



Hættumat vegna berghlaupa í Öskju

Sigríður Sif Gylfadóttir
Jón Kristinn Helgason
Sveinn Brynjólfsson
Eiríkur Gíslason
Tómas Jóhannesson

Hættumat vegna berghlaupa í Öskju

Sigríður Sif Gylfadóttir, Veðurstofu Íslands
Jón Kristinn Helgason, Veðurstofu Íslands
Sveinn Brynjólfsson, Veðurstofu Íslands
Eiríkur Gíslason, Veðurstofu Íslands
Tómas Jóhannesson, Veðurstofu Íslands

Lykilsíða

Skýrsla nr.: VÍ 2016-007	Dags.: Júlí 2016	ISSN: 1670-8261	Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/> Skilmálar:
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Hættumat vegna berghlaupa í Öskju		Upplag: 25 Fjöldi síðna: 46 Framkvæmdastjóri sviðs: Jórunn Harðardóttir	
Höfundar: Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason og Tómas Jóhannesson		Verkefnisstjóri: Eiríkur Gíslason Verknúmer: 4751-0-0001	
Gerð skýrslu/verkstig:		Málsnúmer: 2014-217	
Unnið fyrir: Vatnajökulsþjóðgarð og Ofanflóðasjóð			
Samvinnuaðilar: Jarðvísindastofun Háskólans, Norska jarðtæknistofnunin NGI			
Útdráttur: Hættumat vegna berghlaupa og flóðbylgna í Öskju hefur verið unnið í framhaldi af stóru hlaupi sem féll í Öskjuvatn 21. júlí 2014 og olli mikilli flóðbylgju á vatninu. Niðurstaða matsins er að áhætta einstaklinga af völdum slíkra hlaupa sé ekki mikil en þó sé tilefni til ákveðinna aðgerða til þess að draga úr slyshættu starfsmanna og annarra sem oft eiga leið um svæðið við Öskjuvatn. Eðlilegt er að fólk sem fer um Öskju sé varað við hættunni á skriðuföllum og flóðbylgjum með áberandi hætti þegar það kemur inn á svæðið og mælt með því að það dvelji ekki langdvölum við vatnið. Einnig er rétt að beina þeim tilmælum til ferðaþjónustuaðila að þeir skipuleggi ferðir um svæðið þannig að ekki sé staldrað við niðri við vatnið til þess að matast eða koma á framfæri fræðslu um svæðið. Svæði við bakka Öskjuvatns þar sem flóðbylgjur geta skapað hættu hafa verið afmörkuð á korti og jafnframt svæði sem talin eru varhugaverð vegna óstöðugra jarðlaga. Skilgreind eru tvenns konar hættusvæði vegna flóðbylgju. Annars vegar er svæði þar sem mælt er með að ferðamenn og aðrir sem fara um svæðið hafi ekki langa viðdvöl og að ekki séu sett þar upp upplýsingaskilti eða önnur aðstaða sem dvelur fyrir ferðafólki. Þetta svæði miðast við flóðbylgjur af völdum berghlaupa sem eru allt að því jafn stór og hlaupið 2014. Hins vegar er skilgreint viðbúnaðarsvæði sem svarar til allt að tvöfalt stærri hlaupa. Á þessu svæði kann að skapast hætta af völdum mjög stórra hlaupa og þar er rétt að vara við umferð ef vísbendingar eru um yfirvofandi hlaup, t.d. ef vart verður við sprungumyndun eða hreyfingar á jarðlögum nærri öskjubrúnninni eða í kjölfar stórra jarðskjálfta nærri Öskju sem ástæða er til að óttast að geti leitt til berghlaups.			
Lykilorð: Hættumat, skriðuföll, berghlaup, flóðbylgja, Askja		Undirskrift framkvæmdastjóra sviðs:  Undirskrift verkefnisstjóra:  Yfirfarið af: SG	

Efnisyfirlit

1 Inngangur	7
2 Berghlaupið 21. júlí 2014	8
2.1 Berghlaupið.....	9
2.2 Flóðbylgjan.....	10
2.3 Hlaupurðin á botni Öskjuvatns.....	11
3 Greining áhættu	14
4 Flóðbylgjur	17
5 Hermun á flóðbylgju af völdum berghlaupsins 21. júlí 2014	18
6 Líkanreikningar á flóðbylgjum í Öskjuvatni	22
7 Hættumat og viðbúnaður	26
8 Niðurstaða	29
9 Þakkir	30
10 Heimildir	31
Viðaukar	
I Ljósmyndir	36
II Niðurstöður sviðsmynda	43
III Kort	45

1 Inngangur

Stórt berghlaup féll úr suðausturbrún Öskju niður í Öskjuvatn þann 21. júlí 2014 og olli flóðbylgju (tsunami) sem skolaðist langt upp á bakkana allt í kringum vatnið. Svo heppilega vildi til að hlaupið varð síðla kvölds og enginn var nærri vatninu en annars hefði getað farið illa. Aðeins nokkrum klst. áður voru tugir ferðamanna niðri á vatnsbakkanum við Víti sem hefðu átt erfitt með að komast undan flóðbylgjunni sem barst yfir vatnið á einungis 1–2 mínútum og skolaðist upp tugi metra og yfir brúnina niður í Víti.

Hlaupið féll úr 370 m hárrí öskjubrúninni (sjá mynd 1), var um 900 m breitt efst en um 550 m þar sem það gekk út í vatnið og rúmmál efnis sem féll niður í vatnið og hækkaði vatnsborð þess er talið hafa verið um 8 milljónir m³. Margvíslegar mælingar og rannsóknir hafa farið fram á berg-hlaupinu og afleiðingum þess af hálfu Veðurstofunnar og Jarðvísindastofnunar HÍ (Harpa Grímsdóttir o.fl., 2016). Teknar voru loftmyndir af berghlaupsurðinni og unnin landlíkön á grundvelli þeirra og útvegaðar myndir og landlíkön af Öskju fyrir berghlaupið. Berghlaupsurðin á botni Öskjuvatns var mæld með fjölgeislamælitæki frá báti. Jarðskjálftar sem vart varð við hlaupið hafa verið greindir og hafnar eru rannsóknir á vísbendingum sem í þeim felast um eðli hlaupsins í samvinnu við erlenda jarðskjálftafræðinga. Teknar voru ljósmyndir af hlaupinu og ummerkjum um það og útvegaðar myndir af ýmsum svæðum í Öskju frá því fyrir hlaupið.

Ummerki um flóðbylgjuna sem skolaðist upp á bakka Öskjuvatns voru mæld með GPS- og leysitækjum og unnin kort af útbreiðslu hennar. Þessi skýrsla fjallar um rannsóknir á flóðbylgjunni og líkanreikninga til þess að meta hættu af völdum slíkra bylgna. Markmiðið með rannsóknunum og reikningunum er að vinna öryggisáætlun fyrir umferð ferðamanna og annarra um Öskju sem tekur tillit til þeirrar hættu sem stafar af hugsanlegum berghlaupum niður í Öskjuvatn (Tómas Jóhannesson o.fl., 2014a,b; Tómas Jóhannesson & Eiríkur Gíslason, 2014).



Mynd 1. Berghlaupsurðin í suðausturbrún Öskju, að hluta hulin nýsnævi. Ljósmynd: Kristinn I. Pétursson, 1. ágúst 2014.

2 Berghlaupið 21. júlí 2014

Berghlaupið í Öskju í júlí 2014 kann að vera eitt stærsta berghlaup á sögulegum tíma á Íslandi sem ekki féll í beinum tengslum við eldgos (myndir 1 og 2). Rúmmál efnis sem komst á hreyfingu var væntanlega nokkuð umfram Steinholtshlaupið 1967 en það er talið hafa verið um 15 millj. m³ (Guðmundur Kjartansson, 1967). Mun stærri berghlaup hafa væntanlega fallið nokkrum sinnum á sögulegum tíma sem beinn þáttur í eldsumbrotum, m.a. í sambandi við eldgosíð í Öskju 1875 en þá hófst myndun Öskjuvatns sem síðan stækkaði á nokkrum áratugum upp í þá stærð sem vatnið hefur nú. Í lýsingu W. L. Watts (1962, ritað 1876) á ferð hans í Öskju í júlí 1875 segir frá því þegar þeir félagar urðu vitni að hruni bergspildu niður í eldgjána sem þeir komu að og könnuðu.

... Djúpt undir fótum okkar og um eina mílu til norðurs grilltum við brátt barm gígsins, og meðan við stöðum niður í hann, opnaðist víð sprunga og stór spilda steypist hávaðalítið niður í botnlaust hydýpið. Nú rofaði dálítið gegnum gosbræluuna, og gapti þá við jarðfall, eins og op á stórri kolanámu, norðan–norðaustan við gígbarminn, og úr því lagði kolsvartan mökk beint up í loftið. ...

Lýsing þessi, í kjarnyrtri þýðingu Jóns Eypórssonar, gefur til kynna miklar hamfarir og er auðvelt að geta sér þess til að stórkostleg skriðuföll hafi verið samfara myndun hinna miklu öskjubarma sem að hluta urðu til í gosinu 1875 en ekki er unnt að leggja tölulegt mat á stærð hrunsins sem Watts lýsir.

Berghlaupið í Öskju árið 2014 er óbein afleiðing eldgossins 1875 og myndunar öskjunnar. Þverhníptir hamraveggir öskjunnar eru óstöðugir og sprungnir, auk þess sem spennur af völdum jarðskorpuhreyfinga í rötum eldstöðvarinnar kunna að valda enn frekari óstöðugleika á ákveðnum stöðum í öskjubrúninni. Berghlaup sem eru tugir millj. m³ að stærð eru sjaldgæf hér á landi sem og í öðrum löndum og slík hlaup sem ekki falla í tengslum við eldgos jafnvel enn sjaldgæfari en þau sem eru samfara eldgosum hér á landi. Hlaup sem ekki tengjast eldgosum eru að



Mynd 2. Horft yfir ofanvert berghlaupið. Sjá má óbrotið bergflykki sem stendur hátt upp úr urðinni og hliðarstraum sem hljóp til norðausturs út úr meginstraumnum miðhlíðis og stöðvaðist þar. Ljósmynd: Jón Kristinn Helgason, 3. ágúst 2014.



Mynd 3. Yfirlitsmynd af Öskjuvatni frá því fyrir berghlaupið með helstu örnefnum sem vísað er til í skýrslunni. Útlínur berhlaupsins 21. júlí 2014 eru sýndar með raudri línu. Upprétt loftmynd Loftmynda ehf. er frá 23. júlí 2013.

vissu leyti hættulegri fólki en önnur. Síður er við því að búast að berghlaup falli þegar ekki er til að dreifa umróti og jarðskorpuhreyfingum sem eldgosi fylgja, og slík hlaup geta komið meira að óvörum. Því er fyllsta ástæða til þess að kanna hlaup þessarar gerðar þegar þau verða og reyna eftir því sem unnt er að greina orsakir þeirra og afmarka svæði þar sem vísbendingar eru um að þau kunni að falla.

2.1 Berghlaupið

Berghlaupið huldi að mestu Suðurbotnahraun og lagðist upp að Kvíslahrauni (sjá staðsetningu örnefna á mynd 3 og korti 1). Sjálfar eldstöðvar Suðurbotnahrauns eru þó fyrir utan hlaupurðina. Hlaupið kom fram á jarðskjálftamælum Veðurstofunnar sem skjálftaórói og benda gögnin til þess að hlaupið hafi farið af stað um kl. 23:24. Skriðan olli titringi sem stóð yfir í rúmlega eina mínútu. Bylgjurnar sáust á stórum hluta jarðskjálftamælakerfis Veðurstofunnar, mjög vel á nálægum stöðvum en einungis lægstu tíðnirnar á fjarlægustu mælum. Enginn sjónarvottur varð að berghlaupinu en síðustu ferðamennirnir yfirgáfu svæðið við vatnið tæpum klukkutíma fyrir hlaupið. Björgunarsveitarmenn hjá Hálendisvakt Landsbjargar sáu hvítan mökk yfir Öskju nokkrum mínútum eftir hlaupið. Mökkurinn líktist helst gufubólstrum sem stigu upp úr öskjunni og er talið að það sé vegna þess að hlaupið hafi afhjúpað grunnstæðan jarðhita undir yfirborði

jarðar. Einnig kann ryk, sem þyrlaðist upp við berghlaupið, að hafa komið við sögu (Jón Kristinn Helgason o.fl., 2014).

Upptök berghlaupsins voru efst í brún öskjunnar á um 900 m breiðu svæði í 350 m hæð yfir yfirborði vatnsins þar sem myndaðist stór brotskál. Hluti efnisins nam staðar í miðri hlíðinni og myndað 250 m breiðan hjall í um 150 m hæð yfir vatninu sem hallar að mestu til suðurs inn að brún öskjunnar. Ummerki á yfirborði benda til þess að meirihluti efnisins sem hljóp út í vatnið eigi upptök í brúninni sunnanverðri þar sem gliðnun var mest í aðdraganda hlaupsins og að efnið sem hljóp úr brúninni norðanverðri hafi að mestu hlaðist upp og myndað fyrnefndan hjall sem er stærri og þykkari í norðanverðri brotskálinni. Fjarlægð frá brún öskjunnar niður að yfirborði Öskjuvatns er rúmir 1100 m.

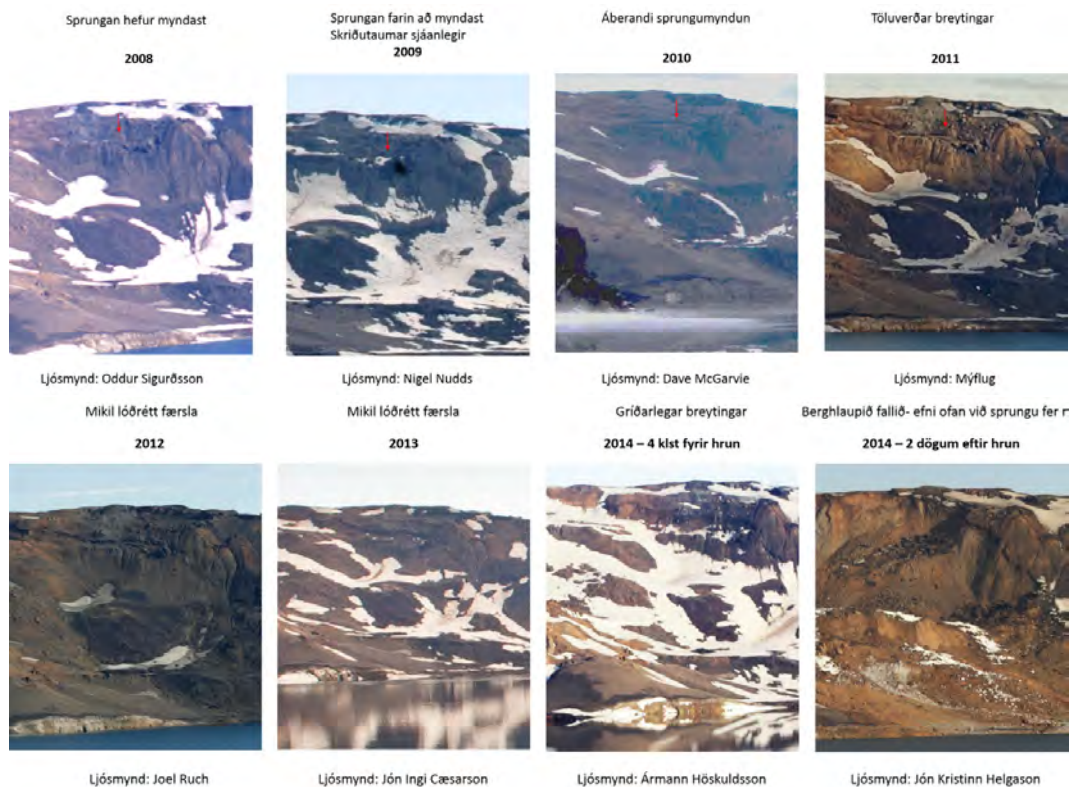
Meginorsök hlaupsins má rekja til hreyfingar um misgengissprungu í brún öskjunnar. Sprunga þessi var þekkt og er hún merkt á sprungu- og misgengiskorti Hartley og Thor Thordarson (2012). Hægfara hreyfing virðist hafa verið á berginu í brún öskjunnar frá 2007 og herti mjög á skriðinu sumarið 2014 (mynd 4). Einnig sýna ljósmyndir frá 2013 sprungur nærri upptökum hlaupsins sem eru til marks um að víðtæk hreyfing í berggrunni var þá hafin á þessu svæði (sjá mynd 22 í ljósmyndaviðauka). Fram að hlaupinu var mesta gliðnunin á árbilinu 2011–2012. Eðli málsins samkvæmt voru mestu hreyfingarnar skömmu fyrir hlaupið en á ljósmyndum sem teknar voru 10 dögum áður sést að sprungan hafði gliðnað talsvert og jarðlögin sem síðar hlupu sigið mikið auk þess sem sprungur voru farnar að myndast í snjóhulu í hjallanum neðan við brún öskjunnar. Á ljósmynd sem tekin var örfáum klukkustundum fyrir hlaupið sést að næstum öll hlíðin ofan Suðurbotna hafði færst úr stað.

Í flóknu jarðfræðilegu umhverfi sem þessu eru eflaust margir skriðfletir en ummerki berghlaupsins benda til þess að meginskriðflöturinn hafi tengist hringsprungunni í brún öskjunnar en misgengi og sprungur innan berghlaupssvæðisins hafa líklega haft áhrif á hreyfingu hlaupsins (Siebert, 2002). Jarðfræðileg ummerki á yfirborði benda til þess að um svokallaðar snörunarhreyfingu sé um að ræða en það þýðir að skriðflötur berghlaupsins er íhvolfur og að jarðlögin hafi snarast um hann. Ekki er hægt að útiloka að fleiri íhvolfir rennslisfletir hafi legið neðar í jarðlögunum. Meginskriðflötur berghlaupsins er fremur brattur við brún öskjunnar eða allt að 60–70° en halli skriðflatarins lækkar eftir því sem fjær dregur frá brúninni og virðist hann ná niður að hringsprungunni sem Hartley og Thordarson (2012) teiknuðu í neðanverðri hlíðinni í Suðurbotnum en hún sést einnig vel á eldri loftmyndum. Ekki er hægt að útiloka að skriðflöturinn liggi neðar í staflanum en að svo stöddu hafa engar jarðfræðilegar vísbendingar fundist sem benda til þess að hann nái undir yfirborð Öskjuvatns.

Rúmmál skriðunnar er metið um 20 milljón m³ með því að bera saman landlíkön frá 2013 og 2014. Landlíkönin sýna mestan hæðarmismun í brún öskjunnar en hún lækkaði um allt að 120 m. Fremst í hjallanum sem myndaðist við hlaupið hefur landið hækkað um allt að 90 m. Rúmmál berghlaupsins kann að vera meira ef skriðflöturinn hefur legið neðar en eins og áður segir hafa engar jarðfræðilegar vísbendingar fundist sem benda til þess.

2.2 Flóðbylgjan

Mörk flóðbylgjunnar á bökkum Öskjuvatns eru sýnd á korti á mynd 5. Bylgjan náði víða 20–40 m hæð umhverfis vatnið og reis hæst upp í um 60 m hæð í gili nokkru norðan Kvíslahrauns og upp í 70–80 m hæð í nokkrum giljum við suðurströnd vatnsins þar sem landslag við ströndina

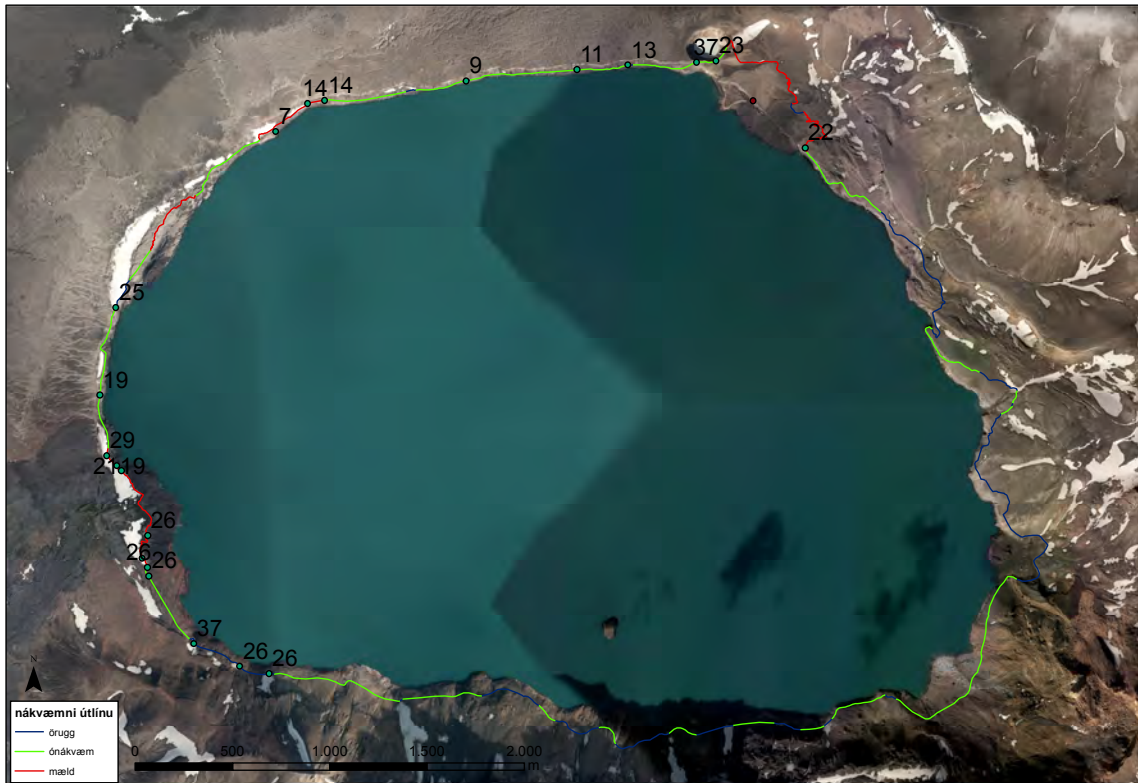


Mynd 4. Ljósmyndaröð, tekin saman af Jóni Kristni Helgasyni, sem sýnir þróun sprungunnar ofan Suðurbotna frá 2008 fram að berghlaupi 2014.

magnaði ölduna (Sveinn Brynjólfsson, 2014a). Bylgjan gekk lengst um 400 m inn á flatlendið suðaustan við Víti, yfir 300 m í Kvíslahrauni, yfir 200 m í Mývetningahrauni og um 140 m við Ólafsgíga (sjá mynd 3 og yfirlitskort aftast í skýrslunni, kort 1). Bylgjan olli miklu rofi á bökkum vatnsins og breytti ströndinni umtalsvert, t.d. við Víti eins og sjá má á mynd 19 í ljósmyndaviðauka.

2.3 Hlaupurðin á botni Öskjuvatns

Berghlaupsurðin á botni vatnsins er sýnd á mynd 6. Til samanburðar eru tiltækar mælingar af botni vatnsins frá því áður en hlaupið féll sem fram fóru haustið 2012. Í báðum tilvikum er um að ræða niðurstöður fjölgeisla-mælinga Ármanns Höskuldssonar á Jarðvísindastofnun HÍ sem gerðar voru frá báti sem fluttur var á Öskjuvatn með þyrllu. Mælingarnar sýna að berghlaupstungan, sem liggur til norðvesturs á milli eyjunnar Asks og lítillar eldstöðvar á botni vatnsins, er víða um 600 m breið, nær um 2,1 km út í vatnið og neðstu 800 m tungunnar eru um 8 m að þykkt að meðaltali. Flatarmál tungunnar í vatninu er um 1,1 km² og vatnsdýpið um 150 m þar sem mest er. Háir hryggir þar sem urðin er þykkust ná allt að 30 m hæð yfir vatnsbotninum sem mældist 2012. Yfirborð tungunnar er mjög óreglulegt og víða má sjá stór bergstykki sem ekki hafa brotnað upp heldur borist fram með hlaupinu og staðnæmst í stórum hrönnum þar sem mörgum slíkum flykkjum ægir saman. Berghlaupið sveigir til vesturs niður að dýpsta hluta vatnsins þar sem það þynnist mikið. Framarlega í skriðutungunni er þyrping af stórum flekum sem eru allt að 150 m á lengd, 70 m á breidd og 25 m á þykkt. Ofar er tungan fremur óregluleg (e. *hummocky*), með stórum hólum, görðum og rásum sem standa hornrétt á rennlistefnuna. Landformin verða

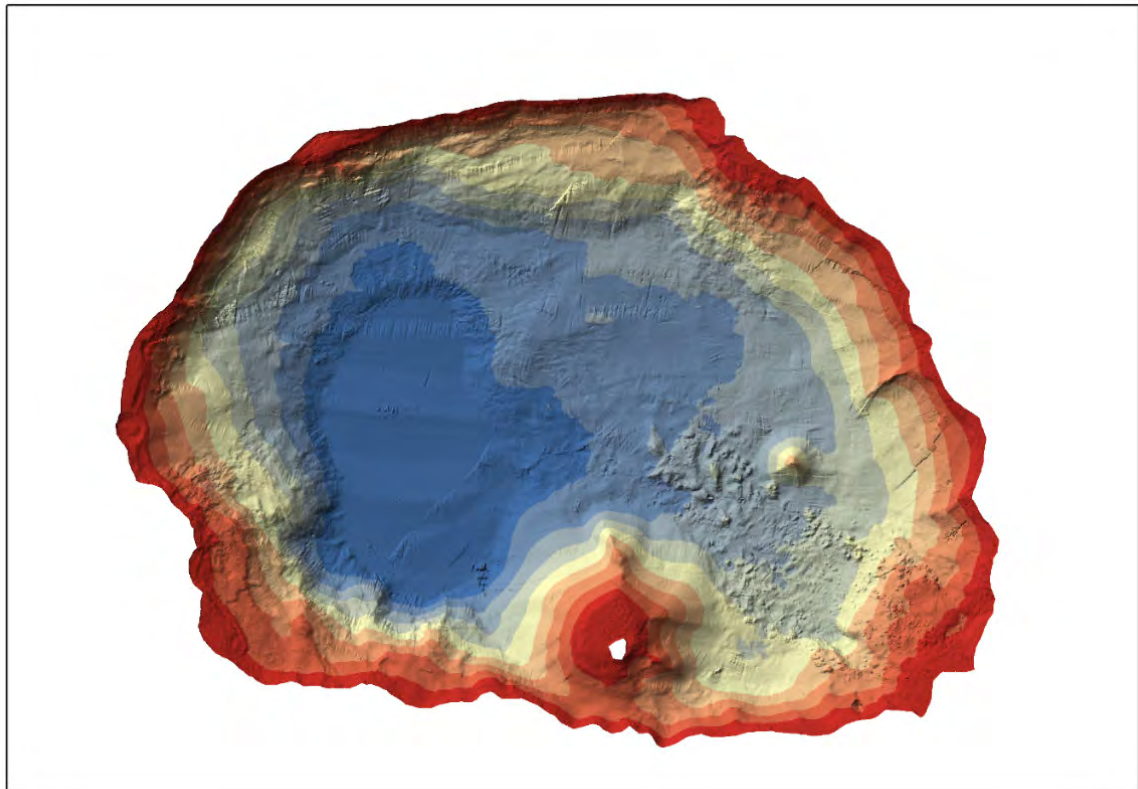


Mynd 5. Efstu mörk flóðbylgju þann 21. júlí 2014 á bökkum Öskjuvatns skv. GPS- og leysi-mælingum og greiningu á loftmynd frá 29. ágúst 2014 sem sýnd er sem bakgrunnur (tekin á vegum IsViews verkefnis University of Munchen). Mæld ummerki eru sýnd með rauðri línu, mörk byggð á túlkun loftmyndar sem talin er nokkuð örugg eru sýnd með blárri línu en túlkuð mörk sem talin eru óviss með grænni línu. Mæld hæð efstu flóðmarka er sýnd með tölum við ströndina á nokkrum stöðum umhverfis vatnið.

stærri eftir því sem fjær dregur frá upptökunum sem bendir til þess að stór og nokkuð heillegur fleki hafi hlaupið út í Öskjuvatn og brotnað upp eftir því sem hann ferðaðist lengra. Í heildina er berghlaupið rúmlega 3200 m að lengd í láréttu plani og heildarfallhæðin um 500 m, þar af 350 m ofan vatnsborðs og um 150 m neðan þess.

Mælingar á vatnsborði í Öskjuvatni fyrir og eftir berghlaupið sýna að það hækkaði um 65 ± 20 cm við hlaupið (Sveinn Brynjólfsson, 2016b) (sjá mynd 23 í ljósmyndaviðauka). Þar sem flatarmál Öskjuvatns er um $11,7 \text{ km}^2$ má út frá hækkuninni reikna að rúmmál berghlaupsurðarinnar sem féll út í vatnið sé um 9 milljónir m^3 að teknu tilliti til grops jarðlaganna sem um er að ræða en það er í samræmi við mismun á landhæð á berghlaupssvæðinu ofan vatnsbakkans við Suðurbotna. Landlíkan frá því fyrir hlaupið er að meðaltali hærra en eftir hlaupið og munar þar u.þ.b. 8 milljónum m^3 þegar heildað er yfir allt upptakasvæðið og berghlaupsurðina.

Í viðauka I eru sýndar nokkar ljósmyndir af berghlaupinu og jarðarumróti af þess völdum og ummerkjum sem flóðbylgjan skildi eftir sig á bökkum Öskjuvatns.



Mynd 6. Berghlaupstungan á botni Öskjuvatns skv. fjölgeislamælingu Ármanns Höskulds-sonar frá Jarðvísindastofnun HÍ í ágúst 2014 (skyggt landlíkan).

3 Greining áhættu

Hættumat vegna ofanflóða á Íslandi miðast við *einstaklingsbundna áhættu* (umhverfisráðuneytið, 2000, Kristján Jónasson o.fl., 1999). Hún er skilgreind sem árlegar líkur á því að einstaklingur sem býr á tilteknum stað farist í ofanflóði. Stjórnvöld hafa ákveðið að áhættan $0,2 \cdot 10^{-4}$ á ári eða minni sé viðunandi. 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. Ekki hafa verið settar sambærilegar viðmiðunarreglur vegna annarrar náttúruvár og því eðlilegt að hafa hliðsjón af aðferðum við ofanflóðahættumat þegar hugað er að hættu af völdum annarra náttúruafla. Þó má nefna í þessu samhengi að lagt hefur verið mat á tjónmætti jarðskjálfta á landinu og svæði afmörkuð á korti. Þessi flokkun landsvæða er fyrst og fremst notuð við ákvörðun nauðsynlegrar burðargetu bygginga.

Svipuðu máli gegnir um hættu af völdum skriðufalla í Öskju og ofanflóða að almennt má telja eðlilegt að lögð sé mest áhersla á hættu á slysum á fólki en tjón á eignum, röskun á starfsemi eða aðrir þættir skipti minna máli. Því verður athygli hér fyrst og fremst beint að dánarlíkum fólks sem leið á um Öskju en aðrir þættir aðeins nefndir í framhjáhlapi.

Þörf fyrir hættumat og framsetning þess ræðst annars vegar að hættunni sem fengist er við og hins vegar að þörf fyrir viðbúnað og aðgerðir sem nauðsynlegar eða æskilegar eru til þess að bregðast við hættunni. Þar sem hætta stöðjar að byggð eða svæðum þar sem reistir hafa verið mikilvægir innviðir samgöngu-, raforku- eða fjarskiptakerfa þarf að greina tíðni hættulegra atburða, áhættu, og ýmsa aðra þætti. Í slíkum tilvikum þarf að oft að afmarka hættusvæði af nokkrum mismunandi gerðum og setja reglur um hagnýtingu þeirra eins og gert er í ofanflóðahættumati. Þar sem hagsmunir eru minni er unnt að komast af með einfaldara hættumat. Í Öskju er ekki um að ræða nein umsvif sem kalla á greiningu á áhættu umfram slysaáhættu á fólki. Slysaáhætta sem stafar af skriðuföllum og flóðbylgjum takmarkast við ákveðin svæði sem þarf að afmarka en það er álit Veðurstofunnar að ekki sé þörf fyrir reglur um hagnýtingu þeirra hættusvæða sem hér eru fram sett umfram leiðbeinandi tilmæli til fólks sem leið á um Öskju eins og nánar verður vikið að hér að neðan.

Rétt er að hafa nokkur atriði í huga þegar greind er áhætta fólks sem leið á um Öskju svo sem ferðamanna eða starfsmanna sem þar eru við störf.

- Í fyrsta lagi er hætta vegna skriðufalla ekki eini áhættuþáttur sem ræður líkum á slysum. Askja er virk megineldstöð og þar geta orðið eldgos sem fylgir slysaáhætta fyrir þá sem staddir eru á svæðinu. Eldgosi í Öskju getur fylgt gjóskuhlaup eins og í gosinu 1875 (Carey o.fl., 2009). Slík hlaup geta verið mjög hættuleg fólki eins og ýmis dæmi sanna, t.d. er talið að gjóskuhlaup í Öræfajökulsgosinu gosinu 1362 hafi náð yfir 10 km frá fjallinu (Ármann Höskuldsson & Þorvaldur Þórðarson, 2007; Ármann Höskuldsson, 2012).
- Viðvera þeirra sem leið eiga um Öskju er mjög mismunandi eftir því um hverja er að ræða og í öllum tilvikum miklu minni en fólks í heimahúsum á snjóflóðahættusvæðum. Ferðafólk getur farið um miklu hættulegri svæði en henta til búsetu og taka þarf tillit til þess í hættumati fyrir Öskju. Ferðamenn sem leið eiga um svæðið koma flestir mjög sjaldan og er eðlilegt að jafna áhættu þeirra af heimsókninni í Ösku yfir alllangan tíma, a.m.k. ár eða jafnvel enn lengri tíma. Starfsmenn Vatnajökulspjóðgarðs, leiðsögumenn og aðrir sem starfa sinna vegna koma oft í Ösku eru miklu oftar á svæðinu og þarf að taka áhættu þeirra fyrir sérstaklega.

- Áhætta bæði ferðamanna og starfsmanna af völdum skriðufalla í Öskju er annars eðlis en áhætta íbúa á hættusvæðum vegna ofanflóða. Hefð er fyrir því að miða við hærri áhættu þegar fólk tekur ákvörðun um að ferðast um svæði eða fyrirtæki ákveður að vera þar með starfsemi heldur en þegar um er að ræða hættu sem beinist að öllum íbúum ákveðins svæðis, t.d. jafnt börnum sem fullorðnum, eða hættu sem beinist að fólki í heimahúsum.
- Skriðuföll og flóðbylgjur í Öskju geta leitt til slyss á stórum hópi fólks sem fyrir tilviljun er stutt á óheppilegum stað þegar slys verður. Oft er miðað við að meira tilefni sé til þess að koma í veg slíka hættu, svokallaða safnáhættu, en þegar um er að ræða hættu sem beinist að einum eða fáum einstaklingum í hvert sinn.
- Jafnvel þótt niðurstaða áhættugreiningar sé að áhætta einstaklinga sé viðunandi, miðað við þær forsendur sem stjórnvöld hafa ákveðið fyrir ofanflóð, kann að vera ástæða til þess að vara við hættunni og draga úr líkum á slysum með aðgerðum til þess að ekki verði slys sem einfalt hefði verið að koma í veg fyrir.

Árlegar dánarlíkur vegna skriðufalla og flóðbylgju í Öskjuvatni má meta gróflega fyrir tvo mismunandi hópa fólks sem þangað eiga erindi. Nægilegt er fyrir þá greiningu sem hér er fram sett að meta stærðarþrep þáttanna sem áhættunni ráða þannig að hugmynd fái um áhættu fyrir hvorn hóp. Í raun er áhættan talsvert mismunandi fyrir þá einstaklinga sem um Öskju fara og ræðst af því hversu oft viðkomandi einstaklingur fer um svæðið og hversu lengi hann kann að dveljast á hættusvæðinu niðri við vatnið. Hér er miðað við að endurkomutími berghlaupa sem valda svo mikilli flóðbylgju að hætta stafar af sé nokkrir áratugir og að fólk sem fyrir bylgjunni verður geti litla björg sér veitt þannig að dánarlíkur séu e.t.v. 50%. Ætla má að flóðbylgjan berist yfir Öskjuvatn á 1–2 mínútum þannig að ekki er líklegt að þeir sem verða hennar fyrst varir eftir að skriðan er fallin geti forðað sér nægilega langt frá vatnsbakkanum þannig að bylgjan nái þeim ekki.

Ekki er miklum upplýsingum til að dreifa til þess að meta endurkomutíma berghlaupa sem geta valdið flóðbylgjum á Öskjuvatni. Ljóst er að fleiri berghlaup hafa fallið úr öskjubrúnunum síðan Öskjuvatn myndaðist á nokkrum áratugum eftir gosið 1875. Hins vegar hafa engin þeirra skilið eftir sig jafn stóra tungu á vatnsbotninum og hlaupið í júlí 2014. Því er hugsanlegt að hlaupið 2014 sé eina stórhlaupið síðan vatnið myndaðist. Endurkomutímamatið sem hér er notað, nokkrir áratugir, er því væntanlega í varkárari kantinum sem er eðlilegt til þess að taka þessa óvissu með í reikninginn.

Ferðamenn. Ef ferðamaður sem kemur í Öskju á nokkurra ára fresti tekur ekkert tillit til slysa-hættu má ætla að hann geti dvalið nokkra klukkutíma niðri við vatnið á svæðinu þar sem flóðbylgjan gengur á land. Ferðahópar geta t.d. numið þar staðar til þess að fræðast um svæðið, borða nesti, skoða áhugaverð jarðfræðileg fyrirbæri og jafnvel kynna sér fræðslu-efni sem til greina kemur að setja upp nærri vatninu. Ef áhættu sem þessu er samfara er jafnað á nokkurra ára tímabil má meta hana u.þ.b. $(0,004 - 0,01) \cdot 10^{-4}$ á ári (þá er miðað við þrjátíu ára endurkomutíma stórra berghlaupa, tveggja klukkustunda viðdvöl ferðamanns við vatnið og áhættunni jafnað yfir 3–10 ár). Þessa áhættu er eðlilegt að telja viðunandi jafnvel þó ekki sé tekið tillit til þess að hún er tekin samfara frístundaiðkun sem viðkomandi velur að taka þátt í sbr. umræðuna hér að framan.

Starfsmenn Vatnajökulsþjóðgarðs og ýmissa fyrirtækja. Starfsmenn Vatnajökulsþjóðgarðs, leiðsögumenn og ýmsir starfsmenn sem oft eiga leið um Öskju, svo og vísindamenn sem þar geta dvalið langdvölum við rannsóknir, geta átt erindi niður að vatninu oft í viku obbann af sumrinu. Ef miðað er við að þeir dvelji samt ekki nema fáar klukkustundir á svæðinu þar sem flóðbylgjan gengur á land má meta áhættuna u.þ.b. $(0,6 - 1) \cdot 10^{-4}$ á ári (þá er aftur miðað við tveggja klukkustunda viðdvöl, tvær til fjórar heimsóknir niður að vatninu á viku í tvo mánuði yfir sumarið og áhættunni ekki jafnað yfir fleiri en eitt ár). Þessi áhætta er ívið hærri en viðunandi áhætta í hættumati vegna ofanflóða en minni en áhætta starfsmanna í ýmsum störfum sem stunduð eru í samfélaginu, t.d. í byggingarvinnu, sjómennsku og víðar. Í þeim atvinnugreinum er oft talið eðlilegt að grípa til margs konar aðgerða til þess að draga úr slysaáttu.

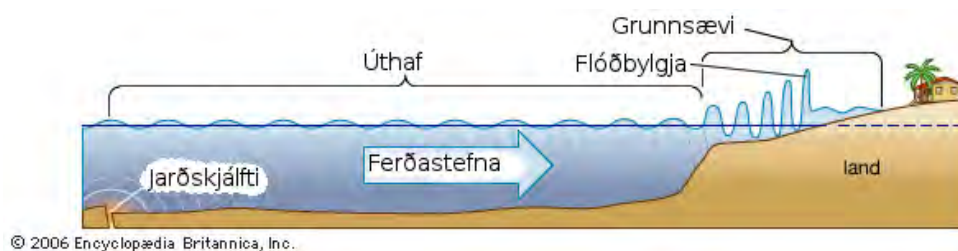
Það gegnir því ólíku máli um áhættu þeirra tveggja hópa sem hér hafa verið teknir til umræðu. Áhætta ferðamanna er svo lítil að ekki er ástæða til þess að gera mikið veður út af henni ef eingöngu er litið til áhættu hvers einstaklings fyrir sig. Áhætta landvarðar eða leiðsögumanns, sem oft á leið um svæðið og gæti haft ástæðu til þess að dveljast oft á svæðinu við vatnið ef ekki er gripið til neinna varúðarráðstafana, er hins vegar nokkur samanborið við áhættu sem talin er viðunandi á vinnustöðum eða annars staðar í okkar samfélagi nú á dögum.

Eins og fyrr var nefnt kann að vera ástæða til þess að vara ferðamenn við flóðbylgjuháttunni og draga með því úr líkum á slysum sem einfalt hefði verið að koma í veg fyrir. Slíkar viðvaranir koma einnig til álita fyrir berghlaupssvæðið sjálft og önnur svæði nærri öskjubrúninni þar sem berghlaup geta farið af stað eins og nánar verður vikið að í kafla 7 um hættumat.

4 Flóðbylgjur

Flóðbylgjur verða af völdum ýmissa náttúruhamfara, svo sem jarðskjálfta, eldsumbrota, skriðufalla og snjóflóða. Fræðiheitið sem notast er við er japanska orðið tsunami, en bein þýðing þess er hafnarbylgjur. Flóðbylgjur vegna jarðskjálfta eru tíðar við strendur Japans. Þá veldur aflögun hafsbotnins því að gríðarlegur massi vatns færist til í einu vefangi, sem leiðir til flóðbylgju sem ferðast á ógnarhraða út frá upptakastað. Á úthafinu er bylgjan vart greinanleg því hún er löng (tugir eða hundruð km) en útslagið takmarkað svo halli vatnsborðsins er lítill. Þegar bylgjan kemur á grunnsævi hægir hún á sér og hækkar þegar sjórinn hleðst upp. Mynd 7 sýnir einfalda mynd af hafnarbylgjum.

Skriðuflóðbylgjur verða við það að skriða fellur í vatn eða sjó. Ekki hefur verið talin stafa mikil hættu af þeim á Íslandi en talið er að stórar skriður eða berghlaup falli í sjó fram einu sinni til tvisvar á hverju árþúsundi hér á landi þótt ekki séu heimildir um það á sögulegum tíma (Árni Hjartarson, 2006). Hins vegar hafa flóðbylgjur af völdum snjóflóða sem ganga í sjó fram valdið nokkrum skemmdum bæði á Suðureyri við Súgandafjörð og á Siglufirði. Flóðbylgjur vegna ofanflóða eru yfirleitt töluvert minni en þær sem verða vegna jarðskjálfta en áhrifin geta verið mjög mikil í nágrenni farvegarins. Í Noregi hafa skriður valdið stórum flóðbylgjum þegar þær ganga út í þrönga firði og á síðustu öld létust samtals 174 manns í þremur tilvikum, í Loen 1905 og 1936 og í Tafjord 1934 (Ólafur Jónsson, 1957, 1976, 1992). Fjölmörg dæmi eru um flóðbylgjur vegna skriðufalla sem ganga út í stöðuvötn en eitt það þekktasta er skriða við Vajont stífluna á Ítalíu árið 1963 þar sem skriðan olli 250 m hárra flóðbylgju í uppistöðulóni, sem fór yfir stífluvegginn og olli dauða um 2000 manns sem bjuggu í þorpum neðan stíflunnar.



Mynd 7. Myndun og útbreiðsla flóðbylgna af völdum jarðskjálfta á hafsbotni. Mynd fengin frá Encyclopaedia Britannica.

5 Hermun á flóðbylgju af völdum berghlaupsins 21. júlí 2014

Til þess að öðlast frekari innsýn í atburðarrásina þegar berghlaupið gekk út í Öskjuvatn 21. júlí 2014 var líkanreikningahugbúnaðurinn GeoClaw notaður til þess að herma myndun og útbreiðslu flóðbylgjunnar. GeoClaw (Berger o.fl., 2011) samanstendur af safni aðferða til þess að leysa tvívíðu Saint Venant jöfnurnar sem lýsa flæði grunns vökva. Til þess að vatn geti talist grunnt verða láréttar fjarlægðir að vera mun meiri en vatnsdýptin, en í því tilfalli verður lóðréttur hraði hverfandi og nægir að lýsa hraðasviðinu í lárétta stefnu. Þessi nálgun á við í fjöldamörgum verkefnum tengdum jarðeðlisfræði, t.d. útbreiðslu vatnsflóða og snjóflóða. Þegar lýsa á bylgjuhreyfingu á vatni með tvívíðu líkani gildir einnig að bylgjur verða að vera langar í samanburði við dýpt vatnsins. Þessi nálgun á ekki fyllilega við þegar Öskjuvatn á í hlut vegna þess hversu djúpt vatnið er, enda annað dýpsta stöðuvatn á landinu á eftir Jökulsárlóni á Breiðamerkursandi. Hermun leiddi í ljós að nauðsynlegt var að útvíkka líkanið og taka tillit til tvístrunar bylgna, en þá er reiknað með að bylgjur með mismunandi lengd ferðist með ólíkum hraða. Þannig fékkst mun betra samræmi milli mælinga og líkanreikninga. Í reiknilíkaninu er berghlaupinu lýst sem ummyndun á botni vatnsins, þ.e. vatnsbotninn er hækkaður sem nemur þykkt hlaupsins og þar með lyftist vatnið upp og bylgjuhreyfingar fara af stað, svipað og lýst er í kaflanum um hafnarbylgjur hér á undan. Berghlaupið rennur fyrir tilstilli þyngdarafllsins og tapar orku vegna núnings við botn og víxlverkunar við vatnsmassann. GeoClaw reiknar hvernig ummyndun botnsins myndar bylgjur á yfirborðinu og hvernig bylgjurnar ferðast yfir vatnið og ganga á land umhverfis það.

Ummerki flóðbylgjunnar í Öskjuvatni voru kortlögð og gefa mælingarnar nokkuð góða hugmynd um breidd og rúmtak þess hluta skriðunnar sem gekk út í vatnið sem og stefnu hennar í grófum dráttum (Harpa Grímsdóttir o.fl., 2016; Sveinn Brynjólfsson, 2015a,b). Meiri óvissa er í mati á hraða skriðunnar og þykkt þegar hún skall á vatnsfletinum. Til eru nákvæm gögn um hámarksútbreiðslu flóðbylgjunnar hringinn í kringum vatnið, sýnd á mynd 5. Með því að bera niðurstöður reiknilíkansins um hámarksútbreiðslu flóðbylgjunnar saman við mælingar mátti stilla hraða, stefnu og þykkt af þannig að samsvörunin væri sem best. Þetta var gert með því að beita altækri bestun (e. *global optimization*) þar sem frávik reiknaðrar útbreiðslu frá mælingum er lágmarkað með ákveðinni slembiaðferð (e. *differential evolution*) til þess að forðast staðbundin lágmark. Líkanið er keyrt fyrir allavega mismunandi samsetningar af stikum, þ.e. upphafshraða (U_0), stefnu (θ) og þykkt (D), en innan skilgreindra marka og bestunargrímið notar þessar upplýsingar til þess að velja þau gildi sem gefa minnst frávik frá mældri útbreiðslu, ef allt gengur að óskum. Gildin sem reyndust gefa besta hermun á útbreiðslu flóðbylgjunnar voru $U_0 = 33$ m/s, $\theta = 300 - 305^\circ$ (VNV) og $D = 36$ m. Mynd 8 sýnir hvernig reiknaðri og mældri hæð bylgjunnar ber saman hringinn í kringum vatnið.

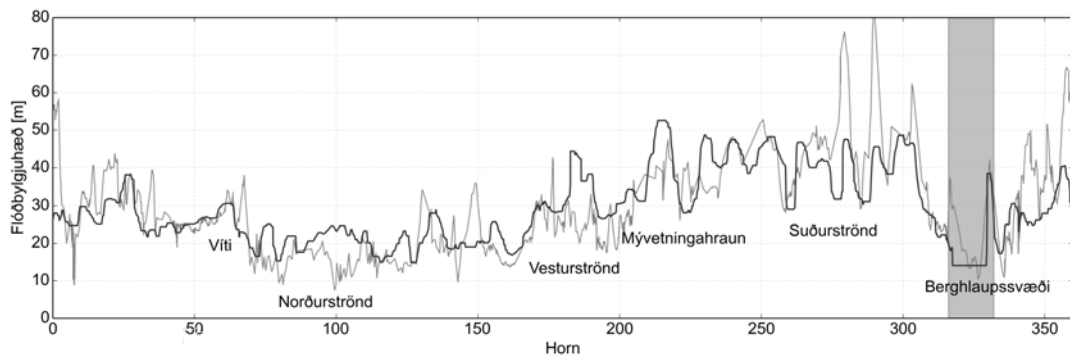
Samanburður á reiknaðri og mældri útbreiðslu flóðbylgjunnar er sýndur á korti á mynd 9. Samræmið er í flestum tilfellum mjög gott en sumstaðar gengur bylgjan ívið lengra á land samkvæmt líkaninu. Hér þarf þó að hafa í huga að kvörðunin sem fæst með bestunaraðferðinni byggir á því að lágmarka muninn á reiknaðri og mældri landhæð við útmörk flóðbylgjunnar. Það þýðir að þar sem landhalli er lítill getur töluverður munur á korti svarað til lítils misræmis í hæð. Þetta er tilfallið á ströndinni við Víti og Ólafsgíga.

Hermun á flóðbylgjunni með GeoClaw reiknilíkaninu leiddi í ljós að flókið mynstur bylgjuhreyfinga myndast á vatninu. Bylgjurnar kastast fram og til baka af bökkum vatnsins og magnast eða dvína vegna samliðunar. Þetta þýðir að fyrsti bylgjufaldurinn, sem myndast rétt eftir að skriðan

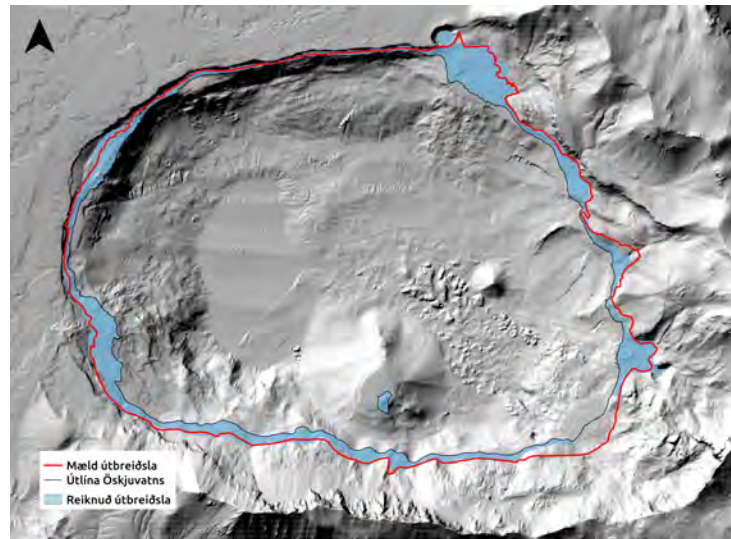
gengur út í vatnið, verður ekki endilega sá stærsti sem gengur á land, þvert á móti ná endurköstin oft lengst. Mynd 10 sýnir vatnshæðina á ströndinni við Víti sem fall af tíma og á henni kemur glögg fram að seinni bylgjufaldar eru hærri en sá fyrsti, og er sá sem er annar í röðinni hæstur þeirra. Hæð stærstu bylgjufaldanna hleypur frá 4 m upp í 8 m og er því dagljóst að illa hefði farið hefðu ferðamenn staðið nærri ströndinni. Viðbragðstíminn var enda stuttur, það tekur fyrstu bylgjuna um eina og hálfu mínútu að ná ströndinni við Víti.

Athyglisvert er að bylgjan skolast mun herra á land við Víti en skammt þar fyrir vestan þar sem greinilegt var á snjósköflum við vatnsbakkann að bylgjan hafði ekki náð mjög hátt. Höfðu starfsmenn Vatnajökulspjóðgarðs á orði að þessi munur væri eitt af mörgu sem vakið hafði athygli þeirra þegar menn komu að Öskjuvatni fyrst eftir berghlaupið og skoðuðu ummerki þess. Þarna sýna mælingar á hæð flóðbylgjunnar 3–4 sinnum meiri hæð efsta bylgjufalds við Víti miðað við nokkra staði skammt vestan Vítis þar sem bylgjan nær skemmst á land, sbr. mynd 8. Líkanreikningarnir sýna verulegan mismun milli þessara staða og reiknast flóðbylgjan um tvöfalt hærri við Víti en þar sem hún er lægst vestan Vítis en munurinn er ekki jafn mikill og mælingarnar gefa til kynna. Til þess að ná þessum mikla mun í hæð flóðbylgjunnar reyndist nauðsynlegt að útvíkka reiknilíkanið í GeoClaw og taka tillit til svokallaðrar tvístrunar (e. *dispersion*) bylgna. Hún veldur því að bylgjur af mismunandi tíðni ferðast með ólíkum hraða og leiðir til þess að fyrsti bylgjufaldurinn verður lægri. Það er einmitt hann sem veldur hámarksútbreiðslu við norðurjaðar vatnsins en við Vítisströndina ganga síðari toppar lengra á land eftir að hafa magnast vegna flókens mynsturs samliðunar og endurkasts af bökkum vatnsins (sjá nánar í grein Sigríðar Sifjar Gylfadóttur o.fl. (2016) um líkanreikningana). Nánari upplýsingar um flóðbylgjur af völdum jarðskjálfta og skriðufalla er að finna í greinum Harbitz o.fl. (2004, 2014a,b), Løvholt o.fl. (2008) og Masson o.fl. (2006).

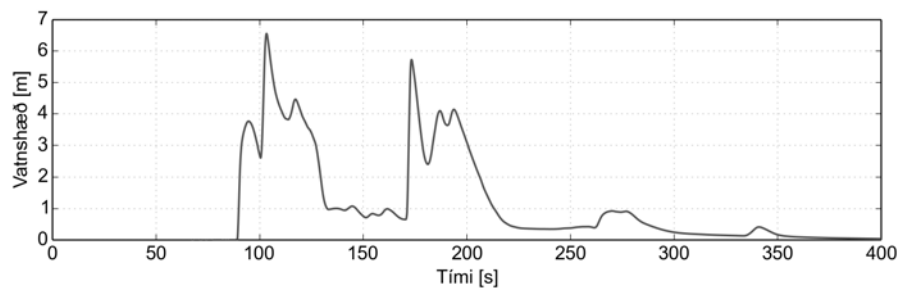
Hið flókna bylgjumynstur á vatninu er sýnt á kortum á mynd 11 þar sem reiknuð hæð flóðbylgjunnar á mismunandi tímum eftir að skriðan gengur út í vatnið er teiknuð.



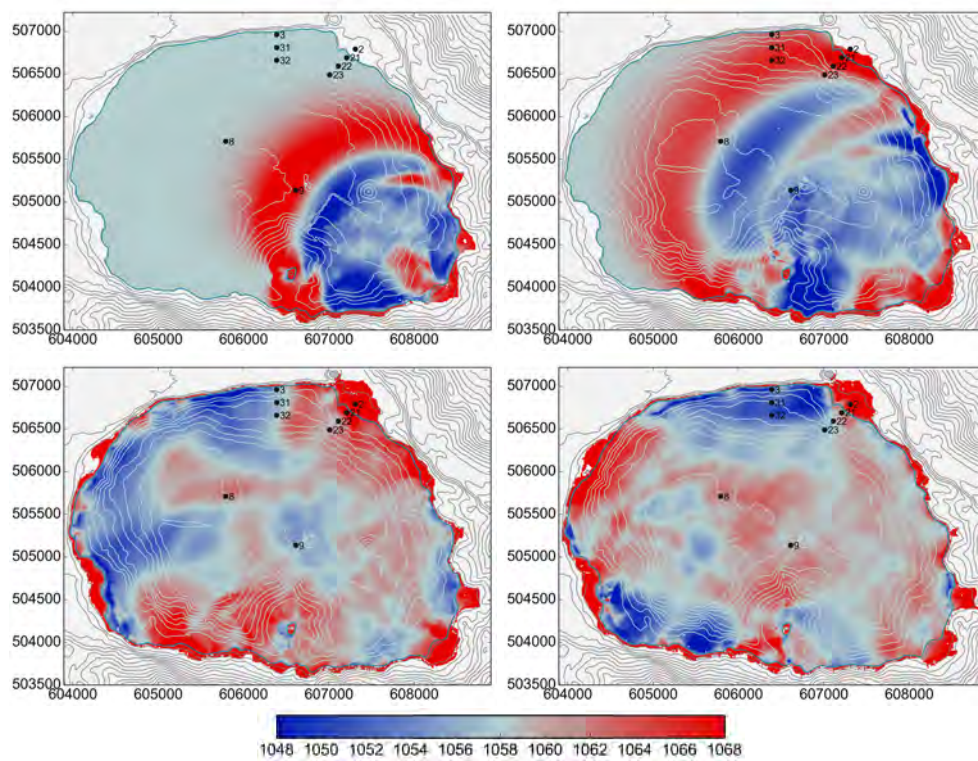
Mynd 8. Mæld (ljósgrá lína) og reiknuð (svört lína) hámarkshæð flóðbylgju hringinn í kringum Öskjuvatn rangsælist frá austri. Berghlaupssvæðið er skyggt sökum ónákvæmni þar sem að landlíkanið í reikningum verður fyrir áhrifum af tölulegri útfærslu skriðunnar og lýsir ekki raunverulegu landslagi.



Mynd 9. Hámarksdreifing flóðbylgjunnar 2014 skv. reikningum með líkaninu GeoClaw, land sem fer undir flóðbylgju sýnt með bláum lit. Rauð lína sýnir mæld útmörk flóðbylgjunnar.



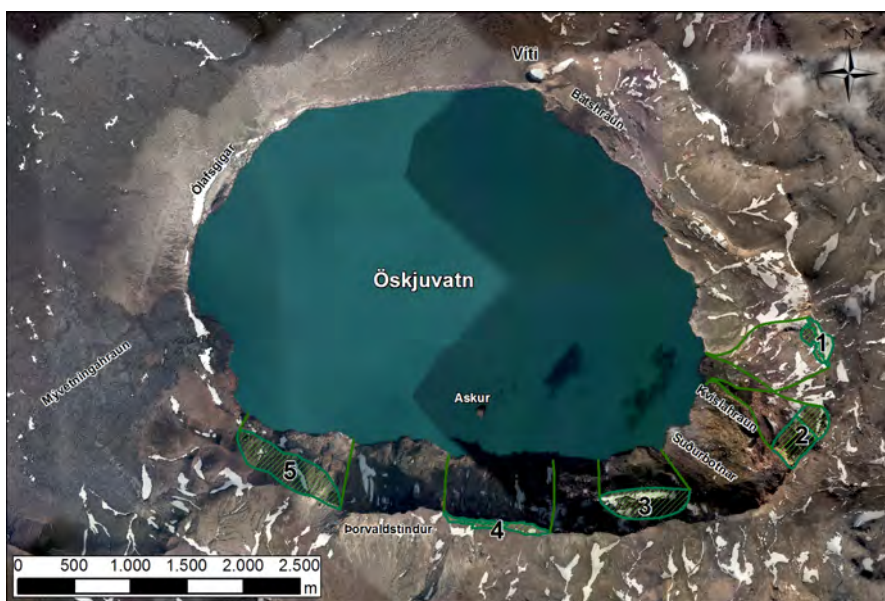
Mynd 10. Reiknuð vatnshæð sem fall af tíma á ströndinni neðan Vítis.



Mynd 11. Flóðbylgja á Öskuvatni 60, 90, 180 og 270 s eftir að berghlaupið kastast út í vatnið skv. reikningum með líkaninu GeoClaw.

6 Líkanreikningar á flóðbylgjum í Öskjuvatni

Til þess að afmarka svæði þar sem ferðmönnum stafar hættu af flóðbylgjum á Öskjuvatni voru afmörkuð fimm hugsanleg upptakasvæði skriðufalla úr hlíðunum umhverfis vatnið og bylgjur af völdum hlaupa af mismunandi stærð úr sumum þeirra reiknaðar með hjálp straumfræðilíkansins GeoClaw sem fjallað var um í síðasta kafla. Upptakasvæðin eru sýnd á mynd 12 ásamt úthlaupsfarvegum. Vegna óvissu um stærð mögulegra berghlaupa var farin sú leið að reikna fyrir þrjár mismunandi stærðir, hálf tómmál berghlaupsins í júlí 2014, sama rúmmál og tvöfalt rúmmál.



Mynd 12. Helstu hugsanlegu upptakasvæði berghlaupa niður í Öskjuvatn.

Eldstöðvar eru í eðli sínu fremur óstöðug jarðfræðileg fyrirbæri vegna uppbyggingar þeirra og örrar landmótunar. Algennt er að skriður og berghlaup sem eiga upptök sín innan megineldstöðva eða í jaðri þeirra ferðist lengra en utan eldstöðvakerfa. Ástæðuna má meðal annars rekja til innskota- og jarðhitavirkni. Skriðfletir innan megineldstöðva liggja almennt dýpra en á svæðum utan þeirra og því má búast við stærri berghlaupum innan eldstöðvakerfa. Myndun slíkra berghlaupa má að stórum hluta til rekja til eftirfarandi þátta en mikil úrkoma, leysingar og jarðskjálftavirkni geta framkallað slíkar skriður (Siebert, 2002).

1. Jarðfræðileg uppbygging eldstöðvarinnar. Sérstaklega í grennd við hraungúla þar sem hraun hleðst upp með tíð og tíma ofan á laus gjóskulög.
2. Sprengingar í jarðhitakerfum.
3. Jarðhitavirkni veldur ummyndun, breytir grunnvatnsmynstri og grunnvatnsþrýstingi sem dregur úr styrk bergs með tíð og tíma.
4. Þensla og samdráttur í kvikuhólfi undir eldstöðinni getur valdið spennubreytingum sem ýta undir óstöðugleika í hlíðum eldstöðvarinnar. Spennubreytingarnar ýta undir hreyfingar sem eiga sér yfirleitt stað um fyrirbyggjandi misgengi eða sprungur.

Mælingar á jarðskorpuhreyfingum í Öskju sýna landsig innan Öskjuvatnsöskjunnar frá því að mælingar hófust með skipulögðum hætti árið 1983. Breytingarnar innan öskjunnar má rekja til

þrýstingsfalls í grunnstæðu kvikuhólfi með miðju skammt norðvestan við Öskjuvatn. Sigið er um 2–3 cm á ári og samfara eru láréttar hreyfingar sem bæði tengjast kvikuhólfinu og gliðnun landsins (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2014). Spennubreytingar í jarðskorpunni í kjölfar slíkra jarðskorpuhreyfinga leiða til óstöðugleika á misgengisbrotum innan öskjunnar. Líkanreikningar Freysteins Sigmundssonar o.fl. (2014) benda til þess að mestis óstöðugleika sé að vænta í Austurfjöllum og einna helst við suðausturhluta Öskjuvatns þar sem berghlaupið 2014 átti upptök.

Jarðhiti innan öskjunnar er á nokkuð skýrt afmörkuðum svæðum við Öskjuvatn: við Víti og Bátshraun, í Suðurbotnum og syðst og vestast við vatnið undir Þorvaldstindi. Nokkur jarðhiti er einnig á litlu svæði nyrst í öskjunni, nærri Sigurðarskarði. Jarðhitasvæðin tengjast flest eldvirkni á fyrri hluta 20. aldar og bera svæðin ummerki um mikinn jarðhita, þó mismikið eftir svæðum. Í Suðurbotnum var röð af fjórum allstórum sprengigígum, sem mynduðust í gosinu 1922 (Kristján Jónasson og Sigmundur Einarsson, 2009). Sumarið 1989 tók að bera á auknum jarðhita á Suðurbotnasvæðinu og gat Guðmundur Sigvaldason sér til að þar gætu hafa verið kvikuhreyfingar. Einkennidist jarðhitasvæðið þá af heitri jörð, gufuaugum og útfellingum af brennisteini.

Hér að neðan eru valin svæði sem talin eru hugsanleg upptakasvæði stórra skriðufalla eða berg-hlaupa sem geta valdið flóðbylgjum í Öskjuvatni.

Svæði 1 – Milli Bátshrauns og Suðurbotna. Rúmum 1 km norðan við Suðurbotnasvæðið er 500 m langur og 200 m breiður tveggja þrepa hjalli. Myndun hjallans er tengd sigi öskjunnar og virðist hreyfingin hafa átt sér stað um eina af hringsprungunum sem sig varð um við myndun öskjunnar. Bakvið efri hjallann hefur myndast stór og gleið sprunga í berginu upp á brún. Spennubreytingar innan massans frá 1983 til 2014 reiknast nokkuð minni á þessu svæði en í Suðurbotnum en engu að síður hafa þarna orðið talsverðar spennubreytingar (Freysteinn Sigmundsson o.fl., 2014). Í hlíðinni neðan við hjallann má sjá ummerki um stóra skriðu sem átti upptök í hjallanum og nam staðar rétt ofan við Kvíslahraun. Staksteinar sjást þar liggja ofan á Kvíslahrauni næst hlíðinni sem sýnir að hrunið átti sér stað eftir 1922. Á loftmynd sem tekin var í ágúst 2014 má sjá ummerki um hreyfingar í brún hjallans. Neðan við brúnina má sjá u.þ.b. 100 m langa sprungu í lausum jarðlögum undir hjallanum. Stórfellt hrun úr hjallanum myndi leiða til berghlaups yfir nyrsta hluta Kvíslahrauns og út í Öskjuvatn.

Svæði 2 – Suðurbotnar. Norður af brotsárinu sem myndaðist í berghlaupinu er stór gjá sem hefur myndast um misgengið í brún öskjunnar. Gjáin er í beinu framhaldi af brotsári berghlaupsins og því er hætt við því að þetta svæði geti einnig hlaupið. Gjáin er tæplega 300 metra löng og fyrir miðri hlíðinni sjást ummerki um jarðhita. Efsti hluti upptakasvæðisins sem er dregið á þessum stað fylgir fyrrnefndu misgengi sem nær inn í miðja hvilftina ofan við Kvíslahraun. Samkvæmt líkanreikningum Freysteins Sigmundssonar o.fl. (2014) eru spennubreytingar á þessu svæði svipaðar og innan svæðisins sem hljóp í Suðurbotnum. Jarðhiti innan svæðisins stuðlar að veikingu bergsins. Með áframhaldandi sigi og jarðhita-virkni er margt sem bendir til þess að úr þessu svæði geti fallið hlaup á næstu áratugum. Gefi hlíðin sig mun efnið hlaupa yfir Kvíslahraun og út í Öskjuvatn.

Svæði 3 – Suðurhlíð, á milli Suðurbotna og Þorvaldstinds. Skammt vestan við Suðurbotna er 750 m breiður hjalli í tæplega 200 m hæð yfir yfirborði vatnsins. Hjalli þessi hefur líklega myndast af völdum sigs eða hlaups úr brún öskjunnar á stykki sem hefur snarast, þar

sem hann hallar inn að brún öskjunnar. Hreyfingin hefur verið um eina af hringsprungunum/misgengjum í brún öskjunnar. Í austanverðum hjallanum eru sjálfar eldstöðvar Suðurbotnahrauns. Líkt og í Suðurbotnum hafa spennubreytingar á þessu svæðið verið miklar síðustu 3 áratugi og ljóst að þarna er jarðhiti sem veikir bergið. Þekkt er að berghlaupsurð sem stöðvast hefur með þessum hætti geti hlaupið aftur og því er þetta svæði meðal annars valið (Selby, 1993). Efni sem hleypur úr hjallanum mun falla rakleitt ofan í Öskjuvatn.

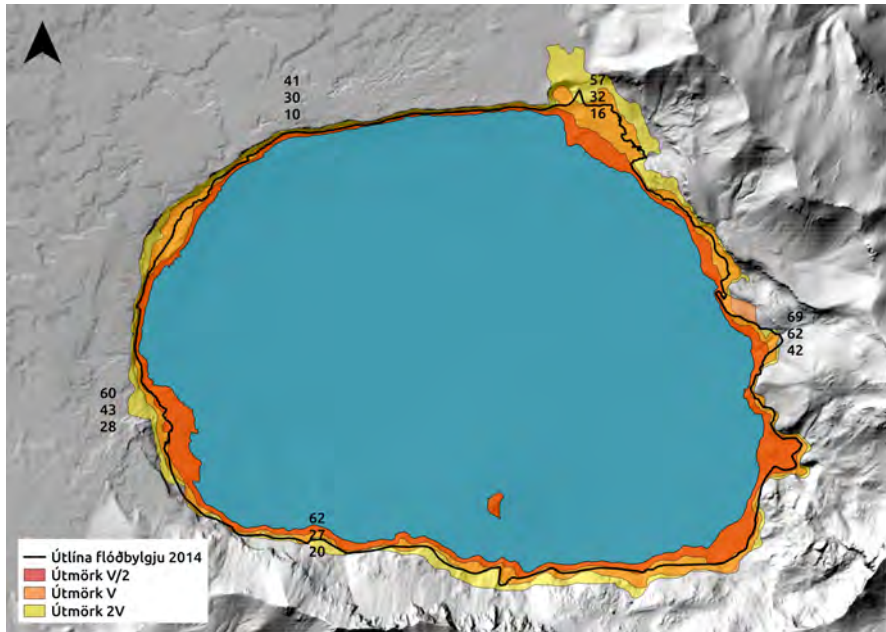
Svæði 4 – Þorvaldstindur. Í tæplega 80 m fjarlægð frá brún Öskjunnar að sunnanverðu, í grennd við Þorvaldstind, er u.þ.b. 750 m löng sprunga. Sprunga þessi er í beinum tengslum við brotsár gamals berghlaups sem að féll vestan við berghlaupið í Suðurbotnum 2014. Á þessum slóðum er brún öskjunnar í tæplega 550 m fjarlægð frá Öskjuvatni og stendur í um 400 m hæð yfir vatninu. Efsti hluti hlíðarinnar er mjög brattur, með halla á bilinu 60–80°, en halli neðri hluta hlíðarinnar er á bilinu 20–40°. Ummerki um sprunguna sjást vel á uppréttri loftmynd frá 29. ágúst 2014. Efni sem hrynur úr hlíðinni á þessum slóðum mun hlaupa beint út í Öskjuvatn.

Svæði 5 – Suðurhlíð, vestan við Þorvaldstind. Í miðri hlíð öskjunnar að suðvestanverðu sést móta fyrir hringsprungu sem tengist myndun öskjunnar. Efri hluti upptakasvæðisins sem afmarkað er fylgir þessari hallandi sprungu/misgengi frá brún í 1430 m h.y.s. og niður í 1256 m h.y.s. og er svæðið um 1100 m breitt. Neðri hluti svæðisins tengist svipaðri sprungu í hlíðinni. Svæðið er í austurjaðri Mývetningahrauns og því má búast við að hluti svæðisins sé ummyndaður af jarðhita. Spennubreytingar af völdum sigs á þessu svæði reiknast afar litlar í samanburði við Austurfjöll og því eru minni líkur á stórfelldu hruni úr suðurhlíðum öskjunnar að vestanverðu en austan. Víða í hlíðinni má sjá ummerki um fremur nýleg lítil hlaup og skriður sem hafa náð niður í vatnið. Efnið sem hleypur úr hlíðinni á þessum stað mun falla beint ofan í Öskjuvatn.

Upptakasvæði beint ofan eyjunnar Asks við suðurströnd vatnsins er ólíklegt til þess að koma af stað stórrí flóðbylgju vegna þess hversu grunnt vatnið er þar sem skriðan gengur út í það og voru áhrif skriðu úr upptakasvæði 4 því ekki skoðuð með reikningum. Niðurstöður líkanreikninga fyrir upptakasvæði 1, 2, 3 og 5 eru sýndar á myndum 27–30 í viðauka II. Samandregnar niðurstöður eru sýndar á mynd 13 þar sem hámarksútbreiðsla flóðbylgju fyrir hverja stærð skriðu er afmörkuð með litum.

Helmingi minna berghlaup en það sem átti sér stað í júlí 2014 getur valdið töluverðum usla við strandlínuna umhverfis vatnið og sumstaðar er hugsanlegt að útbreiðsla flóðbylgjunnar verði jafn mikil og þeirrar sem gekk yfir vatnið 2014, sjá svæði með rauðum lit á mynd 13. Bylgjan gengur að lágmarki upp í um 10 m hæð yfir yfirborð vatnsins og við Vítisströndina nær hún hátt í 20 m hæð. Það tekur bylgjuna um 1,5 mínútur að ná Vítisströndinni og eftir það ganga margir bylgjutoppar af svipaðri hæð á land.

Líkleg hámarksútbreiðsla flóðbylgju af völdum berghlaups af svipaðri stærð og í júlí 2014 er sýnd með appelsínugulum lit á mynd 13. Það er nokkuð háð staðsetningu berghlaupsins hvar áhrifanna gætir mest en austur- og vesturströnd vatnsins liggja verst við. Er það bæði vegna nálægðar við upptakasvæði en eins vegna þess hversu aflíðandi ströndin er þar í samanburði við suður- og norðurströndina. Vítisströndin liggur mjög illa við flóðbylgjum af völdum berghlaupa úr suðausturbarminum og er það aflíðandi að vatnið getur gengið mjög langt á land þar. Það tekur



Mynd 13. Reiknuð efstu mörk flóðbylgju á bökkum Öskjuvatns. Rautt svæði sýnir hámarks-útbreiðslu flóðbylgna vegna helmingi minna berghlaups en í júlí 2014, appelsínugult svæði vegna jafnstórs og gult svæði vegna tvöfalt stærra berghlaups. Mesta reiknaða hæð flóðbylgjunnar fyrir hverja stærð berghlaups í metrum er sýnd með tölum við ströndina á nokkrum stöðum umhverfis vatnið. Á hverjum stað sýna tölurnar niðurstöður líkanreikninga fyrir berghlaup með rúmmál sem er helmingur (neðst), jafn stórt (miðja) og tvöfalt (efst) á við berghlaupið í júlí 2014. Svört lína sýnir mælda hæð flóðbylgjunnar í júlí 2014.

flóðbylgjuna 1–1,5 mínútu að ná ströndinni við Víti og misjafnt er hvort fyrsti bylgjufaldurinn er stærstur eða einhver hinna sem á eftir koma en í öllu falli fylgja margar stórar bylgjur í kjölfar hans. Algengt er að flóðbylgjan við Víti gangi upp í 30–40 m hæð yfir yfirborð vatnsins.

Hamfaraskriða af tvöfaldri stærð þeirrar sem féll í júlí 2014 gengi mjög langt á land nánast allan hringinn í kringum vatnið. Það er til marks um kraftinn að bylgjan gæti náð upp að brún við norðurströndina þrátt fyrir mikinn bratta hlíðarinnar. Ferðamönnum við Víti stafaði augljóslega mikil hættu af slíkri bylgju. Flóðbylgjan næði að ströndinni eftir um mínútu og upp yfir brún Vítis eftir um 1,5 mínútu. Þegar vatnið kemur yfir brúnina rennur það undan halla yfir 200 m til norðurs í áttina að bílastæðinu við Vikraborgir en vatnsdýptin yrði víðast hvar minni en 1 m. Fyrsti bylgjufaldurinn yrði langstærstur og seinni toppar næðu ekki upp yfir brúnina við Víti. Það ber þó að hafa í huga að nákvæm útbreiðsla á gönguleiðinni frá Víti að Vikraborgum er óviss vegna þess hversu gropið hraunið er á þessu svæði. Hugsanlegt er að hluti vatnsins hripi niður um sprungur, sem gæti hamlað útbreiðslu þess.

7 Hættumat og viðbúnaður

Niðurstaða áhættugreiningarinnar í kafla 3 er að tilefni er til ákveðinna aðgerða til þess að draga úr slyshættu starfsmanna og annarra sem oft eiga leið um svæðið við Öskjuvatn af völdum flóðbylgna. Slíkar aðgerðir hafa jafnframt þann kost að draga stórlega úr líkum á hópslysum sem einnig er rétt að huga að. Þannig er eðlilegt að ferðafólk sé varað við hættunni á skriðuföllum og flóðbylgjum með áberandi hætti þegar það kemur inn á svæðið og mælt með því að það dvelji ekki langdvölum við vatnið. Einnig er rétt að beina þeim tilmælum til ferðapjónustuaðila að þeir skipuleggi ferðir um svæðið þannig að ekki sé staldrað við niðri við vatnið til þess að matast eða koma á framfæri fræðslu um svæðið. Aðrir sem erindi eiga á svæðið, s.s. vísindamenn, geta einnig hagað störfum sínum þannig að viðdvöl við vatnið sé tiltölulega lítil. Miðlun upplýsinga með þessum hætti beinist fyrst og fremst að ferðafólki en upplýsingarnar komast einnig til skila til leiðsögumanna og annarra starfsmanna stofnana og fyrirtækja og auka því einnig á öryggi þeirra. Jafnframt er æskilegt að stofnanir og fyrirtæki með starfsemi á svæðinu geri viðbragðsáætlun vegna sinna starfsmanna og að starfsmenn séu upplýstir um hættu sem kann að vera fyrir hendi og hvernig eigi að bregðast við. Með slíkum aðgerðum virðist ljóst að unnt er að stytta tíma sem menn dveljast á hættusvæðinu a.m.k. tífalt eða meira og þá má ætla að áhætta bæði ferðamanna og annarra verði viðunandi miðað við áhættuna sem lögð er til grundvallar í hættumati vegna ofanflóða.

Auk svæðisins þar sem flóðbylgjan skapar hættu er einnig rétt að huga að hættu á upptakasvæðum og í farvegum hugsanlegra berghlaupa og loks í skriðuurðinni sjálfri frá júlí 2014 þar sem hætta kann að skapast af völdum óstöðugra jarðlaga sem bylst geta um og lent á fólki eða þar sem grjóthrun getur skapað hættu.

Svæði við bakka Öskjuvatns þar sem flóðbylgjur geta skapað hættu er afmarkað á korti 2 aftast í skýrslunni og á því eru jafnframt afmörkuð svæði sem talin eru varhugaverð vegna óstöðugleika jarðlaga. Sýnd eru tvö hættusvæði vegna flóðbylgju. Annars vegar er svæði þar sem mælt er með að ferðamenn og aðrir sem fara um svæðið hafi ekki langa viðdvöl og að ekki séu sett upp upplýsingaskilti eða önnur aðstaða sem dvelur fyrir ferðafólki. Þetta svæði miðast við flóðbylgjur af völdum berghlaupa sem eru allt að því jafn stór og hlaupið 2014. Hins vegar er sýnt viðbúnaðarsvæði sem svarar til allt að tvöfalt stærri hlaupa. Á þessu svæði kann að skapast hætta af völdum mjög stórra hlaupa og þar er rétt að vara við umferð ef vísbendingar eru um yfirvofandi hlaup, t.d. ef vart verður við sprungumyndun eða hreyfingar á jarðlögum nærri öskjubrúninni eða í kjölfar stórra jarðskjálfta nærri Öskju sem ástæða er til að óttast að geti leitt til berghlaups. Þessi svæði eru til þess ætluð að sýna á kortum sem kynna þarf ferðalöngum og ferðapjónustuaðilum og benda á að ferðir um þau geti verið varasamar. Einnig þarf að taka tillit til þessara svæða við skipulag gönguleiða í grennd við vatnið. Eins og nánar er rætt í kafla 3 um greiningu áhættu er ekki talin ástæða til þess að draga fram önnur atriði á hættumatskortum af Öskju, t.d. varðandi skipulagsmál eins og gert er í hættumati vegna ofanflóða, vegna þess að ekki er nein byggð eða fyrirhugaðar framkvæmdir á þessum hættusvæðum. Því er talið fullnægjandi að afmarka hættusvæði eins og hér er gert og kynna þau hagsmunaaðilum með það í huga að á þessum svæðum verði engin mannvirki reist og svæðin höfð til hliðsjónar í sambandi við skipulagningu umferðar um þjóðgarðinn.

Þær aðgerðir sem hér eru lagðar til eru sambærilegar við tilmæli sem beint er til ferðamanna við Ilulissat á Vestur-Grænlandi þar sem flóðbylgjur skolast upp í nokkurra tuga metra hæð þegar

borgarísjakar velta á Ilulissatfirði (Jakobshavnfirði sem áður var svo nefndur). Þar eru ferðamenn varaðir við hættu af völdum flóðbylgna á skiltum (mynd 14) þegar komið er inn á svæðið og við helstu staði þar sem vænta má að leið ferðamanna liggji niður að ströndinni og mælt með því að fólk fari ekki niður að sjónum. Að öðru leyti er ekki amast við för fólks um svæðið og ekki gripið til annarra ráðstafana til þess að koma í veg fyrir slys af völdum þessara flóðbylgna.



Mynd 14. Viðvörunarskilti við Sermermiut við Ilulissatfjörð á Vestur-Grænlandi sem varar ferðamenn við hættu af völdum flóðbylgna sem borgarísjakar geta komið af stað þegar þeir velta. Ljósmynd: Harold Wanless.

Að lokum er rétt að fara hér nokkrum orðum um aðra náttúruvá á svæðinu við Öskjuvatn. Eldgos í Öskju eru augljós ógn við þá sem kunna að vera þar staddir þegar gos hefst. Ummerki um gjóskuhlaup frá 1875 og heimildir um gosið (Carey o.fl., 2009) benda til þess að allir sem staddir eru innan meginöskjunnar séu í bráðri lífshættu í upphafi slíks goss. Fólki gefst mjög lítil tími til þess að forða sér sökum þess hversu skyndilega gos af þessum toga geta hafist. Því skiptir miklu máli að unnt sé að vara við slíku gosi fyrirfram. Endurkomutími sprengigoss af þessari gerð í Öskju er ekki auðmetinn en hann er væntanlega allmörg þúsund ár en eitt sprengigosi í Öskju annað en gosið 1875 er þekkt á nútíma (Carey o.fl., 2009). Gera má ráð fyrir að áhætta ferðamanna af völdum stórs sprengigoss sé vel viðunandi, eins og fyrir flóðbylgjuna. Einstaklingsáhætta starfsmanna Vatnajökulsþjóðgarðs og annarra starfsmanna sem kunna að dvelja á svæðinu marga daga á hverju sumri er líklega einnig viðunandi en þó ekki fjarri mörkunum sem við er miðað í ofanflóðahættumati. Útbreiðsla gjóskuflóðsins 1875 takmarkaðist við meginöskjuna með lítilsháttar flæði yfir öskjubrúnina til suðvesturs (Carey o.fl., 2009). Í slíku gosi nær hættan sem fólki er búin því ekki til bílastæðis þar sem lagt er upp í gönguferðir inn í Öskju og eða svæðisins þar sem skálar við Dreka standa en fyrir enn stærra gos gæti þurft að hafa áhyggjur af fólki þar líka. Líkur á slíku gosi eru væntanlega talsvert minni en fyrir gos á sama stærðarþrepi og 1875 og áhætta fólks sem reiknast af völdum stórgoss af þeim toga því hverfandi. Hætta á hópslysi af völdum sprengigoss er væntanlega svipuð eða jafnvel meiri en fyrir berghlaup og flóðbylgju af hennar völdum vegna þess að hættan nær til miklu stærra svæðis og þar dveljast allir sem um Öskju fara í allmargar klukkustundir í hverri heimsókn. Því er

jafn brýnt að huga að hættu í tengslum við eldgos og bergflaup þegar gerð er áætlun um viðbúnað til þess að tryggja öryggi fólks sem fer um eða starfar í grennd við Öskju. Mikilvægasta öryggisráðstöfunin er eftirlitskerfi sem gerir kleift að greina forboða um að eldgos sé að hefjast og rýming svæðisins sem þá kann að vera í hættu. Líklegt er að eldgos í Öskju hafi nokkurn aðdraganda og þess verði vart á jarðskjálfamælum og með ýmsum öðrum forboðum þannig að forða megi fólki af svæðinu með góðum fyrirvara. Slíkur fyrirvari gefst að öllum líkindum ekki fyrir bergflaup og flóðbylgjuna og því er dreifing upplýsinga og viðvarana til ferðafólks og annarra sem um Öskju fara mikilvægari í viðbúnaði vegna flóðbylgjunnar.

8 Niðurstaða

Hættumat vegna berghlaupa og flóðbylgna í Öskju hefur verið unnið í framhaldi af stóru hlaupi sem féll í Öskjuvatn 21. júlí 2014 og olli mikilli flóðbylgju á vatninu. Niðurstaða matsins er að áhætta einstaklinga af völdum slíkra hlaupa sé ekki mikil en þó sé tilefni til ákveðinna aðgerða til þess að draga úr slyshættu starfsmanna og annarra sem oft eiga leið um svæðið við Öskjuvatn af völdum flóðbylgna.

Eðlilegt er að fólk sem fer um Öskju sé varað við hættunni á skriðuföllum og flóðbylgjum með áberandi hætti þegar það kemur inn á svæðið og mælt með því að það dvelji ekki langdvölum við vatnið. Einnig er rétt að beina þeim tilmælum til ferðapjónustuaðila að þeir skipuleggi ferðir um svæðið þannig að ekki sé staldrað við niðri við vatnið til þess að matast eða koma á framfæri fræðslu um svæðið. Jafnframt er mælt með því að stofnanir og fyrirtæki með starfsemi á svæðinu geri viðbragðsáætlun vegna sinna starfsmanna og að starfsmenn séu upplýstir um hættu em kann að vera fyrir hendi og hvernig eigi að bregðast við.

Svæði við bakka Öskjuvatns þar sem flóðbylgjur geta skapað hættu hafa verið afmörkuð á korti og jafnframt svæði sem talin eru varhugaverð vegna óstöðugra jarðlaga. Skilgreind eru tvö hættu-svæði vegna flóðbylgju. Annars vegar er svæði þar sem mælt er með að ferðamenn og aðrir sem fara um svæðið hafi ekki langa viðdvöl og að ekki sé sett þar upp upplýsingaskilti eða önnur aðstaða sem dvelur fyrir ferðafólki. Þetta svæði miðast við flóðbylgjur af völdum berghlaupa sem eru allt að því jafn stór og hlaupið 2014. Hins vegar er skilgreint viðbúnaðarsvæði sem svarar til allt að tvöfalt stærri hlaupa. Á þessu svæði kann að skapast hætta af völdum mjög stórra hlaupa og þar er rétt að vara við umferð ef vísbendingar eru um yfirvofandi hlaup, t.d. ef vart verður við sprungumyndun eða hreyfingar á jarðlögum nærri öskjubrúninni eða í kjölfar stórra jarðskjálfta nærri Öskju sem ástæða er til að óttast að geti leitt til berghlaups.

9 Þakkir

Ofanflóðasjóður og Vatnajökulsþjóðgarður fjármögnum mælingar á hlaupinu og styrktu einnig úrvinnslu gagna og rannsóknir sem á eftir fylgdu. Norræna rannsóknarverkefnið NORDRESS og Norska jarðtæknistofnunin NGI stóðu að rannsóknum á flóðbylgjunni á Öskjuvatni með Veðurstofu Íslands. Landhelgisgæslan flutti vísindamenn í Öskju í vettvangsferð í júlí 2014 og bát til fjölgeisla mælinga á Öskjuvatn í ágúst 2014 og er henni þakkað fyrir framlag til flutningsins. Háskólanum í Innsbruck, Fjarkönnun ehf., IsViews verkefni Háskólans í München og Loftmyndum ehf. er þakkað fyrir mælingar á vettvangi og framlag þeirra til loftmyndatöku af berghlaupinu en það útheimti þrautseigju margra aðila að afla allra þeirra mæligagna sem náðust af hlaupinu og ummerkjum þess. Starfsmönnum Vatnajökulsþjóðgarðs og mörgum öðrum sem leitað hefur verið til er þökkuð aðstoð við að afla ljósmynda og annarra upplýsinga um berghlaupið en það er ekki síst þeim að þakka að vitneskja um hlaupið og aðdraganda þess er jafn ýtarleg og raun ber vitni.

10 Heimildir

- Ármann Höskuldsson & Þorvaldur Þórðarson (2007). The eruption of Öräfajökull 1362 and the destruction of the district of Hérað, SE-Iceland. *Cities on Volcanoes 5, 19–23 November 2007*. Shimabara: Volcanological Society of Japan.
- Ármann Höskuldsson (2012). Eldgos í Öräfajökli 1362. *Ráðstefna Kvískerjasjóðs 14. mars 2012*.
- Árni Hjartarson (2006). Flóðbylgjur (tsunami) af völdum berghlaupa og skriðna – Eru þær algengar á Íslandi. *Náttúrufr.*, **74**, 11–15.
- Berger, M. J., D. L. George, R. J. LeVeque & K. T. Mandli (2011). The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Adv. Water Res.*, **34**, 1195–1206.
- Carey, R. J., B. F. Houghton & T. Thordarson (2009). Tephra dispersal and eruption dynamics of wet and dry phases of the 1875 eruption of Askja Volcano, Iceland. *Bull. Volcanol.*, **72**(3), 259–278, doi 10.1007/s00445-009-0317-3
- Freysteinn Sigmundsson, Vincent Drouin, Elías Rafn Heimsson, Michelle Parks, Stéphanie Dumont, Benedikt G. Ófeigsson & Ásta Rut Hjartardóttir (2014). *Jarðskorpuhreyfingar í Öskju og tengsl þeirra við berghlaupið 21. júlí 2014*. Jarðvísindastofnun HÍ, minnisblað dags. 14.12.2014.
- Guðmundur Kjartansson (1967). Steinsholtshlaupið 15. janúar 1967. *Náttúrufr.*, **37**, 120–169.
- Harbitz, C. B., & F. Løvholt (2004). *Tsunami modelling and prediction Pre-project: Slide-generated waves in reservoirs*. Oslo, ICG Report 10-2004-1, NGI Report 20031100-1.
- Harbitz, C. B., S. Glimsdal, F. Løvholt, V. Kveldevik, G. K. Pedersena & A. Jensen (2014a). Rockslide tsunamis in complex fjords: From an unstable rock slope at Åkerneset to tsunami risk in western Norway. *Coastal Engineering*, **88**, 101–122.
- Harbitz, C. B., F. Løvholt & H. Bungum (2014b). Submarine landslide tsunamis: how extreme and how likely? *Natural Hazards*, **72**(3), 1341–1374, doi:10.1007/s11069-013-0681-3.
- Harpa Grímsdóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason, Tómas Jóhannesson, Kristín Vogfjörð, Martin Hensch, Kristín Jónsdóttir, Melissa Anne Pfeffer, Ármann Höskuldsson, Freysteinn Sigmundsson, Ásta Rut Hjartardóttir, Þorsteinn Sæmundsson & Ágúst Guðmundsson (2016). *Berghlaup í Öskju 21. júlí 2014. Yfirlit um mælingar og könnun á vettvangi*. Veðurstofa Íslands, greinargerð HG/2016-01.
- Hartley, M. E., & T. Thordarson (2012). Formation of Öskjuvatn caldera at Askja, North Iceland: mechanism of caldera collapse and implications for the lateral flow hypothesis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **227–228**, 85–101.
- Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Tómas Jóhannesson, Kristín S. Vogfjörð, Harpa Grímsdóttir, Ásta Rut Hjartardóttir, Þorsteinn Sæmundsson, Ármann Höskuldsson, Freysteinn Sigmundsson & Hannah Reynolds (2014). *Frumniðurstöður rannsókna á berghlaupi í Öskju 21. júlí 2014*. Veðurstofa Íslands, minnisbl. dags. 5.8.2014.
- Jón Kristinn Helgason (2016a). *Jarðfræðileg ummerki í Suðurbotnum í aðdraganda berghlaupsins í Öskju*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 18.9.2014, uppfært 21.6.2016.
- Jón Kristinn Helgason (2016b). *Landlíkön sem tengjast berghlaupinu í Öskju 21. júlí 2014*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 10.3.2015, uppfært 21.6.2016.
- Kristján Jónasson og Sigmundur Einarsson (2009). *Flokkun háhitasvæða á Íslandi: Jarðfræði, landmótun og yfirborðsummerki jarðhita*. Erindi/ágríp á Haustráðstefnu JFÍ 2009.

- Kristján Jónasson, Sven Þ. Sigurðsson & Þorsteinn Arnalds (1999). *Estimation of Avalanche Risk*. Veðurstofa Íslands, rit 99001.
- Løvholt, F., G. Pedersen & G. Gislér (2008). Oceanic propagation of a potential tsunami from the La Palma Island. *J. Geophys. Res.*, **113**, C09026, doi:10.1029/2007JC004603.
- Masson, D. G., C. B. Harbitz, R. B. Wynn, G. Pedersen & F. Løvholt (2006). Submarine landslides – processes, triggers and hazard prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, **364**, 2009–2039.
- Ólafur Jónsson (1957). *Skriðuföll og snjóflóð*. Akureyri, Bókaútgáfan Norðri.
- Ólafur Jónsson (1976). *Berghlaup*. Akureyri, Ræktunarfélag Norðurlands.
- Ólafur Jónsson (1992). *Skriðuföll og snjóflóð. I*. Reykjavík, Bókaútgáfan Skjaldborg.
- Ólafur Jónsson & Halldór G. Pétursson (1992). *Skriðuföll og snjóflóð. II. Skriðuannáll*. Reykjavík, Bókaútgáfan Skjaldborg.
- Ólafur Jónsson, Sigurjón Rist & Jóhannes Sigvaldason (1992). *Skriðuföll og snjóflóð. III. Snjóflóðaannáll*. Reykjavík, Bókaútgáfan Skjaldborg.
- Selby, M. J. (1993). *Hillslope materials and processes (2nd edition)*. Oxford University Press, 451+xv pp.
- Siebert, L. (2002). Landslides resulting from structural failure of volcanoes. *Reviews in Engineering Geology*, **15**, 209–235.
- Sigmundsson, F., V. Drouin, E. R. Heimisson, M. Parks, S. Dumont, Á. R. Hjartardóttir, P. Einarsson, Á. Höskuldsson, B. Brandsdóttir, Þ. Sæmundsson, T. Jóhannesson, J. K. Helgason, E. Sturkell, R. Pedersen, M. T. Guðmundsson, A. J. Hooper, K. Spaans & Ch. Minet (2014). Deflation and deformation of the Askja caldera complex, Iceland, since 1983: Strain and stress development on caldera boundaries prior to a tsunami generating rockslide in 2014 at Lake Öskjuvatn. Poster V51A-4715 at AGU in San Francisco 15–19 December 2014.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jihwan Kim, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Ármann Höskuldsson, Tómas Jóhannesson, Carl Bonnevie Harbitz & Finn Løvholt (2016). The 2014 Lake Askja rockslide-induced tsunami: optimization of rockslide parameters comparing numerical simulations with observed run-up. Grein sem send hefur verið vísindaritinu *J. Geophys. Res.* til birtingar.
- Sveinn Brynjólfsson (2016a). *Samantekt á athugunum á flóðbylgju í kjölfar berghlaups í Öskju 21. júlí 2014*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 19.11.2014, uppfært 21.6.2016.
- Sveinn Brynjólfsson (2016b). *Samantekt á athugunum á vatnsborðsbreytingum Öskjuvatns eftir berghlaup í Öskju 21. júlí 2014*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 17.9.2014, uppfært 21.6.2016.
- Tómas Jóhannesson, Harpa Grímsdóttir, Jón Kristinn Helgason, Kristín Vogfjörð, Magnús Tumi Guðmundsson, Freysteinn Sigmundsson, Ármann Höskuldsson & Þorsteinn Sæmundsson (2014a). *Áætlun um mælingar á berghlaupi sem féll í Öskju þann 21. júlí 2014*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 1.8.2014.
- Tómas Jóhannesson, Harpa Grímsdóttir, Eiríkur Gíslason, Jón Kristinn Helgason, Kristín Vogfjörð, Magnús Tumi Guðmundsson, Freysteinn Sigmundsson, Ármann Höskuldsson & Þorsteinn Sæmundsson (2014b). *Endurskoðuð áætlun um mælingar á berghlaupi sem féll í Öskju þann 21. júlí 2014*. Veðurstofa Íslands, minnisblað dags. 9.9.2014.
- Tómas Jóhannesson & Eiríkur Gíslason (2014). *Áætlun um rannsóknir á flóðbylgju af völdum berghlaups í Öskju þann 21. júlí 2014*. Veðurstofa Íslands, minnisbl. dags. 19.12.2014.
- Umhverfisráðuneytið (2000). *Reglugerð nr. 505/2000 um hættumat vegna ofanflóða, flokkun og nýtingu hættusvæða og gerð bráðabirgðahættumats*.

Watts, W. L. (1962, ritað 1876). *Norður yfir Vatnajökul eða Um ókunna stigu á Íslandi* (Jón Eyþórsson sneri á íslenzku úr *Across the Vatna Jökull or Scenes in Iceland*). Reykjavík, Bókfellsútgáfan.

Viðaukar

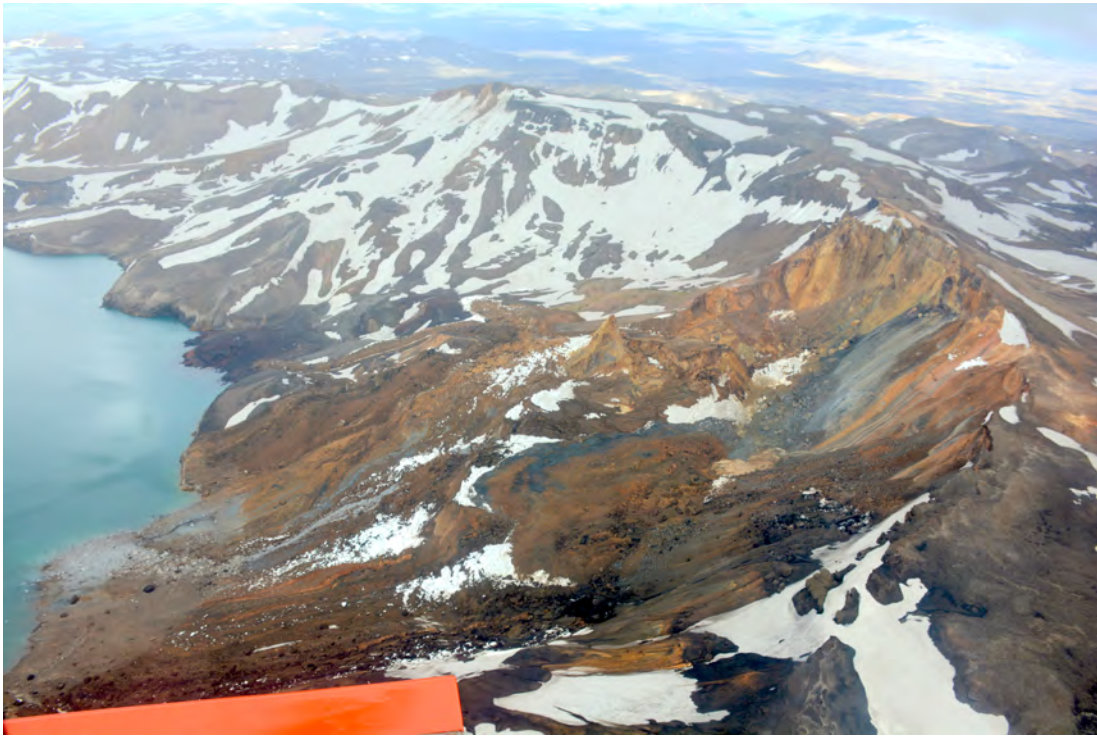
I Ljósmyndir



Mynd 15. Horft upp eftir berghlaupinu frá norðri. Vel sést hversu gríðarlega mikið efni hefur hlaupið úr brún öskjunnar. Ljósmynd: Sveinn Brynjólfsson, 24. júlí 2014.



Mynd 16. Horft yfir berghlaupið úr norðaustri. Sjá má háa strýtu sem stendur upp úr wrðinni ofarlega í hlaupinu og hliðarstraum sem hljóp til norðausturs út úr meginstraumnum miðhlíðis og stöðvaðist þar. Ljósmynd: Jón Kristinn Helgason, 3. ágúst 2014.



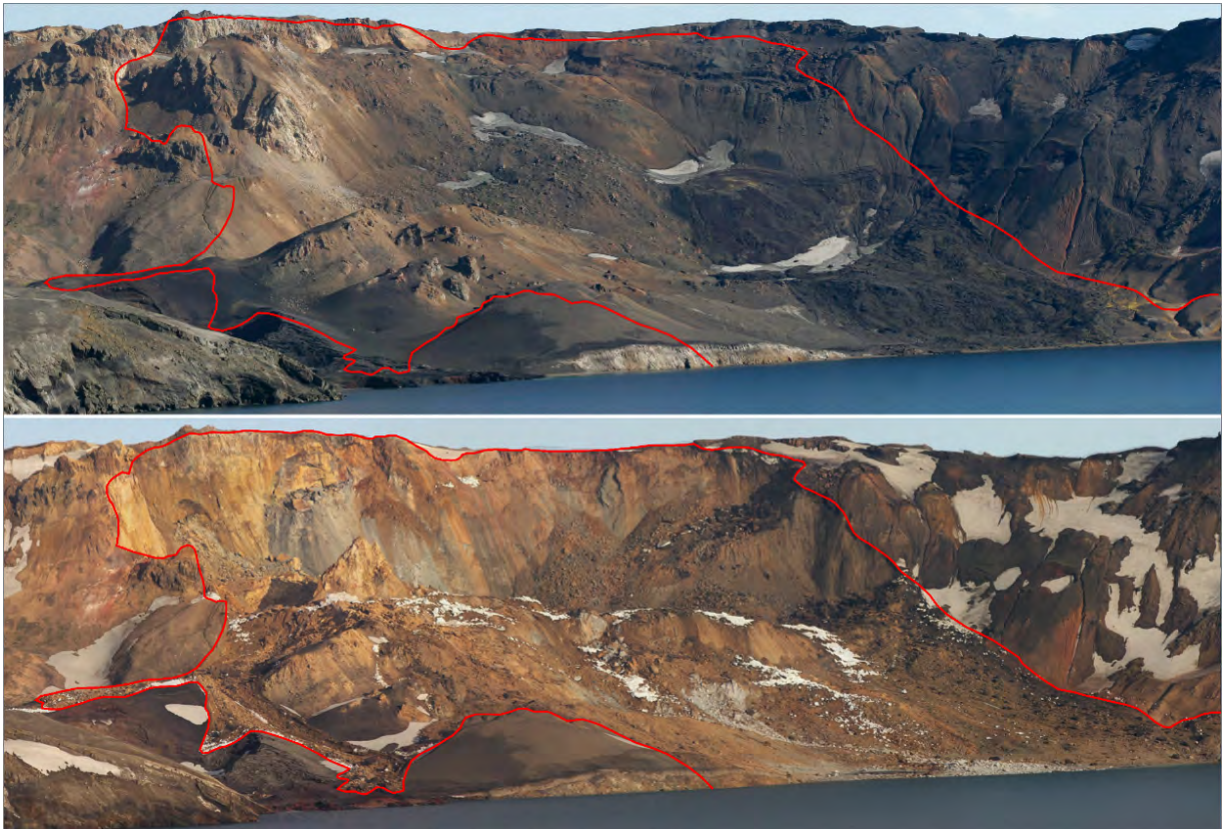
Mynd 17. Horft yfir bergslaupið úr suðri úr þyrlu. Sjá má skriðflötinn neðan öskjubrúnarinnar og umturnuð jarðlög neðar. Ljósmynd: Ásta Rut Hjartardóttir, 24. júlí 2014.



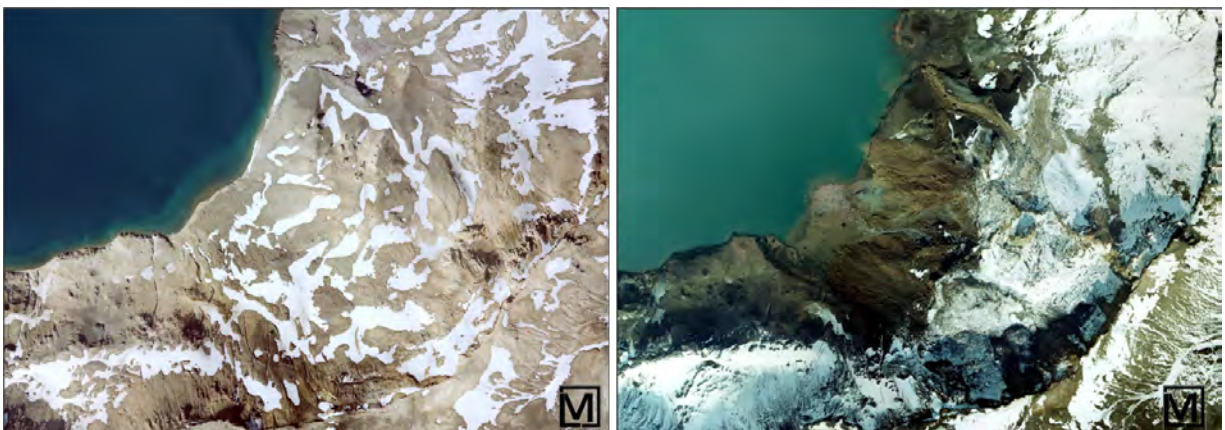
Mynd 18. Flóðbylgjan gekk langt upp á land við Mývetningahraun og ummerki um hana sáust vel á snjósköflum í brún Öskjunnar að vestanverðu. Ljósmynd: Sveinn Brynjólfsson, 3. ágúst 2014.



Mynd 19. Gríðarlegar breytingar hafa orðið á strandlínu Öskjuvatns af völdum flóðbylgjunnar eins og sjá má á ljósmyndum tveimur aftanganum við Bátshraun fyrir og eftir berg-hlaupið. Ljósmyndir: Ármann Höskuldsson, 18. september 2012, og Sveinn Brynjólfsson, 24.7.2014.



Mynd 20. Berghlaupssvæðið 4 klst fyrir hlaup og fjórum dögum eftir hlaupið. Útlína hlaupsins er teiknuð á myndirnar. Ljósmyndir: Ármann Höskuldsson, 21.7.2014, og Jón Kristinn Helgason, 24. júlí 2014. Teikning: Jón Kristinn Helgason.



Mynd 21. Loftmyndir af berghlaupssvæðinu fyrir og eftir hlaupið. Loftmyndirnar eru teknar 23. júlí 2013 og 19. ágúst 2014 af Loftmyndum ehf.



Mynd 22. Sprungur við brún Öskju ofan Suðurbotna sumarið 2013 sýna að þar var þá komin hreyfing á jarðlög sem hlupu fram tæpu ári síðar. Ljósmyndir: Joel Ruch, 25. ágúst 2013.



Mynd 23. Hækkun á vatnsborði Öskjuvatns frá 21.7.2014 til 4.8.2014. Ljósmyndir: Hafsteinn Óskarsson og Sveinn Brynjólfsson.



Mynd 24. Nærmynd af berghlaupstungunni tekin frá Öskjuvatni sem sýnir hversu stórt og úfið hlaupið er. Ljósmynd: Þorsteinn Sæmundsson, 3. ágúst 2014.



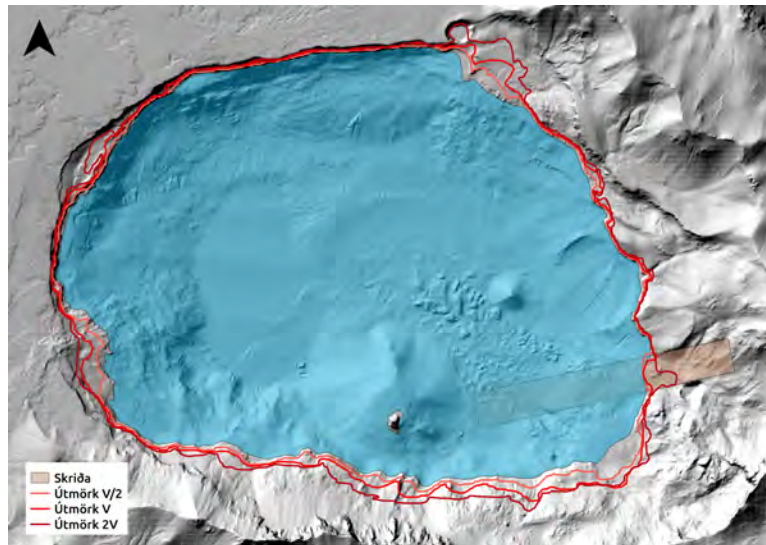
Mynd 25. Á yfirborði Öskjuvatns var mikil breiða af vikri sem flaut ofan á vatninu eftir berghlaupið. Ummerki flóðbylgjunnar sjást vel á snjósköflum í bakgrunni myndarinnar. Ljósmynd: Sveinn Brynjólfsson, 24. júlí 2014.



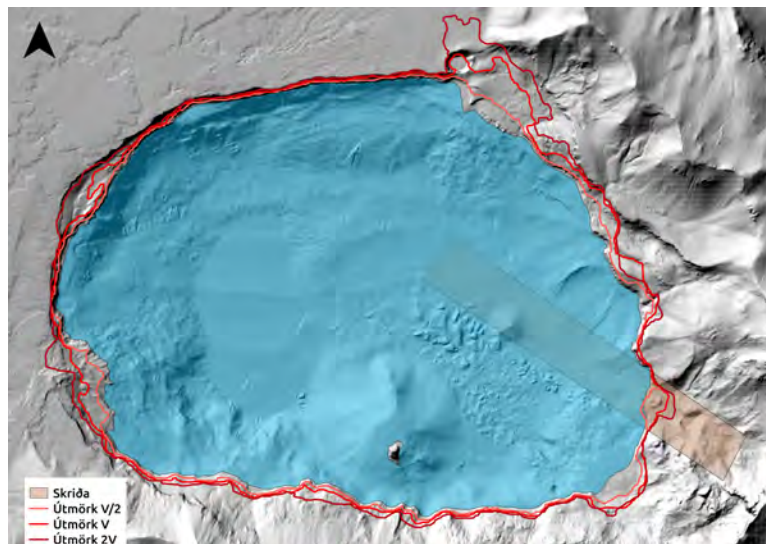
Mynd 26. Ljósmynd tekin tæpum tveimur mánuðum eftir berghlaupið sem sýnir að mikið hefur hrunið úr suðvesturhluta brotstálsins eftir berghlaupið 21. júlí. Ljósmynd: Helga Margrét Helgadóttir, 15. september 2014.

II Niðurstöður sviðsmynda

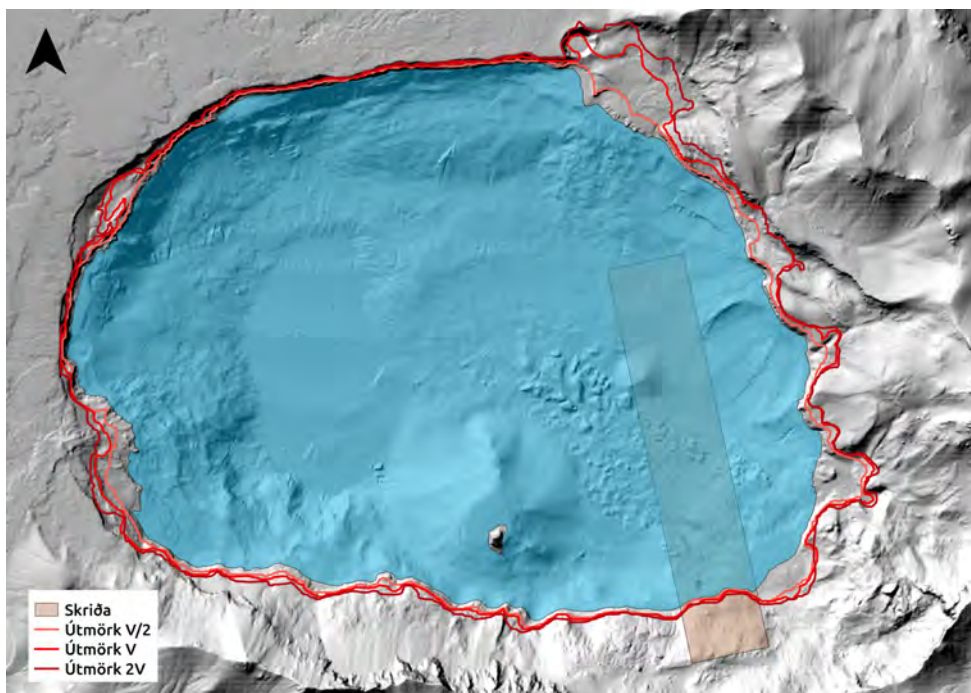
Niðurstöður líkanreikninga sem ræddar eru í kafla 6 eru sýndar á myndum 27–30.



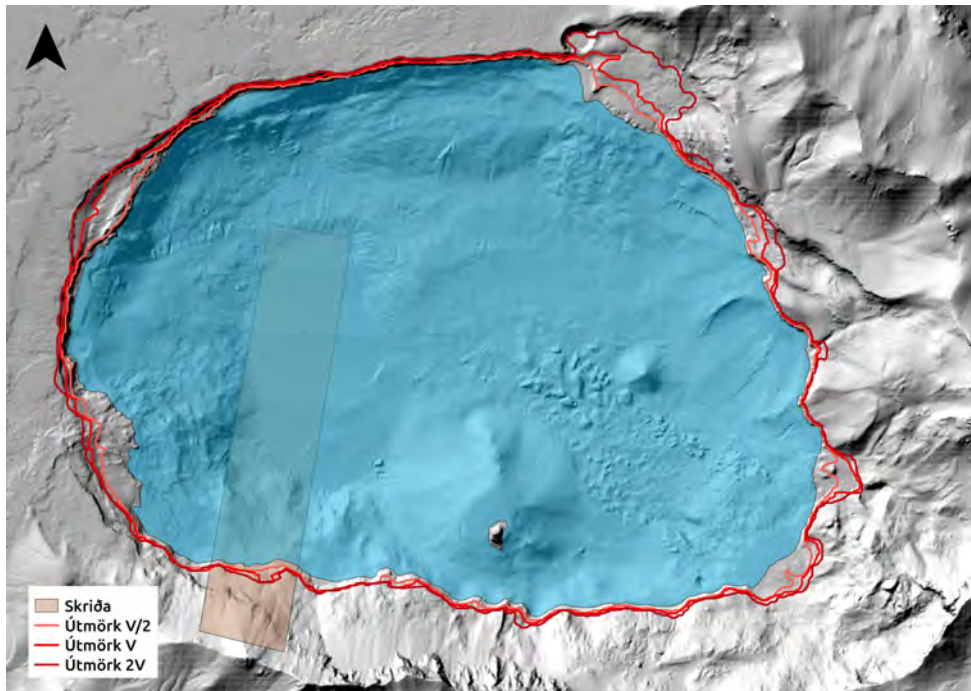
Mynd 27. Reiknuð efstu mörk flóðbylgju við Öskjuvatn vegna berghlaups úr upptakasvæði 1 (sjá mynd 12). Ljósrauð lína sýnir hámarksútbreiðslu flóðbylgna vegna helmingi minna berghlaups en í júlí 2014, rauð lína vegna jafnstórs hlaups og dökkrauð lína vegna tvöfalt stærra berghlaups. Berghlaupið er lauslega dregið inn á myndina sem skyggður kassi.



Mynd 28. Reiknuð efstu mörk flóðbylgju við Öskjuvatn vegna berghlaups úr upptakasvæði 2. Ljósrauð lína sýnir hámarksútbreiðslu flóðbylgna vegna helmingi minna berghlaups en í júlí 2014, rauð lína vegna jafnstórs hlaups og dökkrauð lína vegna tvöfalt stærra berghlaups. Berghlaupið er lauslega dregið inn á myndina sem skyggður kassi.



Mynd 29. Reiknuð efstu mörk flóðbylgju við Öskjuvatn vegna berghlaups úr upptakasvæði 3. Ljósrauð lína sýnir hámarksútbreiðslu flóðbylgna vegna helmingi minna berghlaups en í júlí 2014, rauð lína vegna jafnstórs hlaups og dökkrauð lína vegna tvöfalt stærra berghlaups. Berghlaupið er lauslega dregið inn á myndina sem skyggður kassi.



Mynd 30. Reiknuð efstu mörk flóðbylgju við Öskjuvatn vegna berghlaups úr upptakasvæði 5. Ljósrauð lína sýnir hámarksútbreiðslu flóðbylgna vegna helmingi minna berghlaups en í júlí 2014, rauð lína vegna jafnstórs hlaups og dökkrauð lína vegna tvöfalt stærra berghlaups. Berghlaupið er lauslega dregið inn á myndina sem skyggður kassi.

III Kort

Kort 1. Yfirlitskort (A3, 1:25 000).

Yfirlitskort af Öskju ásamt mörkum hættumetins svæðis.

Kort 2. Hættumat. (A3, 1:25 000).

Hættusvæði þar sem flóðbylgjur af völdum berghlaupa geta skapað hættu eru afmörkuð. Annars vegar er svæði afmarkað með rauðri heildreginni línu þar sem mælt er með að ferðamenn og aðrir sem fara um svæðið hafi ekki langa viðdvöl og að ekki séu sett þar upp upplýsingaskilti eða önnur aðstaða sem dvelur fyrir ferðafólki. Hins vegar er viðbún- aðarsvæði afmarkað með gulri línu sem svarar til allt að tvöfalt stærri hlaupa en í júlí 2014. Á þessu svæði kann að skapast hætta af völdum mjög stórra hlaupa og þar er rétt að vara við umferð ef vísbendingar eru um yfirvofandi hlaup, t.d. ef vart verður við sprungumynd- un eða hreyfingar á jarðlögum nærri öskjubrúninni eða í kjölfar mjög stórra jarðskjálfta. Varhugavert svæði þar sem fólki getur stafað hætta af hruni úr óstöðugum jarðlögum berg- hlaupsins frá júlí 2014 er afmarkað nærri Suðurbotnum með gulum línum.

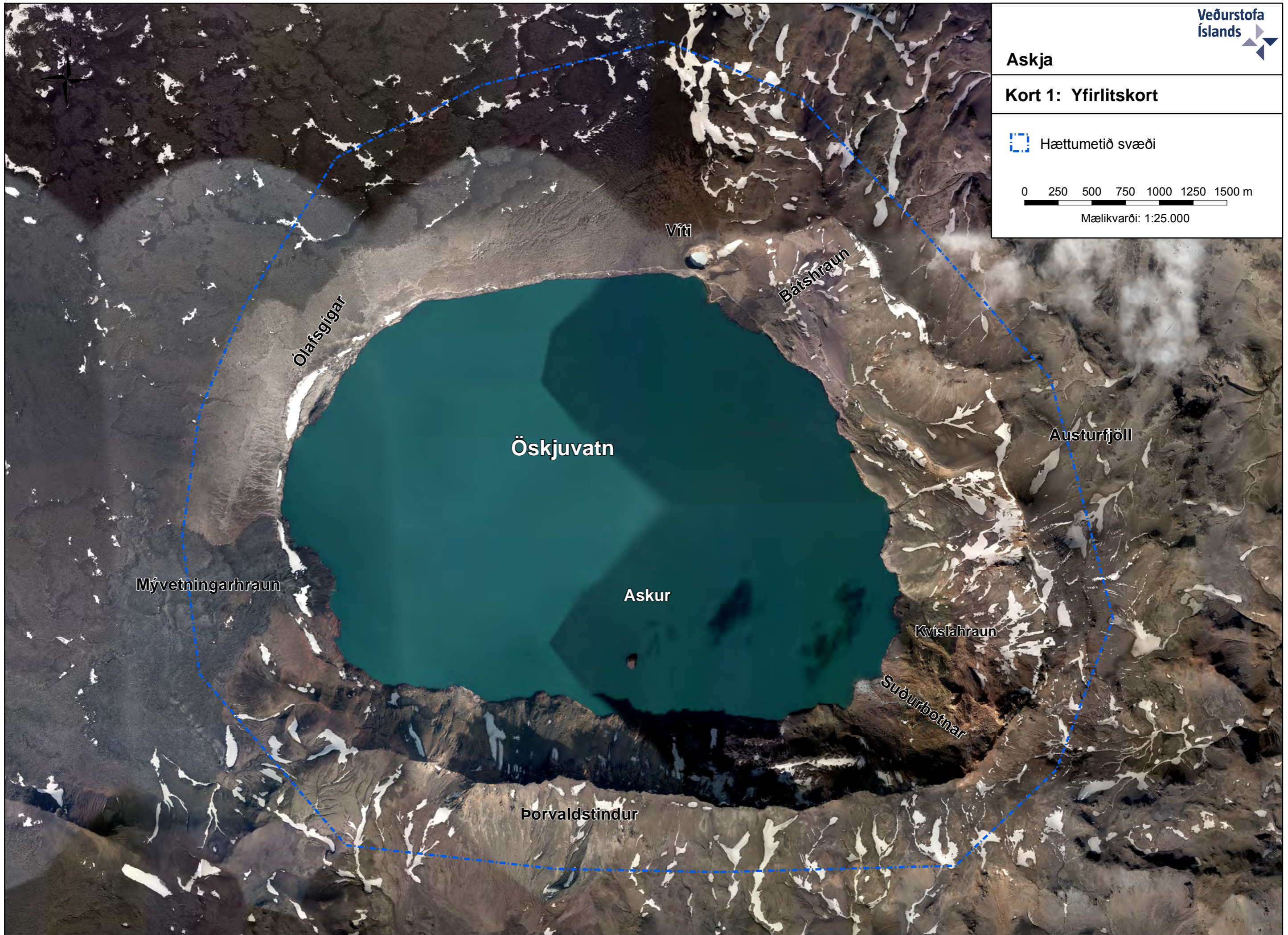
Askja

Kort 1: Yfirlitskort

 Hættumetið svæði





0 250 500 750 1000 1250 1500 m

Mælikvarði: 1:25.000



Askja

Kort 2: Hættumat

-  Hættumetið svæði
-  Hrunhætta
-  Hættusvæði v. flóðbylgna
-  Viðbúnaðarsvæði v. flóðbylgna

0 250 500 750 1000 1250 1500 m

Mælikvarði: 1:25.000

