

Jón Kristinn Helgason, Sigríður Sif Gylfadóttir, Sveinn Brynjólfsson, Harpa Grímsdóttir, Ármann Höskuldsson, Þorsteinn Sæmundsson, Ásta Rut Hjartardóttir, Freysteinn Sigmundsson og Tómas Jóhannesson

Berghlaupið í Öskju

21. júlí 2014

AÐ KVÖLDI 21. JÚLÍ 2014 varð stórt berghlaup úr Suðurbotnum í Öskjuvatn. Hlaupið haldi að mestu Suðurbotnahraun og lagðist upp að Kvíslahrauni. Hlaupið kom af stað flóðbylgju sem náði víða 20–40 m hæð og jafnvel allt að 70–80 m á stöku stað. Bylgjan gekk hundruð metra inn á flatlendið suðaustan við Víti, í Kvíslahrauni, Mývetningahrauni og við Ólafsgíga. Líkanreikningar sýna að hæð flóðbylgjunnar á mismunandi stöðum réðst af flóknu samspili í bylgjuhreyfingu á yfirborði vatnsins. Berghlaupstungan á botni Öskjuvatns er víða um 600 m breið. Hún nær um 2,1 km út í vatnið og eru neðstu 800 m tungunnar um 8 m að þykkt að meðaltali. Heildarrúmmál efnis sem fór á hreyfingu í hlaupinu er talið um 20 milljónir m³ og er það með stærstu berg-hlaupum sem þekkt eru á sögulegum tíma á Íslandi. Jarðlög við Öskjuvatn eru víða sprungin og óstöðug og hætta er á að berghlaup geti komið aftur á svipuðum slóðum og þetta hlaup og einnig bæði norðan þess og vestan. Berghlaup og flóðbylgjur af þeirra völdum geta skapað mikla hættu fyrir fólk sem stótt er í Öskju. Áhætta af völdum slíkra berghlaupa er hins vegar ekki talin mikil þegar tekið er tillit til þess hversu sjaldgæf hlaupin eru og að fólk staldrar alla jafna stutt við á svæðinu. Þó er rétt að vara ferðalanga í Öskju við því að dveljast langdvölum við vatnsbakkann. Líkanreikningar benda til þess að flóðbylgja af völdum nokkru stærra hlaups geti kastast upp á brúnina vestan við Víti og flætt þar yfir nokkurt svæði til norðurs.

INNGANGUR

Stórt berghlaup féll úr suðaustur-brún Öskju í Öskjuvatn hinn 21. júlí 2014 og olli flóðbylgju sem skolaðist langt upp á bakkana allt í kringum vatnið. Svo heppilega vildi til að hlaupið varð síðla kvölds og enginn var nærri vatninu. Aðeins nokkrum klukkustundum fyrir hrúnið voru tugir ferðamanna niðri við vatnsbakkann við Víti og hefðu þeir án efa átt erfitt með að komast undan flóð-bylgjunni sem talin er hafa borist yfir vatnið á einungis 1–2 mínútum og barst tugi metra upp hlíðina þar og yfir í Víti.

Berghlaupið kom úr 370 m hárrí suðausturbrún öskjunnar (1. mynd). Brotsárið er um 900 m breitt efst en breidd hlaupsins þar sem það gekk út í vatnið um 550 m. Hlaupið kom fram á jarðskjálftamælum Veðurstofu Íslands, sem skjálftaórói og sýna gögnin að það fór af stað laust fyrir kl. 23.24. Skriðan olli titringi sem stóð yfir í rúma mínútu. Bylgjurnar sáust á stórum hluta jarðskjálftamælakerfis Veðurstofunnar, mjög vel á nálægum stöðvum en einungis lægstu tíðnirnar á fjarlægustu mælum. Enginn sjónarvottur var að berghlaupinu. Síðustu ferðamenn dagsins yfirgáfu svæðið við vatnið tæpum klukkutíma fyrir hlaupið. Björgunar-sveitarmenn hjá Hálendisvakt Landsbjargar sáu hvítan mökk yfir Öskjuvatni



1. mynd. Berghlaupsurðin í suðausturbrún Öskju, að hluta hulin nýsnævi. – The rockslide debris in the southeastern slopes of the Askja caldera, partly covered with fresh snow. Ljósmynd: Kristinn I. Pétursson, 1.8. 2014.

nokkrum mínútum eftir hlaupið. Mökkurinn líktist því helst að gufubólstrar stigju upp úr öskjunni og er talið að hlaupið hafi afhjúpað grunnstæðan jarðhita undir yfirborði jarðar. Einnig kann að hafa komið við sögu ryk sem þyrlaðist upp við berghlaupið.

Margvíslegar mælingar og rannsóknir fóru fram á berghlaupinu og afleiðingum þess af hálfu Veðurstofunnar og Jarðvísindastofnunar Háskóla Íslands. Teknar voru loftmyndir af berghlaupsurðinni og unnin landlíkön á grundvelli þeirra, og útvegaðar myndir og landlíkön af Öskju fyrir berghlaupið. Hlaupurðin á botni Öskjuvatns var kortlögð með fjölgeislamælitæki af báti. Teknar voru ljósmyndir af hlaupurðinni og öðrum ummerkjum og bornar saman við myndir af ýmsum svæðum í Öskju fyrir hlaup. Loks voru ummerki um flóðbylgjuna sem skolaðist upp á bakka Öskjuvatns mæld með GPS-tækjum og leysikíki og unnin kort af útbreiðslu hennar. Þá var berghlaupið kortlagt

með hitamyndavél og mæld hæð vatnsborðs í Öskjuvatni.

Árið 1875 varð stórt eldgos í Öskju og leiddi það til myndunar Öskjuvatns á nokkrum áratugum með endurteknum jarðföllum og berghlaupum. Reyndar var sig byrjað í Öskju áður en gosið hófst þannig að rekja má myndun vatnsins nokkru lengra aftur.¹ Þverhniptir hamraveggir öskjunnar eru enn óstöðugir og sprungnir, og að auki kann spennan af völdum jarðskorpuhreyfinga í rótum eldstöðvarinnar að valda enn frekari óstöðugleika á ákveðnum stöðum í öskjubrúninni. Það má því segja að berghlaupið í Öskju árið 2014 sé óbein afleiðing af þessu mikla eldgos. Berghlaup sem eru tugir milljóna m³ að stærð verða ekki oft hér á landi fremur en í öðrum löndum. Þegar slík hlaup eru ekki í beinum tengslum við eldgos eru þau á vissan hátt hættulegri fólki en hlaup í gosi. Síður er við því að búast að berghlaup verði þegar ekki er um að ræða umrót og jarðskorpu-

hreyfingar sem eldgos fylgja og má því ætla að slík hlaup komi mönnum frekar 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, til þess meðal annars að geta afmarkað svæði þar sem vísbendingar eru um hættu á berghlaupi.

Hér verður gerð grein fyrir mælingum og rannsóknum á berghlaupinu, flóðbylgjunni og líkanreikningum sem unnir hafa verið til þess að meta hættu af völdum slíkra bylgna. Nánari lýsingu á hlaupinu, ljósmyndir af jarðarumróti af þess völdum og ummerkjum flóðbylgjunnar á bökkum Öskjuvatns er að finna í skýrslu um mælingarnar.² Markmiðið með rannsóknunum var meðal annars að vinna öryggisáætlun fyrir umferð ferðamanna og annarra við Öskju þar sem tekið yrði tillit til þeirrar hættu sem stafar af hugsanlegum berg-hlaupum í Öskjuvatni.³

BERGHLAUPIÐ 21. JÚLÍ 2014

Berghlaupið í Öskju í júlí 2014 er eitt mesta berghlaup á sögulegum tíma á Íslandi (1. og 2. mynd), af þeim sem urðu án þess að á eldgos stæði. Rúmmál efnis sem komst á hreyfingu var væntanlega nokkuð umfram stærð Steinsholts-hlaupsins sem féll árið 1967. Það er talið hafa verið um 15 milljónir m³,^{4,5} og framhlaupið úr Fagraskógarfjalli í Hítardal í júlí 2018 10–20 milljónir m³ (Veðurstofa Íslands, óbirt gögn). Berghlaup úr Hallbjarnarstaðatindi í Skriðdal, sem líkur benda til að orðið hafi á landnámsöld,⁶ kann að vera svipað að stærð. Rúmmál þess hefur ekki verið metið þar sem þykkt hlaupurðarinnar er óþekkt, en hún er um 2,9 km² að flatarmáli og 3 km að lengd. Stærri berghlaup hafa hugsanlega orðið nokkrum sinnum á sögulegum tíma sem beinn þáttur í eldsumbrotum, svo sem í tengslum við eldgos í Öskju 1875. Þá eða skömmu áður hófst myndun Öskjuvatns sem síðan stækkaði á nokkrum áratugum upp í núverandi stærð.⁷ Í lýsingu Williams Lords Watts⁸ á ferð í Öskju í júlí 1875 segir frá því að þeir félagar urðu vitni að hruni bergspildu niður í eldgjána, sem þeir komu að og könnuðu.⁸

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

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

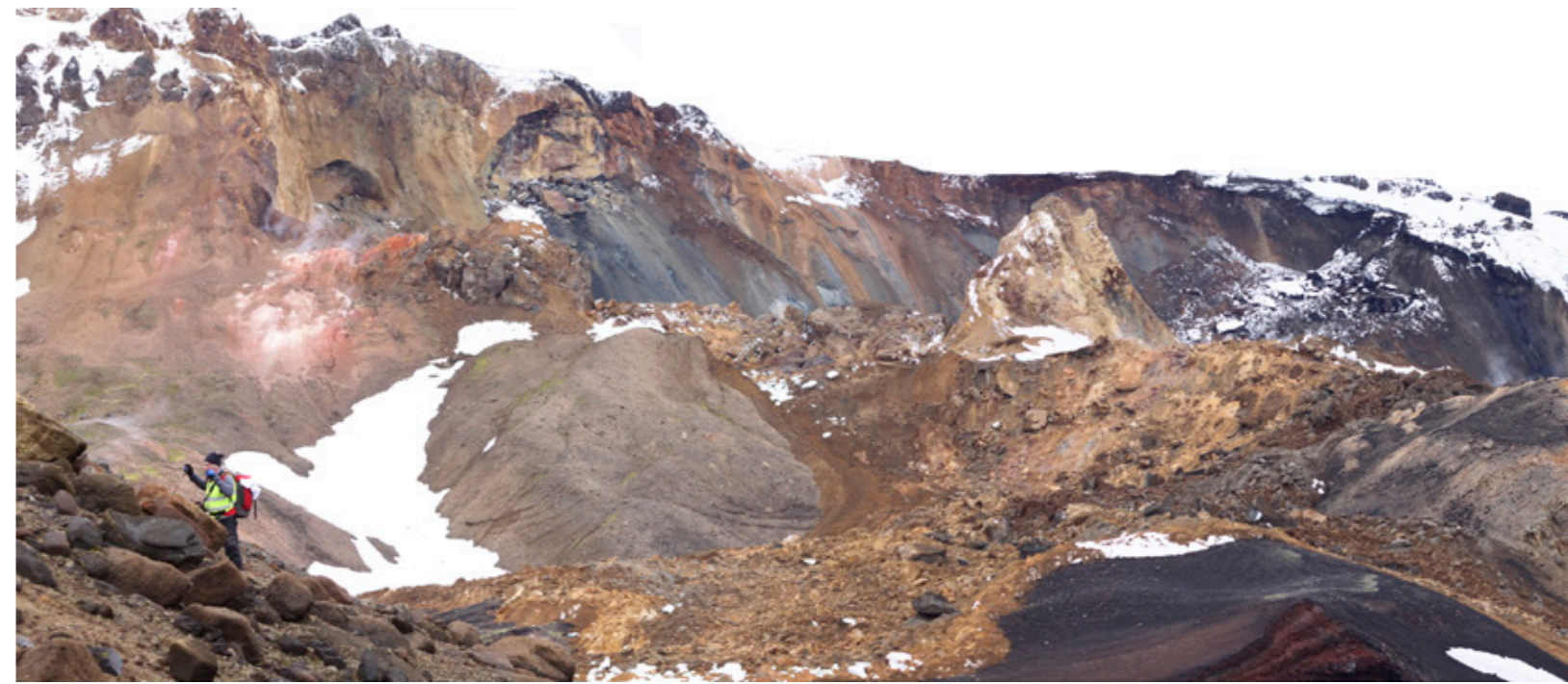
Þegar litið er til jarðskjálftagagna og gasmælinga bendir ekkert til þess að berghlaupið 2014 hafi átt sér stað vegna jarðhræringa eða eldvirkni á þeim tíma. Mikill snjór var á svæðinu og hlýtt hafði verið í veðri, og er líklegt að leysing hafi hleypt skriðunni af stað um sprungu þar sem hreyfing var hafin nokkrum árum fyrr. Berghlaup sem þessi eru hluti af langtímaþróun öskjunnar af völdum eldvirkni og jarðskorpuhreyfinga.

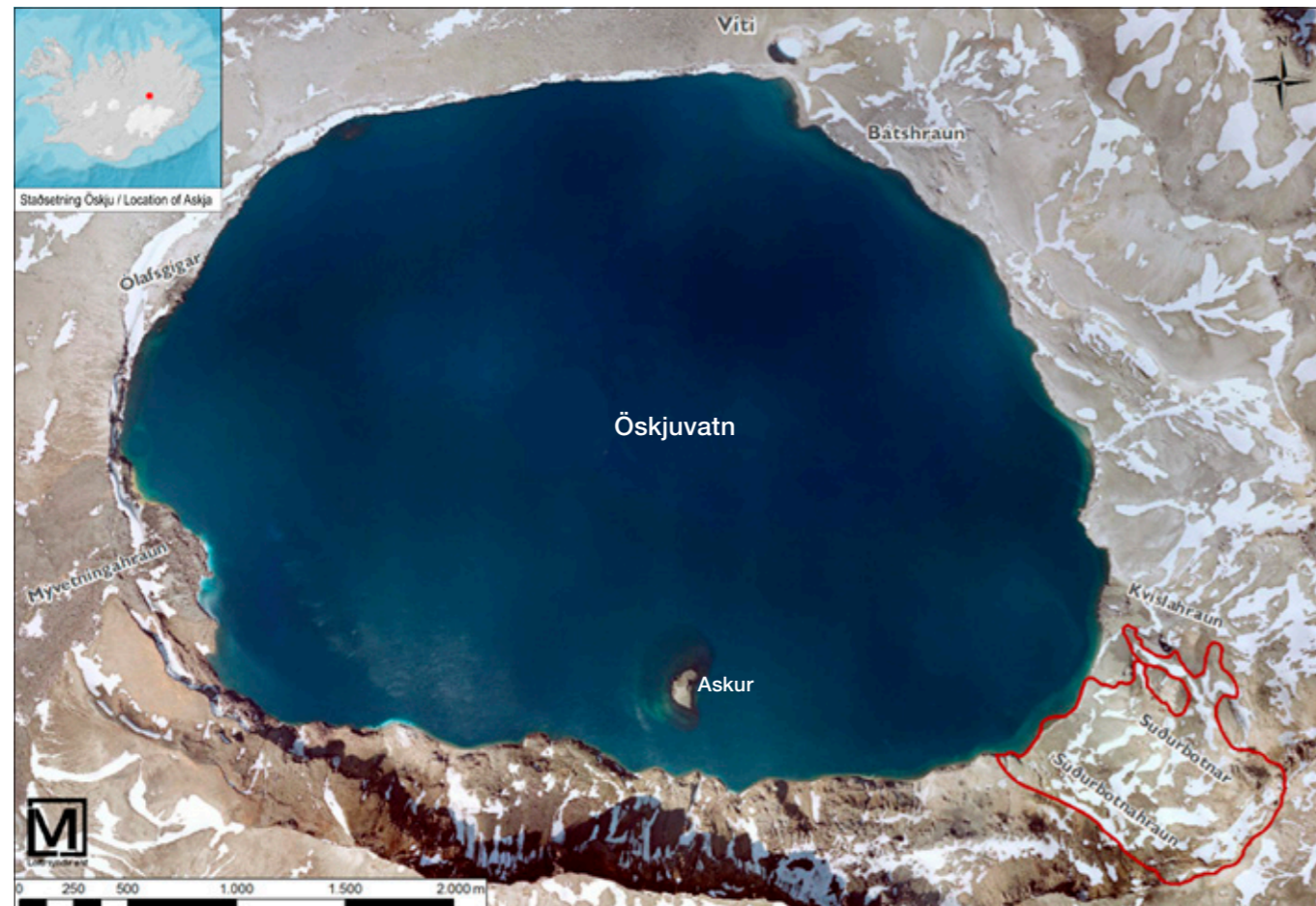
BERGHLAUPIÐ OG JARÐFRÆÐILEGAR AÐSTÆÐUR

Berghlaupið huldí að mestu Suðurbotnahraun og lagðist upp að Kvíslahrauni (sjá örnefni á 3. mynd). Hlaupurðin nær þó ekki yfir sjálfar eldstöðvar Suðurbotnahrauns. Upp-tök berghlaupsins eru efst í brún öskjunnar á um 900 m breiðu svæði í 350 m hæð yfir yfirborði vatnsins og myndaðist þar stór brotskál. Hluti efnisins nam staðar í miðri hlíðinni og myndaði 250 m breiðan hjalla í um 150 m hæð yfir vatninu. Hjallanum 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 hreyfing var mest í aðdraganda hlaupsins. Efnid sem hljóp úr brúninni norðanverðri stöðvaðist að mestu neðar í hlíðinni þar sem það hlóðst upp og myndaði fyrrnefndan hjalla, sem er stærri og þykkari í norðanverðri brotskálinni. Lárétt fjarlægð frá brún öskjunnar að strönd vatnsins er rúmum 1.100 m.

Meginorsök hlaupsins má rekja til hreyfingar um misgengissprungu í brún öskjunnar. Sprunga þessi var þekkt og er hún merkt á sprungu- og misgengiskorti

2. mynd. Horft yfir berghlaupið ofanvert. Sjá má óbrotið bergfliki sem stendur hátt upp úr urðinni og hliðarstræm sem hljóp til norðausturs út úr meginstraumnum miðhlíðis og stöðvaðist þar. – An aerial view over the upper part of the rockslide. A large unbroken piece of bedrock can be seen standing above the debris. A part of the slide travelled to the northeast out of the main flow and stopped before reaching the lake. Ljósmynd: Jón Kristinn Helgason, 3.8. 2014.





3. mynd. Yfirlitsmynd af Öskjuvatni frá því fyrir berghlaupið með helstu örnefnum. Útlínur berghlaupsins 21. júlí 2014 eru rauðar. Upprétt loftmynd frá 23. júlí 2013. – An aerial view of Lake Öskjuvatn prior to the rockslide (23 July 2013), with place names mentioned in the text. The extent of the rockslide above the water level is indicated with a red line. ©Loftmyndir ehf.

Hartleys og Þorvalds Þórðarsonar.⁹ Tekist hefur að safna ljósmyndum af berg-hlaupssvæðinu frá árunum fyrir hlaupið og er því hægt að rekja hreyfingu um sprunguna í aðdraganda hlaupsins. Hægfare hreyfing virðist hafa verið á berginu í brún öskjunnar frá 2007 og herti mjög á skriðinu sumarið 2014 (4. mynd). Einnig sýna ljósmyndir frá 2013 sprungur nærri upptökum hlaupsins, sem eru til marks um að víðtæk hreyfing í berggrunni hafi þá verið hafin á þessu svæði (5. mynd). Þar til nokkru fyrir hlaupið var mesta hreyfingin á árabílinu 2011–2012 en samkvæmt eðli máls var hreyfingin mest skömmu fyrir hlaupið. Á ljósmyndum sem teknar voru 10 dögum fyrir hlaupið sést að talsverð hreyfing var orðin um sprunguna og höfðu jarðlögin sem síðar hlupu sigið mikið. Auk þess voru sprungur farnar að myndast í snjóhulu í hjallanum neðan við brún öskjunnar. Á ljósmynd sem

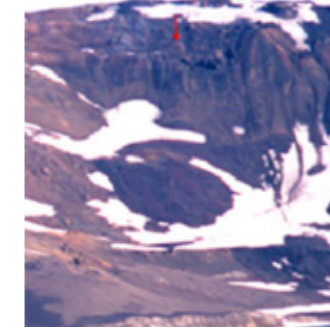
tekin var örfáum klukkustundum fyrir hlaupið sést að næstum öll hlíðin ofan Suðurbotna færðist úr stað. Mánuðinn fyrir hlaupið var fremur hlýtt og mikið rigndi á svæðinu að sögn landvarða, og mikill snjór var til fjalla, sérstaklega í Öskju austanverðri. Það er því líklegt að leysingar hafi hert á skriðinu í aðdraganda hlaupsins og hugsanlega komið því af stað.

Eldstöðin Askja í Dyngjufjöllum samanstendur af þremur til fjórum öskjum og er Öskjuvatn í þeirri yngstu (6. mynd). Hún myndaðist á um þrjátíu árum eftir eldgosið 1875.^{7,9} Fyrir þann tíma var Öskjuvatn ekki til og því eru öskjubarmarnir við vatnið jarðfræðilega mjög ungir. Slíkar hlíðar eru óstöðugri en hlíðar í eldra landslagi sem komist hafa í ákveðið jafnvægi. Ljóst þykir af ummerkjum að berghlaup hafa áður komið úr hlíðum Öskju eftir 1875 þótt menn hafi ekki orðið þeirra

varir. Stór hlaup hafa þó ekki náð niður í vatnið á þessum tíma. Upptakasvæði berghlaupsins 2014 er í jarðlögum sem hlóðust upp á síðustu ísöld, að meginhluta lagskipt móberg. Jarðhitasvæði er í hlíðinni á upptakasvæði berg-hlaupsins og er það tengt súrum líparíthraungúl sem hefur troðist inn í móbergslögin.^{10,11} Í berghlaupinu finnst hvort tveggja, móbergshöfð og brot úr líparíthraungúlum.

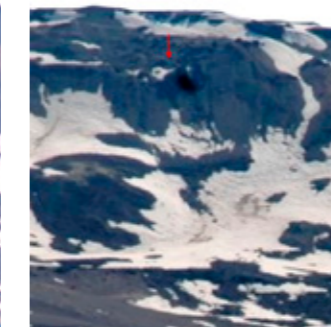
Auk misgengissprungunnar í suðausturjaðri öskjunnar er talið að jarðhitinn í upptökum berghlaupsins hafi komið við sögu í aðdraganda hlaupsins. Jarðhitaummyndun veikir bergið,¹⁵ breytir grunnvatnsstöðu^{16,17} og myndar leirlög sem skriður geta hlaupið um. Mælingar á jarðskorpahreyfingum í Öskju hófust árið 1966. Í upphafi skiptust á tímabil með risi og sigi en síðan 1983 hefur askjan sigið stöðugt. Sigmiðjan er skammt norðan við Ólafs-

2008 – Sprungan hefur myndast / A crack has formed



Ljósmynd./photo: Oddur Sigurðsson

2009 – Skriðtaumar sjáanlegir við sprunguna / Debris flow tongues below the crack



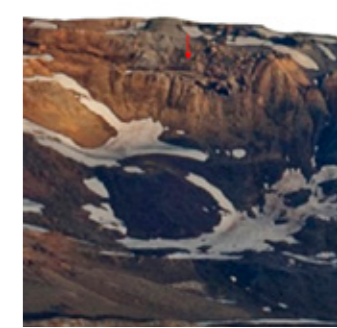
Ljósmynd./photo: Nigel Nudds

2010 – Áberandi sprungumyndun / The crack is clearly visible



Ljósmynd./photo: Dave McGravie

2011 – Töluverðar breytingar / Considerable changes from previous year



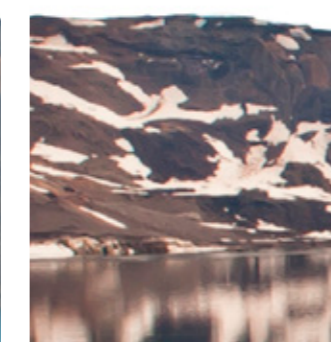
Ljósmynd./photo: Mýflug

2012 – Mikil lóðrétt færsla / Substantial vertical movement



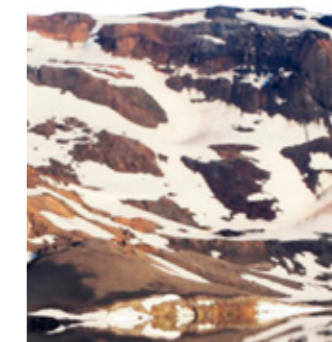
Ljósmynd./photo: Joel Ruch

2013 – Áframhaldandi lóðrétt færsla / Continued vertical movement



Ljósmynd./photo: Jón Ingi Cæsarson

2014 – Gríðarlegar breytingar / Dramatical changes 4 klst fyrir hrun / 4 hrs before the event



Ljósmynd./photo: Ármann Höskuldsson

2014 – Berghlaupið fallið / The rockslide has fallen 2 dögum eftir hrun / 2 days after the event



Ljósmynd./photo: Jón Kristinn Helgason

4. mynd. Ljósmyndaröð sem sýnir þróun sprungunnar ofan Suðurbotna frá 2008 fram að berghlaupinu 2014. – A series of photographs that show the evolution of the fissure above Suðurbotnar from 2008 to 2014 when the rockslide occurred.

gíga við norðvestanvert Öskjuvatn, í miðri meginöskjunni. Áætlað sig á því svæði síðastliðin ár er um 20 mm á ári (byggt á tölum úr grein Drouins o.fl.¹⁸). Sigið minnkar hratt út frá þessari miðju. Sigið er talið stafa af þrýstifalli í grunnstæðu kvikuhólfi eldstöðvarinnar með þrýstimiðju undir sigmiðjunni. Þetta veldur spennubreytingum í bergi á svæðinu og síðan 1983 hafa þær verið talsverðar. Jarðskorpahreyfingar og spennubreytingar af völdum þeirra eru taldar hafa leitt til óstöðugleika á misgengissprungum á upptakasvæði berghlaupsins.^{19,20}

Í flóknu jarðrænu umhverfi sem þessu eru eflaust margir skriðfletir en ummerki berghlaupsins benda til þess að megin-skriðfleturinn tengist hringsprungunni í brún öskjunnar. Misgengi og sprungur innan berg-hlaupssvæðisins hafa líklega haft áhrif á hreyfingu hlaupsins, eins og algengt

er við berghlaup.¹⁶ Ummerki á yfirborði benda til þess að um svokallaða snörunarhreyfingu (e. rotational slide) sé að ræða en það þýðir að skriðfletur berghlaupsins er íhvolfur og að jarðlögin hafa snarast um hann. Skriðfletur berghlaupsins þar sem hann er hulinn urð má meta með því að draga íhvolfan sést á yfirborði og tengja hann þeim stað hlíðarinnar nokkru neðar þar sem landhæð fyrir og eftir hlaup er svipuð (7. mynd). Megin-skriðfletur berghlaupsins er fremur brattur þar sem hann fellur saman við hringsprunguna við brún öskjunnar, eða allt að 60–70°. Hallinn minnkar eftir því sem fjær dregur brúnni og virðist skriðfleturinn ná niður í 100–200 m hæð yfir vatnsborðinu. Ekki er hægt að útiloka að skriðfleturinn liggja neðar í staflanum, en engar jarðfræðilegar vísbendingar eru um að hann nái undir yfirborð Öskjuvatns.

Rúmmál berghlaupsins er metið um 20 milljónir m³ með því að bera saman landlíkön frá 2013 og 2014, að teknu tilliti til grops jarðlaga. Mælingar á gropi jarðlaga hér á landi^{21–23} (Árni Hjartarson, munnl. upplýsingar úr gögnum frá ÍSOR, 2016) benda til þess að grop upprunalegu jarðlaganna á upptakasvæði berghlaupsins kunni að hafa verið 10–20% en grop berghlaupsurðarinnar þar sem hún stöðvaðist á þurru landi geti verið tvöfalt meira, eða 20–40%. Hér verður miðað við 15% grop jarðlaga á upptakasvæðinu fyrir berghlaupið og 30% grop í hlaupurðinni á landi.

Mælingar á vatnsborðshæð Öskjuvatns fyrir og eftir berghlaupið gefa til kynna 65±20 cm hækkun vatnsborðs við hlaupið. Þegar ljósmyndir sem teknar voru fyrir hlaupið (21. júlí, nokkrum klst. fyrir hlaup) og eftir það (í vettvangsferð 4. ágúst) eru bornar saman við mælingar á klettunum vestan við Víti fæst vatns-

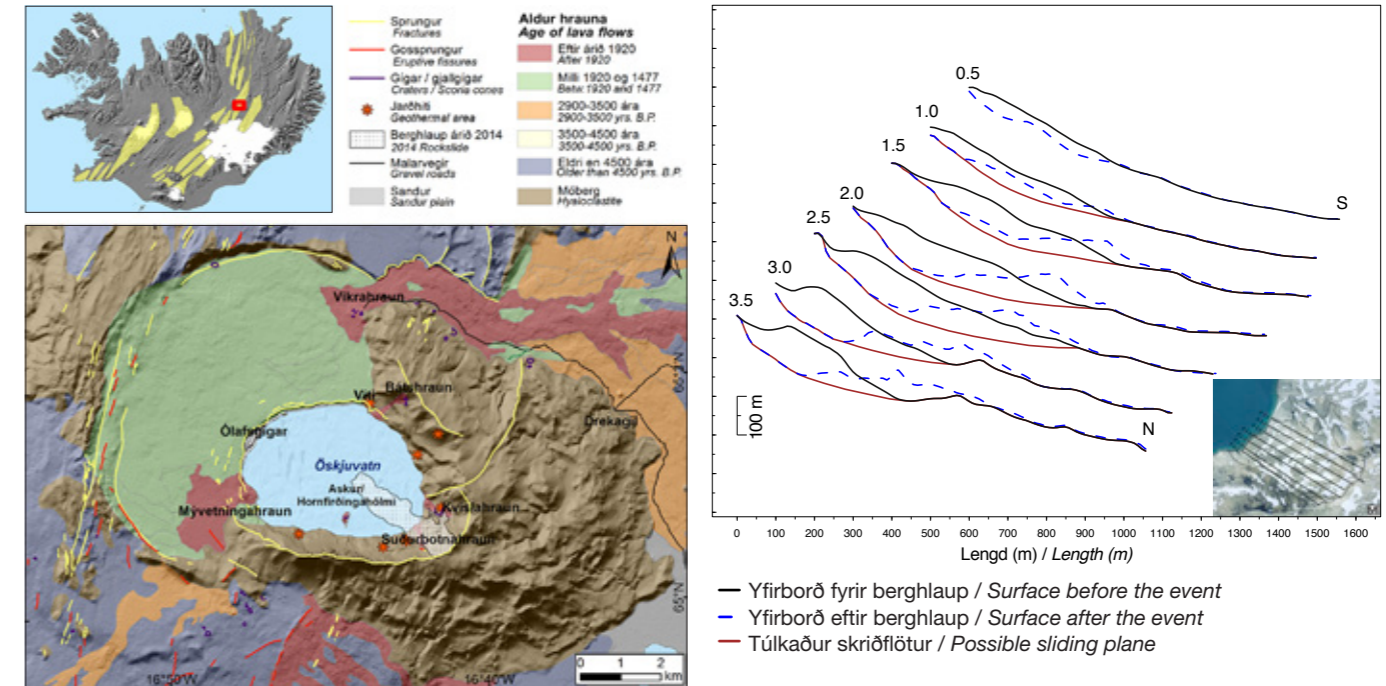


5. mynd. Sprungur við brún Öskju ofan Suðurbotna sumarið 2013 sýna að þar var þá komin hreyfing á jarðlög sem hlupu fram tæpu ári síðar. – Fissures in the mountain above Suðurbotnar in the summer of 2013 show that movement within bedrock had already started some years prior to the rockslide. Ljós-/Photo: Joel Ruch, 25.8. 2013.

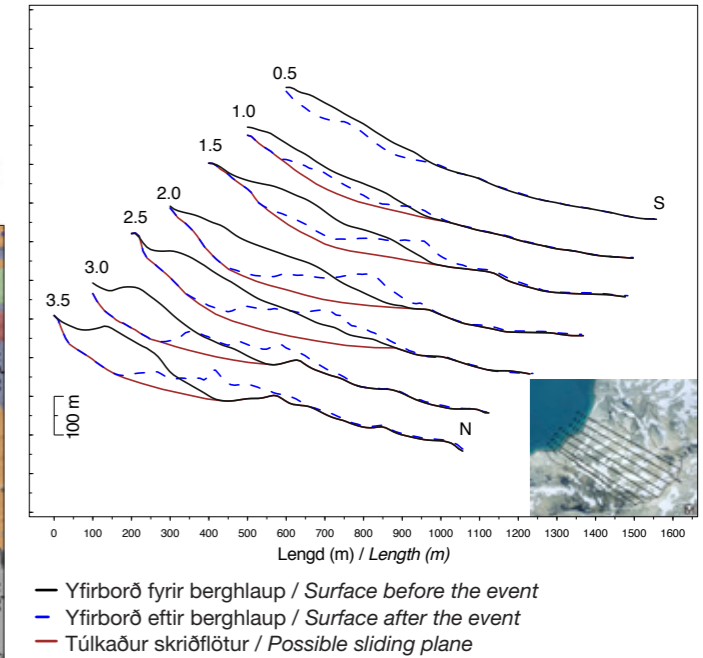
borðshækkun um 80–90 cm. GPS-mælingar á vatnsborði í vettvangsferðum 24. júlí og 4. ágúst sýna hækkun um 31 ± 5 cm á þessu tímabili. Gera má ráð fyrir að berghlaupsurðin á botni vatnsins sé mettuð vatni og að rúmmál hennar, sem reiknað er út frá rúmmáli vatns sem hún ryður frá sér, sé því ekki sambærilegt við mælingar á rúmmáli jarðlaga sem brotnuðu frá öskjubrúninni við berg-hlaupið né á rúmmáli hlaupurðarinnar á þurru landi ofan vatnsborðsins. Þar sem flatarmál Öskjuvatns er um $11,7 \text{ km}^2$ má út frá hækkun botnsins reikna að rúmmál fasts efnis í hlaupurðinni í vatninu (án tillits til grops) sé um $7,5$ milljónir m^3 . Það samvarar um $8,8$ milljónum m^3 af bergi á upptakasvæði berg-hlaupsins (15% grop) en $10,7$ milljónum m^3 í urðinni þar sem berghlaupið nam staðar á þurru landi (30% grop).

Landlíkan frá því fyrir hlaupið sýnir að hlíðin var þá að meðaltali hærri en eftir hlaupið og munar þar samtals um $7,7$ milljónum m^3 yfir upptakasvæðið og berghlaupsurðina. Landlíkðin sýna mestan hæðarmismun við brún öskjuunnar þar sem hlíðin lækkaði um allt að 120 m. Fremst í hjallanum sem myndadist við hlaupið hefur landið hækkað um allt að 90 m. Þegar mat á skriðfletinum er dregið frá mældri landhæð eftir berg-hlaupið fæst rúmmálið $10,3$ milljón m^3 á þeim jarðlögum sem komust á hreyfingu og staðnæmdust ofan vatnsborðs. Þegar skriðflöturinn (og landhæð fyrir hlaupið neðan hans) er hins vegar dreginn frá mældri landhæð fyrir berghlaupið fæst rúmmálið $18,2$ milljón m^3 fyrir þau jarðlög sem féllu úr upptakasvæðinu. Þessar tölur eru talsverðri óvissu háðar vegna þess að skriðflöturinn gæti legið dýpra,

og einnig má hugsa sér hærri tengingar við landið neðan meginupptakasvæðisins. Erfitt er að leggja mat á þessa óvissu en gíska má á ± 3 milljónir m^3 . Að teknu tilliti til hlaupungunnar neðan vatnsborðs er heildarrúmmál efnis sem komst á hreyfingu því metið um 21 – 22 milljónir m^3 af berghlaupsurð með 30% gropi en $17,5$ – 18 milljónir m^3 af bergi á upptakasvæði berghlaupsins með 15% gropi. Að teknu tilliti til óvissunnar má því segja að rúmmál berghlaupsins sé um 20 milljón m^3 hvort sem litið er til upprunalegra jarðlaga sem komust á hreyfingu eða hlaupurðar á þurru landi, með óvissu upp á nokkrar milljónir m^3 . Rúmmál berghlaupsins kann að vera meira ef skriðflöturinn hefur legið neðar en eins og áður segir eru ekki um það neinar vísbendingar. Tölur um rúmmál tungunnar í vatninu,



6. mynd. Jarðfræðikort sem sýnir útlínur berghlaupsins, sprungur og aldur hrauna sem runnið hafa eftir að jökla leysti á svæðinu. Útlínur og aldur hrauna eru frá Guðmundi E. Sigvaldasi ni o.fl.,¹² sprungur eru frá Ástu Rut Hjartardóttur o.fl.¹³ og upplýsingar um jarðhita eru frá Árna Hjartarsyni og Kristjáni Sæmundssyni.¹⁴ Vegir eru úr IS50-gagna-grunni Landmælinga Íslands, TanDEM-X-hæðarlíkanið í bakgrunni er frá Þýsku geimferðastofnuninni (DLR). – Geological map showing the outline of the rockslide, fractures and age of postglacial lava flows. Outlines and ages of lava flows are from Sigvaldason et al.,¹² fractures, eruptive fissures and craters are from Hjartardóttir et al.¹³ and information on geothermal areas are from Hjartarson and Sæmundsson.¹⁴ The roads are from the IS50 database of the National Land Survey of Iceland and the TanDEM-X digital elevation model is from the German Space Agency (DLR).



7. mynd. Langsnið sem sýna landhæð ofan vatnsborðs Öskjuvatns samkvæmt landlíkðinum fyrir og eftir berghlaupið. Einnig er sýndur skriðflöturinn sem berghlaupið brotnaði um og rann á samkvæmt túlkun á grundvelli lögunar skriðflatarins þar sem hann er ber ofan um 1.250 m y.s. og halla lands neðan 1.100 – 1.150 m y.s., þar sem berghlaupsurðin virðist einungis vera þunn sliki ofan á fyrri landi. – Longitudinal sections from DEMs of the rockslide area from before (black curves) and after (blue dashed curves) the slide, above of the lake water level. The sliding surface (redish curves) is interpreted based on the slope of the debris-free mountainside above ca. 1.250 a.s.l., after the event, and below 1.100 – 1.150 a.s.l., in areas where the debris cover appears to be a thin layer covering the surface of the slope prior to the event.

urðarinnar á landi og hlaupsins í heild eru teknar saman í töflu 1, að gefnum mismunandi forsendum um grop. Í hverri línu er ein rúmmálastala byggð á mælingum en hinar tvær eru reiknaðar út frá mati á gropi jarðlaga.

Þegar berghlaupið féll var rekið þétt net jarðskjálftamæla í og við Öskju og hafa gögn um skjálfta og óróa í tengslum við hlaupið verið greind og lagt mat á rúmmál, skriðlengd og hraða hlaupsins á grundvelli skjálftamælinganna.²⁴ Niðurstöður þessarar greiningar um rúmmál (35 – 80 milljónir m^3) og skriðlengd massamiðju (1260 ± 250 m) eru ekki í samræmi við mælingarnar sem gerðar voru á vettvangi og lýst er hér að ofan, og hraðinn sem reiknast ($7 \pm 0,7 \text{ m s}^{-1}$) er ekki sérlega trúverðugur þegar litið er til fallhæðar berghlaupsins og skriðlengdar.

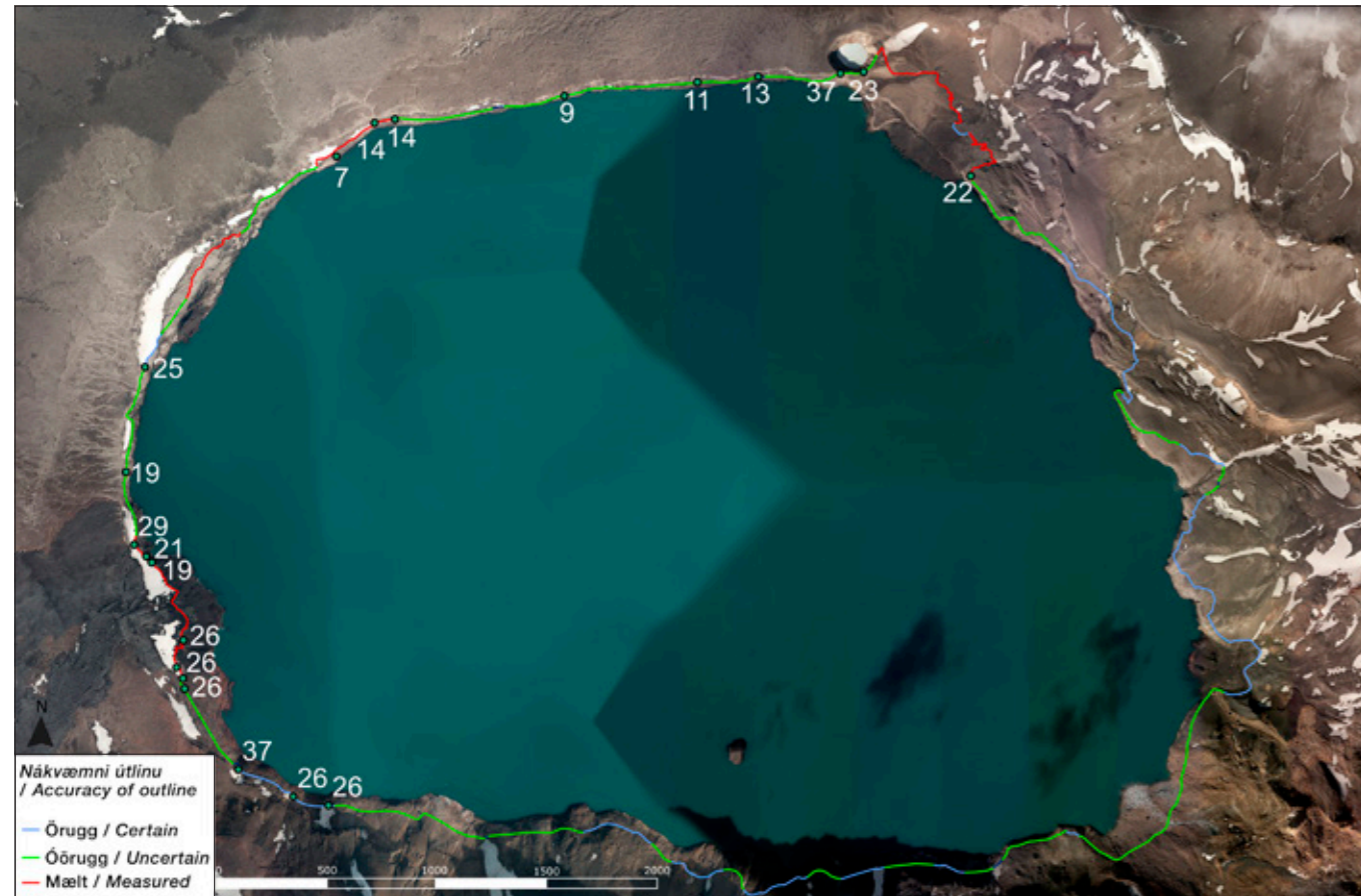
FLÓÐBYLGJAN

Mörk flóðbylgjunnar á bökkum Öskjuvatns eru sýnd á korti á 8. mynd. Svo heppilega vill til að þegar berg-hlaupið varð lágu snjóskafar enn á við og dreif umhverfis vatnið. Flóðbylgjan skildi eftir sig svartan sand og vikur á sköflunum og víða reyndist því auðvelt að mæla hæð bylgjunnar á þeim. Flóðbylgjan náði víða 20 – 40 m hæð umhverfis vatnið og virðist hafa risið upp í um 60 m hæð í gili nokkru norðan Kvislahrauns en í allt að 70 – 80 m hæð í nokkrum giljum við suðurströnd vatnsins þar sem landslag við ströndina hefur trúlega magnað upp ölduna. Bylgjan gekk lengst um 400 m inn á flatlendið suðaustan við Víti, yfir 300 m í Kvislahrauni, yfir 200 m í Mývetningahrauni og um 140 m við Ólafsgíga (sjá 3. mynd). Bylgjan olli

víða miklu rofi á bökkum vatnsins og gjörbreytti ströndinni sums staðar, t.d. við Víti eins og sjá má á 9. mynd, og í Mývetningahrauni.

HLAUPURÐIN Á BOTNI ÖSKJUVATNS

Berghlaupsurðin á botni vatnsins var kortlögð með Simrad EM3002-fjölgeislamæli haustið 2014 og eru niðurstöður mælinganna sýndar á 10. mynd. Til samanburðar eru tiltækar mælingar af botni vatnsins frá því áður en hlaupið varð. Þær fóru fram haustið 2012. Í báðum tilvikum stóð Jarðvísindastofnun fyrir mælingunum og var mælt frá báti sem fluttur var á Öskjuvatn með þyrllu. Mælingarnar 2014 sýna að berghlaupstungan liggur til norðvesturs á milli eyjunnar Asks (Hornfirðingahólma) og lítillar eldstöðvar



8. mynd. Efstu mörk flóðbylgju 21. júlí 2014 á bökkum Öskjuvatns samkvæmt GPS- og leysimælingum og greiningu á loftmynd frá 29. ágúst 2014 sem sýnd er sem bakgrunnur (tekin á vegum IsViews-verkefnis Münchenarháskóla). Mæld ummerki eru sýnd með rauðri línu, mörk byggð á túlkun loftmyndar sem talin er nokkuð örugg eru sýnd með blárrí línu en túlkun mörk sem talin eru óviss með grænni línu. Mæld hæð efstu flóðmarka er sýnd með tölum við ströndina á nokkrum stöðum umhverfis vatnið. – The maximum inundation of the tsunami around Lake Öskjuvatn on the 21 July 2014 according to GPS and laser rangefinder binocular measurements, and analysis of an aerial photograph from 29 August 2014, which is shown as background (courtesy of the IsViews project, University of Munich). Red curves show measured tsunami run-up, blue curves show interpretation of the aerial image that is considered certain and green curves more uncertain interpretation. Measured maximum inundation height of the tsunami is shown with labels along the coastline.

1. tafla. Rúmmál berghlaupsins í Öskju 21. júlí 2014 (í milljónum m³). Tölur í svigum eru reiknaðar út frá mati á gropi jarðlaga á upptakasvæði (15%) og í hlaupurð á landi (30%). – The volume of the landslide in Askja on 21 July 2014 (million m³). Numbers in parentheses are computed from estimates of the porosity of the landslide material in the starting area before the landslide was released (15%) and in the debris tongue on land (30%).

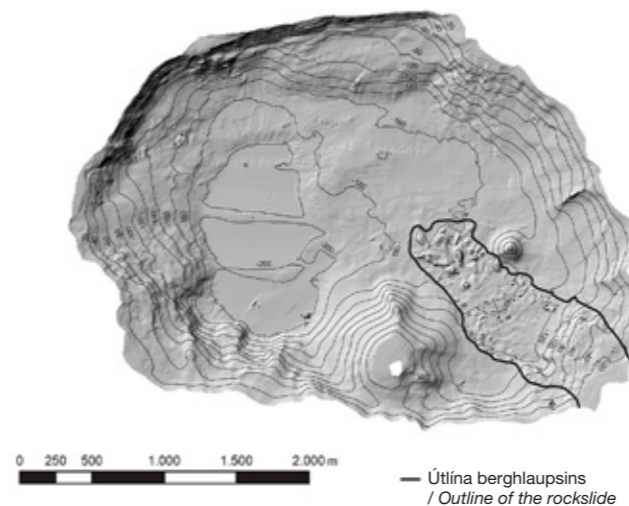
	Ekkert grop / No porosity	15% grop / Porosity	30% grop / Porosity
Tungan í vatninu / The tongue in the lake	7,5	(8,8)	(10,7)
Hlaupurð á landi / Slide debris on land	(7,2)	(8,5)	10,3
Rúmmál efnis sem féll úr upptakasvæðinu / Material released from the starting area	(15,5)	18,2	(22,1)
Summa tungu í vatni og urðar á landi / Sum of tongue in the lake and debris on land	(14,7)	(17,3)	(21,0)

á botni vatnsins. Tungan er víða um 600 m breið, nær um 2,1 km út í vatnið og fremstu 800 m tungunnar eru um 8 m þykkir að meðaltali. Flatarmál tungunnar í vatninu er um 1,1 km² og vatnsdýpið 170 m þar sem mest er. Háir hryggir þar sem urðin er þykkust ná allt að 30 m hæð yfir vatnsbotninum eins og hann var mældur 2012.

Yfirborð berghlaupstungunnar á vatnsbotninum er mjög óreglulegt og víða má sjá stór bergstykki sem ekki hafa brotnað upp heldur borist með hlaupinu og staðnæmst í stórum hrönnum þar sem mörgum slíkum bergstykkjum ægir saman. Berghlaupið sveigir til vesturs niður að dýpsta hluta vatnsins og þynnist þar mjög. Framarlega í urðinni sést þyrping af stórum flekum sem eru allt



9. mynd. Gríðarlegar breytingar hafa orðið á strandlínu Öskjuvatns af völdum flóðbylgjunnar, eins og sjá má á ljósmyndum af tunganum við Batahraun fyrir (t.v.) og eftir (t.h.) berghlaupið. – Dramatic changes occurred along the shoreline of Lake Öskjuvatn as a consequence of the tsunami, as can be seen on photographs of the spit near Batahraun lava, before (left) and after (right) the rockslide. Ljós./Photos: Ármann Höskuldsson, 18.9. 2012; Sveinn Brynjólfsson, 24.7. 2014.



10. mynd. Berghlaupstungan á botni Öskjuvatns samkvæmt fjölgeisla-mælingu Ármanns Höskuldssonar á Jarðvísindastofnun í ágúst 2014 (skyggt landlíkan). – The rockslide tongue on the bottom of Lake Öskjuvatn according to a multibeam survey of Ármann Höskuldsson at the University of Iceland (shading of the lake bottom DEM).

að 150 m langir, 70 m breiðir og 25 m þykkir. Ofar er tungan fremur óregluleg (e. hummocky), með stórum hólum, gördum og rásum þvert á rennslisstefnunna. Landformin verða stærri eftir því sem fjær dregur upptökunum. Í heildina er berghlaupið rúmlega 3.200 m að lengd í láréttu plani og heildarfallhæðin um 520 m, þar af 350 m ofan vatnsborðs og um 170 m neðan þess.

Ekki er unnt að áætla rúmmál berghlaupstungunnar á vatnsbotninum nákvæmlega með beinum samanburði á fjölgeisla-mælingunum frá 2012 og 2014 vegna þess að mælingin 2012 nær ekki til nema hluta svæðisins sem tungan þekur og vatnsbotninn þar fyrir hlaup er því ekki þekktur með nægilegri nákvæmni. Fjölgeisla-mælingarnar sýna ekki aðrar

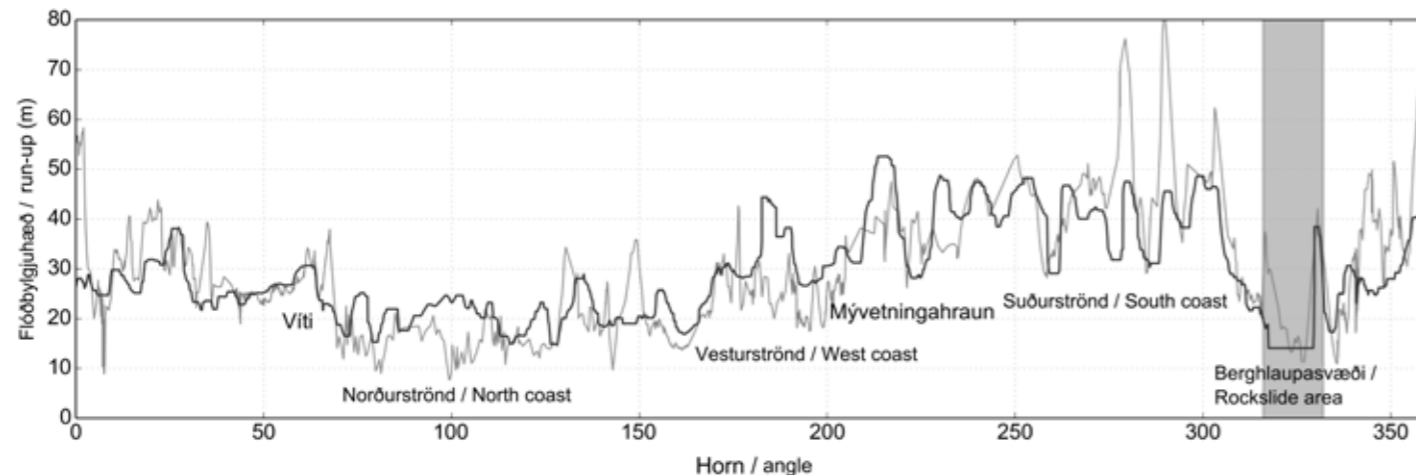
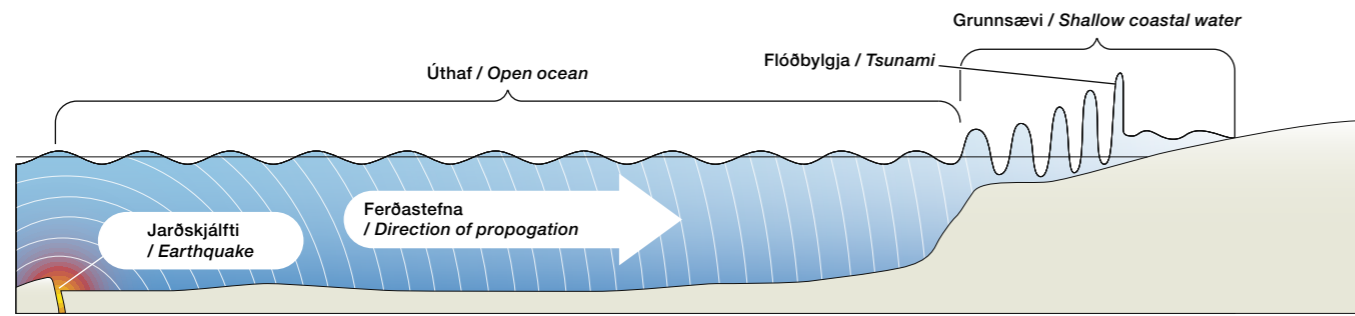
berghlaupstungur á botni vatnsins og benda því til þess að ekki hafi fallið stór hlaup úr öskjubörmunum á þessu svæði frá gosinu 1875 þegar þykkur vikur lagðist yfir stóran hluta þess. Hins vegar sýnir botnkortið nokkrar hrauntungur, þ.e. tungur Batahrauns í norðausturhluta vatnsins og Mývetningahrauns í suðvesturhlutanum. Framhlaupstungur í tengslum við gosið 1875 kunna að vera huldar vikri á vatnsbotninum.

FLÓÐBYLGJUR AF VÖLDUM SKRÍÐUFALLA

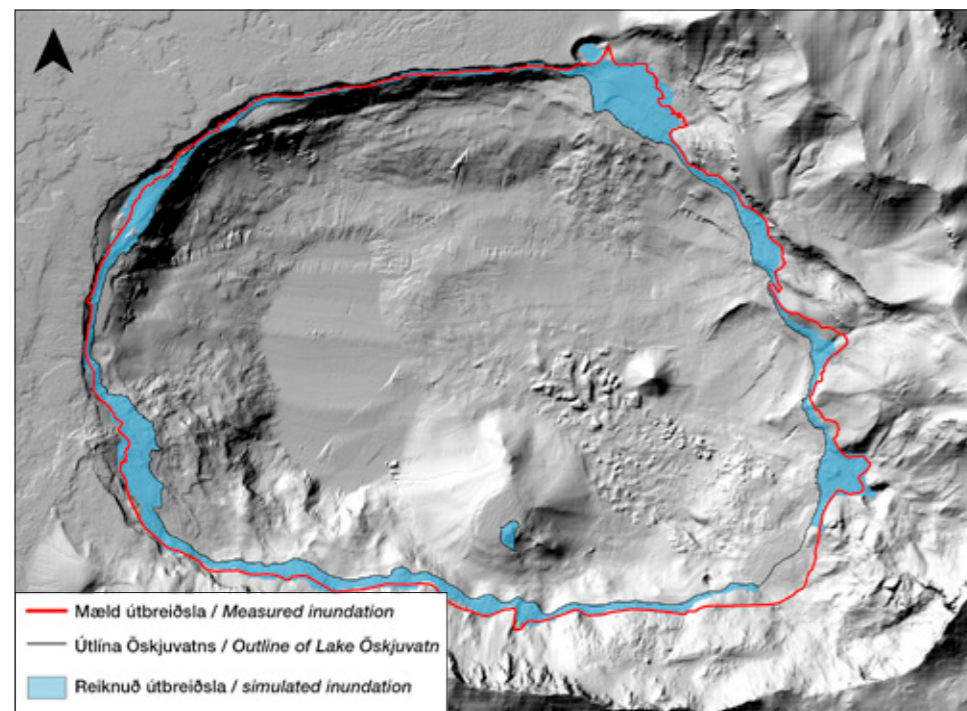
Flóðbylgjur myndast af völdum ýmissa náttúruhamfara, svo sem jarðskjálfta, eldsumbrota, skriðufalla, á landi og neðansjárvar, og snjóflóða.²⁵ Alþjóðlega fræðiheitið er japanska orðið

tsunami, en bein þýðing þess er hafnarbylgja. Flóðbylgjur vegna jarðskjálfta eru tíðar við strendur Japans og annarra landa sem liggja að hafsvæðum þar sem verða stórir jarðskjálftar. Aflögun hafsbotsins við jarðskjálfta veldur því að gríðarlegur massi vatns færir til í einu vetfangi, 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 þannig að hæð öldunnar er óveruleg. Þegar bylgjan kemur á grunnsvævi hægir hún á sér og hækkar þegar sjórinn hleðst upp. Á 11. mynd er einföld teikning af flóðbylgju við strönd. Skriðuföll á hafsbotni hafa valdið miklum flóðbylgjum og er Storgegga-skriðan úr landgrunnsbrún Noregs

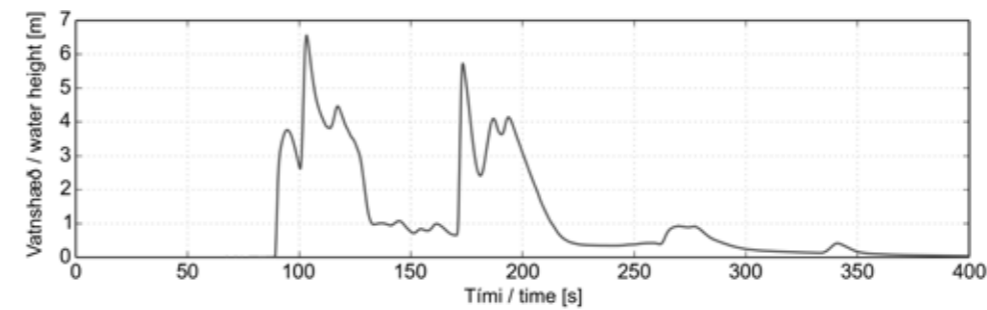
11. mynd. Myndun og útbreiðsla flóðbylgna af völdum jarðskjálfta á hafsbotni. – The formation and spreading of tsunami waves caused by a submarine earthquake. Mynd/Fig.: Encyclopaedia Britannica 2006.



12. mynd. Mæld og metin (ljósgrá lína) og reiknuð (svört lína) hámarks hæð flóðbylgju hringinn í kringum Öskjuvatn rangsælis frá austri. Berg-hlaupssvæðið er skyggt og þar kann að gæta ónákvæmni í reikningunum. – Measured/estimated (grey curve) and simulated maximum inundation (black curve) as a function of the angle in the counter clockwise direction from the east around Lake Öskjuvatn.



13. mynd. Hámarksútbreiðsla flóðbylgjunnar 2014 samkvæmt GeoClaw-reikningum. Land sem fer undir flóðbylgju sýnt með bláum lit. Rauð lína sýnir mæld og metin útmörk flóðbylgjunnar. – Simulated maximum inundation of the Lake Öskjuvatn tsunami in 2014 (blue areas). The red curve shows the measured/estimated maximum inundation and the black curve the outline of the lake.



14. mynd. Reiknuð vatnshæð sem fall af tíma á ströndinni neðan Vítis samkvæmt GeoClaw-reikningum. – Modelled water height as a function of time at the shoreline near Viti according to GeoClaw simulations.

fyrir rúmum 8.000 árum eitt þekktasta dæmið um slíkt hlaup. Hún er talin hafa verið um 3.000 km³ að rúmmáli.²⁶ Flóðbylgjan af hennar völdum mun hafa verið 15–20 m há í Færeyjum og kann að hafa verið um 5 m á Austfjörðum.^{27,28}

Skriðuflóðbylgjur verða við það að skriða fellur í vatn eða sjó. Ekki hefur verið talin stafa mikil hætta af þeim á Íslandi. Álitid er að stórar skriður eða berg-hlaup falli í sjó fram einu sinni til tvisvar á hverri þúsöld hér á landi þótt ekki séu heimildir um það á sögulegum tíma.²⁹ Berg-hlaupið á Steinsholtsjökul í janúar 1967^{4,5} féll niður í lón framan við jökulinn og olli flóðbylgju sem barst marga kílómetra niður Steinsholtsdal og kom fram sem hlaup í Krossá og Markarfljóti. Hins vegar hafa flóðbylgjur af völdum snjóflóða sem ganga í sjó fram valdið nokkrum skemmdum bæði á Suðureyri við Súgandafjörð og á Siglufirði og einnig eru dæmi um slíkar bylgjur af völdum skriðufalla á Eskifirði. Flóðbylgjur frá ofanflóðum eru yfirleitt töluvert minni en stórar bylgjur sem jarðskjálftar valda en áhrifin geta verið mjög mikil í nágrenni farvegans. Í Noregi hafa skriður valdið stórum flóðbylgjum þegar þær ganga út í þrönga firði eða stöðuvötn. Á síðustu öld létust samtals 174 í þremur tilvikum, í Loen 1905 og 1936 og í Tafjord 1934.^{30–34}

Þekkt eru fjölmörg tilvik um flóðbylgjur frá skriðufalli í stöðuvötn. Eitt það þekktasta varð í Vajont-lóninu á Ítalíu árið 1963.³⁵ Skriða féll í uppistöðulónið og olli 250 m hári flóðbylgju sem fór yfir stífluegginn og grandaði um 2.000 manns í þorpum neðan stíflunnar. Ein stærsta þekkt flóðbylgja af völdum berg-hlaups í sjó

fram á sögulegum tíma varð í Lituya-flóa í Alaska árið 1958. Þá hlupu rúmlega 30 milljónir m³ skriðufellis út í fjörðinn og komu af stað gríðarlegri flóðbylgju sem skoladist upp í allt að 520 m h.y.s. í hlíðinni gegnt upptökum hlaupsins.^{36,37} Nokkur berg-hlaup á Grænlandi hafa valdið flóðbylgjum á seinni árum, nú síðast í júní 2017 við Uummannaq-fjörð norðan Qeqertarsuaq-eyju (Diskóey, Bjarney) þar sem mikið tjón varð í þorpinu Nuugaatsiaq. Á svipuðum slóðum féll árið 2000 um 90 milljóna m³ skriða í sjó fram úr 900–1.400 m hæð í hlíðum Paatuut-fjalls og olli mikilli flóðbylgju sem sópaði burt nokkrum húsum í hinum yfirgefna námubæ Qullissat á Qeqertarsuaq handan fjarðar þegar hún óð 250 m inn á land upp í um 30 m hæð yfir sjávarmáli.³⁸ Nánari upplýsingar um flóðbylgjur af völdum jarðskjálfta og skriðufalla er meðal annars að finna í nokkrum greinum og skýrslum í heimildalista aftan við þessa grein.^{26,39–42}

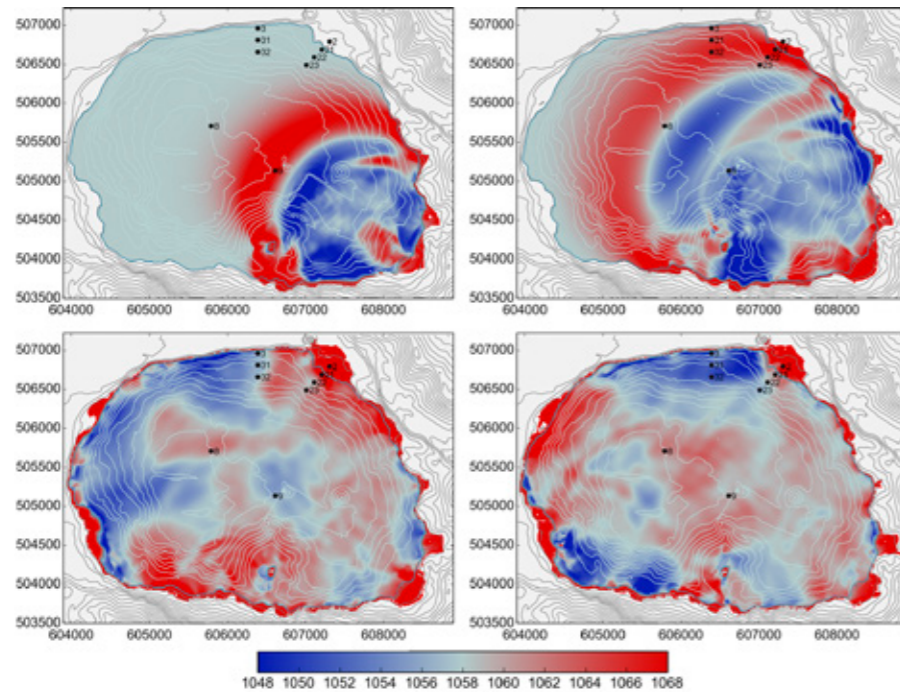
HERMUN FLÓÐBYLGJUNNAR

Til þess að öðlast frekari innsýn í atburðarásina þegar berg-hlaupið féll í Öskjuvatn var myndun og útbreiðsla flóðbylgjunnar reiknuð með hugbúnaðinum GeoClaw,⁴³ sem er gerður til þess að herma flæði grunns vökva, með viðbótum sem taka tillit til tvístrunar bylgna.⁴⁴ Hugtakið tvístrun felur í sér að bylgjur með mismunandi bylgjulengd ferðast með ólíkum hraða, og í þessu tilfelli reynist mun betra samræmi milli mælinga og líkanreikninga þegar tekið er tillit til tvístrunar. Í reiknilíkaninu er berg-hlaupinu lýst sem aflögun á botni vatnsins, þ.e. vatnsbotninn er hækkaður sem nemur þykkt hlaups-

ins og þar með lyftist vatnið og bylgjur fara af stað, svipað og lýst er í kafla um flóðbylgjur hér að framan. Berg-hlaupið rennur niður í vatnið fyrir tilstilli þyngdarafllsins og tapar orku vegna núnings við botn og víxlverkunar við vatnsmassann. GeoClaw-hugbúnaðurinn reiknar hvernig aflögun botnsins myndar bylgjur á yfirborðinu og hvernig bylgjurnar ferðast yfir vatnið og ganga á land umhverfis það.

Ummerki berg-hlaupsins og flóðbylgjunnar í Öskjuvatni voru kortlögð (8. mynd) og gefa mælingarnar nokkuð góða mynd af hámarksútbreiðslu flóðbylgjunnar hringinn í kringum vatnið og af breidd og rúmtaki þess hluta skriðunnar sem gekk út í vatnið, sem og stefnu hennar. Meiri óvissa er um hraða og þykkt skriðunnar þegar hún skall á vatnsfletinum. Með því að bera niðurstöður reiknilíkansins um hámarksútbreiðslu flóðbylgjunnar saman við mælingar mátti stilla hraða, stefnu og þykkt þannig að samsvörunin væri sem best.⁴⁵ Líkanið var keyrt fyrir margar mismunandi samsetningar af stikum, þ.e. upphafshraða (U_0), stefnu (q) og þykkt (D), en innan skilgreindra marka, og valin þau gildi sem gáfu minnst frávik frá mældri útbreiðslu ($U_0 = 33$ m/s, $q = 300\text{--}305^\circ$ (VNV) og $D = 36$ m). Á 12. mynd sést hvernig reiknaðri og mældri hæð bylgjunnar ber saman hringinn í kringum vatnið.

Samanburður reiknaðrar og mældrar útbreiðslu flóðbylgjunnar er sýndur á korti á 13. mynd. Samræmið er í flestum tilfellum mjög gott en sums staðar gengur bylgjan ívið lengra á land samkvæmt líkaninu. Hér þarf þó að hafa í huga að kvörðun líkansins byggist á



15. mynd. Flóðbylgja á Öskjuvatni 60, 90, 180 og 270 sekúndum eftir að berghlaupið kastast út í vatnið samkvæmt GeoClaw-reikningum (litir sýna hæð vatnsborðs í metrum). – Tsunami waves in Lake Öskjuvatni, 60, 90, 180 and 270 s after the rockslide entered the lake according to GeoClaw simulations (the colours indicate water level in metres).

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 lítills misræmis í hæð. Þetta er tilfellið á ströndinni við Víti og Ólafsgíga.

Hermun flóðbylgjunnar sýnir 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, er ekki endilega sá hæsti sem gengur á land. Þvert á móti ná endurköstin oft lengst. Á 14. mynd sést vatnshæðin á ströndinni við Víti sem fall af tíma og á henni kemur glögg fram að seinni bylgjufaldarnir eru hærri en sá fyrsti. Annar faldurinn í röðinni er hæstur. Hæð stærstu bylgjufaldanna hleypur frá 4 upp í 8 m og er ljóst að illa hefði farið hefðu ferðamenn staðið nærri ströndinni. Viðbragðstíminn hefði orðið stuttur, því að það tekur fyrstu bylgjuna um eina og hálfu mínútu frá því hlaupið fellur að ná ströndinni við Víti.

Athyglisvert er að bylgjan skolast mun hærra 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 Vatnajökulsþjóðgarðs á orði að þessi munur væri eitt af mörgu sem vakið hefði athygli þeirra þegar þeir komu að Öskjuvatni eftir berg-hlaupið og skoðuðu ummerkin. Þarna sýna mælingar 3–4 sinnum meiri hæð efsta bylgjufalds við Víti en á nokkrum stöðum vestan Vítis þar sem bylgjan náði skemmst á land, sbr. 12. mynd. Líkanreikningarnir sýna verulegan mismun milli þessara staða og reiknast flóðbylgjan um tvöfalt hærri við Víti en þar sem hún er lægst vestan Vítis. Munurinn er þó ekki jafnmikill og mælingarnar gefa til kynna.

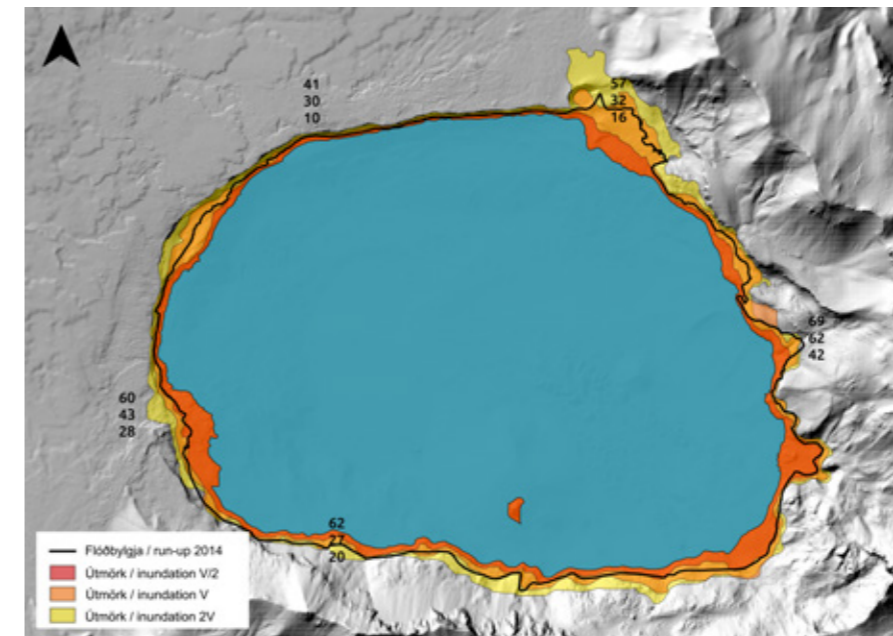
Hið flókna bylgjumynstur á vatninu er sýnt á kortum á 15. mynd þar sem reiknuð hæð flóðbylgjunnar á mismunandi tímum eftir að skriðan gengur út í vatnið er teiknuð.

HÆTTUMAT

Til þess að athuga hvar ferðamönnum stafar mest hættu af flóðbylgjum á Öskjuvatni voru afmörkuð fjögur hugsanleg upptakasvæði skriðu-falla úr hlíðunum umhverfis vatnið

sunnan- og suðaustanvert. Bylgjur af völdum hlaupa af mismunandi stærð voru reiknaðar með líkani (sjá nánar í skýrslu um hættumatid³). Vegna óvissu um stærð mögulegra berghlaupa var farin sú leið að reikna í hverju tilviki fyrir þrjár mismunandi stærðir, hálftrúmmál berghlaupsins í júlí 2014 (V/2), sama trúmmál (V) og tvöfalt trúmmál (2V).

Samandregnar niðurstöður þessara líkanreikninga eru sýndar á 16. mynd þar sem hámarksútbreiðsla flóðbylgju fyrir hverja stærð skriðu er afmörkuð með mismunandi litum. Helmingi minna berghlaup en það sem átti sér stað í júlí 2014 virðist geta valdið töluverðum usla við strandlínuna umhverfis vatnið og sums staðar er hugsanlegt að útbreiðsla flóðbylgjunnar yrði jafnmikil og þeirrar sem gekk yfir vatnið 2014 (svæði með rauðum lit á myndinni). 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 eina og hálfu mínútu að ná Vítisströndinni og eftir það ganga margir bylgjutoppar af svipaðri hæð á land.



16. mynd. Reiknuð efstu mörk flóðbylgju á bökkum Öskjuvatns. Rautt svæði sýnir hámarksútbreiðslu flóðbylgna af völdum helmingi minna berghlaups en í júlí 2014 (V/2), appelsínugult sýnir útbreiðslu frá jafnstóru hlaupi (V) og gult útbreiðslu frá tvöfalt stærra hlaups (2V). Reiknuð mesta 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 trúmmál sem er helmingur (neðst), jafnstórt (miðja) og tvöfalt (efst) á við berghlaupið í júlí 2014. Svört lína sýnir mælda og metna hæð flóðbylgjunnar í júlí 2014. – Simulated maximum inundation of tsunami waves along the shoreline of Lake Öskjuvatni. Red areas show inundation for a rockslide half the size of the slide in July 2014 (V/2), orange areas inundation caused by a slide of same size as in 2014 (V), and yellow areas inundation caused by a slide twice the size as in 2014 (2V). Maximum run-up in metres is shown at several locations along the shoreline, for a rockslide half the size (top), same size (middle) and twice the size (bottom) as in 2014. The black curve shows the measured/estimated run-up of the tsunami in July 2014.

Líkleg hámarksútbreiðsla flóðbylgju af völdum berghlaups af svipaðri stærð og í júlí 2014 er sýnd með appelsínugul lit á myndinni. Það er nokkuð háð stað berghlaupsins hvar áhrifanna gætti mest en austur- og vesturströnd vatnsins liggja verst við. Það er vegna nálægðar við upptakasvæði en ekki síður vegna þess hversu aflíðandi ströndin þar er í samanburði við suður- og norðurströndina. Vítisströndin liggur mjög illa við flóðbylgjum af völdum berghlaups úr suðausturbarminum og er það aflíðandi að vatnið getur gengið mjög langt á land. Það tekur flóðbylgjuna eina til hálfu aðra mínútu að ná ströndinni við Víti. Það er misjafnt hvort fyrsti bylgjufaldurinn er hæstur eða einhver hinna sem á eftir koma en í öllum tilvikum fylgja margar stórar bylgjur í kjölfar þeirrar fyrstu. Flóðbylgjan við Víti nær víða upp í 30–40 m hæð yfir yfirborð vatnsins.

Flóðbylgja af völdum skriðu tvöfalt stærri en þeirrar sem féll 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. Ferðamönnum við Víti stafaði

augljóslega mikil hættu af slíkri bylgju. Flóðbylgjan næði að ströndinni þar eftir um mínútu og upp yfir brún Vítis eftir um hálfu aðra mínútu. Þegar vatnið kemur yfir brúnina rennur það undan halla yfir 200 m til norðurs í átt að bílastæðinu við Vikraborgir en vatnsdýptin yrði víðast hvar minni en 1 m. Fyrsti bylgjufaldurinn yrði langhæstur 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 hripaði niður um sprungur, sem gæti hamlað útbreiðslu bylgjunnar.

Ljóst er að berghlaup og flóðbylgjur af þeirra völdum geta skapað mikla hættu fyrir fólk sem stadd er í Öskju. Í hættumati sem unnið var í framhaldi af berghlaupinu í júlí 2014³ er þó komist að þeirri niðurstöðu að áhætta sem fólk er búin af völdum berghlaups í Öskju sé ekki mikil þegar tillit er tekið til þess hversu sjaldgæf hlaupin eru og til þess að fólk staldrar alla jafna stutt við á svæðinu. Tilefni er engu að síður til ákveðinna aðgerða til þess að draga úr slysaættu fyrir þá sem oft eiga leið um svæðið.

Þessar aðgerðir hafa jafnframt þann kost að draga stórlega úr líkum á hópsslysum, sem einnig er rétt að huga að. Með þeim aðgerðum virðist ljóst að unnt sé að stytta tímann sem fólk dvelst á hættusvæðinu að minnsta kosti tífalt og má ætla að áhætta bæði ferðamanna og annarra verði þá viðunandi þegar miðað er við áhættuna sem lögð er til grundvallar í hættumati vegna ofanflóða hér á landi.⁴⁶

Á sérstöku hættumatskortu sem fylgir hættumatinu frá 2016 eru afmörkuð 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. Þar þarf að forðast að setja upp fræðsluskilti eða koma upp aðstöðu sem ferðafólk staðnæmist við. Þetta svæði miðast við flóðbylgju af völdum berghlaups sem er allt að því jafnmikið og hlaupið 2014. Hins vegar er skilgreint viðbúnaðarsvæði sem svarar til allt að tvöfalt stærri hlaups. Þar er rétt að vara við umferð ef vísbendingar eru um yfirvofandi hlaup, svo sem ef vart verður við sprungumyndun eða hreyfingu á jarðlögum nærri öskjubrúnni eða í kjölfar mikilla jarðskjálfta nærri Öskju sem ástæða er til að óttast að geti leitt til berghlaups.

Auk svæðisins þar sem flóðbylgjan skapar hættu er rétt að huga að hættu á upptakasvæðum og í farvegum hugsanlegra berghlaupa og loks í hlaupurðinni sjálfri frá 2014. Þar kann að skapast hætta af völdum óstöðugra jarðlaga eða grjóthruns og eru þessi svæði einnig afmörkuð á hættumatskortinu.

ÖNNUR NÁTTÚRUVÁ

Að lokum er rétt að fara hér nokkrum orðum um aðra náttúruvá á svæðinu við Öskjuvatn. Eldgos í Öskju er augljós ógn við þá sem þar eru staddir þegar gos hefst. Ummerki um gjóskuhlaup frá 1875 og heimildir um það gos⁴⁷ benda til þess að allir sem staddir eru innan meginöskjunnar séu í bráðri lífshættu í upphafi slíks goss. Fólki gefst mjög lítill tími til þess að forða sér sökum þess hversu skyndilega gos af þessum toga geta hafist, nema menn geti brugðist við áður en gosið byrjar. Því skiptir miklu máli að unnt sé að vara við slíku gosi fyrirfram. Einungis eitt sprengigös er þekkt í Öskju á nútíma annað en gosið 1875⁴⁷ og því má gera ráð fyrir að áhætta fyrir ferðamenn af völdum stórs sprengigoss sé vel viðunandi, eins og í tilvikí flóðbylgju. Einstaklingsáhætta fyrir starfsmenn Vatnajökulshjódgarðs og aðra starfsmenn við rannsóknir eða ferðapjónustu, sem stundum dveljast á svæðinu marga daga á hverju sumri, er líklega einnig viðunandi en þó ekki fjarri mörkunum sem miðað er við í ofanflóðahættumatinu.

Útbreiðsla gjóskuflóðsins 1875 takmarkaðist við meginöskjuna með lítilsháttar flæði yfir öskjubrúnina til suðvesturs.⁴⁷ Í slíku gosi nær hættan sem fólki er búin því ekki til bílastæðisins við Vikraborgir þar sem lagt er upp í gönguferðir inn í Öskju, né heldur til skálasvæðisins við DrekaGil, en við enn meira gos gæti þurft að hafa áhyggjur af fólki þar líka. Líkur á slíku gosi eru væntanlega talsvert minni en á gosi af sömu stærð og 1875 og áhætta sem reiknast af völdum stórgoss af þeim toga fyrir menn er því hverfandi.

Hætta á hópslysi af völdum sprengigoss er líklega svipuð eða jafnvel meiri en við berghlaup og flóðbylgju af völdum þess, vegna þess að hættan nær til miklu stærra svæðis þar sem allir þeir dveljast sem um Öskju fara í allmargar klukkustundir í hverri heim-

sókn. Því er jafnbrýnt að huga að hættu í tengslum við eldgos og berghlaup þegar gerð er áætlun um viðbúnað til þess að tryggja öryggi fólks sem fer um eða starfar í grennd við Öskju. Mikilvæg-asta öryggisráðstöfunin er eftirlitskerfi sem gerir kleift að greina forboða um að eldgos sé að hefjast ásamt áætlun um rýmingu svæðisins sem þá kann að vera í hættu. Líklegt er að eldgos í Öskju hafi nokkurn aðdraganda og að hans verði vart á jarðskjálftamælum og með ýmsum öðrum forboðum, þannig að forða megi fólki af svæðinu með góðum fyrirvara. Slíkur fyrirvari gefst að öllum líkindum ekki fyrir berghlaup og flóð-bylgju og því er dreifing upplýsinga og viðvarana til ferðafólks og annarra sem um Öskju fara mikilvægari í viðbúnaði vegna flóðbylgjunnar.

UMRÆDA

Berghlaupið í Öskju í júlí 2014 er eitt mesta berghlaup á sögulegum tíma á Íslandi, að þeim undanteknum sem kunna að hafa fallið meðan á eldgosi stóð. Upptök hlaupsins voru í brún öskjunnar suðaustanverðrar en mælingar á jarðskorpuhreyfingum sýna að askjan er enn að síga eftir gosið 1875 og veldur það spennubreytingum í bergi og óstöð-ugleika á misgengjum. Hægfara hreyf-ing virðist hafa verið á berginu í brún öskjunnar að minnsta kosti frá árinu 2007. Berghlaupið gekk út í Öskjuvatn og kom af stað flóðbylgju sem skolað-ist tugi metra upp á bakkana í kringum vatnið. Líkanreikningar sýna flókið samspil í bylgjuhreyfingu á vatninu þar sem bylgjur sem endurkastast frá bökk-unum samliðast bylgjum sem berast frá ströndinni þar sem berghlaupið féll. Reikningarnir gera kleift að meta hættu-svæði við vatnið af völdum berghlaupa af mismunandi stærð frá nokkrum hugsanlegum upptakasvæðum í öskju-börmunum. Niðurstaða hættumats er að áhætta fyrir einstaklinga af völdum berghlaupa í Öskju sé ekki mikil en þó sé tilefni til ákveðinna aðgerða til þess að draga úr slysa hættu fyrir þá sem oft eiga leið um svæðið við Öskjuvatn.

Eðlilegt er að fólk sem fer um Öskju sé varað við hættu á skriðuföllum og flóðbylgjum með áberandi hætti þegar það kemur inn á svæðið og að mælt sé með því að það dveljist 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, svo sem vísindamenn, geta einnig hagað störfum sínum þannig að viðdvöl við vatnið sjálft sé tiltölu-lega skömm. Jafnframt er mælt með því að stofnanir og fyrirtæki með starf-semi á svæðinu geri viðbragðsáætlun vegna starfsmanna sinna og að þeir séu upplýstir um þá hættu sem 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 hættumatskorti og jafnframt svæði sem talin eru varhuga-verð vegna óstöðugra jarðlaga.

Berghlaupið í Öskju og nýfallið fram-hlaup úr Fagraskógarfjalli í Hítardal í júlí 2018, sem var svipað að stærð, eru nýlegar áminningar um hættuna sem felst í stórum berghlaupum og fram-hlaupum hér á landi. Þessi hlaup ollu sem betur fer ekki slysum og tiltölu-lega litlu tjóni. Þau féllu hins vegar bæði á svæðum sem ferðafólk fer oft um og ljóst er að illa hefði farið ef fólk hefði verið þar sem hlaupin féllu eða afleiðinga þeirra gætti. Hætta á stórum framhlaupum kann að fara vaxandi hér á landi með hlýnandi loftslagi, sérstak-lega þar sem sífreri í hliðum þiðnar⁴⁸ og þar sem skriðjöklar hopa hratt.⁴⁹ Þar sem jöklar hopa og þynnast skilja þeir eftir brattar hliðar sem eru ekki í jafnvægi við roföflin. Hliðarnar geta hrunið niður á jöklana, eins og við Steinsholtsjökul í janúar 1967^{4,5} og á Morsárjökul í mars 2007,⁵⁰ í miklum berghlaupum sem ferð-ast jafnvel langt niður fyrir jökulsporð-ana. Hættulegar skriður geta einnig fallið úr bröttum jökulurðum við jökulsporða og jökullón þar sem jöklar hafa hopað. Nú fer miklu fleira fólk en áður um svæði í grennd við hliðar sem geta af þessum ástæðum verið mun óstöðugri en áður. Huga þarf að vísbendingum um óstöð-ugleika í hliðum við hörfandi jökla og þar sem sífreri kann að leynast í bröttu fjalllendi, og vara við skriðuföllum þar sem vísbendingar um yfirvofandi hættu er að finna. Einnig þarf að fylgjast með sprungumyndun og hreyfingu á þekktum sprungum við eldstöðvar og í brattlendi þar sem skriður geta fallið, sérstaklega í grennd við fjölsótta ferðamannastaði.

ABSTRACT

ROCKSLIDE IN ASKJA,

C-ICELAND, ON 21st JULY 2014

A large rockslide fell from the south-eastern rim of the Askja caldera, Central Iceland, in the evening of 21st of July 2014 and into the Öskjuvatn lake. The rockslide covered most of the Suðurbotnahraun lava and reached the edge of the Kvíslahraun lava. The slide caused a tsunami with run-up of 20–40 m at many locations along the shore-line and up to 70–80 m in a couple of places. The tsunami wave propagated hundreds of metres up the flat shore near the Víti crater, in the Kvíslahraun lava, in the Mývetningahraun lava and by the Ólafsgígur craters. Model simulations show that the tsunami run-up along the coast is determined by complicated interference of waves on the lake surface. The rockslide tongue on the bottom of the Öskjuvatn lake is ca. 600 m wide, extends ca. 2.1 km into the lake, and the thickness of the outermost 800 m is ca. 8 m on average. The volume of mobilized material is estimated at ca. 20 million m³. The bedrock around the Öskjuvatn lake is extensively fractured and may be unstable in places. There is a danger of further rockslides near the location of the 2014 slide and also both to the north and to the west of the slide. Rockslides and tsunamis endanger travellers in the Askja Caldera, which is a popular tourist destination. The risk to individuals due to potential rockslides and tsunamis in Askja is, however, not considered very high due to the low frequency of the slides and the fact that people typically do not stay long in the caldera. Nevertheless, precautionary measures are advised to ensure the safety of people visiting the area. Travellers should, for example, not stay long down by the coast. Model simulations indicate that tsunami waves induced by a somewhat larger rock-slide than in 2014 could overtop the northern caldera rim by the Víti crater and flow some distance to the north beyond the rim.

ÞAKKIR

Ofanflóðasjóður og Vatnajökulshjódgarður fjármögnuðu mælingar á hlaupinu og styrktu einnig úrvinnslu gagna og rannsóknir sem á eftir fylgdu. Vinir Vatnajökuls styrktu fjölgeislamælingar á botni Öskjuvatns. Norræna rannsóknarverkefnið NORDRESS og Norska jarðtæknistofnunin, NGI, stóðu að rannsóknum á flóðbylgjunni á Öskjuvatni með Vedurstofu Íslands. Jihwan Kim á NGI er sérstaklega þökkuð aðstoð við GeoClaw-líkanreikninga. Landhelgisgæslan flutti vísindamenn í Öskju í vettvangsferð í júlí 2014 og Þyrluþjónusta Reykjavíkur bát til fjölgeislamælinga á Öskjuvatn í ágúst 2014. Háskólanum í Innsbruck, Fjarkönnun ehf., IsViews-verkefni Háskólans í München og Loftmyndum ehf. er þakkað fyrir samstarf við mælingar á vettvangi og framlag þeirra til loftmyndatöku af berghlaupinu. Það útheimti þrautseigju margra að afla allra þeirra mæligagna sem náðust um hlaupið og ummerki þess. Starfsmönnum Vatnajökulshjódgarðs og mörgum öðrum sem leitað hefur verið til er þökkuð aðstoð við að afla ljósmynda og annarra upplýsinga um berghlaupið en það er ekki sist þeim að þakka að vitneskja um hlaupið og aðdraganda þess er jafn ýtarleg og raun ber vitni. Sveinn Óli Pálmarrson á Verkfræðistofunni Vatnaskilum og Árni Hjartarson á Íslenskum orkurannsóknum veittu aðstoð við mat á grunnvatnsaðstæðum við Öskjuvatn og lögðu til upplýsingar um grip jarðlaga. Halldóri G. Péturssyni á Náttúrufræðistofnun Íslands á Akureyri er þökkuð aðstoð við túlkun mælinga og ljósmynda og gagnlegar samræður.

HEIMILDIR

- Ásta Rut Hjartardóttir 2008. The fissure swarm of the Askja central volcano. MS-ritgerð við Háskóla Íslands, Reykjavík.
- Harpa Grímsdóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason, Tómas Jóhannesson, Kristín Vogfjörð, Hensch, M., Kristín Jónsdóttir, Pfeffer, M.A., 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. Vedurstofa Íslands (HG/2016-01), Reykjavík.
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Eiríkur Gíslason & Tómas Jóhannesson 2016. Hættumat vegna berghlaupa í Öskju. Vedurstofa Íslands (2016-007), Reykjavík.
- Guðmundur Kjartansson 1967. The Steinsholtshlaup, Central-South Iceland on January 15th, 1967. Jökull 17. 249–262.
- Guðmundur Kjartansson 1968. Steinsholtshlaupið 15. janúar 1967. Náttúrufræðingurinn 37. 120–169.
- Árni Hjartarson 1990. Þá hljóp ofan fjallið allt. Náttúrufræðingurinn 60 (2). 81–91.
- Ólafur Jónsson 1942. Öskjuvatn. Náttúrufræðingurinn 12. 58–72.
- Watts, W.L. 1962. Norður yfir Vatnajökul eða Um ókunna stigu á Íslandi (þýð. Jón Eyþórsson). Bókfellsútgáfan, Reykjavík. (Tilv. bls. 115. Frumútg. 1876: Across the Vatna Jökull or Scenes in Iceland: Being a description of hitherto unknown regions, Longmans, London).
- Hartley, M.E. & Þorvaldur Þórðarson 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.
- Graetinger, A.H., Skilling, I.P., McGarvie, D. & Ármann Höskuldsson 2012. Intrusion of basalt into frozen sediments and generation of Coherent-Margined Volcaniclastic Dikes (CMVDs). Journal of Volcanology and Geothermal Research 217–218. 30–38. doi:10.1016/j.jvolgeores.2011.12.008
- Graetinger, A.H., Skilling, I., McGarvie, D. & Ármann Höskuldsson 2013. Subaqueous basaltic magmatic explosions trigger phreatomagmatism: A case study from Askja, Iceland. Journal of Volcanology and Geothermal Research 264. 17–35. doi:10.1016/j.jvolgeores.2013.08.001
- Guðmundur E. Sigvaldason, Annertz, K. & Nilsson, M. 1992. Effect of glacier loading/deloading on volcanism: Postglacial volcanic production rate of the Dyngjufjöll area, Central Iceland. Bulletin of Volcanology 54. 385–392.
- Ásta Rut Hjartardóttir, Páll Einarsson & Haraldur Sigurðsson 2009. The fissure swarm of the Askja volcanic system along the divergent plate boundary of N Iceland. Bulletin of Volcanology 71 (9). 961–975. doi:10.1007/s00445-009-0282-x
- Árni Hjartarson & Kristján Sæmundsson 2014. Berggrunnskort af Íslandi, 1:600:000. Íslenskar orkurannsóknir, Reykjavík.
- Lopez, D.L. & Williams, S.T. 1993. Catastrophic volcanic collapse: Relation to hydrothermal processes. Science 260. 1794–1796.
- Siebert, L. 2002. Landslides resulting from structural failure of volcanoes. Reviews in Engineering Geology, 15. 209–235.

17. Day, S.J. 1996. Hydrothermal pore fluid pressure and the stability of porous, permeable volcanoes. *Bls. 77–93 í: Volcano instability on the earth and other planets* (ritstj. McGuire, W.J., Jones, A.P. & Neuberg, J.). Geological Society (Special publication 110), London.
18. Drouin, V., Freysteinn Sigmundsson, Benedikt G. Ófeigsson, Sigrún Hreinsdóttir, Sturkell, E. & Páll Einarsson 2017. Deformation in the Northern volcanic zone of Iceland 2008–2014: An interplay of tectonic, magmatic, and glacial isostatic deformation. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth* 122, 3158–3178. doi:10.1002/2016JB013206
19. Freysteinn Sigmundsson, Drouin, V., Parks, M., Dumont, S., Elías Rafn Heimisson, Ásta Rut Hjartardóttir, Páll Einarsson, Ármann Höskuldsson, Bryndís Brandsdóttir, Þorsteinn Sæmundsson, Tómas Jóhannesson, Jón Kristinn Helgason, Sturkell, E., Pedersen, R., Hooper, A.J., Spaans, K., Minet, C. & Magnús Tumi Guðmundsson 2014. Deflation and deformation of the Askja caldera complex, Iceland, since 1983: Strain and stress development on caldera boundaries prior to tsunami generating rockslide in 2014 at Lake Öskjuvatn. Ágrip V51A-4715, AGU 2014 Fall meeting, 15.–19. desember 2014, San Francisco.
20. Freysteinn Sigmundsson, Drouin, V., Elías Rafn Heimisson, Parks, M., Dumont, S., Benedikt G. Ófeigsson & Ásta Rut Hjartardóttir 2014. Jarðskorpuphreyfingar í Öskju og tengsl þeirra við berghlaupið 21. júlí 2014. *Minnisblað* 14.12. 2014, Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands, Reykjavík.
21. Svanur Pálsson 1972. Mælingar á eðlisþyngd og poruhluta bergs. *Orkustofnun, Raforkudeild. Reykjavík.* 33 bls.
22. Freysteinn Sigurðsson & Jón Ingimarsson 1990. Lekt íslenskra jarðefna. Í: (Ritstj. Guttormur Sigbjarnarson) Vatnið og landið: Ávörp, erindi og ágríp: Vatnafræðiráðstefna haldin 22.–23. október 1987 í tilefni 40 ára afmælis Vatna-mælinga og 20 ára afmælis Orkustofnunar: Tileinkuð Sigurjóni Rist vatna-mælingamanni sjötugum. Orkustofnun, Reykjavík. 121–128.
23. Árni Hjartarson, Birgir Jónsson, Davíð Egilson, Jón Ingimarsson, Hörður Svavarsson, Snorri Zóphóniasson & Þórólfur H. Hafstað 1983. Kver með fröðleiksmolun um vatnjarðfræði, dæluþrófanir og lektun. *Orkustofnun (OS-83022/VOD-12B)*, Reykjavík. 96 bls.
24. Schöpa, A., Chao, W.-A., Lipovsky, B.P., Hovius, N., White, R.S., Green, R.G. & Turowski, J.M. 2018. Dynamics of the Askja caldera July 2014 landslide, Iceland, from seismic signal analysis: Precursor, motion and aftermath. *Earth Surface Dynamics* 6. 467–485. doi:10.5194/esurf-6-467-2018
25. Páll Einarsson 2013. Flóðbylgjur. *Bls. 523–525 í: Náttúruvá á Íslandi – Eldgos og jarðskjálftar* (ritstj. Júlíus Sólness, Freysteinn Sigmundsson & Bjarni Besson). Viðlagatrygging Íslands og Háskólaútgáfan, Reykjavík.
26. Masson, D.G., Harbitz, C.B., Wynn, R.B., Pedersen, G. & Løvholt, F. 2006. Submarine landslides – processes, triggers and hazard prediction. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 364. 2009–2039.
27. Bondevik, S., Løvholt, F., Harbitz, C.B., Mangerud, J., Dawson, A. & Svendsen, J.I. 2005. The Storegga slide tsunami – Comparing field observations with numerical simulations. *Marine and Petroleum Geology* 22 (1–2). 195–208.
28. Kim, J., Løvholt, F., Issler, D. & Forsberg, C.F. 2019. Landslide material control on tsunami genesis—The Storegga slide and tsunami (8,100 Years BP). *Journal of Geophysical Research. Oceans* 124. doi:10.1029/2018JC014893
29. Árni Hjartarson 2006. Flóðbylgjur (tsunami) af völdum berghlaupa og skriðna – eru þær algengar á Íslandi? *Náttúrufræðingurinn* 74. 11–15.
30. Ólafur Jónsson 1957. Skriðuföll og snjóflóð. I–II. *Norðri, Akureyri.* 586 bls. (2. útg. 1992, Skjaldborg, Reykjavík).
31. Ólafur Jónsson 1976. Berghlaup. Ræktunarfélag Norðurlands, Akureyri. 623 bls.
32. Ólafur Jónsson 1992. Skriðuföll og snjóflóð. I. *Almennt um ofanföll: Erlendar stórskríður og snjóflóð.* Skjaldborg, Reykjavík.
33. Ólafur Jónsson & Halldór G. Pétursson 1992. Skriðuföll og snjóflóð. II. *Skriðuannáll.* Skjaldborg, Reykjavík.
34. Ólafur Jónsson, Sigurjón Rist & Jóhannes Sigvaldason 1992. Skriðuföll og snjóflóð. III. *Snjóflóðaannáll.* Skjaldborg, Reykjavík.
35. Ghiretti, M. 2012. The 1963 Vaiont landslide, Italy. *Bls. 359–372 í: Landslides: Types, mechanisms and modeling* (ritstj. Clague, J. & Stead, D.). Cambridge University Press, Cambridge.
36. Miller, D.J. 1960. Giant waves in Lituya bay, Alaska. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 354-C, 51–86.
37. Ward, S.N. & Day, S. 2010. The 1958 Lituya bay landslide and tsunami – A tsunami ball approach. *Journal of Earthquake and Tsunami* 4. 285–319. doi:10.1142/S1793431110000893
38. Dahl-Jensen, T., Larsen, L.M., Pedersen, S.A.S., Pedersen, J., Jepsen, H.F., Krarup Pedersen, G., Nielsen, T., Pedersen, A.K., Von Platen-Hallermund, F. & Weng, W. 2004. Landslide and tsunami 21 November 2000 in Paatuut, West Greenland. *Natural Hazards* 31 (1). 277–287.
39. Harbitz, C.B. & Løvholt, F. 2004. Tsunami modelling and prediction: Pre-project: Slide generated waves in reservoirs. ICG Report 10-2004-I, NGI Report 20031100-1. International Centre for Geohazards, Oslo.
40. Harbitz, C.B., Glimsdal, S., Løvholt, F., Kvelsvik, V., Pedersen, G.K. & Jensen, A. 2014. Rockslide tsunamis in complex fjords: From an unstable rock slope at Åkerneset to tsunami risk in western Norway. *Coastal Engineering* 88. 101–122.
41. Harbitz, C.B., Løvholt, F. & Bungum, H. 2014. Submarine landslide tsunamis: How extreme and how likely? *Natural Hazards* 72 (3). 1341–1374. doi:10.1007/s11069-013-0681-3
42. Løvholt, F., Pedersen, G. & Gisler, G. 2008. Oceanic propagation of a potential tsunami from the La Palma island. *Journal of Geophysical Research. Oceans*. 113. C09026. doi:10.1029/2007JC004603
43. Berger, M.J., George, D.L., LeVeque, R.J. & Mandli, K.T. 2011. The GeoClaw software for depth-averaged flows with adaptive refinement. *Advances in Water Resources* 34. 1195–1206.
44. Kim, J., Pedersen, G.K., Løvholt, F. & LeVeque, R.J. 2017. A Boussinesq type extension of the GeoClaw model – A study of wave breaking phenomena applying dispersive long wave models. *Coastal Engineering* 122. 75–86.
45. Sigríður Sif Gylfadóttir, Kim, J., Jón Kristinn Helgason, Sveinn Brynjólfsson, Ármann Höskuldsson, Tómas Jóhannesson, Harbitz, C.B. & Løvholt, F. 2017. The 2014 Lake Askja rockslide-induced tsunami: Optimization of numerical tsunami model using observed data. *Journal of Geophysical Research. Oceans* 122. 4110–4122. doi:10.1002/2016JC012496
46. Reglugerð um hættumat vegna ofanflóða, flokkun og nýtingu hættusvæða og gerð bráðabirgðahættumats nr. 505/2000 m.s.br.
47. Carey, R.J., Houghton, B.F. & Þorvaldur Þórðarson 2009. Tephra dispersal and eruption dynamics of wet and dry phases of the 1875 eruption of Askja Volcano, Iceland. *Bulletin of Volcanology* 72 (3). 259–278. doi:10.1007/s00445-009-0317-3
48. Þorsteinn Sæmundsson, Morino, C., Jón Kristinn Helgason, Conway, S.J. & Halldór G. Pétursson 2018. The triggering factors of the Móafellshyrna debris slide in northern Iceland: Intense precipitation, earthquake activity and thawing of mountain permafrost. *Science of the Total Environment* 621. 1163–1175.
49. Deline, P., Hewitt, K., Reznichenko, N. & Shugar, D. 2014. Rock avalanches onto glaciers. *Bls. 263–319 í: Landslide hazards, risks and disasters* (ritstj. Davies, T.R.). Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-12-396452-6.00009-4
50. Þorsteinn Sæmundsson, Ingvar Atli Sigurðsson, Halldór G. Pétursson, Helgi Páll Jónsson, Decaulne, A., Roberts, M.J. & Esther H. Jensen 2011. Hvað orsakaði bergflóðið sem féll á Morsárjökul í suðurjaðri Vatnajökuls 20. mars 2007 og hverjar hafa afleiðingar þess orðið? *Náttúrufræðingurinn* 81 (3–4). 131–141.

UM HÖFUNDA



Jón Kristinn Helgason (f. 1982) lauk BS-prófi í jarðfræði frá Háskóla Íslands árið 2006 og MS-prófi í Geohazard Assessment frá University of Portsmouth árið 2008. Hann hefur starfað hjá Veðurstofu Íslands síðan 2008. Jón Kristinn sérhæfir sig í skriðurannsóknum og ofanflóðahættumati.



Þorsteinn Sæmundsson (f. 1963) lauk BS-prófi og 4. árs prófi í jarðfræði frá Háskóla Íslands árið 1988, fil.lic.-prófi í ísaldarjarðfræði frá Háskólanum í Lundi í Svíþjóð 1992 og fil. dr.-prófi frá sama skóla árið 1995. Hann var sérfræðingur á snjóflóðadeild Veðurstofu Íslands 1995–1999 og forstöðumaður Náttúrustofu Norðurlands vestra 2000–2014. Frá árinu 2015 hefur Þorsteinn starfað sem stundakennari og aðjúntk við Háskóla Íslands og unnið að rannsóknum á skriðuföllum. Sérfræðingur í umhverfis- og auðlindaráðuneytinu frá árinu 2019.



Sigríður Sif Gylfadóttir (f. 1978) lauk BS-prófi í jarðeðlisfræði frá Háskóla Íslands árið 2001, MS-prófi í eðlisfræði frá sama skóla árið 2004 og Lic. Tech. Sci.-prófi í eðlisfræði frá Tækniháskólanum í Helsinki árið 2007 með áherslu á líkanreikninga á eiginleikum örmárra rafeindakerfa í hálfleiðurum. Sigríður vinnur við ofanflóðahættumat hjá Veðurstofu Íslands.



Ásta Rut Hjartardóttir (f. 1978) lauk doktorsprófi í jarðeðlisfræði frá Háskóla Íslands árið 2013. Hún hefur unnið við rannsóknir á sprungum og sprungu-sveimum á Íslandi, Míð-Íslandsbeltinu, Norðurgosbeltinu og Vesturgosbeltinu, og einnig við aflögunarmælingar á eldfjöllum. Hún er aðjúntk við jarðvísindadeild og vísindamaður við Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands.



Sveinn Brynjólfsson (f. 1975) lauk BS-prófi í jarðeðlisfræði frá Háskóla Ísland árið 2005 og MS-prófi frá sama skóla árið 2011. Hann hefur unnið á Veðurstofu Íslands frá 2005 og starfar við ofanflóðavöktun og ofanflóðahættumat.



Freysteinn Sigmundsson (f. 1966) lauk doktorsprófi í jarðeðlisfræði frá háskólanum í Boulder í Colorado í Bandaríkjunum árið 1992. Hann starfar sem jarðeðlisfræðingur á Norræna eldfjallasetrinu og Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands. Hann stundar m.a. rannsóknir jarðskorpuphreyfingum og kvikuhreyfingum í rötum eldstöðva.



Harpa Grímsdóttir (f. 1973) lauk BS-gráðu í landafræði frá Háskóla Íslands árið 1998 og mastersgráðu frá University of British Columbia í Kanada árið 2004. Hún starfar sem fagstjóri ofanflóðavöktunar á Veðurstofu Íslands og hefur unnið að ýmsum verkefnum og rannsóknum á sviði snjóflóða og skriðufalla.



Tómas Jóhannesson (f. 1957) lauk cand.mag.-prófi í jarðeðlisfræði frá Háskólanum í Oslo 1982 og doktorsprófi í jöklafræði frá University of Washington í Bandaríkjunum 1992. Tómas starfaði á Orkustofnun 1987–1995. Hann er fagstjóri á sviði jöklafræði á Veðurstofu Íslands og hefur starfað þar frá 1995.



Ármann Höskuldsson (f. 1960) lauk doktorsprófi í eldfjallafræði, bergfræði og jarðefnafræði frá Universite Blaise Pascal í Frakklandi árið 1992. Hann starfar sem rannsóknarprófessor í eldfjallafræði á Norræna eldfjallasetrinu og Jarðvísindastofnun Háskóla Íslands. Hann stundar rannsóknir í eldfjallafræði, á náttúruvá af völdum eldfjalla, opnun Norður-Atlantshafs og tilurð Íslands.

PÓST- OG NETFÖNG HÖFUNDA / AUTHORS' ADDRESSES

Jón Kristinn Helgason
Snjóflóðasetri Veðurstofu Íslands
Suðurgötu 12
400 Ísafirði
jonkr@vedur.is

Sigríður Sif Gylfadóttir
Snjóflóðasetri Veðurstofu Íslands
Suðurgötu 12
400 Ísafirði
siggasif@vedur.is

Sveinn Brynjólfsson
Veðurstofu Íslands
Borgum við Norðurslóð
602 Akureyri
sveinnbr@vedur.is

Harpa Grímsdóttir
Snjóflóðasetri Veðurstofu Íslands
Suðurgötu 12
400 Ísafirði
harpa@vedur.is

Ármann Höskuldsson
Jarðvísindastofnun HÍ
Öskju, Sturlugötu 7
107 Reykjavík
armh@hi.is

Þorsteinn Sæmundsson
HÍ – Líf- og umhverfis-
vísindadeild / Umhverfis-
og byggingarverkfræðideild
Öskju, Sturlugötu 7
107 Reykjavík
steinis@hi.is

Ásta Rut Hjartardóttir
Jarðvísindastofnun HÍ
Öskju, Sturlugötu 7
107 Reykjavík
astahj@hi.is

Freysteinn Sigmundsson
Jarðvísindastofnun HÍ
Öskju, Sturlugötu 7
107 Reykjavík
fs@hi.is

Tómas Jóhannesson
Veðurstofu Íslands
Bústaðavegi 7–9
108 Reykjavík
tj@vedur.is