðsluhraðann. Myndir A5 og A6 sýna útslag sjávarfalla og eru þær í samræmi við það sem gefið hefur verið út í almanaki Sjómælingasviðs Landhelgisgæslunnar (sjá einnig mynd 7a í Guðrún E. Jóhannsdóttir, 2019).



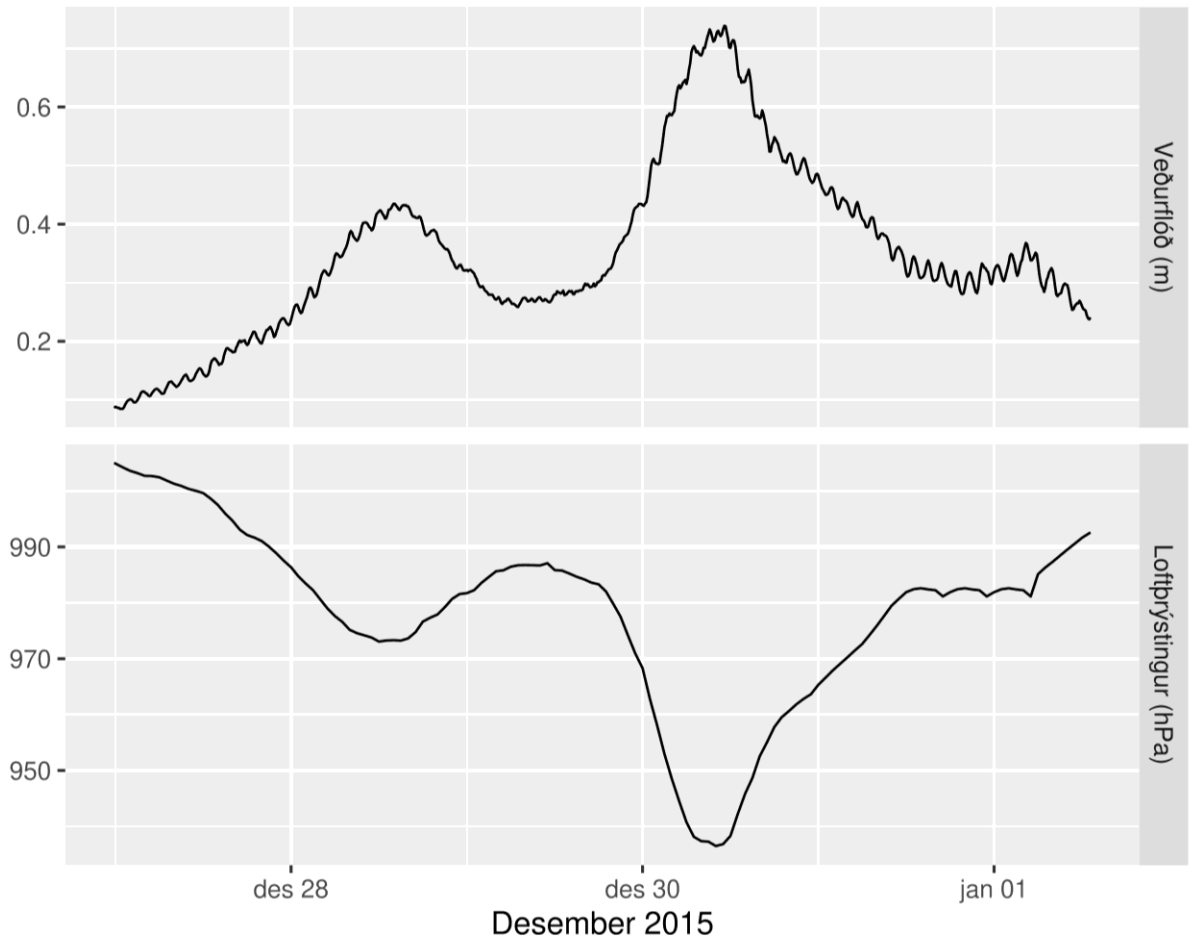
Mynd A1 Reikninet Delft3D-FM umhverfis landið. Einnig eru merktar inn 90 staðsetningar þar sem niðurstöður líkansins eru vistaðar á 10 mín. fresti (sjá nánar mynd A2).



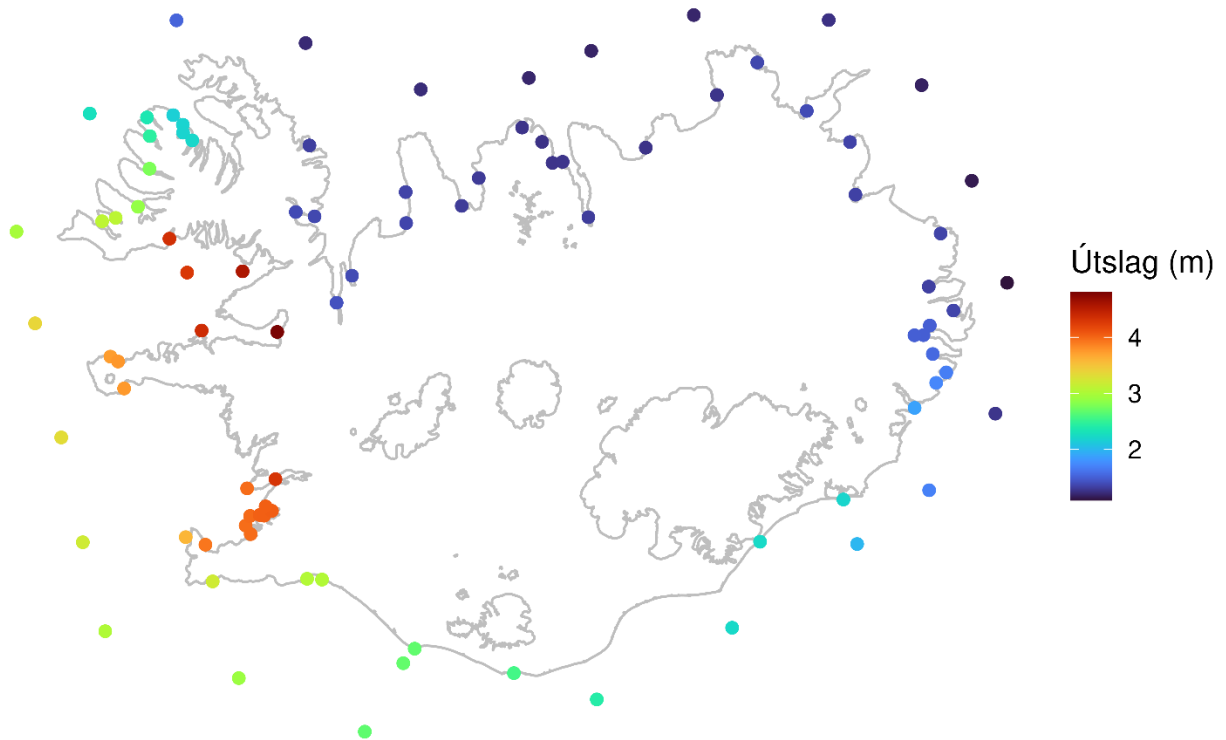
Mynd A2 Stöðvar þar sem gögnum var safnað úr líkaninu skv. lista frá Vegagerðinni.



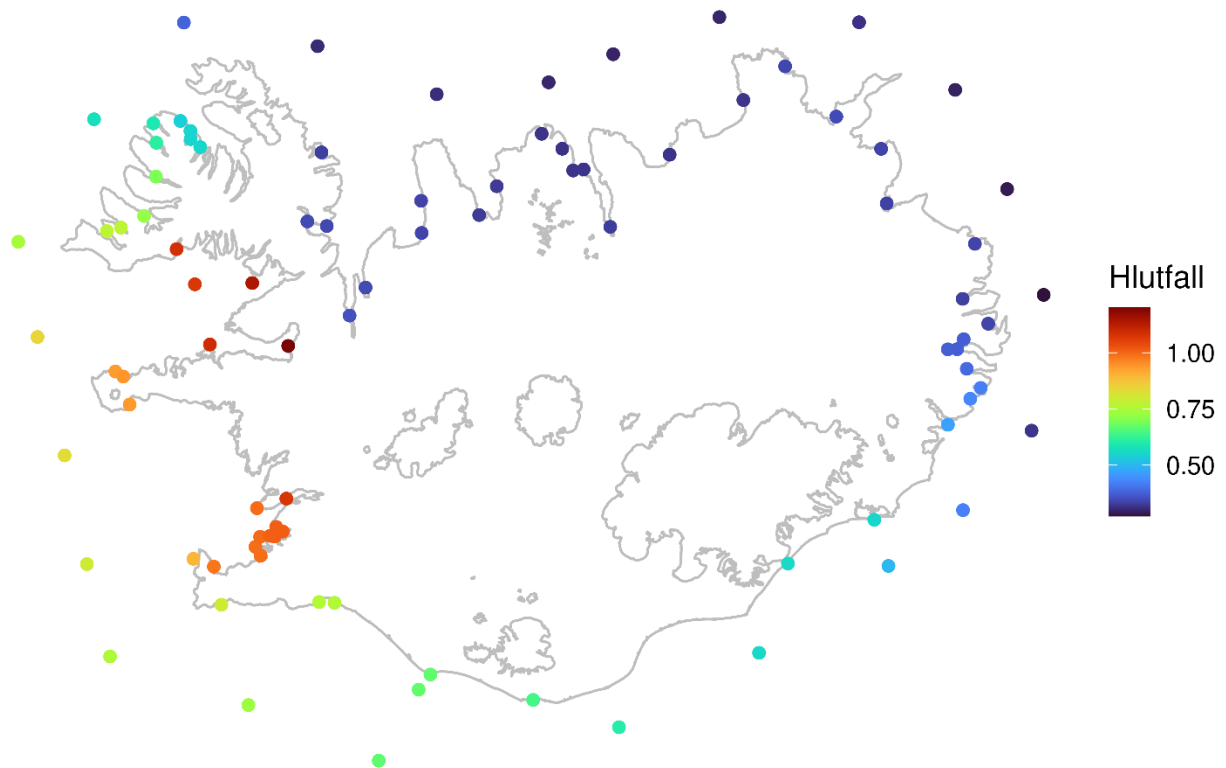
Mynd A3 Sjávarhæð á Húsavík í lok desember 2015 samkvæmt Delt3D-FM. Myndin sýnir niðurstöður útreikninga þar sem einungis áhrif sjávarfalla eru tekin með í reikninginn (græn lína) og svo niðurstöður þar sem einnig er gert ráð fyrir breytingum í lofthjúpunum (rauð lína). Veðurflóðið er mismunur þessara tveggja (blá lína).



Mynd A4 Samanburður á loftþjúpshætti sjávarhæðar (veðurflóð) á Húsavík í lok desember 2015 og loftþrýstings. Greinilegt er að loftþrýstingsbreytingar eru ráðandi þáttur í sjávarhæðarbreytingum.



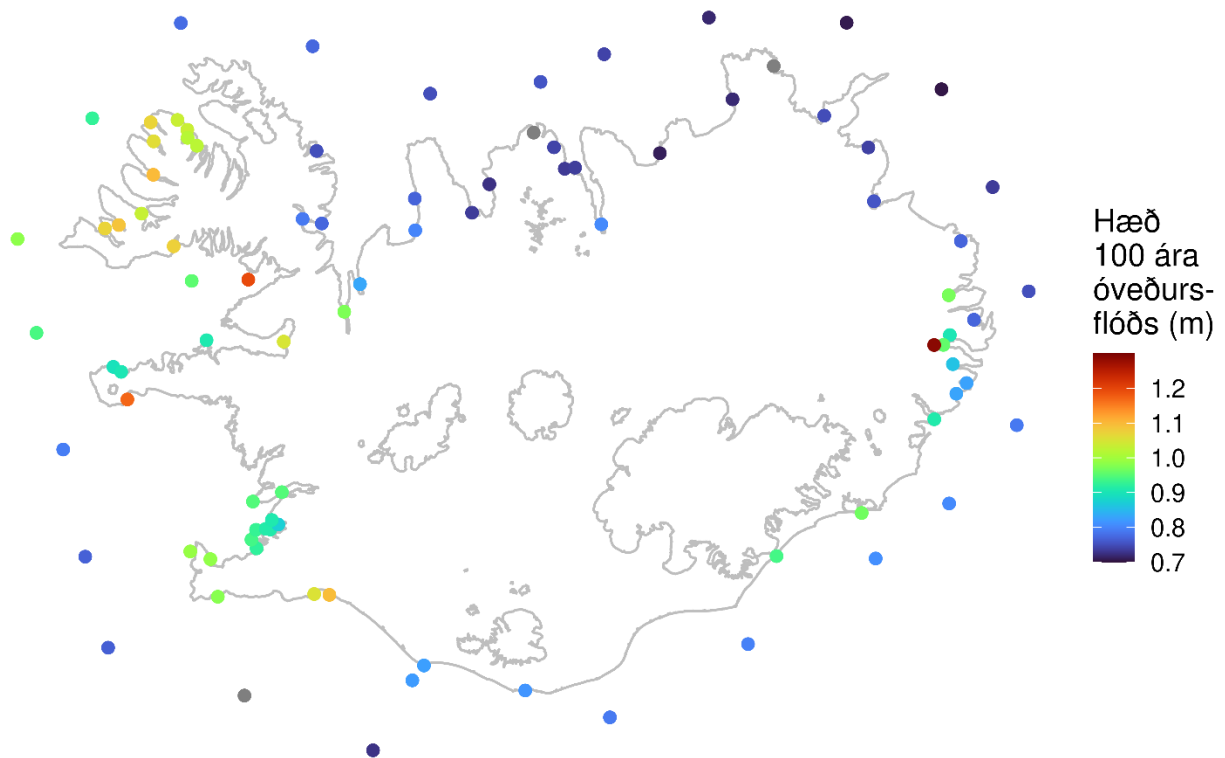
Mynd A5. Útslag sjávarfallabylgju. Myndin sýnir mun 99% og 1% hlutfallsmarka sjávarstöðu reiknaða með sjávarfallakröftum eingöngu.



Mynd A6 Hlutfallslegt útslag sjávarfalla miðað við útslagið í Reykjavík.

A2 Úrvinnsla á reikniniðurstöðum líkans

Til að meta líkur á h_{100} voru kannaðar nokkrar aðferðir sem notaðar hafa verið við að vinna úr mælingum (Coles, 2001; Matthías o.fl., 2017). Prófaðar voru Almenna aftakadreifingin (GEV) með hámarkssennileikametli, vægisáðferð og þröskuldsáðferð (POT) með hámarkssennileikametli. Aðferðunum var beitt á óveðursflóðaraðirnar og munur milli þeirra reyndist ekki stórvægilegur, en óvissumörk voru þó mismunandi. Fallið var frá því að nota þröskuldsáðferð, því niðurstöður eru háðar vali á þröskuldi og erfitt að réttlæta áðferð til að velja 90 ólíka þröskulda. Mynd A7 sýnir niðurstöðu þess að nota almennu aftakadreifinguna á ársámörk hvernna raðar. Hæð óveðursflóðsins er á bilinu 0.7 til 1.3 m umhverfis landið, við ströndina eru lægstu gildin norðan og austan við landið. Athygli vekur að óveðursflóðið er nokkru herra í Reyðarfirði en annars staðar. Tölfræðileg óvissa í mati flóðahæðar á þessum punkti var mjög mikil, sjá umfjöllun í grein A2.1.3.



Mynd A7 Hæð h_{100} , flóðs með 1% árslíkur á 90 stöðum umhverfis landið, reiknað með almennu aftakadreifingunni á ársámörk hvernna raðar. Myndin sýnir óveðursflóð án áhrifa sjávarfalla.

A2.1 Óvissa í mati á flóðahæð

Þegar stuðlar í aftakadreifingu eru reiknaðir er yfirleitt ekki nema lítill hluti gagnanna notaður, sá hluti sem gefur mynd af dreifingu aftakagilda. Ýmsar leiðir hafa í gegnum tíðina verið notaðar til þess að reyna að bæta nýtinguna, en slíkt bætir matið og dregur úr óvissu.

Hvað úrvinnsluna hér varðar eru nokkrir óvissuþættir sem þarf að huga að. Í fyrsta lagi þarf að athuga hvort lægsta loftvægi á tímabilinu 1996–2016 endurspeglir lægsta mögulega loftvægi, eða hvort skoða þurfi mögulega hæð miðað við langtíma gögn um loftþrýsting. Í öðru lagi er eðlilegt að velta fyrir sér hvort verstu óveðursflóð í reikningunum hafi alltaf fallið saman við háflæði, eða jafnvel stórstreymi. Auðvelt er að hugsa sér að ef brautir lægða hefðu hnikast hefðu óveðrin hitt öðruvísi á sjávarföllum og niðurstaðan orðið önnur. Þá er hefðbundin tölfræðileg óvissa tengd mati á stuðlum og á hæð 100 ára flóðs. Loks er óvissa tengd því þegar niðurstöður um viðmiðunarflóð eru reiknaðar yfir á kort. Hér verða þessir óvissuþættir ræddir frekar.

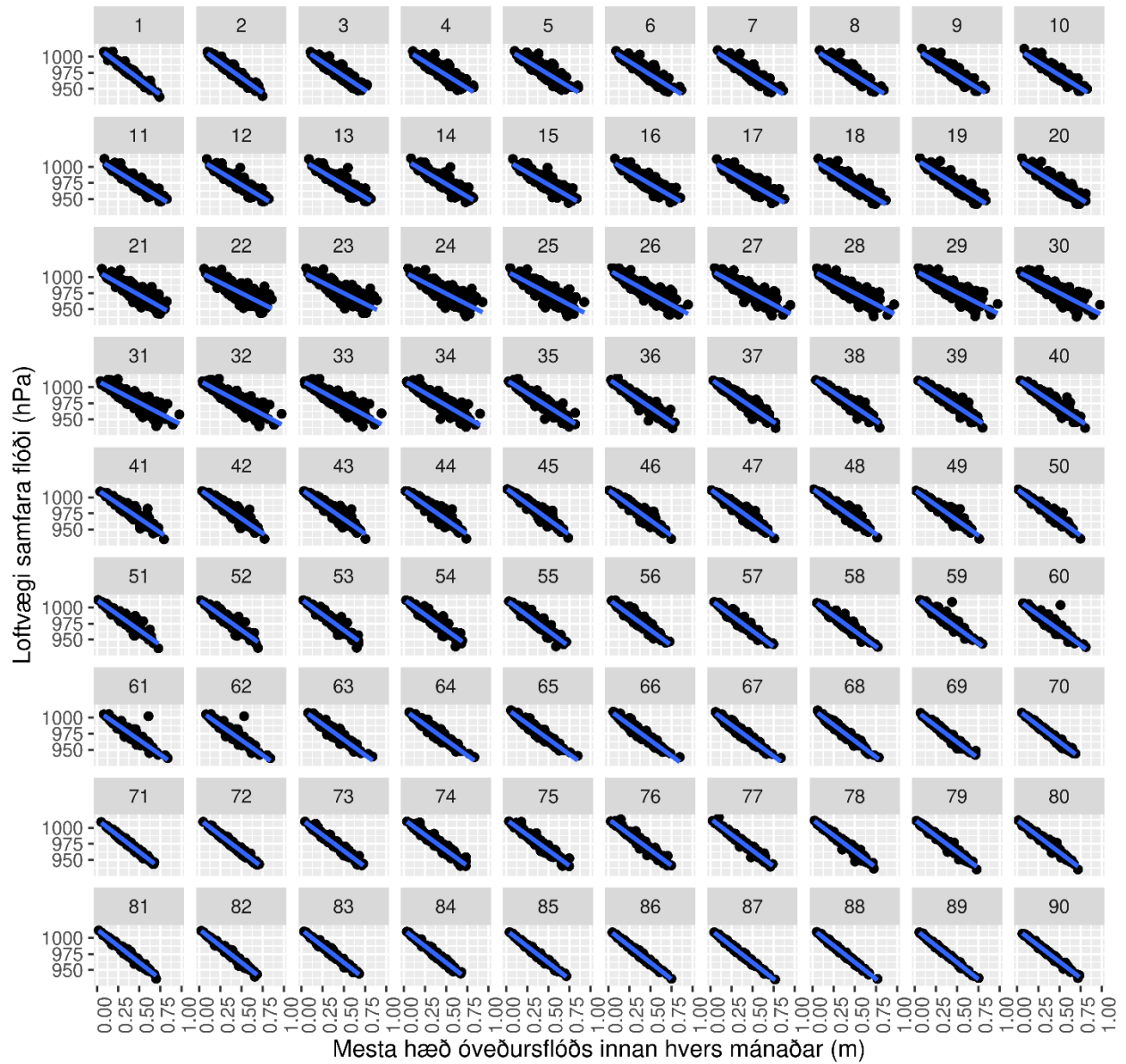
A2.1.1 Þáttur loftþrýstings

Mynd A4 sýnir að loftþrýstingsbreytingar eru ráðandi þáttur í hæð veðurflóða. Þó myndin sé fyrir reikninga við Húsavík er ástæða til þess að ætla að hún endurspeglir aðstæður víða við ströndina. Undantekningar eru þó líklegar þar sem miklar grynningar geta valdið því að þáttur öldu verði meiri, og eins gæti standbylgja í höfn valdið skammtíma breytingum á flóðahæð sem ekki eru í samræmi við loftþrýstingsbreytingar. Dæmi um slíkt gæti verið í Borgarnesi eða Grindavík þar sem Dubois o.fl. (2022) sýndu að líkanið átti erfitt með að herma óveðursflóð.

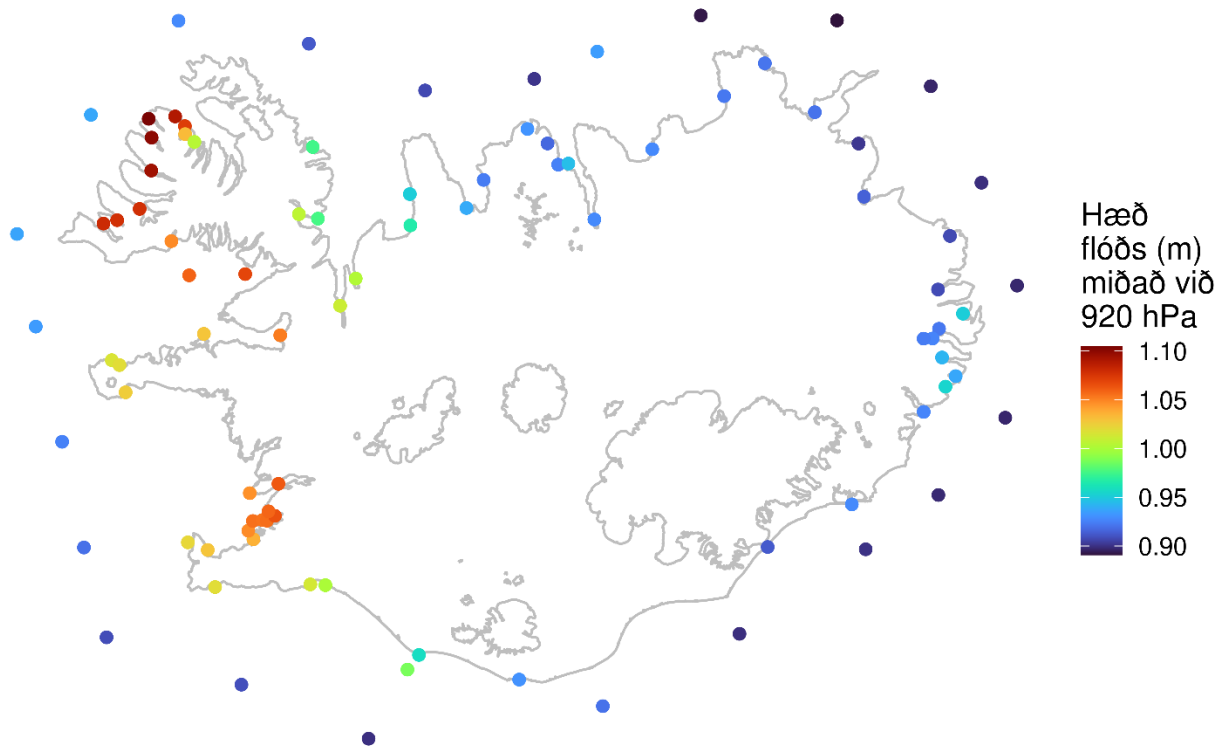
Almennt var þó línulegt samband milli loftþrýstings og hæðar óveðursflóðs. Mynd A8 sýnir samanburð mestu hæðar óveðursflóðs í hverjum mánuði og loftþrýstings á sama tíma, fyrir stöðvarnar 90. Algengasti halli bestu línu var 0.96 cm hækkun sjávarstöðu fyrir hvert 1 hPa fall í loftþrýstingi sem er aðeins hærra en 0.84 cm/hPa sem var reiknað fyrir gögn í Reykjavíkurböfn á tímabilinu 1956–1990 (Ólafur Guðmundsson og Páll Einarsson, 2006), en nærri því sem gera má ráð fyrir vegna vökvastöðujafnvægis (0.99 cm/hPa). Á nokkrum stöðvum var hækkun sjávarstöðu meiri (um 1.05–1.1 cm fyrir 1 hPa fall í loftvægi), en á þeim stöðum var óvissan á matinu meiri. Línulega sambandið var notað til þess að meta mögulega hækkun við allra lægsta loftþrýsting sem mælst hefur á Íslandi.

Í þeim 90 punktum sem vistaðir eru við keyrslur á líkaninu er lægsta loftþrýstingsgildið 934.7 hPa sem er um 15 hPa hærra en lægsta mæld gildi frá því að samfelldar mælingar hófust. Lægst hefur loftþrýstingur mælst 920 hPa þann 2. desember 1929 á Stórhöfða í Vestmannaeyjum, þó rökstyðja megi að vegna staðsetningar hafi þrýstingur við sjávarmál líklega verið tæplega 4 hPa hærri (Trausti Jónsson, 2007).

Mynd A9 sýnir hæð flóðs við 920 hPa loftþrýsting, reiknað frá línulegum líkönum sem sjá má á mynd A8. Hæð þessa þrýstingsflóðs er á bilinu 0.9–1.1 m, og er víðast meiri en hundrað ára óveðursflóðið (h_{100}) sem sýnt er á mynd A7. Það þarf ekki að koma á óvart því mynd A9 byggir á lægri þrýstingi en notaður var í Delft3D-FM keyrslunum. Við norðurströnd landsins, frá Ströndum að Langanesi er h_{100} á bilinu 0.7 til 0.9 m (sjá mynd A7) og á þessu svæði er versta þrýstingsflóð 0.15–0.3 m hærra en h_{100} . Annars staðar er munurinn minni og sums staðar er versta þrýstingsflóð lægra en h_{100} . Niðurstaðan bendir því til þess að við norðurströndina gæti hæð 100 ára flóðsins á mynd A7 verið vanmetin, og taka þarf tillit til þess við ákvörðun endanlegrar hæðar þess 100 ára flóðs sem verður notað til viðmiðunar.



Mynd A8. Samband mestu sjávarhæðar hvers mánaðar (m) og minnsta loftþrýstings (hPa) við hverja stöð á mynd A1.



Mynd A9 Hæð flóðs ef loftþrýstingur væri 920 hPa. Myndin sýnir einungis þann hluta flóðsins sem bregst við breytingum á loftþrýstingi en gera mætti ráð fyrir að óveðursflóð við þennan loftþrýsting væri eitthvað hærra.

A2.1.2 Óvissa vegna tímasetningar óveðursflóða og sjávarfalla

Ef aftakgreiningunni sem lýst er hér að ofan er beitt á tímaraðir frá keyrslum með lofthjúpsgögnum og stjarnfræðilegum flóðkröftum fæst niðurstaða sem endurspeglar bæði sjávarföll og veðurflóð (sjá mynd A10). Umfjöllun um slíka útreikninga má finna víða (sjá t.d. grein 3.4.1 í Coles, 2001) en niðurstaðan takamarkast þó af því að árshámörkin geta endurspeglað hvernig óveður féll að hinum reglulegu sjávarföllum. Fyrir nægilega langar tímaraðir verður þetta minna vandamál, en hér er notast við raðir sem eru 21 árs langar.

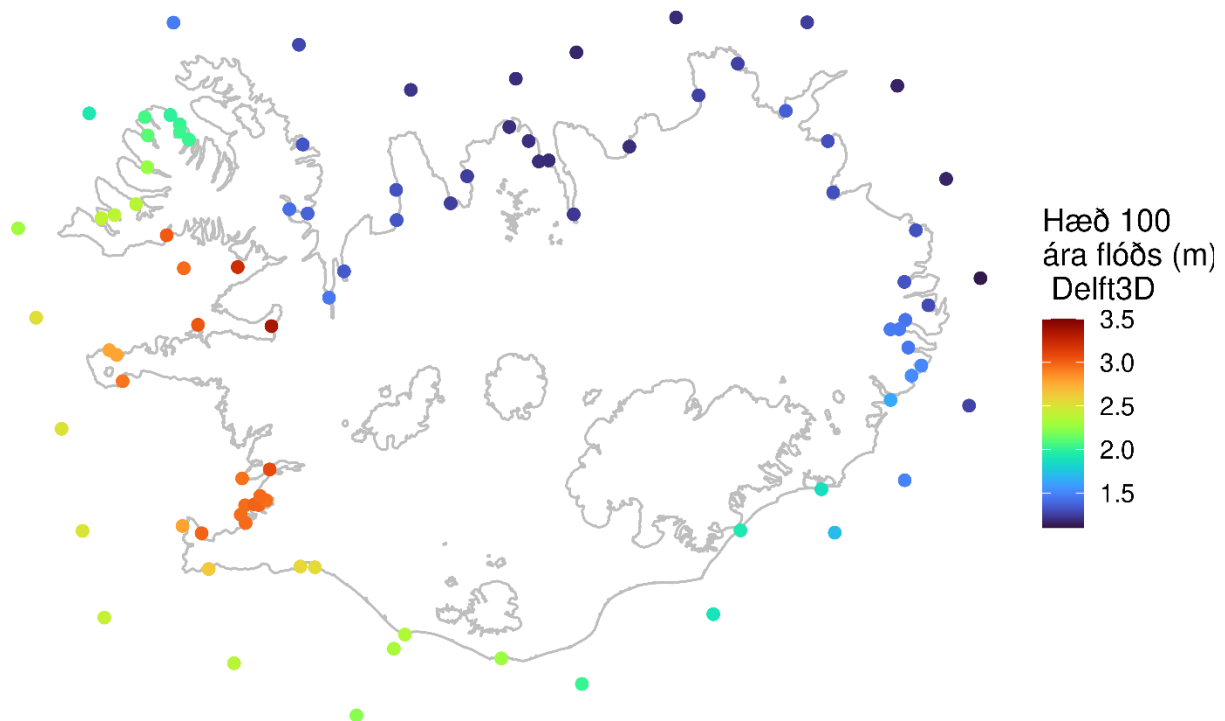
Hægt er að bæta úr þessum takmörkunum og jafnframt bæta nýtingu gagnanna (sem almenna aftakadreifingin er oft gagnrýnd fyrir að nýta illa) samtímis því að bæta mat á óvissu og leggja mat á samlíkur hámarka í veðurflóðum og sjávarföllum. Þetta má gera með því að beita aðferð slembifasa (Theiler o.fl., 1992) við að stækka gagnasafnið sem gerir mögulegt að endurtaka greininguna oft, bæta mat á h_{100} og leggja mat á tölfræðilega óvissu í því.

Með aðferð slembifasa er tímaröðinni fyrst Fourier varpað í tíðnirúm, fösum vörpunarinnar svo slembiraðað og henni varpað til baka úr tíðnirúmi yfir í tímarúm. Niðurstaðan er röð sem hefur sama aflróf og sjálffylgni og upphaflega röðin, en aðferð Theiler tryggir einnig að dreifing raðarinnar sé varðveitt. Þessari aðferð var beitt til að búa til 500 staðgönguraðir fyrir óveðursröðina á hverjum stað. Hver staðgönguröð var síðan lögð við sjávarfallaröðina og þannig fengust 500 ólíkar raðir fyrir hvern stað. Einfaldast er að hugsa sér að þetta kanni áhrif þess ef sambærileg óveður hefðu valdið flóðum

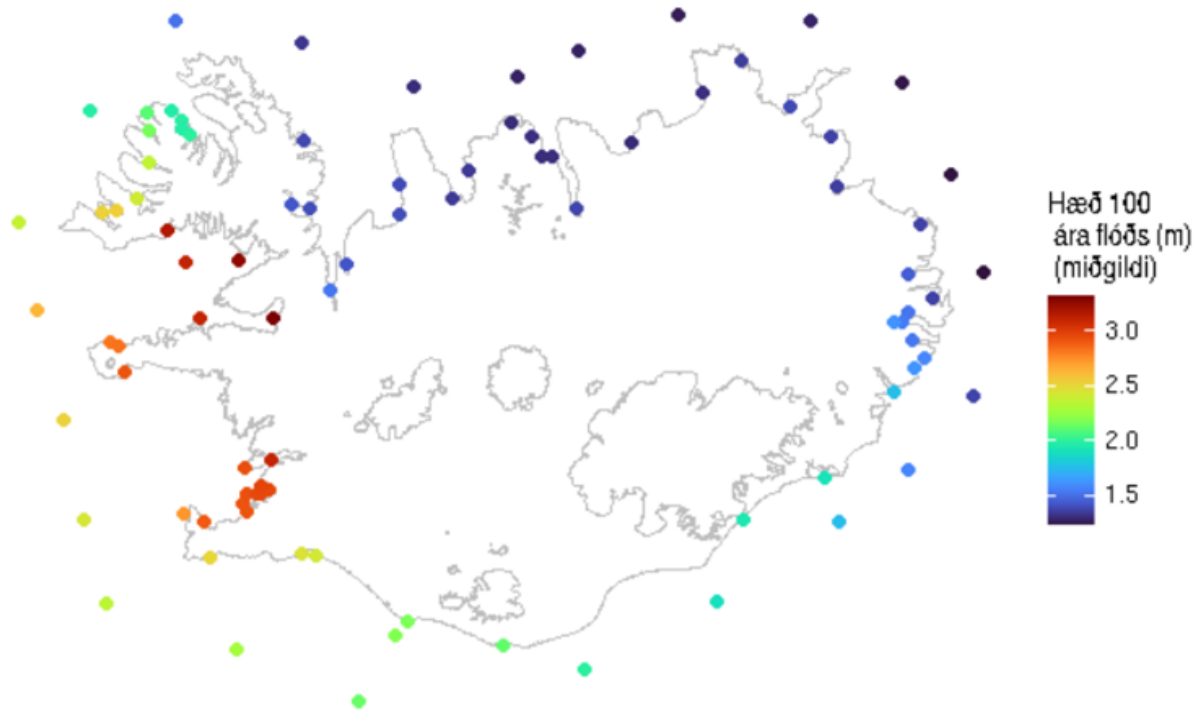
sem hefðu hitt öðruvísi á sjávarföll, t.d. þannig að óveðursflóð sem átti sér stað á lágflæði gæti hitt á háflæði. Með því að reikna h_{100} fyrir hverja röð má fá mat á áhrifum þess að tímasetning óveðra hefði verið önnur og á sama tíma leggja mat á dreifingu niðurstaðna. Mynd A11 sýnir niðurstöðu þess að reikna miðgildi h_{100} á hverjum stað og mynd A12 sýnir 95% hlutfallsmark dreifingarinnar.

Myndir A10, A11 og A12 eru ólíkar mynd A7 hvað það varðar að þær sýna niðurstöður þegar óveðursflóð hefur verið faldað saman við sjávarföllin. Fyrir vikið er ráðandi þáttur í litadreifingunni hæð sjávarfallabylgjunnar (sjá mynd A5). Það er ekki sjálfgefið að það hækki matið á h_{100} að byggja á 500 staðgönguröðum, en samanburður á upprunalegum reikniniðurstöðum og niðurstöðum á mynd A11 sýnir að miðgildið var allt að 0.2 m hærra norðan við landið, en álíka mikið lægra sunnan við það (sjá mynd A13).

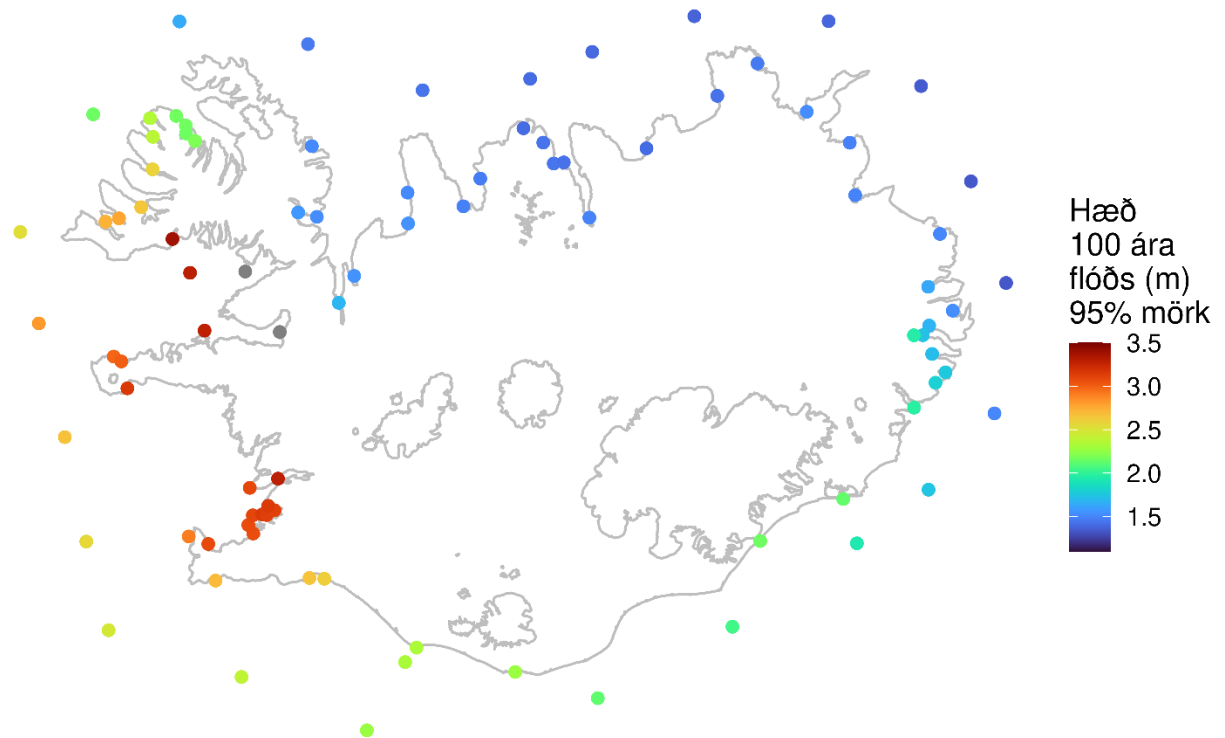
Þegar unnið er með 500 staðgönguraðir sem endurspeгла það ef óveðursflóð hefðu hitt öðruvísi á sjávarföll til þess að meta hættu á sjávarflóðum, eru ekki góð rök fyrir því að miða við miðgildi eða meðaltal dreifingarinnar. Eðlilegra er að miða við slæm tilvik, t.d. 95% mörk dreifingarinnar, sem sjá má á mynd A12. Mynd A14 sýnir að 95% markið hækkar mat á h_{100} um 0.1 til 0.3 m til viðbótar frá miðgildinu, og m.a. hækkar það um 0.1 til 0.15 m norðan við landið þar sem greining á óvissu vegna loftþrýstings hér að framan (sjá grein A2.1.1) benti til þess að upphafleg greining á h_{100} væri of lág. Vegna þess er í skýrslunni *viðmiðunarhæð* 100 ára flóða byggð á 95% hlutfallsmörkum dreifingar h_{100} , eins og þau koma fram á mynd A12 og vísað er í viðauka A3 um nánari útfærslu.



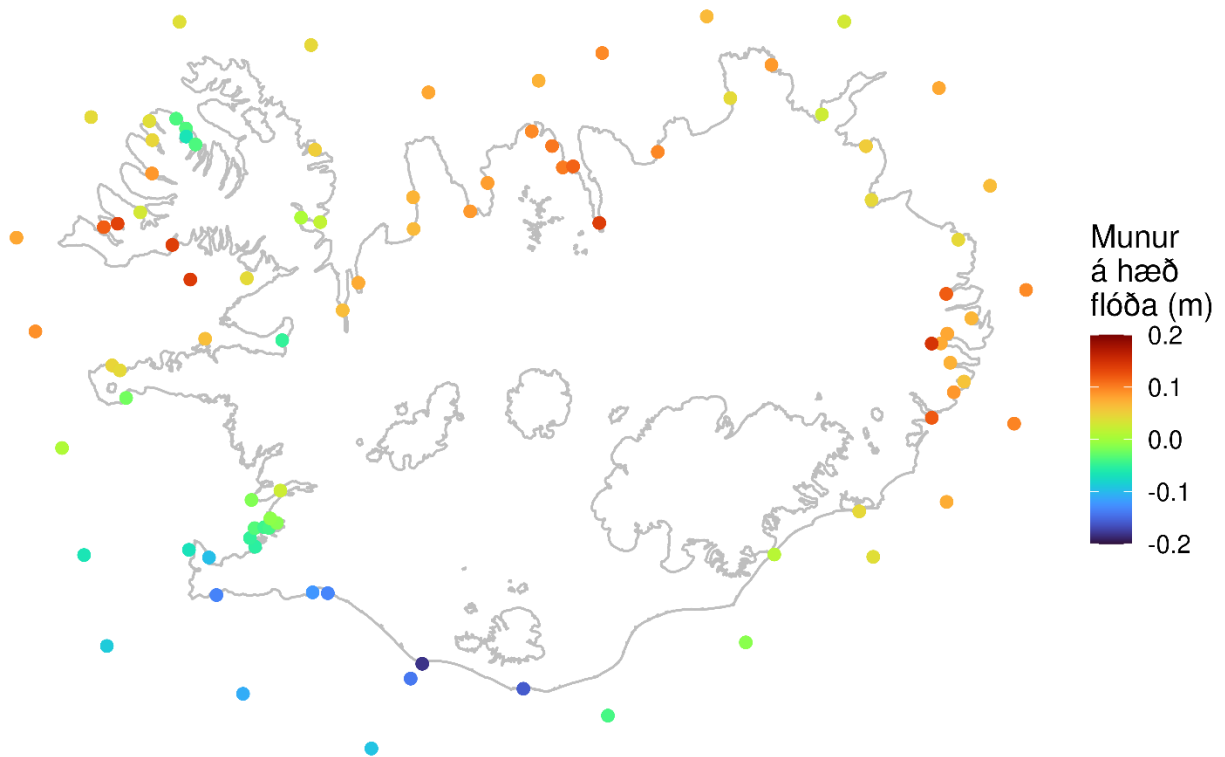
Mynd A10. Hæð 100 ára flóðs í upphaflegu 21 árs keyrslu Delft3D-FM þar sem áhrif sjávarfalla og breytinga í lofthjúpi eru bæði tekin með í reikninginn.



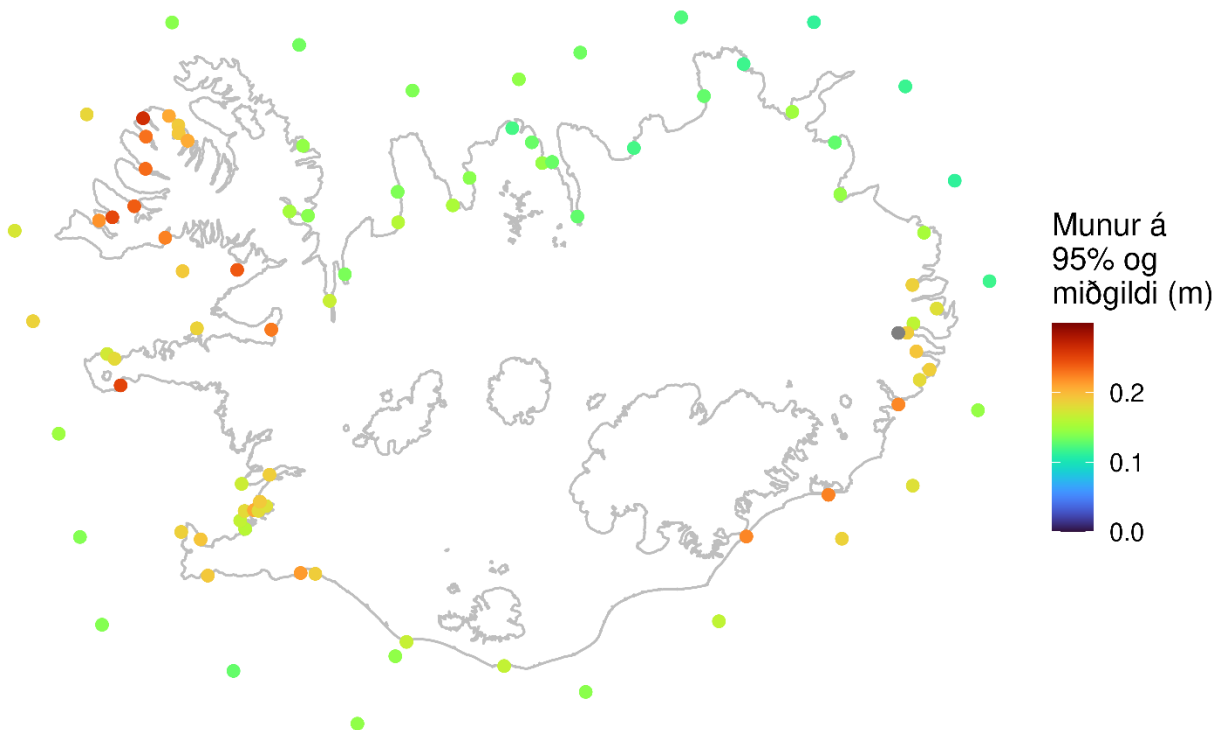
Mynd A11 Miðgildi h100 fyrir 500 ólíkar staðgönguraðir með aðferðinni sem lýst er í textanum.



Mynd A12 . Hæð hundrað ára flóðs miðað við 95% mörk dreifingarinnar. Þetta kort var notað sem grundvöllur viðmiðunarflóðs. Sjá grein A3.



Mynd A13. Mismunur á miðgildi h_{100} þegar notað er miðgildi 500 staðgönguraða og upphaflegra reikniniðurstaðna Delft3D-FM (sjá mynd A5).



Mynd A14. Hækkun á hundrað ára flóði frá úrvinnslu 500 staðgönguraða í 95% hlutfallsmark raðanna.

A2.1.3 Tölfræðileg óvissa í mati á stuðlum

Lengd tímaráða sem notaðar eru til að reikna hæð 100 ára flóðs með almennu aftakgreiningunni, hefur afgerandi áhrif á óvissuna. Lengri raðir skila yfirleitt minni óvissu í mati á stuðlum. Aðferðin gefur ágætt mat á óvissu í stuðlum og fyrir vikið er auðvelt að bera saman metna hæð 100 ára flóðs og stærð 5–95 % óvissubilsins sem GEV aðferðin skilar. Í þessu verkefni voru notaðar raðir sem spanna 21 ár (frá 1996 til 2016) og 100 ára hæðin reiknuð í 90 punktum (sjá mynd A7). Eins og fram kom í grein A2 var hæðin á bilinu 0.7 til 1.3 m en samkvæmt GEV aðferðinni var spönn 5–95% bilsins í 100 ára hæðinni í helmingi tilfella undir 0.23 m og í 75% tilfella undir 0.35 m. Mest var óvissan í reiknipunktinum í Reyðarfirði þar sem hún var 0.95 m, en það gildi skar sig mikið úr og var gjörólíkt niðurstöðum fyrir nærliggjandi reiknipunkta.

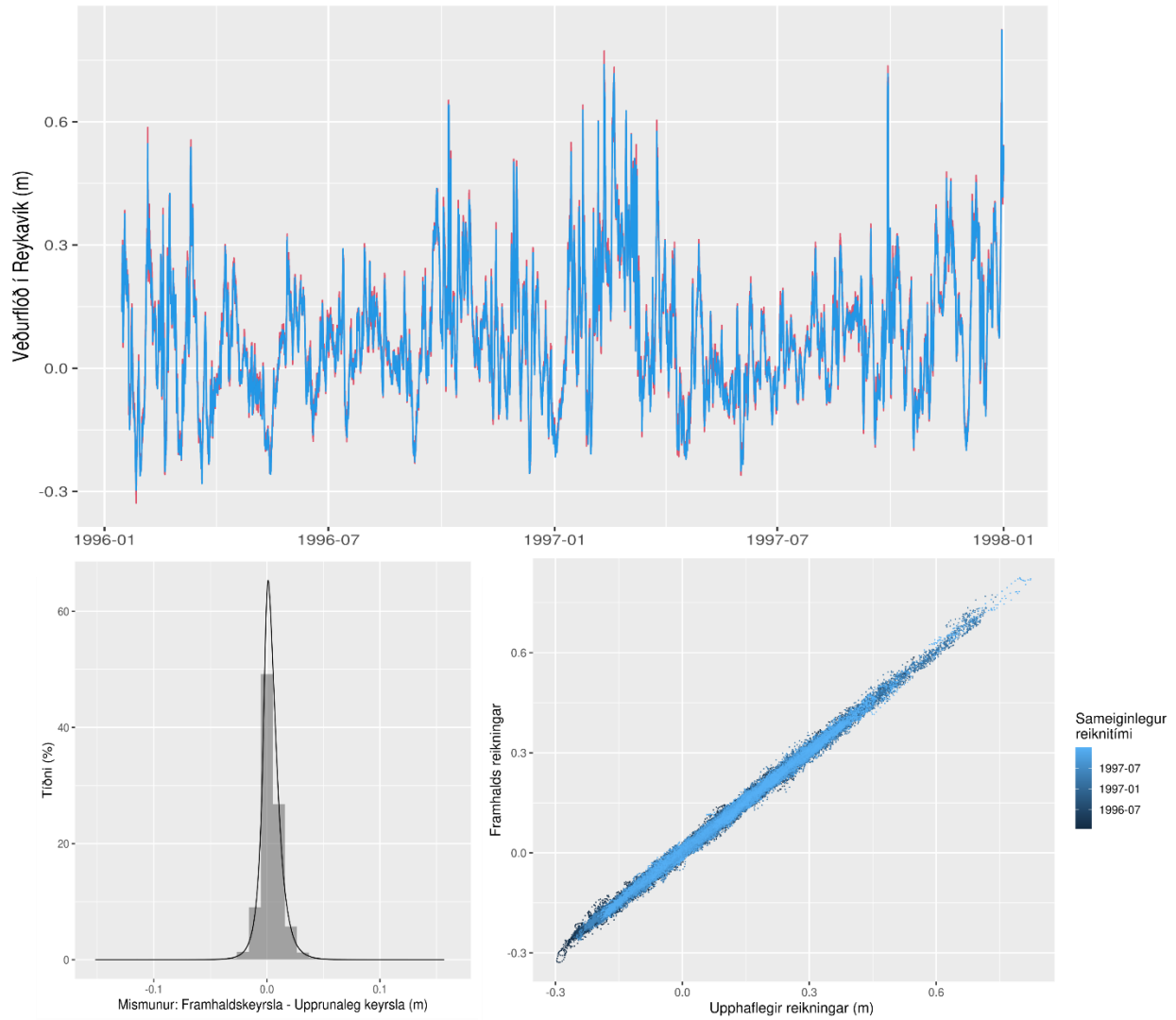
Til að kanna betur óvissu á stuðlum var líkanið keyrt fyrir tímabilið 1980 til 1997. Í stað þess að keyra líkanið tvisvar og reikna áhrif lofthjúps sem mismun tveggja keyrslna, var líkanið keyrt með lofthjúpsbreytingum eingöngu en án sjávarfalla. Þessar framhaldskeyrslur sköruðust við upprunalegu keyrslurnar fyrir árin 1996 og 1997. Mynd A15 sýnir muninn á niðurstöðunum fyrir þessi tvö ár. Efst er samanburður á tímaröðum fyrir niðurstöður í Reykjavík, en fyrir neðan er tíðnirit af mismuni allra reiknipunkta fyrir allar stöðvar. Munurinn er ákaflega lítill, að meðaltali um 0.3 cm og yfirleitt innan við 2 cm. Punktamyndin sýnir hvernig punktarnir raða sér á $y=x$ línuna og einnig að það er ekki bjögun fyrir hærri eða lægri gildi.

Þessir framhaldsreikningar gefa kost á að skoða hversu mikið óvissan í mati á stuðlum (og á 100 ára hæð) tengist lengd raðarinnar. Með því að lengja röðina og endurtaka reikningana sem sýndir eru á mynd A7 með 38 ára röð mátti skoða breytingar á 5% til 95% óvissubili í mati á hundrað ára hæð. Niðurstöður sýndu að þetta bil þrengdist nokkuð og var helmingur gilda undir 0.2 m og 75% þeirra undir 0.25 m. Stærsta óvissubilið (reiknipunkturinn innst í Reyðarfirði) minnkaði úr 0.95 í 0.59 m og 100 ára gildið sjálfst lækkaði um 0.25 m.

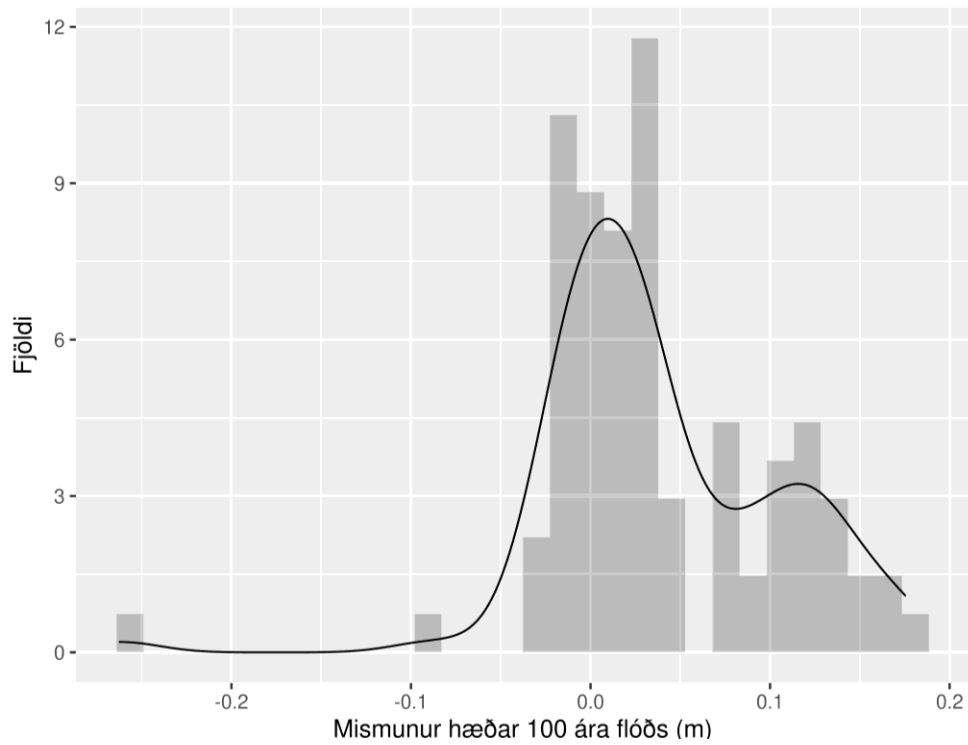
Þessir útreikningar gefa einnig tilefni til að skoða hversu h_{100} á mynd A7 er háð reiknitímabilinu 1996 til 2017. Fyrir þetta tímabil voru nokkur öflug óveður, sérstaklega við suðvesturhluta landsins (t.d. „Engihjallaveðrið“ 1991) og því var mikilvægt að kanna hvort það breytti niðurstöðum að hafa þessi ár með.

Mynd A16 sýnir breytingar sem verða í reiknaðri hæð 100 ára flóðs við það að nota lengra reiknitímabil. Í flestum tilvikum eru litlar breytingar. Búið er að nefna dæmið þar sem 100 ára flóðið í Reyðarfirði lækkaði um 0.25 m, en það er eftirtektarvert að í nokkrum tilvikum hækkaði flóðið um 0.1 – 0.2 m. Mynd A17 sýnir kort af þessum breytingum og þar má sjá að hækkunin er aðallega á suðvesturhluta landsins, á því svæði þar sem ofangreindra óveðra gætti mest.

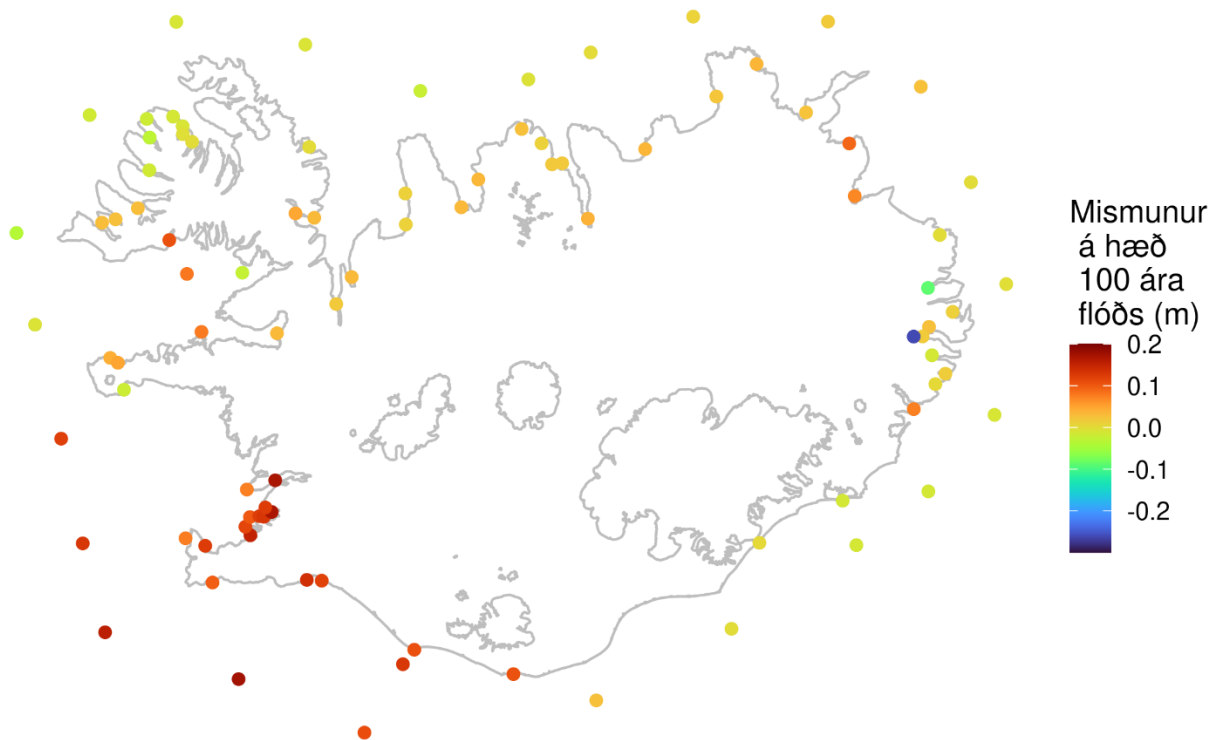
Hæð viðmiðunarflóðs sem hér er notað (mynd 1) var fengin með því að skoða 95% mörk á h_{100} eftir að tekið var tillit til þess að það kann að vera tilviljunum háð hvernig flóð hitta á hæstu sjávarstöðu (sjá grein A2.1.2). Líta má á þá hækkun sem af þessu hlaust sem öryggisþátt og niðurstöður með framhaldsreikningi benda ekki til þess að metið flóð fari yfir þau. Reikningar með lengra tímabili gefa því ekki til kynna að endurskoða þurfi viðmiðunarflóðið á mynd 1.



Mynd A15 Samanburður á líkankeyrslum fyrir sameiginlega tímabilið 1996 og 1997.



Mynd A16 Mismunur hæðar 100 ára flóðs þegar notaðar eru keyrslur 1996 - 2016 og þegar notaðar eru keyrslur 1980 til 2016. Í flestum tilvikum eru flóðhæðirnar svipaðar, en þó eru nokkur tilvik þar sem þær eru hærri þegar notað er lengra tímabil.



Mynd A17 Breytingar á 100 ára hæð óveðursflóða þegar reiknað er með tímabilinu 1980 til 2017.

A3 Kortlagning niðurstaðna

Til þess að geta kortlagt niðurstöðurnar, var flóðhæðin í hverjum punkti aðlöguð að landshæðarkerfinu ISH2004 (Guðmundur Valsson, 2012). Með því að aðlaga hæðina að ISH2004 var hægt að bera flóðahæðir saman við íslenska hæðarlíkanið ÍslandsDEM (Landmælingar Íslands, 2020) og reikna hversu langt inn á land flóð gæti borist. Eins og rætt er að framan er hæð óveðursflóða reiknuð með því að taka mismun útreikninga með sjávarföllum eingöngu og keyrslum með breytingum í loftþrýstingi og vindum (sjá t.d. mynd A3). Hvað aðlögun að ISH2004 varðar skiptir máli að loftvægi í sjávarfallakeyrslum var fest í meðaltali lofthjúpsins (1 atm eða 1013.25 hPa), en meðalloftvægi við landið er lægra sem veldur hækun á sjávarstöðu. Í Reykjavík var þessi munur 0.085 m að meðaltali fyrir allt reiknitímabilið. Þar sem ISH2004 er skilgreint með núllpunkt í meðalsjávarhæð í Reykjavík var hæðarmunurinn í Reykjavík (0.085 m) dreginn frá flóðhæðinni í öllum punktum reiknilíkansins. Þannig fékkst flóðhæðin í öllum reiknipunktunum miðað við meðalsjávarhæð í Reykjavík og niðurstöður þá samanburðarhæfar við hæðir í hæðarlíkaninu ÍslandsDEM.

Þegar búið var að ákvarða viðmiðunarhæð 100 ára flóðs í hverjum reiknipunkti miðað við ISH2004 var tvívíðri splæsibrúun beitt til að fá mat á flóðahæð við strandlínuna (ESRI, 2020, sjá einnig Briggs, 1974; Terzopoulos, 1998; Smith & Wessel 1988 og Zoraster, 2003). Niðurstöðuna má sjá á mynd 1 sem sýnir flóðhæðina brúaða umhverfis landið. Þetta flóð er hér kallað *viðmiðunarflóð* og vísað er í kafla A2 og sérstaklega mynd A12 fyrir nánari rökstuðning þess.

Síðasta skrefið í kortlagningunni var að bera hæð viðmiðunarflóðsins saman við ÍslandsDEM á 10 x 10 m neti og meta hversu langt inn í landið flóð gæti náð. Við þessa útreikninga var upphlaup flóðbylgju ekki skoðað heldur einungis hvort vatnshæðin í viðmiðunarflóði væri hærri en landhæð í reikninetinu. Þetta var gert fyrir allt strandsvæði Íslands auk þeirra eyja þar sem fólk hefur fasta búsetu. Niðurstöðu fyrir landið allt má sjá á mynd 2 sem sýnir þá staði þar sem viðmiðunarflóðið gengur á land. Einnig var hver byggðarkjarni við sjávarsíðuna kortlagður og skoðaður sérstaklega. Niðurstöður fyrir höfuðborgarsvæðið, Ísafjörð, Akureyri, Eskifjörð, Höfn í Hornafirði, Vík í Mýrdal, Reykjanesbæ og Voga eru sýndar og ræddar hér að framan en niðurstöður fyrir ólíka landshluta og alla byggðarkjarna við ströndina má sjá í fylgiriti (sjá yfirlit yfir byggðarkjarna í töflu A1).

A3.1 Óvissa tengd kortlagningu niðurstaðna

Auk þeirrar óvissu sem fylgir útreikningunum á viðmiðunarflóðhæðinni er óvissa í kortlagningu mögulegra flóðasvæða. Lítilsháttar óvissa er tengd brúunaraðferðum og aðlögun að hæðarkerfinu ISH2004. Þessi óvissa er þó smá í samanburði við aðra óvissuþætti í mati á viðmiðunarhæðinni. Þannig felst töluverð óvissa í landhæð í ÍslandsDEM sem notað var við kortlagninguna. Óvissa í landhæð hefur verið metin innan við 0.5 m í 2x2 m neti, en hér er notað 10x10 m net svo gera má ráð fyrir minni óvissu. Ef miðað er við að óvissu 2x2 m reita megi lýsa sem óháðum staðaldreifðum hendingum væri óvissa á grófara 10x10 m neti minni en 0.1 m. Það er hins vegar ekki líklegt að óvissa samliggjandi reita sé óháð, svo 0.1 m verður að skoðast sem lágmarksmat. Óvissa í kortlagningu á svæðum sem flæða er þá á bilinu 0.1–0.5 m vegna óvissu um landhæð ÍslandsDEM en ekki eru góðar forsendur til að þrengja það bil.

Tafla A1. Þeir byggðarkjarnar sem sýndir eru nánar á viðmiðunarflóðskortum í fylgiskjali skýrslunnar.

Akranes	Grundarfjörður	Ólafsvík
Akureyri	Grundarhverfi	Patreksfjörður
Arnarstapi	Hafnarfjörður	Raufarhöfn
Álftanes	Hafnir	Reyðarfjörður
Árskógssandur	Hauganes	Reykhólar
Bakkafjörður	Hellissandur	Reykjanesbær
Bakkagerði	Hellnar	Reykjavík
Bíldudalur	Hjalteyri	Rif
Blönduós	Hnífsdalur	Sandgerði
Bolungarvík	Höfn	Sauðárkrókur
Borðeyri	Hofsós	Seltjarnarnes
Borgarnes	Hólmavík	Seyðisfjörður
Breiðdalsvík	Hrísey	Siglufjörður
Brúnahlíð	Húsavík	Skagaströnd
Búðardalur	Hvammstangi	Stöðvarfjörður
Dalvík	Hvanneyri	Stokkseyri
Djúpivogur	Innes	Stykkishólmur
Drangsnes	Ísafjörður	Súðavík
Eskifjörður	Keflavík	Suðureyri
Eyrbakki	Kópasker	Svalbarðseyri
Fáskrúðsfjörður	Kópavogur	Tálknafjörður
Flatey	Laugarbakki	Vestmannaeyjabær
Flateyri	Lónsbakki	Vík
Garðabær	Mosfellsbær	Vogar
Garður	Nesjahverfi	Vopnafjörður
Grenivík	Neskaupstaður	Þingeyri
Grimsey	Njarðvík	Þorlákshöfn
Grindavík	Ólafsfjörður	Þórshöfn