

Jarðfræðafélag Íslands

FEBRÚARRÁÐSTEFNA 2000

Umbrot í Mýrdals– og Eyjafjallajökli

Ágrip erinda og veggspjalda

Umsjón:  
Sigurður Sveinn Jónsson

Reykjavík 17. febrúar 2000

### Tilvitnun í ritið:

Karl Grönvold, Niels Óskarsson og Lisbeth Hildebrand, 2000: Efnasamsetning Kötluviku. Febrúarráðstefna 2000. Ágrip erinda og veggspjalda. Jarðfræðafélag Íslands, s. 12.

Karl Grönvold, Niels Óskarsson og Lisbeth Hildebrand, 2000: Geochemistry of Katla magmas (in Icelandic). Geoscience Society of Iceland, February Meeting 2000, p. 12.

# Dagskrá

## *Skráning*

- 13:00 *Setning ráðstefnunnar: Helgi Torfason*
- Fundarstjóri: Edda Lilja Sveinsdóttir**
- 13:05 *Ragnar Stefánsson, Gunnar B. Guðmundsson og Páll Halldórsson: Jarðskjálfta- og þenslu-mælingar til eftirlits með Mýrdals- og Eyjafjallajökli – líkur á eldgosi.*
- 13:30 *Halldór Geirsson, Þóra Árnadóttir, Bergur H. Bergsson og Christof Völksen: Samfelldar GPS mælingar við Eyjafjalla- og Mýrdalsjökul.*
- 13:55 *Páll Einarsson: Atburðarás í tengslum við hlaup í Jökulsá á Sólheimasandi í júlí 1999.*
- 14:20 *Bryndís Brandsdóttir: Jarðskjálftar og kvika undir Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli.*
- 14:45 **Kaffi – veggspjöld**
- Fundarstjóri: Haraldur Auðunsson**
- 15:15 *Erik Sturkell, Páll Einarsson og Freysteinn Sigmundsson: Crustal deformation around Mýralsjökull and Eyjafjallajökull, 1967-2000.*
- 15:40 *Magnús Tumi. Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Guðbjarni Guðmundsson: Jarðhitinn í Mýrdalsjökli og atburðirnir sumarið 1999.*
- 16:05 *Sigurður Reynir Gíslason: Koltvíoxið frá Eyjafjallajökli.*
- 16:30 *Ármann Höskuldsson: Gjóskuflóð í Eyjafjallajökli?*
- 16:55 *Hrefna Kristmannsdóttir, Árni Snorrason, Sigurður R. Gíslason, Hreinn Haraldsson, Ásgeir Gunnarsson, Steinunn Hauksdóttir og Sverrir Elefsen: Próun efnavöktunarkerfis til varnar mannvirkjum við eldsumbrot í jökli. I Bakgrunnur.*
- 17:20 *Ráðstefnuslit*
- 17:30 **Veggspjaldasýning – léttar veitingar**

# Efnisyfirlit

■ Ármann Höskuldsson: Gjóskuflóð í Eyjafjallajökli? .....	1
■ Bryndís Brandsdóttir: Jarðskjálfar og kvika undir Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli. ....	3
□ Guðrún Larsen, Anthony Newton, Andrew Dugmore og Elsa G. Vilmundardóttir: Súr þeytigos í Kötlu á Nútíma .....	5
■ Halldór Geirsson, Þóra Árnadóttir, Bergur H. Bergsson og Christof Völksen: Samfelldar GPS mælingar við Eyjafjalla- og Mýrdalsjökul.....	7
□ Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús Tumi Guðmundsson: Mýrdalsjökull: Yfirborð, botn og rennslisleiðir jökulhlaupa .....	8
■ Hrefna Kristmannsdóttir, Árni Snorrason, Sigurður R. Gíslason, Hreinn Haraldsson, Ásgeir Gunnarsson, Steinunn Hauksdóttir og Sverrir Elefsen: Þróun efnavöktunarkerfis til varnar mannvirkjum við eldsumbrot í jökli. I Bakgrunnur .....	9
□ Karl Grønvold, Niels Óskarsson og Lisbeth Hildebrand: Efnasamsetning Kötlukviku .....	12
■ Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Guðbjarni Guðmundsson: Jarðhitinn í Mýrdalsjökli og atburðirnir sumarið 1999 .....	13
■ Páll Einarsson: Atburðarás í tengslum við hlaup í Jökulsá á Sólheimasandi í júlí 1999 .....	14
■ Ragnar Stefánsson, Gunnar B. Guðmundsson og Páll Halldórsson: Jarðskjálfsta- og þenslumælingar til eftirlits með Mýrdals- og Eyjafjallajökli – líkur á eldgosi .....	15
□ Ragnar Stefánsson, Gunnar B. Guðmundsson og Páll Halldórsson: Jarðskjálfsta- og þenslumælingar til eftirlits með Mýrdals- og Eyjafjallajökli – líkur á eldgosi .....	15
□ Roberts, Matthew J., Andrew J. Russell, Fiona S. Tweed and Óskar Knudsen: Ice fracturing during jökulhlaups: Implications for englacial floodwater routing and outlet development .....	17
□ Russell, Andrew J., Fiona S. Tweed, Óskar Knudsen, Matthew J. Roberts, James W. Rice Jr., Philip M. Marren , Richard I. Waller, E. Lucy Rushmer and Timothy D. Harris: The characteristics and immediate impact of an unexpected magmatically-triggered outburst flood on the Jökulsá á Sólheimasandi, Mýrdalsjökull, southern Iceland .....	18
■ Sigurður Reynir Gíslason: Koltvíoxið frá Eyjafjallajökli .....	20
■ Sturkell, Erik, Páll Einarsson og Freysteinn Sigmundsson: Crustal deformation around Mýrdalsjökull and Eyjafjallajökull, 1967-2000 .....	22
□ Sverrir Elefsen, Sigvaldi Árnason, Árni Snorrason, Hrefna Kristmannsdóttir, Sigurður R. Gíslason og Hreinn Haraldsson: Efnavöktunarkerfi til varnar mannvirkjum við eldsumbrot í jökli. II Kerfislýsing .....	24

## Skýringar á táknum í efnisyfirliti

- Vegspjald
- Erindi

## GJÓSKUFLÓÐ Í EYJAFJALLAJÖKLI?

Árman Höskuldsson, Náttúrustofa Suðurlands, Strandvegi 50, 900 Vestmannaeyjar.

Í þessum fyrirlestri er ætlunin að fjalla um gjóskuflóð og myndun þeirra. Þá verður fjallað um gjóskuflóð í jarðsögu Íslands og rýnt sérstaklega í sögulegan tíma og eldgosasögu 20. aldarinnar, en þar verður drepið á goslysingum sem eiga við um gjóskuflóð. Í lokin munum við fjalla um eldgos í Eyjafallajökli með viðkomu í Alaska og Montserrat í Karabískra hafinu.

Gjóskuflóð verða til í eldgosum þar sem mikilli gjóska er þeytt upp í andrúmsloftið. Gjóskan byrjar á því að mynda gosmøkk sem rís í andrúmsloftinu, gosmøkkurinn nær hinsvegar ekki að rísa til fulls vegna þess að útstreymi gosefna verður hraðara en innstreymi umhverfislofts. Fyrir vikið verður gosmøkkurinn þyngri en andrúmsloftið, fellur saman og myndar gjóskuflóð. Smærri og vægari afbrigði eru nefnd gusthlaup (surge) og myndast í phreatomagmatískum eldgosum við sömu skilyrði, gusthlaup eru mjög algeng á Íslandi og finnast í öllum phreatomagmatískum gosmynjum.

Þrátt fyrir að þeytigos eigi sér stað um tvisvar á öld hafa gjóskuflóð verið heldur fyrirferðarlítill í rannsóknarniðurstöðum á íslenskum eldfjöllum. Þó eru ummerki slíkra flóða greinileg í gegnum allan tertíer tíma landsins (Sæmundsson 1974). Rannsóknir í Öskju sýna að í gosinu 1875 voru gusthlaup algeng og alla vega eitt gjóskuhlaup hljóp til SV af Öskjuvatni (Sparks et al. 1981).

Rannsóknir á eldgosinu í Heklu 1947 sýna að í upphafi goss hafa fallið til nokkur gjóskuhlaup. Þessi gjóskuhlaup voru þó ekki túlkuð sem slík, heldur voru þau talin vera jökulhlaup sem áttu upptök sín í bráðunum á jökulhettunni. Samanburðarrannsókn á Heklu gjóskusetinu og gjóskuseti frá Redoubt eldgosinu í Alaska 1989-90 sýna þó að um samskonar set er að ræða. Í Redoubt var fylgst með því er gjóskuhlaupin félleu niður fjallið og yfir jökulhettu þess. Gjóskuhlaupin bræddu og rufu jökulinn svo að stór klakastykki vöðluðust inn í gjóskuflóðið og bárust með því að rótum fjallsins. Þrátt fyrir mikinn hitamismun gjóskunnar og íssins, bráðnuðu klakarnir ekki til fulls. Í Heklu 1947 var gjóskuflóðasetið túlkað sem einskonar hlaupaset einkum vegna þess að mikinn ís mátti sjá í því, þó fannst höfundir ljóst að hér gæti ekki hafa verið hefðbundið hlaup á ferðinni (Kjartansson 1951). Ljósmyndir af gosmekkinum sýna, svo ekki verður um villst, að á fyrstu mínútum gossins félleu nokkur flóð niðu hlíðar hennar. Ætla má að afleiðingar þessara flóða hafi verið hinrar sömu og í Redoubt. Hekla 1947 og Redoubt 1989-90 voru bæði frekar stór eldgos og mynduð háa gosmekki.

Lýsingum á eldgosinu í Eyjafallajökli 1821-23 ber saman um að gosið hafi verið lítið og gosmekkir ekki mjög háir (9-10 km). Gosið mun hafa einkennst af stuttum sprengingum sem mynduðu gosmekkina yfir eldstöðinni hverju sinni. Kvikan var ísúr til súr sem upp kom í gosinu (Jakobsson 1979). Hlaupvatn hljóp norður úr öskjunni niður Gígjökul og Steinholtsjökul, enn fremur urðu einhverjir vatnavextir sunnan Eyjafallajökuls. Hlaup í Gígjökli geta eðlilega verið tengd jökulbráð vegna uppkomu kvikunnar innan öskjunnar. Hlaupin í Steinholtsjökli og suður af verða hinsvegar ekki skýrð nema með jarðhita utan öskjunnar eða með gjóskuhlaupum sem félleu útfyrir öskjuna. Sambærilegt gos og það sem var í Eyjafallajökli 1821-23 er nýafstaðið í eldfjallinu Soufrier Hills á Montserrat eyju í Karabískahafinu. Gosið einkenndist af ísúrri dacit kviku sem myndaði hraungul í toppgígnum. Hraungúllinn sprakk reglulega vegna yfirþrýstings kvikugasa og myndaði 9-10 km háa gosmekki. Gosmekkirnir voru yfirhlaðnir gjóska og því mynduðust gjóskuflóð reglulega og lögðu raunar alla byggð á eynni í eyði. Gosið í Soufrier Hills var ekki stórt en

vegna gjóskuflóðamynndanna varð eyðileggingarmáttur þess mun meiri. Í Eyjafjallajökli megum við búast við að kvika verði ísúr eða súr og því mjög seigfljótandi og gasrík. Þessir tveir eiginleikar ýta undir myndun gjóskuflóða og auka þar með líkur á skyndilegum gjósku-jökulhlaupum til allra átta frá Öskjunni.

Heimildir:

- Jakobsson, S. 1979. Petrology of the recent basalts of the eastern volcanic zone, Iceland. *Acta Naturalia Islandica*, 103 p.
- Sparks, R.S.J., Wilson L and Sigurðsson H. 1981. The pyroclastic deposits of the 1875 eruption of Askja, Iceland. *Phil. Trans. Roy. Soc. London* 299:241-273.
- Sæmundsson, K. & Noll, H. 1974. K/Ar ages of rock from Húsafell, Western Iceland, and the development of the Húsafell central volcano. *Jökull*, 40-59.
- Kjartansson, G. 1951. Water flood and mud flows. In: *The eruption of Hekla 1947-1948*. Vísindafélag Íslendinga. Rit II.

# JARÐSKJÁLFTAR OG KVIKA UNDIR MÝRDALSJÖKLI OG EYJAFJALLAJÖKLI

Bryndís Brandsdóttir, Raunvísindastofnun Háskólangs, Dunhaga 3, Reykjavík

Spennubreytingar í þaki kvíkuhólfa og varmanám úr innskotum nálægt yfirborði eru algengustu orsakir jarðskjálfta í íslenskum eldstöðvum. Þrátt fyrir að lítið sé vitað um tíðni og magn kvíkuinniskota í einstakra megineldstöðvum má draga þær ályktanir af rannsóknnum síðustu áratuga að einungis lítill hluti kvíkunnar nái til yfirborðs í eldgosum.

## *Mýrdalsjökull*

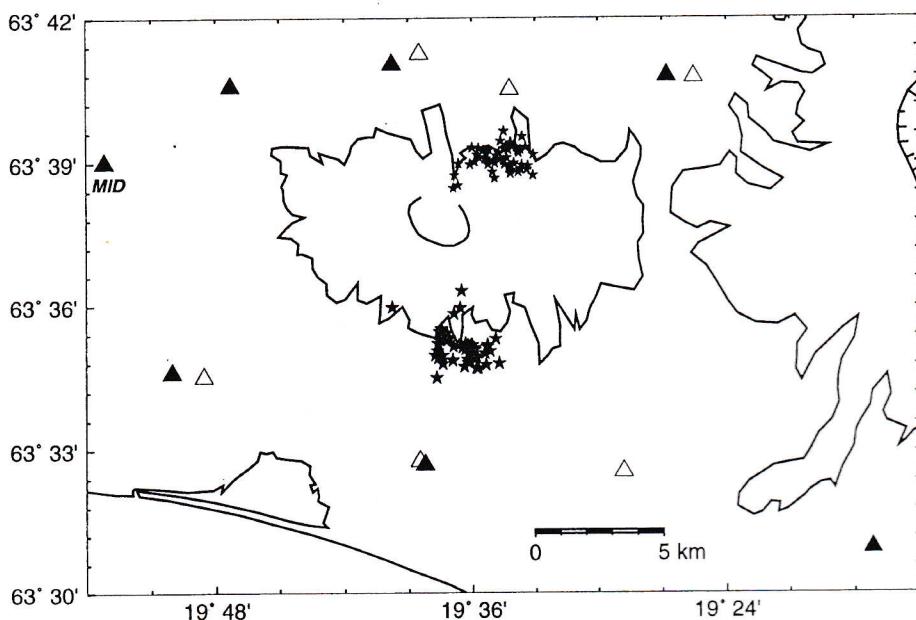
Bylgjubrotsmælingar yfir Mýrdalsjökul sumarið 1991 leiddu í ljós tilvist grunnstæðs kvíkuhólfs undir austanverðum Mýrdalsjökli. Kvíkuhólfíð er 4-5 km breitt í NNE-SSV stefnu, nálægt 1 km þykkt og liggur miðja þess skammt norðan við miðju Kötluöskjunnar (Guðmundsson o.fl., 1994). Botn hólfssins er á um 3 km dýpi, eða 1.5 km undir sjávarmáli. Yfirborð hólfssins er ógreinilegra, m.a. vegna fárra mælinga á bylgjuhraða í efstu jarðlögunum. Þar sem einungis var mælt eitt snið yfir jökulinn gefa mælingarnar enga mynd af útbreiðslu hólfssins í aðrar áttir. Þó má ætla að skjálftaþyrping undir suðaustanverðum jöklínnum endurspegli í grófum dráttum útbreiðslu kviku þar sem hún er bundin við sama svæði. Mælingarnar veita engar upplýsingar um magn kviku eða dreifingu hennar innan svæðisins.

Leiða má líkum að því að þrálát skjálftavirkni í tveimur aðgreindum þyrpingum undir Mýrdalsjökli tengist sveiflum í kvíkuþrýstingi. Skjálftarnir verða þá vegna spennubreytinga í þaki kvíkuhólfsins sem stafa af þrýstingsbreytingum í kvíkunni (Einarsson og Brandsdóttir, 2000). Flestir skjálftanna eru einmitt grunnir og margir bera einnig með sér einkenni sem undirstrika tilvist kviku nálægt yfirborði, s.s. mikla S-bylgjudeyfingu. Aukinn jarðhiti í brúnum Kötluöskjunnar síðastliðið sumar án marktækra breytinga á skjálftavirkni gefur til kynna að tiltölulega litlar þrýstingsbreytingar geti komið kvíkunni til yfirborðs.

## *Eyjafjallajökull*

Þrátt fyrir nálægðina og tektónísk tengsl hefur skjálftavirkni í Eyjafjallajökli verið mjög frábrugðin virkninni í Mýrdalsjökli. Á meðan lífleg virkni hefur einkennt Mýrdalsjökul síðustu þrjá áratugina (Tryggvason, 1973; Einarsson og Brandsdóttir 2000) hefur það sætt tíðindum ef mælst hafa skjálftar í Eyjafjallajökli. Einungis voru staðsettir þar 3 skjálftar á árunum 1978-1985. Það vakti því tölverða athygli þegar skjálftavirkni jókst undir Eyjafjallajökli á árunum 1991-1993 og vorið 1994 var mælum fjölgæð tímabundið á svæðinu. Flestir skjálftanna urðu á 3-7 km dýpi undir Steinsholti við norðausturbrún jöklusins. Bylgjur þessara skjálfta báru þess engin merki að hafa rekist á kviku á leið sinni frá upptökum að mælistöðvum. Brotlausnir gáfu til kynna samgengishreyfingar sem túlka má sem afleiðingar afmarkaðs innskots sem náði ekki yfirborði (Dahm og Brandsdóttir, 1997).

Haustið 1999 var sex síritandi jarðskjálftamælum aftur komið fyrir umhverfis Eyjafjallajökul vegna aukinnar virkni. Mælarnir voru reknir frá miðjum september til októberloka. Nú brá svo við að virknin var mest við suðurbrún jökulsins, upp af Lambafellsheiðinni við svokallaðar Mörleysur. Þeir skjálftar sem þegar hafa verið staðsettir ná frá yfirborði niður á tæplega 7 km dýpi, en flestir þeirra eiga upptök í efstu 2 km. Bylgjur margra þessara skjálfta bera þess merki að hafa rekist á kviku á leið sinni frá upptökum að mælistöðvum. S-bylgjudeyfing er áberandi nálægt upptakasvæðinu en einnig virðist deyfing vera til staðar undir toppgíg Eyjafjallajökuls. Ekki gefur gefist tími til að skoða brotlausnir skjálftanna. Í ljósi þess að landris hefur mælst á þessu svæði er líklegasta skýringin á þessari virkni sú að annað kvikuinniskot hafi orðið við suðurbrún jökulsins síðastliðið haust og hafi það náð lengra í átt að yfirborði en innskotið vorið 1994.



*Skjálftamælistöðvar umhverfis Eyjafjallajökul vorið 1994 (opnir þríhyrningar) og haustið 1999 (fylltir þríhyrningar). MID er stöð í SIL-neti Veðurstofu Íslands. Staðsetningar 53 smáskjálfta frá 1994 og rúmlega 50 skjálfta frá 1999 eru merktar með stjörnum. Óvissa í staðsetningum er innan við 1 km. Vorið 1994 var virknin bundin við norðausturbrún jökulsins en suðurbrún hans haustið 1999.*

#### Heimildir

- T. Dahm og B. Brandsdóttir. Moment tensors of micro-earthquakes from the Eyjafjallajökull volcano in south Iceland. *Geophys J. Int.* 130, 183-192, 1997.
- P. Einarsson og B. Brandsdóttir. Earthquakes in the Mýrdalsjökull area, Iceland, 1978-1985: Seasonal correlation and connection with volcanoes. *Jökull*, í prentun.
- Ó. Guðmundsson, B. Brandsdóttir, W. Menke og G. E. Sigvaldason. The crustal magma chamber of the Katla volcano in south Iceland revealed by 2-D seismic undershooting. *Geophys. J. Int.* 119, 277-296, 1994.
- E. Tryggvason. Seismicity, earthquake swarms and plate boundaries in the Iceland region. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 63, 1327-1348, 1973.

## SÚR PEYTIGOS Í KÖTCLU Á NÚTÍMA

Guðrún Larsen<sup>1</sup>, Anthony Newton<sup>2</sup>, Andrew Dugmore<sup>2</sup> og Elsa Vilmundardóttir<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Raunvísindastofnun Háskóla Íslands, Dunhaga 3, 107 Reykjavík

<sup>2</sup>University of Edinburgh, Dept. of Geography, Drummond St., EH8-9XP Edinburgh

<sup>3</sup>Orkustofnun, Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Með Kötlugjóska er yfirleitt átt við basaltgjóska sem orðin er til vegna snertingar kviku og bræðsluvatns í Kötlugosum eins og þeim sem þekkt eru af lýsingum síðustu 400 ára. Leiða má líkur að því að rúmlega 200 slík gjóskulög séu í jarðvegi frá síðustu 8400 árum (rúmum 7500 geislakolsárum) á svæðinu umhverfis Mýrdalsjökul.

Súr þeytigos hafa einnig orðið á Kötlukerfinu á Nútíma. Nú eru 17 súr Kötlugjóska- lög þekkt frá sama 8400 ára tímabili. Gosin dreifast ekki jafnt á þetta tímabil, heldur voru þau tíðust fyrir um 7000 - 7500 árum, en þá mynduðust þrjú þessara gjóskulaga. Yngsta súra gjóskulagið er tæplega 1600 ára gamalt (um 1675 geislakolsára). Lengsta goshléið, að frátöldu því sem nú stendur yfir, virðist hafa verið um 1200 ár en það styrti um 100 ár.

Auk súru gjóskulaganna er vitað um allmög Kötlugjóskulög sem í finnst bæði basískt og súrt gler, það síðarnefnda oftast í mjög litlu magni. Þau hafa verið talin með basísku gjóskulögunum því óvist er hvort súra glerið er nýmyndað nema í fáeinum tilfellum. Yngstu gjóskulöginn eru frá 12. öld (e.t.v. frá árunum kringum 1179), úr Eldgárgosinu á 10. öld (sá hluti hét áður K-x) og úr gosi skömmu fyrir landnám (áður K-x2).

Hér á eftir verður fjallað stuttlega um súru gosin og gjóskulöginn frá þeim, hvar upptökin hafa verið, hvernig slík gos haða sér, hversu stór þau voru og hvað einkennir súru Kötlugjóskuna.

Þykktarásar súru gjóskulaganna benda til upptaka innan öskjunnar í Mýrdalsjökli. Þeir mætast nálægt miðju hennar, mun vestar en upptök Kötlugosa á síðustu oldum, en um nákvæma staðsetningu er ekki að ræða. Annar möguleiki er að gosið hafi í jöðrum öskjunnar, t.d. á gossprungum tengdum brotalínukerfi hennar. Sé það tilfellið hafa gos komið upp á nokkrum stöðum í öskjujaðrinum, og hugsanlega á fleiri en einum stað í sama gosinu. Í fyrstnefnda tilvikinu gætu jökulhlaup vegna gosanna hafa komið undan Kötlujökli og/eða Sólheimajökli, og jafnvel einnig Entujökli, sé miðað við núverandi ísþykkt og botnlag. Í síðarnefnda tilvikinu gætu jökulhlaup hafa komið undan hverjum hinna þriggja skriðjöklra sem úr öskjunni flæða, en einnig er hugsanlegt að hluti bræðsluvatnsins hafi ekki leitað inn í öskjuna heldur runnið af jöklinum niður í fjallshlíðar utan "hefðbundinna" hlaupleiða.

Magn gjóskunnar sem upp kom í þessum gosum er yfirleitt fremur lítið. Gjóskufallssvæði stærsta lagsins á landi er rúmir  $15000 \text{ km}^2$  innan  $0.2 \text{ cm}$  jafnþykktarlínu. Rúmmál gjóskunnar eins og hún er í jarðvegi (þjöppuð) er um  $0.16 \text{ km}^3$ , sem samsvarar um  $0.27 \text{ km}^3$  af nýfallinni gjósku ef reiknað er með að gjóskan sé nú um 60% af upphaflegu rúmmáli, líkt og gert hefur verið við Heklugjóskulög frá sögulegum tíma. Áætl-að heildarmagn er um  $0.3 \text{ km}^3$ . Þetta er svipað gjóskumagn og fell á landi í fyrsta þætti Heklugossins 1766, en ekki nema 1/5 hluti af því sem upp kom í Kötlugosinu 1755. Smæstu súru gjóskulöginn eru minni en gjóskulagið úr Heklugosinu 1991 ( $0.02 \text{ km}^3$ ). Engin augljós tengsl eru milli magns loftborinnar gjósku og lengdar undanfarandi goshléiðs.

Kornagerð súru gjóskunnar einkennist af löngum glertrefjum, sem brotna niður í nálar eða þunnar plötur. Þær eru í mismiklu magni í gjóskulögunum, gráfustu nálarnar

eru í stærstu gjóskulögunum en í smærri lögnum eru smágerðar nálar innan um fingert glerkurl. Mesta mælda þykkt er 12 cm í 25 km fjarlægð frá miðju öskjunnar, en yfirleitt eru gjóskulögin fremur þunn. Efnasamsetning glersins í þeim gjóskulögum sem búið er að efnagreina er áþeppi í öllum tilfellum,  $\text{SiO}_2$  innihald er 65-67%. Súra gjóska er gráleit að sjá í jarðvegi.

Útbreiðsla og lögur gjóskugeiranna bendir til að mörg gosanna hafi komið í fremur stuttum hrinum með hléum á milli. Einnig er hugsanlegt að sveiflur í gosvirkninni hafi valdið því að gjóska barst ekki nema endrum og eins út fyrir það svæði sem Mýrdalsjökull hylur nú. Ekki er hægt að álykta um lengd gosanna, en hugsanlegt er að þau hafi hagað sér líkt og gosið í Eyjafjallajökli 1821-1823, sem kom í hrinum og stóð í rúmt ár. Kornagerðin bendir til að utanaðkomandi vatn eigi þátt í tætingu kvíkunnar en þrátt fyrir það virðast gosin ekki hafa verið eins öflug og búast mætti við af freatoplínionskum gosum. Hugsanlegt er að jökulþekjan hafi ekki rofnað fyrr en farið var að draga úr kviku uppstreymingu og megnið af gosefnunum hafi hrúgast upp undir ísnum.

Engin merki um jökulhlaup tengd síru Kötlugosunum hafa fundist á söndunum umhverfis Mýrdalsjökul. Sjófleyttur vikur, með efnasamsetningu samsvarandi þeirri sem síra Kötlugjóska hefur, finnst hins vegar víða á strandlínnum við N-Atlantshaf, sem sýnir að í einhverjum þessara gosa barst verulegt magn af vikri til sjávar (Anthony Newton 1999: Ocean-transported pumice in the North Atlantic. Ph.D. thesis, University of Edinburgh). Vafalítið hafa jökulhlaup flutt vikurinn til sjávar. Ekki er hægt að líta á tilvist vikursins á strandlínnum handan Atlantsála sem vísbendingu um að vikur- eða vatnsmagn hafi verið meira en dæmi eru um í jökulhlaupum á sögulegum tíma. Þessi síri vikur getur haldist lengi á floti vegna eiginleika sinna. Hafi t.d.  $0.1 \text{ km}^3$  af vikri borist til sjávar nægir að 1% hans berist yfir hafið til að skilja eftir 10 cm þykkt lag á 10 m breiðri og 1000 km langri strönd, eða 1 cm þykkt lag á 10 m breiðri og 10.000 km langri strönd. Til samanburðar má geta að jökulhlaup í Kötlugosinu 1918 báru 0.3 - 0.6  $\text{km}^3$  af basaltvikri og ösku til sjávar, en langmest af þessu efni sökk við ströndina og færði hana fram.

Skyringin á að sír vatnsborinn vikur hefur ekki fundist á söndunum framan við skriðjöklana sem koma úr öskju Mýrdalsjökuls kann að vera sí að hlaupin hafi verið fremur lítil og að ummerkin hafi horfið á þeim 1600 árum sem liðin eru frá síðasta síra Kötlugosinu. Milli 30 og 40 "venjuleg" Kötlugos hafa orðið á þessu tímabili og stór jökulhlaup hafa fylgt sumum þeirra, a.m.k. á sögulegum tíma. Í Eldgjárgosinu á 10. öld rann hraun yfir stóran hluta flóðsléttunnar framan við Kötlujökul, og jökulhlaupin í því gosi eru líklega þau umfangsmestu sem komið hafa úr Mýrdalsjökli á Nútíma.

Ekkert sírt gjóskulag frá Mýrdalsjökli, þ.e. gjóskulag þar sem sírt gler er meginefnið, er þekkt með vissu á sögulegum tíma. Yfirstandandi goshlé er það lengsta sem vitað er um. Sú spurning vaknar hvort einhverjir atburðir hafi orðið sem geti skýrt þetta óvenjulanga hlé. Stærsti atburðurinn á Kötlukerfinu á Nútíma var Eldgjárgosið á 10. öld, en þá komu upp stór hraun og allt að  $4 \text{ km}^3$  af basaltgjósku á um 75 km langri gosprungu. Suðurendi gosprungunnar náði inn í öskjuna og linsur af ljósri súrri gjósku finnast innan um svarta basaltgjóskuna frá þessum hluta gosprungunnar. Vera má að breytingar á kvíkukerfinu undir öskjunni í atburðunum á 10. öld eigi þátt í þessu langa hléi. Þykkti jökkull á síðari öldum kann einnig að hafa einhver áhrif. Ekki er því hægt að gera ráð fyrir að þessum þætti í eldvirkni Kötlukerfisins sé lokið.

## **SAMFELLDAR GPS MÆLINGAR VIÐ EYJAFJALLA- OG MÝRDALSJÖKUL**

Halldór Geirsson, Þóra Árnadóttir, Bergur H. Bergsson, Veðurstofa Íslands  
Christof Völksen, Landmælingar Íslands

Með GPS landmælingatækni má meta stöðu fastmerkja (punkta) á yfirborði jarðar með nokkurra millimetra nákvæmni. GPS landmælingatækni hefur verið notuð í vaxandi mæli á Íslandi síðan 1986 til að fylgjast með jarðskorpuhreyfingum. Net GPS landmælingapunkta hafa verið mæld á nokkurra mánaða eða nokkurra ára fresti, t.d. til að fylgjast með eldfjöllum. Í samfelldum GPS mælingum er mælitæki látið safna gögnum á sama punkti í langan tíma þ.e. mánuði eða ár. Samfelldar mælingar gefa því meiri upplausn í tíma en netmælingar.

Í kjölfar umbrotana í Mýrdalsjökli síðastliðið sumar var ákveðið að setja upp GPS tæki til samfelldra mælinga við Mýrdalsjökul. Fjögur slík tæki höfðu þá verið sett upp á Hengilssvæðinu. Uppsetning tveggja Trimble 4000SSI GPS landmælingatækja fór fram í september og október 1999 í samvinnu við Norrænu Eldfjallastöðina og Raunvísindastofnun. Tækin eru á Sólheimheiði sunnan Mýrdalsjökuls og á Lágu-Hvolum á Höfðabrekkufrétti austan Mýrdalsjökuls. Loftnetsundirstöður eru komnar upp á Snæbýli (austan Mýrdalsjökuls), Þorvaldseyri (sunnan Eyjafjallajökuls) og Miðmörk (vestan Eyjafjallajökuls).

Í uppsetningu samfelldra mælinga er GPS loftnet fest ofan á um 1m háa undirstöðu úr ryðfríu stáli sem boltuð er niður í klöpp. Stöðvarnar, sem nú eru í gangi, eru knúnar af vindrafstöðvum. GPS tækin eru orkufrek og erfiðleikar hafa verið með rekstur vegna rafmagnsvandræða. Gögn eru sótt sjálfvirkt einu sinni á sólarhring gegnum GSM kerfi Landsímans en mögulegt er að sækja gögn oftar.

Við úrvinnslu er notaður hugbúnaður frá Háskólanum í Bern, Bernese 4.2. Verið er að athuga önnur úrvinnsluforrit í samstarfi við Landmælingar Íslands. Í úrvinnslunni eru notuð gögn frá samfelldri GPS mælistöð í Reykjavík (REYK) sem rekin er af IGS (International GPS Service). Notaðar eru nákvæmar brautir gervitungla sem gefnar eru út nokkrum dögum eftir mælingar og hnit stöðva reiknuð í alþjóðlegu hnitakerfi (ITRF97) með gögnum úr 24 klukkustunda mælilotum. Í næsta úrvinnsluskrefi eru færslur stöðva reiknaðar miðað við ákveðin upphafshnit og að REYK sé föst. Allar gagnaskrár má nálgast á vefnum, <http://www.vedur.is/ja/gps.html>. Niðurstöður mælinga sýna engar marktækar breytingar á Sólheimheiði og Lágu-Hvolum.

Horfur eru á að gagnasöfnun hefjist á Miðmörk og Þorvaldseyri á næstu vikum. Stefnt er að því að úrvinnsla færst nær rauntíma og verði sjálfvirkari en nú er. Nú fer úrvinnsla fram nokkrum dögum eftir að mælingarnar koma í bæinn. Hvergi er unnið úr GPS landmælingagögnum í rauntíma en erlendir hópar eru að gera tilraunir með það.

## MÝRDALSJÖKULL: YFIRBORÐ, BOTN OG RENNSLISLEIÐIR JÖKULHLAUPA

Helgi Björnsson, Finnur Pálsson og Magnús Tumi Guðmundsson.  
Jarðeðlisfræðistofu Raunvísindastofnunar Háskólangs.

Kort af yfirborði og botni Mýrdalsjökuls hafa verið gerð eftir mælingum frá 1991 til þess að lýsa rennsli íss og vatns niður að jökulsporði og jökulám, legu eldstöðva og jarðhitasvæða undir jöklínnum og rennslisleiðum jökulhláupa við Kötlugos. Hæð jöklulyfirborðs var mæld samfellt á mælilínum með nákvæmum lofthæðarmælingum og ísþykkt með íssjá og kort síðan gerð með því að brúa bil milli mæligilda. Niðurstöður eru hér settar fram á kortum og í fjarvíddarmyndum af yfirborði og botni.

Undir Mýrdalsjökli er mikil askja, 700 m djúp, sem afmarkast að sunnan af Háubungu (1375 m y. s.), Goðabungu (1350 m) að vestan og Austmannsbunga rís upp úr norðurbarminum. Flatarmál öskjunnar er  $110 \text{ km}^2$  innan barmannna. Landslag innan öskjunnar endurspeglar mun á eldvirkni í norður- og suðurhluta hennar. Norðurbotn öskjunnar nær niður í 640 m y. s. og er hann lægri og sléttari en suðurbotninn þar sem nokkur stök eldvörp rísa yfir 1100 m, austan við Goðabungu og norðan við Háubungu. Gosstöðvar Kötlu frá 1918 eru í um 800 m hæð undir 400 m þykum jököli. Nokkrir sprungusveimar geisla út frá öskjunni, m. a. austur að Eyjafjallajökli, norðvestur um Entu og norðaustur að Eldgjá. Lega sex jarðhitasvæða við öskjubarmana undir jöklínnum sást af greinilegum sigkötłum á yfirborði hans. Þrír skriðjöklar hafa rofið skörð í öskjubarmana; Kötlujökull niður í um 750 m y. s., Sólheimajökull í um 1000 m og Entujökull í um 1000-1100 m. Um þessi þrjú skörð hafa jökulhláup fallið við gos í jöklínnum, niður á Mýrdalssand, til Sólheima- og Skógasands og til Markarfljótsaura. Auk þess gætu jökulhláup hafa fallið um gljúfur norður frá Austmannsbungu.

Til skamms tíma hafa aðstæður verið þannig í Mýrdalsjökli að ekki hefur safnast vatn í öskjunni nema undir nokkra litla sigkatla við öskjubarmana. Jökullinn þrýstir vatninu við botn út úr öskjunni svo að af  $70 \text{ km}^2$  svæði innan hennar fellur það niður á Mýrdalssand, af  $20 \text{ km}^2$  svæði niður að Markarfljóti og af  $20 \text{ km}^2$  svæði niður á Sólheima- og Skógasand. Við gos innan öskjubarmana er líklegt að rennslisleiðir jökulhláupa yrðu á svipuðum svæðum. Sé litið á allan jökulinn fellur vatn af um  $310 \text{ km}^2$  svæði til Mýrdalsjökuls,  $110 \text{ km}^2$  svæði til Sólheima- og Skógasands og  $170 \text{ km}^2$  að Markarfljóti. Bendi jarðhræringar til þess að gos sé að brjótast upp undir jöklínnum og unnt er að staðsetja líklegar gosstöðvar, má með þessum gögnum meta hvert jökulhláup muni falla.

# PRÓUN EFNAVÖKTUNARKERFIS TIL VARNAR MANN-VIRKJUM VIÐ ELDSUMBROT Í JÖKLI I BAKGRUNNUR

Hrefna Kristmannsdóttir<sup>1</sup>, Árni Snorrason<sup>2</sup>, Sigurður R. Gíslason<sup>3</sup>, Hreinn Haraldsson<sup>4</sup>, Ásgeir Gunnarsson<sup>2</sup>, Sigvaldi Árnason<sup>2</sup>, Snorri Zóphóníasson<sup>2</sup> Steinunn Hauksdóttir<sup>1</sup> og Sverrir Elefsen<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Orkustofnun, Rannsóknarsvið, Grensásvegur 9, 108 Reykjavík, <sup>2</sup>Orkustofnun, Vatnamælingar, Grensásvegur 9, 108 Reykjavík, <sup>3</sup>Raunvísindastofnun Háskóla Íslands, Dunhagi 3, 107 Reykjavík, <sup>4</sup>Vegagerðin, Borgartún 5, 105 Reykjavík

Breytingar verða á efnainnihaldi vatns í jökulám við örlítið innrennsli af jarðhitavatni eða vatni sem hefur komist í snertingu við kviku. Við gos í jökli bráðnar vatn, sem tekur upp efni sem við gos út í andrúmsloftið berst burt með gosstrókum. Þessi efni eru bæði gastegundir og ýmis önnur efni eins og málmar, flúor, klór, köfnunarefni o.fl. Braeðslu-efnið verður einnig mun súrara en ella og við það eykst hvörfun við aurburð og uppleyst efni aukast enn meira. Málmjónir og bíkarbónatjónir sem þannig myndast í vatninu auka verulega rafeiðni þess. Í Skeiðarár- og Skaftárhlaupum er þekkt að veruleg breyting verður á árvatninu vegna jarðhitaáhrifa og reyndar stundum eldvirkni. Lengi hefur verið vitað að í Skeiðarárhlauðum verður breyting á efnainnihaldi áður en hlaup hefjast, oft nokkrum vikum áður. Líklegt er talið að jarðhitavirkni og gasútstreymi geti magnast áður en eldsumbrot hefjast. Afrennsli frá svæðinu ætti því að breyta efnasamsetningu jökulvatns þaðan og breytingarnar gætu því sést talsvert áður en umbrotin verða og gefið viðvörun um að þau væru í aðsigi. Eftir að umbrot hefjast getur gefist fyrirvari um hvert vatnið muni leita með því að merkja leka vatns frá umbrotasvæðinu í árvatni. Til að finna slíkar breytingar og vita hvert viðvörunargildið er þarf að vera til góð bakgrunnsþekking um efnasamsetningu árvatnsins, tengsl þess við rennsli og árstíðabundnar breytingar.

Eftir úrvinnslu gagna frá efnagreiningum á vatni úr Skeiðará fyrir stóra hlaupið 1996 kom í ljós að unnt hefði verið að segja fyrir um hlaupið með nokkurra klukkustunda fyrirvara frá þeim gögnum. Jafnframt komu í Gjálpargosinu fram ummerki um afrennsli frá gosstöðvunum í efnasamsetningu vatns Jökulsár á Fjöllum án þess að um neina verulega rennsisaukningu væri að ræða.

Í umbrotum í Vatnajökli 1996 kom berlega í ljós að bakgrunnsþekkingu vantaði um efnasamsetningu jökuláa. Miklar árstíðabundnar sveiflur eru á efnastyrknum og geta árstíðabundin áhrif í sumum ám verið svipuð og áhrif, sem aðeins gætu þýtt yfirvofandi flóð vegna eldsumbrota í öðrum. Einnig fer það eftir rennsisleið, aurburðarmagni og fleiru hvaða áhrif koma skýrast fram á hverjum stað. Með vitnesku um efnastyrk við mismunandi rennsli má augljóslega greina breytingar vegna áhrifa eldvirkni með mun meiri næmni.

Vatnamælingar og rannsóknarsvið Orkustofnunar ásamt Raunvísindastofnun Háskóla og Vegagerðinni hófu því með tilstyrk Rannsóknarráðs samvinnu um verkefni sem hafði það að markmiði að koma á sjálfvirku vöktunarkerfi vegna jökulhlaupa og flóða frá eldsumbrotum í Vatnajökli og Mýrdalsjökli og byggðist á efnabreytingum í jökulám. Fyrsti áfangi verkefnisins var að afla bakgrunnsgagna um efnasamsetningu vatns í jökulánum. Frá niðurstöðum þess áfanga átti síðan að velja heppilega þætti til vöktunar á hverjum stað og skilgreina viðvörunargildi fyrir styrk hvers þáttar. Síðara stig verkefnisins fólst í að finna og þróa sjálfvirka skynjara og búnað til að fylgjast með þessum þáttum. Jafnframt að setja upp og reka nokkrar stöðvar til reynslu, sem mældu sjálfvirk

efnasamsetningu og rennsli og væru tengdar við fjarskiptastöð, sem sendi út viðvörum ef afbrigðileg gildi mældust.

Heppilegir þættir til sjálfvirkar vöktunar verða að uppfylla þau skilyrði að þeir sýni afgerandi breytingar við örliði írennsli hamfaravatns og að unnt sé að reka mælitæki á staðnum til sjálfvirkar mælingar. Þeir þættir sem í upphafi voru taldir koma helst til greina til vöktunar voru rafleiðni vatnsins og e.t.v. styrkur brennisteinsvetnis og kvikasilfurs. Rafleiðni er mælikvarði á efnastyrk vatnsins og hækkar því verulega við afrennsli frá jarðhita eða kvíkuvirkni. Brennisteinsvetni fylgir jarðhitavirkni og þekkt er lyktin af því sem fylgir jafnan Skeiðarár- og Skaftárhlaupum og er reyndar forboði þeirra. Hins vegar mælist það yfirleitt ekki eða í mjög lágum styrk í hlaupvatninu og þá einkum ef hlaup eru tengd eldsumbrotum. Í október 1996 mældist súlfíð í vatni Jökulsár á Fjöllum. Kvikaþilfur berst með jarðhitagasi í því hærri styrk sem hitastig er hærra og fylgir einnig eldsumbrotum. Það mælist nær aldrei í árvatni á Íslandi, en kom einnig fram í Jökulsá á Fjöllum í umbrotunum 1996. Ýmsir aðrir efnafraðilegir þættir eru dæmigerðir fyrir afrennsli frá eldsumbrotasvæðum en samfelld mæling á þeim er talin torveldari.

Mæling á rafleiðni er einföld og alþekkt tækni að mæla hana samfellt í árvatni. Hins vegar er jökulvatn oft mun gruggugra en almennt gerist í árvatni og finn aurburður getur bæði truflað niðurstöður og einnig valdið rekstrarörðugleikum á mælinum. Miklar árstíðasveiflur eru í leiðni jökulánna, sveiflur eru mismunandi milli áa og góð bakgrunnsþekking á efnasamsetningu viðkomandi árvatns því nauðsynleg til að túlka sveiflur og skilja út óeðlilegar breytingar frá árstíðasveiflu eða venjubundnu írennsli jarðhitablandaðs vatns. Jafnframt er nauðsynlegt að hafa rennslismælingar samhliða leiðnimælingum og þekkja vel samband rafleiðni og rennslis fyrir viðkomandi á og breytingar á því með árstíðum. Gasskynjarar, sem nema mjög lágan styrk brennisteinsvetnis eru þekktir, en sjálfvirk söfnun gassins til mælingar er hins vegar nokkuð erfið í framkvæmd. Skynjarar til mælinga á kvikasilfri í mjög lágum styrk eru þekktir, en væntanlega örðugt að reka þá samfellt við slíkar aðstæður.

Lokið er nú þeim hluta verkefnisins sem snýr að sýnatöku og efnagreiningum á vatnssýnum og hafa fengist mjög góð gögn um sveiflur í efnastyrk í þeim ellefu ám, sem rannsakaðar voru innan þess. Efnastyrkur árvatnsins og breytingar á honum eru mjög mismunandi í þessum ám. Á tímabilinu varð jökulhlaup í Skeiðará og einnig hefur verið leki úr Grímsvötnum í Skeiðará svo sveiflur í efnastyrk hafa verið óeðlilega miklar þar. Tvö hlaup urðu í Skaftá á tímabilinu. Þar var samhliða rekin samfelld leiðnimæling á árvatni í tilraunaskyni, sem gaf góðar ábendingar varðandi framtíðaruppsetningu og rekstur slíkra mælinga í ám með miklum aurburði.

Tengsl leiðni við rennsli er talsvert mismunandi fyrir mismunandi vatnsföll. Almennt séð virðist þetta samhengi tengjast því hversu mikill hluti vatnsins er jökulvatn og jafnframt hvort írennsli jarðhitavatns á sér stað. Hlutfall þessarra þáttar er mismunandi reglulegt, enda margir þættir sem hafa áhrif á þá (rennslisleið, mismunandi vatnsvið og berggrunnur, hitastig o.fl.). Spönn leiðnigilda yfir árið er mjög mismunandi. Leiðni með tíma sýnir að leiðni í árvatni sveiflast yfirleitt á bilinu 40-100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Í Kreppu og Djúpá mælist leiðni lægri en í flestum hinna. Einnig er fremur lág leiðni í Skjálfandafljóti. Í Jökulsá, bæði við Grímsstaði og Upptyppinga og í Leirá er hámarksleiðni 150-170  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Leiðni í Múlakvísl sveiflast milli 100 og 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Brennisteinsvetni mældist í engu tilviki utan örlítils votts í einu lekasýninu í Skeiðará.

Styrkur kvikasilfurs mælist í flestum tilvikum enginn eða um og undir bakgrunnsmörkum. Jafnvel í lekavatni úr Grímsvötnum og hlaupvatni úr Skaftá virðist styrkur kvikasilfurs ekki hækka.

Niðurstöður verkefnisins benda til að leiðnimælingar munu í mörgum ám geta gefið viðvörun um yfirvofandi flóð vegna eldsumbrota. Valin hafa verið vaktgildi fyrir leiðni miðað við mismunandi rennsli í þeim ám sem rannsakaðar voru. Í töflu 1 er sýnd spönn leiðnigilda fyrir árnar, hámark og lágmark hlutfalls leiðni og rennslis og hámarksvaltgildi fyrir leiðni í hverri á. Við ákvörðun á viðvörunargildi þarf auk þessa hámarksgildis að taka mið af hlutfalli leiðni og rennslis.

**Tafla 1.** Spönn leiðnigilda í ánum.

Staður	Hámark leiðni	Hámark leiðni/rennslí	Lágmark leiðni	Lágmark leiðni/rennslí	Viðvörunargildi leiðni
Skjálfandafljót	90	3,5	42	0,4	100
Kreppa	86	4	41	0,2	90
Jökulsá/Uppt.	177	1,6	80	0,5	180
Jökulsá/Grímsst.	147	1,3	58	0,1	150
Skeiðará	510*	0,2	67	11,7	180
Gíga	100	15,7	33	0,9	100
Súla	97	8,6	44	0,5	100
Djúpá	61	14,1	26	0,5	70
Ása-Eldvatn	242*	4,5	85	0,7	130
Leirá	172	38,1	70	1,9	180
Múlakvísl	301	65,8	105	1,4	320

\* gildi frá jökulhlaupum

Komið hefur verið upp vaktstöðvum í tilraunarekstri með síritandi vatnshæðar og leiðnimælingum í Skeiðará ofan brúar, í Jökulsá á Fjöllum og í Skaftá. Til stóð að prófa búnað til sjálfvirkrar mælingar á brennisteinsvetni á rannsóknarstofu og e.t.v. í framhaldi af því í Skaftá. Vegna umbrotanna í Mýrdalsjökli hefur það dregist en hins vegar verið lögð meiri áhersla á að koma upp leiðnimælistöðvum þar. Nú eru starfræktar nokkrar stöðvar í ám sem falla úr Mýrdalsjökli og Eyjafjallajökli. Einungis voru vaktaðar tvær ár á þessu svæði, Leirá og Múlakvísl, í fyrrihluta verkefnisins en til var fyrir allgóður viðmiðunargrunnar fyrir efnasamsetningu Jökulsár á Sólheimasandi. Talsverð jarðhitaáhrif eru að jafnaði í vatni þessarra áa og torveldar það nokkuð vöktunina.

## EFNASAMSETNING KÖTLUKVIKU

Karl Grönvold, Niels Óskarsson og Lisbeth Hildebrand.  
Norrænu eldfjallastöðinni, Grensásvegi 50, 108 Reykjavík.

Sýnum hefur verið safnað frá svæðinu sunnan og austan við Mýrdalsjökul. Sýnin hafa verið efnagreind fyrir aðalefni og nokkur nokkur snefilefni. Einnig hafa steindir verið efnagreindar í völdum sýnum.

Á suð-austur svæðisins þar sem mest upphleðsla hefur átt sér stað sést eingöngu móbergstúff, brotaberg og kubbaberg. Það er einungis í innst í dýpstu giljum sem sést í möguleg hlýskeiðshraun. Efst eru nokkrir hraunflákar þar sem gos hefur náð upp úr jöklum. Austan Sólheimajökuls eru hraunflákar – rofnir, með jöklusorfið yfirborð – en af óvissum aldri. Líparít finnst víða við jökulröndina – oftast sem móberg – og þekkt er stórgos úr Kötlu frá Yngra Holtasóleyjartímanum þar sem gaus súru, ísúru og basískri ösku. Bæði basalt móberg og öskulög eru oft blönduð súrrí ösku. Sandfell, norðan við Kötlujökul, er ísúr stapi. Annars er ísúrt berg hverfandi. Flest bendir til mjög hraðrar upphleðslu í suð-austur hlutanum.

Dílar í basaltinu eru fáir (oftast < 1%) og smáir. Helst eru plagíóklas, ágít og titanomagnetít en einnig koma fyrir ólivín og ilmenít. Hluti af dílunum er ekki í jafnvægi við umhverfi sitt og benda til blöndunar. Þetta á sérstaklega við um ísúra bergið í Sandfelli sem er greinilega blandað. Líparítíð er oftast dílafátækt en þó eru til myndanir með mikið af plagíóklas.

Allt Kötlubasaltið er ríkt í Titan og Járni og er allt tiltölulega þróað – það er langt frá því sem flestir telja líklega möttulkviku. Kvikan er einnig rík af utangarðsefnum – þeim snefilefnum sem heldur velja bráð en kristalla. Til dæmis er hér að finna mjög fosfórríkt basalt.

Nokkrar greiningar á samsætum Sr, Nd og Pb hafa birst áður og mynda, ásamt Torfajöklum, sérstakan hóp frábrugðin öðru bergi á Íslandi sem mælt hefur verið til þessa. Þetta táknað væntanlega að möttullin þar sem Kötlubergið er upprunnið sé annar og því ekki um beint kvikusamband að ræða - til dæmis við Vestmannaeyjar og Laka-gíga. Ekki eru ennþá til samsætugreiningar á súra bergen.

Til þess að mynda jafn þróað og utangarðsefnaríkt basalt og í Kötlu þarf annað hvort að bræða möttulinn þannig að mjög lítil bráð myndist eða að bráð sem myndast verður að losa sig við óhemju af kristöllum á leið sinni til yfirborðs – þarf þó sennilega hvoru tveggja til. Möttullinn gæti auk þess verið eitthvað frábrugðin því sem gerist í rekbeltunum, eins og reyndar samsæturnar og sum utangarðsefnin benda til.

Hið takmarkaða dílamagn í Kötlubasaltinu útilokar nánast að lokastig kvikuþróunar hafi átt sé stað í grunnum kvíkuhólfum né að kvikan hafi haft langa viðvöl í slíkum hólfum skömmu fyrir gos.

## JARÐHITINN Í MÝRDALSJÖKLI OG ATBURÐIRNIR SUMARIÐ 1999

Magnús Tumi Guðmundsson, Þórdís Högnadóttir, Helgi Björnsson, Finnur Pálsson  
Raunvísindastofnun Háskóla Íslands, Höfsvallagötu 53, 107 Reykjavík  
og Guðbjarni Guðmundsson  
Flugmálastjórn, Reykjavíkurflugvelli, pósthólf 350, 121 Reykjavík

Um áratugi hefur jarðhitit verið með svipuðum hætti í öskju Mýrdalsjökuls. Nokkrir fremur smáir sigkatlar raða sér nærrí jöðrum öskjunnar. Þessir katlar hafa verið 10-30 m djúpir, nokkur hundruð metrar í þvermál og samanlagt jarðhitaafl þeirra lauslega metið 300-400 MW. Sumarið 1955 kom skyndilegt hlaup í Múlakvísl og Skálum og þá myndaðist nýr ketill við öskjurimann, í upptökum Kötlujökuls. Loftmyndir og aðrar upplýsingar benda til að ekki hafi orðið breytingar annarstaðar í öskjunni 1955 en líklegt er að smágos hafi orsakað myndun ketilsins. Síðastliðið sumar kom skyndilegt hlaup í Jökulsá á Sólheimasandi og nýr ketill myndaðist í upptökum Sólheimajökuls. Á sama tíma tóku allir þekktir sigkatlar í jöklínnum að stækka. Til að fylgjast með þróun sigkatlanna og öðrum hugsanlegum breytingum, var settur upp sérstakur búnaður í flugvél Flugmálastjórnar. Gögnum frá flughæðarmæli vélarinnar er safnað inn á tölvu og staðsetning hennar skráð með kinematískri GPS mælingu. Þannig hefur fengist tæki til að mæla breytingar á yfirborði jökulsins (nákvæmni 1-2 m). Mælingar hófust 8. október 1999 þegar flogin voru 17 snið. Hafa mælingar verið gerðar á nokkurra vikna fresti síðan.

Vitað er um 15 jarðhitakatla í og við öskjuna. Tólf þeirra voru þekktir með vissu fyrir, en þrír eru nýir eða voru mjög óverulegir fyrir. Þeirra stærstur er ketillinn sem myndaðist upp af Sólheimajökli samfara hlaupinu 18. júlí og hefur hann lítið breyst síðan. Stækkun katlanna var að mestu um garð gengin á u.þ.b. einum mánuði, því ekki virðast hafa orðið miklar breytingar eftir miðjan ágúst. Frá 8. október til loka janúar hafa katlarnir grynnst um 3-6 m. A.m.k. að hluta til stafar sú breyting af vetrarákomu. Með því að nota kort RH af yfirborði jökulsins vorið 1991, og nýtt kort Ísgraf af austurhluta jökulsins eftir loftmyndum frá 6. ágúst, er hægt að meta bráðnun íss samfara stækkun katlanna. Ketillinn sem myndaðist 18. júlí er 20 milljón m<sup>3</sup>. Samanlagt nemur stækkun annarra katla 50 milljón m<sup>3</sup>. Afl jarðhitans jókst í a.m.k. 7000 MW í júlí en strax október var það orðið mun minna. Þó virðist aflid enn vera töluvert meira en var fyrir atburðina síðastliðið sumar. Ennfremur er ljóst að afl nýja ketilsins var um stærðargráðu meira en annarra katla í júlí. Mögulegt er að vatn hafi safnast undir katlinum í einhverjar vikur eða mánuði fyrir hlaupið. Sú staðreynd að annarstaðar tóku katlar að stækka um svipað leyti og hlaupið varð, bendir þó til að myndun stóra ketilsins sé hluti af sama ferli og að vatnssöfnun hafi orðið á tiltölulega skömmum tíma.

Líklegast er að atburðirnir í Mýrdalsjökli stafi af kvíkuhreyfingum. Mögulegt er að þrýstingur hafi lækkað í kvíkuhólfí undir honum og miðja öskjunnar sigið. Við það hefði orðið gliðnun yfir jöðrum slíks hólfs, poruhluti vaxið og þar með lekt bergsins. Þannig gæti varmanám jarðhitavatnsins úr bergeninu aukist. Annar möguleiki er sá að kvika hafi skotist inn í rætur jarðitasvæðanna og aukið þannig afl þeirra. Í þriðja lagi gæti hafa orðið smágos. Samspil þessara þriggja þátta er einnig mögulegt. Hin snögga aukning jarðhitans ásamt tiltölulega hraðri lækkun hans aftur fellur betur að kvíkuinniskoti en því að eingöngu hafi orðið sig og gliðnun. Myndun ketilsins upp af Sólheimajökli á stað þar sem ekki var merkjanleg dæld fyrir, bendir til þess að þar hafi kvika komið upp á mjög lítið dýpi. Fellur atburðarásin reyndar allvel að þeirri tilgátu að smágos hafi orsakað myndun ketilsins.

## ATBURÐARÁS Í TENGSLUM VIÐ HLAUP Í JÖKULSÁ Á SÓLHEIMASANDI Í JÚLÍ 1999

Páll Einarsson, Raunvísindastofnun Háskólangs, Höfsvallagötu 53, 107 Reykjavík

Hlaupið í Jökulsá á Sólheimasandi 18. júlí 1999 var um ýmislegt einstæður atburður. Hlaup af þessari gerð hafa ekki áður orðið í Jökulsá í manna minnum. Því fylgdi skjálftavirkni og sigketill myndaðist í Mýrdalsjökli við efstu drög Sólheimajökuls. Í kjölfar hlaupsins varð aukning í jarðhita á mörgum stöðum undir Mýrdalsjökli. Leiða má að því rök að lítið eldgos hafi orðið undir Mýrdalsjökli, sem valdið hafi hlaupinu. Atburðarásin var sem hér segir:

- 15.-16. júlí: Merkjanleg breyting á jarðskjálftavirkni undir Mýrdalsjökli. Skjálftar áttu upptök undir sunnan- og austanverðum jöklínunum. Einnig mældist hrina af lágtíðni-skjálftum með óviss upptök. Menn taka eftir breytingum á Jökulsá, bæði á lit og lykt.
17. júlí: Klukkan 17 kom fram á mælum væg óróahviða, 20 mínútna löng. Öflugri hviða kom klukkan 22:18 og stóð í 9 mínútur. Næstu 5 klukkustundir var viðvarandi órói, mismikill þó. Jökulsá var dökk og vatnsmikil um kvöldið.
18. júlí: Stutt en ákaft hlaup í Jökulsá. Vatnsborð var metið um 1 m undir brúargólfí skömmu fyrir klukkan 3. Hlaupið sjatnaði hratt. Það kom úr sigkatli ofan Sólheimajökuls og er rúmmál hans metið  $13 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Nokkrir skjálftar mældust undir Mýrdalsjökli þennan dag.

Næstu vikur var viðvarandi jarðskjálftavirkni undir jöklínunum, sem færðist þó fljótegla í horf venjulegrar haustskjálftavirkni.

Rökin fyrir því að lítið eldgos hafi valdið hlaupinu eru einkum þessi:

1. Jarðskjálftavirkni á undan hlaupinu er í fullu samræmi við að lítið gos hafi orðið. Jarðskjálftavirkni var á Kötlusvæðinu dagana á undan, en það er nokkuð frávik frá virkni síðustu mánaða og jafnvel ára.
2. Órói sem kom fram á mælum kvöldið áður er af því tagi sem mælist samfara eldgosum, t.d. í Gjálp 1996 og Grímsvötnum 1983 og 1998. Ekki er með vissu vitað um neitt annað sem getur valdið slíkum óróa. Samanburður við stóra hlaupið úr Grímsvötnum 1996 styður þá niðurstöðu að vatnshlaup hafi ekki valdið óróanum.
3. Vatnið sem hljóp fram hefur orðið til við snögga bráðnun á jöklínunum. Sigketillinn er í bröttum jöqli sem tæpast getur haldið neinu vatni. Hallinn á jökulfirborðinu er 6% og allt vatn sem verður til við jökulbotninn leitar jafnóðum burt. Það styður þessi rök frekar að ketillinn er enn ekki farinn að safna vatni, þó liðið sé hálftrár frá atburðunum og hann sé nú mun dýpri en fyrir hlaupið. Það er ljóst að varmaskipti hafa verið mjög ör undir jöklínunum og nánast útilokað að jarðhiti í venjulegum skilningi geti staðið undir þeim.

Gosið sem olli hlaupinu var mjög lítið. Kvíkumagnið gæti hafa verið á bilinu 1 til 2 ×  $10^6 \text{ m}^3$ .

# JARÐSKJÁLFTA- OG ÞENSLUMÆLINGAR TIL EFTIRLITS MEÐ MÝRDALS- OG EYJAFJALLAJÖKLI - LÍKUR Á ELDGOSI

Ragnar Stefánsson, Gunnar B. Guðmundsson og Páll Halldórsson  
Veðurstofu Íslands

Þeir skjálftar, sem þekktir eru nokkrum klukkutínum áður en Kötlugos brýst upp úr jöcli og hlaup kemur fram á Mýrdalssand, eru líklega af stærðinni 4.5-5 á Richter. Þ.e.a.s. þeir þurfa að vera þetta stórir til að þeir finnist eins mikið í byggð og lýsingar bera með sér. Þetta segir okkur hins vegar ekki svo að óyggjandi sé að svo stórir skjálftar komi á undan stórum Kötlugosum. Það er hins vegar líklegt. Allar ítarlegar heimildir um Kötlugos, sem sagt eftir 1625, greina frá skjálfta á undan. Það eru aðeins sæmilega góðar heimildir um eitt gos í Eyjafjallajökli, 1821, og þar kemur ekki fram hvort skjálftar hafi verið á undan. Hvað sem þessu líður er það ljóst, að til að lengja viðvörunartímann og til að gera viðvörun öruggari þarf að byggja á margbættri túlkun á atburðarás, þar sem jarðskjálftar, hugsanlega mjög litlir, eru líklega þýðingarmestu merkin. Við þekkjum allt of lítið um eðli þessara eldfjalla til að við getum fyrirfram bent á einhver einkenni, sem hljóti að boða gos!

Það er hins vegar hugsanlegt að með mælingum og rannsóknum getum við skilið eðli þeirra, jafnvel með rannsóknum dagana eða vikurnar fyrir gosið. Segja má að fylgst hafi verið með jarðskjálftum á þessu svæði frá því jarðskjálftamælingar hófust hér á landi 1927. Í fyrstu var þetta út frá mælistöð í Reykjavík og frá 1954 bættist við stöð á Akureyri. Árið 1955 var sett upp jarðskjálftastöð í Vík, og 1958 að Kirkju-bæjarklaustri, báðar í því skini að mæla skjálfta á Kötlusvæðinu. Frá því 1967 og fram undir það síðasta hafa jarðskjálftamælingar á svæðinu stöðugt verið að eflast.

Frá því 1951 er til nokkuð heilleg mynd af streinútlausn ("spennuútlausn") í jarðskjálftum og þá í grundvallaratriðum byggt á skjálftum stærri en 3-3.5. Langmest var streinútlausnin í tveimur stórum hrinum, annars vegar frá því í október 1966 og fram í október 67, (sem sagt upp úr því að Surtseyjargosi lauk) og hins vegar frá því í ágúst 76 og fram eftir hausti 77 (sem sagt upp úr því að meginvirkninni á Kröflu og Öxarfjarðarsvæðinu lauk). Þó nokkuð var um skjálfta árin 1992-1993, þótt streinútlausn hafi þá verið miklu minni en á þeim tímabilum sem áður voru tilgreind.

Á þessum þremur tímabilum var gripið til sérstakra ráðstafana til að fylgjast betur með framvindu mála með það í huga að hugsanlega væri gos að brjótast fram.

Það sem einkennt hefur síðastliðið ár hvað varðar jarðskjálfta á svæðinu, er ekki að þeir hafi verið svo miklir. Það er frekar ýmis óljós einkenni á virkninni að viðbættum öðrum mælingum, athugunum og túlkunum, sem hafa bent til þess að kvikuþrýstingur færi vaxandi undir svæðinu. Grunsemdir voru vaknaðar út frá jarðskjálftamælingum áður en vart varð við brennisteinslykt á svæðinu, og hlaupið í Jökulsá á Sólheimasandi sem fylgdi í kjölfarið þann 18. júlí.

Þenslumælingar hafa verið gerðar í borholum á Suðurlandi frá því 1980. Þær hafa veitt þýðingarmiklar upplýsingar um land- og spennubreytingar, sérstaklega sem varðar 2 Heklugos á þessu tímabili. Vegna fjarlægðar þessa kerfis frá Mýrdalsjökuls-Eyjafjallajökulssvæðinu var fyrirfram ekki gert ráð fyrir mælanlegum breytingum þar fyrr en beinlinis í tengslum við gos. Athyglisverðar breytingar hafa hins vegar sést í þessum mælingum allt s.l. ár.

Í erindinu er lýst nokkrum þáttum sem einkenna jarðskjálftavirknina og mælingar þenslumælis á Stórlófshvoli.

Mælingar og túlkun þeirra gæti bent til eftirfarandi einkenna þess umbrotaverlis sem nú stendur yfir:

- Það hófst nálægt áramótum 98-99, en hugsanlega mætti tímasetja þetta fyrr.
- Það tekur til stórs svæðis, sem inniheldur auk Mýrdalsjökuls, Eyjafjallajökul og Torfajökulssvæðið.
- Rætur umbrotanna eru djúpar, hugsanlega á 15-20 km dýpi, og víðáttumiklar,
- og miðja þeirra líklega undir Eyjafjallajökli.
- Kvikuþrýstingur er vaxandi undir Eyjafjallajökli og gætir þrýstings nú á 3-5 km dýpi út frá gosrásinni eins og kemur fram í þenslu eða hniki á 1-3 km dýpi undir suðurhlíðum Eyjafjallanna.
- Það er ekkert hægt að segja um það hversu langt er í gos.
- Þótt miðja umrótanna sé undir Eyjafjallajökli er eins líklegt að næsta gos verði undir Mýrdalsjökli. Svæðin eru samtengd í rót sinni og samspil kvikuþrýstings og spennu í skorpunni ræður því hvar gos kemur upp hverju sinni á þessu svæði.

# ICE FRACTURING DURING JÖKULHLAUPS: IMPLICATIONS FOR ENGLACIAL FLOODWATER ROUTING AND OUTLET DEVELOPMENT

Matthew J. Roberts<sup>1 & 2</sup>, Andrew J. Russell<sup>2</sup>, Fiona S. Tweed<sup>1</sup> and Óskar Knudsen<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Division of Geography, Staffordshire University, College Road, Stoke-on-Trent, Staffordshire, ST4 2DE, England. <sup>2</sup>School of Earth Sciences and Geography, Keele University, Keele, Staffordshire, ST5 5BG, England. <sup>3</sup>Klettur Consulting Engineers, Bíldshöfða 12, IS 112 Reykjavík, Iceland

Theoretical studies of glacier outburst floods (jökulhlaups) assume that: (i) intraglacial floodwater is efficiently transported in isolated conduits; (ii) intraglacial conduit enlargement operates proportionally to increasing discharge; (iii) floodwater exits glaciers through pre-existing ice-marginal outlets; and (iv) the morphology and positioning of outlets remains fixed during flooding. Direct field observations, together with historical jökulhlaup accounts, confirm that these theoretical assumptions are not always correct. This paper presents new evidence for spatial and temporal changes in intraglacial floodwater routing during jökulhlaups; secondly, it identifies and explains the influence of ice fracturing on the routing of floodwater and the positioning and morphology of jökulhlaup outlets; and finally, it re-evaluates previous models of jökulhlaup hydraulics. Field observations are presented from two Icelandic glaciers, Sólheimajökull and Skeiðarárjökull. The documented nature of floods from these glaciers enables an evaluation of our current understanding of jökulhlaup floodwater routing and outlet development. Site-specific video footage and aerial photographs revealed changes in floodwater routing and the positioning and morphology of outlets. Post-flood fieldwork at both glaciers involved surveys of jökulhlaup outlets. Field observations confirm that glaciers cannot transmit floodwater as effectively as previously assumed. Rapid increases in jökulhlaup discharge generate basal hydraulic pressures in excess of ice overburden. Under these circumstances, floodwater can be forced through the surface of glaciers, leading to the development of a range of supraglacial outlets. The rate of increase in hydraulic pressure strongly influences the type of supraglacial outlet that can develop. Steady increases in basal hydraulic pressure can retro-feed pre-existing englacial drainage, whereas rapid increases in pressure can generate hydraulic fracturing. The position and morphology of supraglacial outlets is a control on the spatial and temporal impact of flooding. The development of supraglacial outlets provides a new mechanism for ice block detachment and the rapid elevation of water and debris into glaciers. Knowledge of the controls on intraglacial floodwater routing and outlet development is crucial if we are to effectively mitigate jökulhlaup hazards.

# THE CHARACTERISTICS AND IMMEDIATE IMPACT OF AN UNEXPECTED MAGMATICALLY-TRIGGERED OUTBURST FLOOD ON THE JÖKULSÁ A SÓLHEIMASANDI, MÝRDALSJÖKULL, SOUTHERN ICELAND

Andrew J. Russell (1), Fiona S. Tweed (2), Óskar Knudsen (3), Matthew J. Roberts (1&2), James W. Rice Jr. (4), Philip M. Marren (1), Richard I. Waller (5), E. Lucy Rushmer (2) and Timothy D. Harris (2)

(1) School of Earth Sciences and Geography, Keele University, Staffordshire, ST5 5BG; (2) Division of Geography, Staffordshire University, College Road, Stoke-on-Trent, ST4 2DE; (3) Klettur Consulting Engineers, Bíldshöfða 12, IS 112 Reykjavík, Iceland; (4) Lunar and Planetary Labs., PO Box 210092, University of Arizona, Tucson, Arizona; (5) Department of Earth and Environmental Sciences, University of Greenwich, Medway Campus, Chatham Maritime, Kent, ME 4TD.

Seismic activity within the Katla volcanic system underneath the Mýrdalsjökull ice cap during late July 17<sup>th</sup> and early July 18<sup>th</sup> 1999 was accompanied by the development of a 1.5 km diameter, 50 m deep depression in the accumulation area of Sólheimajökull. At the same time a jökulhlaup was released from the snout of Sólheimajökull, destroying power lines, splashing over a bridge on Iceland's main road and transporting ice blocks 8 km into the sea. The jökulhlaup at Sólheimajökull in July provides a superb opportunity to examine the immediate impact of a sudden magmatically-triggered event on a glacier and sandur that have not experienced an event this size since 1860 AD.

This paper aims to: (1) describe flood flow conditions; (2) identify the immediate impact of the jökulhlaup on the glacier; and (3) identify the immediate impact of the jökulhlaup on the 1 km wide, 8 km long area flanking the Jökulsá á Sólheimasandi between the glacier and the sea. Field data collection was carried out on the day of the flood and the following three weeks. Flood wash limits and river channel cross-sections were surveyed using an EDM allowing the calculation of peak flood discharge. Within flood sedimentary structures, surface grain sizes and ice block grounding structures were measured.

The jökulhlaup burst from the glacier at a number of locations ranging from supraglacial fracture outlets up to 2 km from the glacier snout, to marginal conduit outlets up to 4 km up-glacier of the snout. Jökulhlaup flows exited the glacier snout via two main conduits. Supraglacial outlets consisted of multiple up-glacier dipping fractures at a variety of angles. Grey silt sands were deposited within the fractures and across the glacier surface forming a distinctive residual. Marginal outlets on the western margin of the glacier supplied boulders up to 5 m in diameter, with flows subsequently entraining even larger boulders up to 10 m in diameter from older ice-marginal sediments. Lateral outflow resulted in the temporary storage of jökulhlaup water within former ice-dammed lake basins. Sedimentation within these basins consists of depositions of sands and silts with a series of ripple-marks occasionally sliced through by iceberg keel marks. Localised deltaic deposition occurred where outflow entered these temporary storage locations. At the glacier snout flows from the western outlet were estimated to have a peak discharge of between 4000 and 6000  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ . The new outwash fan deposited in front of the western outlet ranges in thickness from 6 m proximally to less than 1 m distally. Deposition of ice blocks, boulders and finer-grained matrix occurred simultaneously resulting in the post-flood development of kettle holes and large-scale obstacle marks. Sedimentary structures indicate flows were hyperconcentrated probably during the rising stage of the flood. The eastern outlet at the glacier snout had a much lower discharge of approximately 1000  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ . Sediment from the main eastern conduit consisted of better-sorted, finer-grained deposits containing fewer ice blocks.

The overall geomorphic impact of this flood was confined to a main proglacial channel incised into older jökulhlaup deposits. Large amounts of sediment are thought to have been transferred directly from the glacier to the sea, although zones of localised deposition occur in front of the western outlet and within the ice-marginal lake basins. Spectacular jökulhlaups as a mechanism of sediment entrainment in glaciers and ice sheets. This unexpected sudden flood had a significant impact on both glacier and proglacial zone, providing a sobering reminder of the ongoing potential at this site for sudden outburst floods.

## KOLTVÍOXÍD (CO<sub>2</sub>) FRÁ EYJAFJALLAJÖKLI

Sigurður Reynir Gíslason,  
Raunvísindastofnun Háskólangs, Dunhaga 3, 107 Reykjavík

Tilgangur rannsóknarinnar var að leggja mat á streymi koltvíoxíðs frá Eyjafjallajökli miðað við stakar mælingar á árunum 1993 til 2000. Enn fremur að mæla rúmmál lónsins fyrir framan Gígjökul til þess að skilgreina dvalartíma vatns í lóninu. Upplýsingar um dvalartíma vatnsins í lóninu gerir kleift að leggja mat á hversu mikið koltvíoxið tapast til andrúmsloft frá yfirborði lónsins áður en það kemur að mælistað.

Aðstæður við Eyjafjallajökul eru einstakar. Askja eldstöðvarinnar er vel afmörkuð, og hún er hulin jökli sem hefur eitt vel afmarkað útrennsli um Gígjökul. Koltvíoxið sem streymir upp í öskjuna leysist upp í jökulvatni sem kemur undan Gígjökli og rennur í lónið. Með því að mæla rennsli og styrk koltvíoxíðs í útfalli lónsins, Jökulsá, má meta heildarstreymi koltvíoxíðs inn í öskjuna.

Ef gasrík kvika streymir inn undir eldfjall er líklegt að gasútstreymi frá eldfjallinu aukist. Langtíma mælingar á koltvíoxíði í Jökullóninu gætu því nýst til þess að meta líkur á eldgosi. Gígjökull er eitt vinsælasta svæði landsins til æfinga í ísklifri. Vatnið undir Gígjökli er yfirmettað af koltvíoxíði. Lyktarlaust koltvíoxið berst frá vatninu og upp í sprungur og svelgi sem ná til botns. Styrkur koltvíoxíðs í sprungunum er meiri en í venjulegu andrúmslofti og getur valdið köfnun.

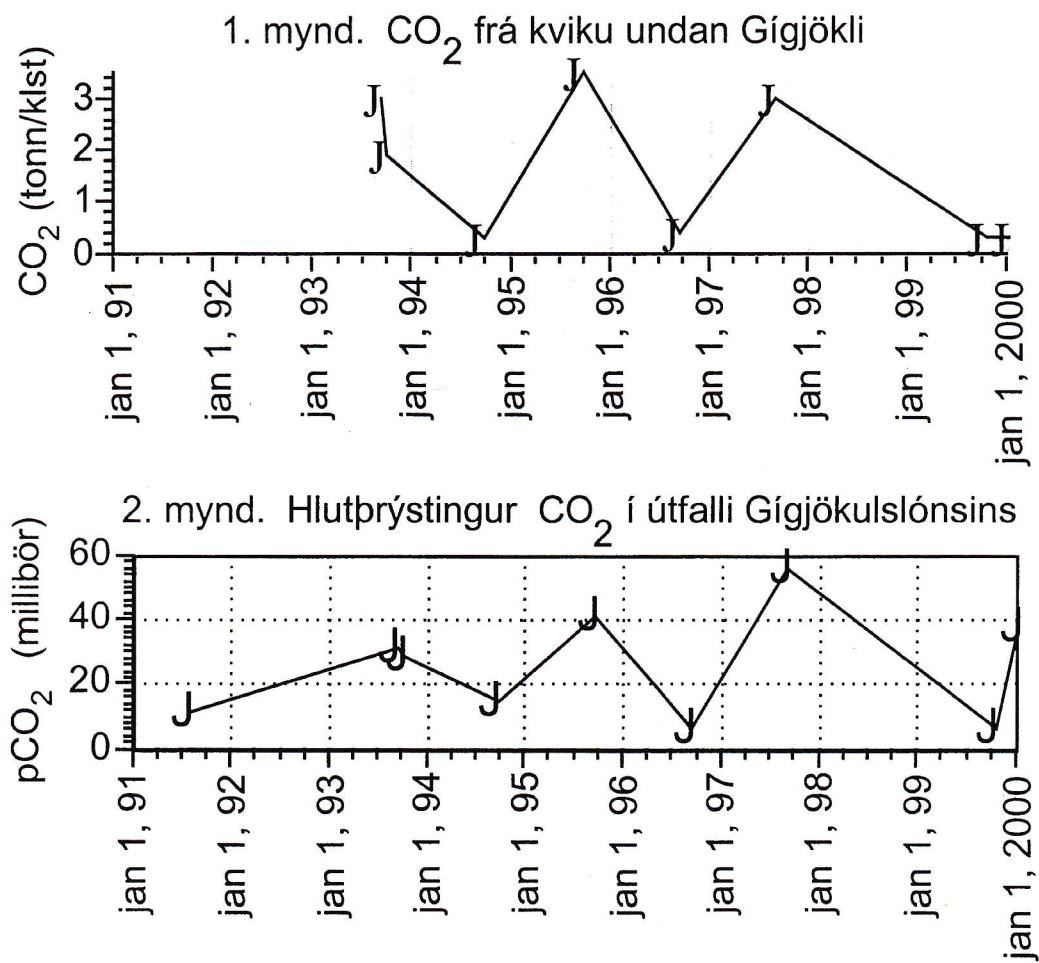
Styrkur uppleysts kolefnis hefur sveiflast tölувert í Jökulsá frá 1991 og er sveiflan óháð rennsli árinna. Heildarstyrkur kolefnis í Steinholtsá, sem er næsta straumvatn austan Gígjökuls, var svipaður og í öðrum jökulám á Íslandi (Sigurður R. Gíslason o.fl., 1996). Styrkurinn í Steinholtsá var stöðugur all til janúar 2000 en þá var hann nokkuð meiri en áður. Í Jökulsá var styrkurinn meiri en tífeldur meðalsstyrkur íslenskra jökuláa þegar hann var hvað mestur. Kolefnið í Steinholtsánni fram til janúar 2000 var að mestu tilkomið vegna upptöku koltvíoxíðs úr andrúmslofti samfara veðrun bergs en styrkur og breytileiki kolefnisstyrksins í Jökulsá verður ekki skýrður nema með streymi koltvíoxíðs inn í öskju Eyjafjallajökuls. Til þess að áætla það magn sem kemur inn í öskjuna var gert ráð fyrir að kolefnið í Jökulsá, sem rekur uppruna sinn til andrúmslofts, sé það sama og það sem mælt var samtímis í Steinholtsánni. Það magn var því dregið frá heildarstyrk kolefnis í Jökulsá til þess að reikna streymi CO<sub>2</sub> inn í öskjuna.

Streymi koltvíoxíðs frá Eyjafjallajökli um botn Gígjökuls hefur verið breytilegt frá haustinu 1993. Það var hlutfallslega lítið síðastliðið haust og haustið 1994, en mikið haustin 1993, 1995 og 1997 eða um og yfir 3 tonn af CO<sub>2</sub> á klukkustund (1. mynd). Hlutþrýstingur koltvíoxíðs í útfalli lónsins fyrir framan Gígjökul er mikill en breytilegur (2. mynd). Koltvíoxið reikar því úr vatninu til andrúmsloft en án þess að augað greini. Ef kyrrstætt loft nær jafnvægi við vatnið getur hluti CO<sub>2</sub> í loftinu orðið allt að 6%. Vinnueftirliti ríkisins setur hættumörk CO<sub>2</sub> andrúmslofti við 5%. Samkvæmt vinnureglum eftirlitsmannna sömu stofnunar er miðað við að lofræsta þurfi rými ef styrkur CO<sub>2</sub> í andrúmslofti fer yfir 1%. Í byrjun desember 1997 mældi Jón Haukur Steingrímsson (1997) styrk CO<sub>2</sub> í kyrrstæðu lofti á botni svelgs í Gígjökli. Reyndist styrkurinn vera um 5%, þ.e. í góðu samræmi við það sem reiknað var út frá vatnsefnasamsetningunni.

Dýpi lónsins og rúmmál var mælt á ís 8. janúar 2000 og er drjúgur hluti lónsins 8 - 14 metra djúpur. Mesta dýpi reyndist vera 14,5 metra. Lónið var allt jafn kalt eða um 0 °C og efnasamsetning þess svipuð hvort heldur var næst jökli eða í útfalli, og eins við botn og á 2 metra dýpi. Heildarrúmmál lónsins var 382000 rúmmetrar.

Reiknaður dvalartími vatnsins í lóninu miðað við rennslí útfalls og rúmmál lónsins sveiflast frá hálfum sólarhringi þegar rennslíð var mest og í rúma viku þegar rennslíð var minnst. Mest tapast af koltvíoxíði þegar hlutþrýstingur CO<sub>2</sub> er mikill og dvalartíminn í lóninu er langur.

Af ofansögðu er ljóst að gasinnstreymi inn í öskju Eyjafjalljökuls hefur verið breytilegt frá 1993 og það var með minnsta móti 18. október 1999 og 8. janúar 2000. Gasið sem kemur inn í öskjuna er nær hreint og lyktarlaust CO<sub>2</sub>. Gasið hefur haft hlutfallslega líttina tíma til efnaskipta við berg því pH gildi vatnsins er lágt. Þetta bendi til þess að hlutfallslega stutt sé í kviku eða gasið berist til yfirborðs öskjunnar í afmörkuðum leiðara sem hefur líttin snertiflót vatns og berg. Mæling sem gerð var 8. janúar síðastliðinn bendir til þess að CO<sub>2</sub> sé farið að streyma inn á vatnasvið Steinsholtsár.



Jón Haukur Steingrímsson (1997). Gígjökull, gasstreymi. Minnisblað til Almannavarna ríkisins. Dags.: 11.2.97, 2 bls.

Sigurður R. Gíslason, Stefán Arnórsson og Halldór Ármannsson (1996). Chemical weathering of basalt inn SW Iceland: Effects of runoff, age of rocks and vegetative/glacial cover. American Journal of Science, 296, bls. 837-907.

# CRUSTAL DEFORMATION AROUND MÝRDALSJÖKULL AND EYJAFJALLAJÖKULL, 1967-2000

Erik Sturkell,<sup>1</sup> Páll Einarsson,<sup>2</sup> and Freysteinn Sigmundsson<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nordic Volcanological Institute

<sup>2</sup>Science Institute, University of Iceland

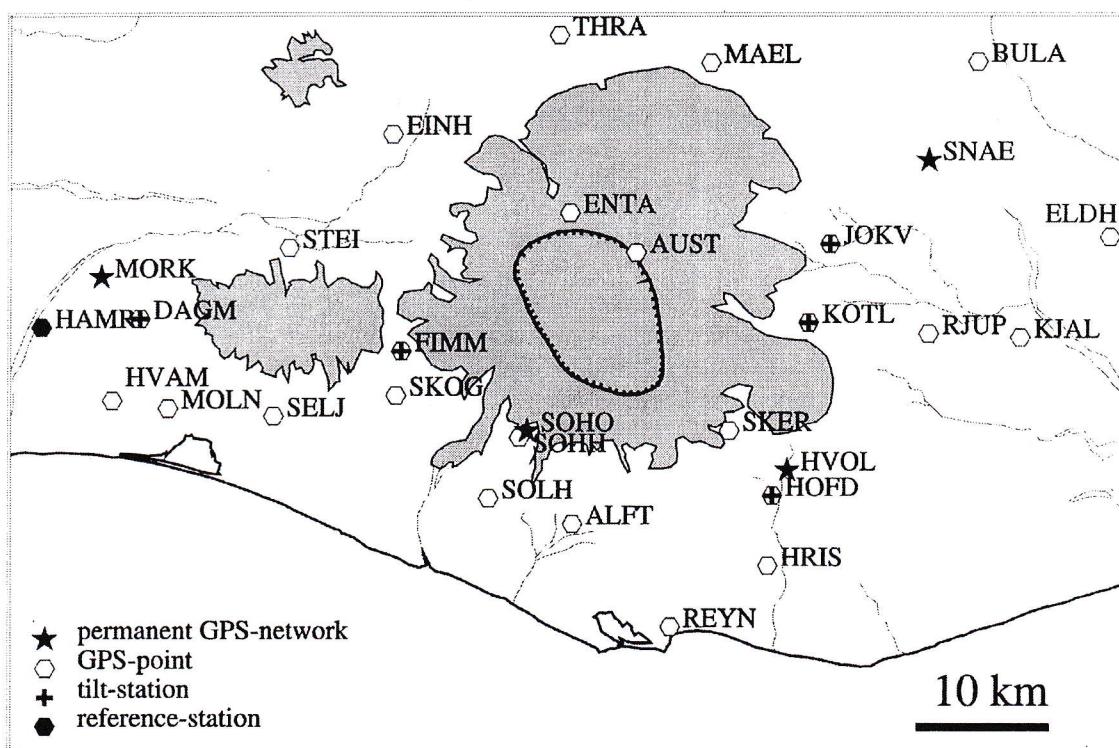
A network of GPS points and optical levelling tilt stations (fig. 1) around Mýrdalsjökull and Eyjafjallajökull has been measured repeatedly in the last years in order to determine crustal deformation at these volcanoes. Three tilt-stations were installed 1967 (fig. 1) to the east and southeast of Mýrdalsjökull. In 1992 a tilt station was installed at Fimmvörðuháls and Dagmálfjall 1994. The first GPS points were installed in 1989 in the area as a part of a regional network. In 1993 a denser GPS-network was installed around Mýrdalsjökull, and in 1994 several points was installed around Eyjafjallajökull.

GPS and the tilt measurements have shown very little crustal deformation attributable to Katla since measurements were initiated. Most of the stations are situated relatively far from the volcano and these stations are not sensitive to inflation of a magma chamber at a shallow depth. The stations closest to expected inflation centres in the caldera are located on the caldera rim and are not easily accessible. For example, an uplift of 50 cm from a point source at 2000 m depth would cause at 11 km distance a vertical uplift of 0.3 cm, a horizontal displacement 1.6 cm and a tilt of 0.77 µrad, too small to be measured.

Significant deformation has been observed at Eyjafjallajökull, on its southern slopes, in 1994 and again in 1999. In 1994 some crustal deformation took place at Eyjafjöll in association with an earthquake swarm recorded between May 29, and June 22. Uplift of 2.9 cm and a horizontal displacement of 2.4 cm in the direction 220° was recorded by GPS measurements at the Seljavellir station. Upward tilt of 12.4 µrad in the direction 266° was measured at Fimmvörðuháls. The GPS station at Steinsholt showed insignificant horizontal displacement and a vertical subsidence of -2.2 cm. It should be noted that the Seljavellir and Steinsholt points were measured with GPS for the first time on June 2 - 6, 1994, that is during the earthquake swarm. Therefore the total amount of deformation associated with the event may not have been measured. Measurements spanning the time period from September 1994 to the summer of 1998 yielded insignificant amount of horizontal displacements around Eyjafjallajökull. In the early morning of July 18, 1999, a small jökulhlaup occurred in Jökulsá á Sólheimasandi. In response to this event, tilt measurements were performed at Fimmvörðuháls on July 19, 1999. These showed an uplift of 3.5 µrad in the direction 60° (i.e. approximately the direction towards Goðabunga) since the summer 1998. The GPS network around Eyjafjallajökull was re-measured 16-21 August. No deformation was detected, except the very significant uplift at the Seljavellir station of 5.7 cm and a horizontal displacement of 4.4 cm in almost southerly direction (198°) since the 1998 measurements. The tilt station at Fimmvörðuháls was re-measured October 16 showing an upward tilt in the direction of Seljavellir (256°) of about 10 µrad. The tilt station at Dagmálfjall did also show uplift in the direction of Seljavellir of about 1.9 µrad in the direction 123° (during the period 15/7-98 to 21/10-99). This amount of tilt is just slightly more than the uncertainty of the method, which is about 1 µrad. However, it gives an indication, and along with the other observations suggests an uplift of the area around Seljavellir. The measurements at Fimmvörðuháls yielding 10 µrad tilt is

conclusive and together with the data from the tilt station at Dagnálafjall point to a centre of uplift centred on the southern slopes of Eyjafjallajökull, north of Seljavellir. The timing for the beginning of the inflation of Eyjafjallajökull in 1999 is bracketed between the tilt measurement at Fimmvörðuháls on July 19 and the GPS survey at Seljavellir on August 16-21. The displacement measured by GPS from the summer 1998 to November 1999 of the Seljavellir point shows an uplift of 12.1 cm and a horizontal displacement of 11.4 cm in direction 202°. This direction of the horizontal displacement is similar to the displacement measured during the 1994 event, which was in direction 220°.

The ongoing deformation at Eyjafjallajökull seems to be local and therefore of shallow origin. It does not seem to be radially symmetrical because of no deformation is recorded north of the ice cap. A shallow dyke intrusion is considered the probable explanation for the recorded crustal deformation at the south flank of Eyjafjallajökull.



**Figure 1.** Map of the geodetic network around Eyjafjallajökull and Mýrdalsjökull. The GPS- and tilt stations mentioned in the text are Dagnálafjall (DAGM), Fimmvörðuháls (FIMM), Seljavellir (SELJ), and Steinsholt (STEI).

## EFNAVÖKTUNARKERFI TIL VARNAR MANNVIRKJUM VIÐ ELDSUMBROT Í JÖKLI II KERFISLÝSING

Sverrir Óskar Elefsen<sup>1</sup>, Sigvaldi Árnason<sup>1</sup>, Gunnar Sigurðsson<sup>1</sup>, Árni Snorrason<sup>1</sup>,  
Hrefna Kristmannsdóttir<sup>2</sup>, Sigurður R. Gíslason<sup>3</sup>, Hreinn Haraldsson<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Orkustofnun, Vatnamælingar, Grensásvegur 9, 108 Reykjavík, <sup>2</sup>Orkustofnun, Rannsóknarsvið, Grensásvegur 9, 108 Reykjavík Iceland, <sup>3</sup>Rauvísindastofnun Háskóla Íslands, Dunhagi 3, 107 Reykjavík,  
<sup>4</sup>Public Roads Authority, Borgartún 5, 105 Reykjavík

Á undanförnum þremur árum hafa Vatnamælingar og Rannsóknarsvið Orkustofnunar ásamt Raunvísindastofnun Háskóla og Vegagerðinni með tilstyrk Rannsóknarráðs unnið sameiginlega að verkefni með því markmiði að koma á sjálfvirku efnavöktunarkerfi vegna jökulhlaupa og flóða frá eldsumbrotum í Vatnajökli og Mýrdalsjökli. Byggist vöktunin á rennslis- og efnabreytingum í jökulám og var fyrsti áfangi verkefnisins því að afla bakgrunnsgagna um efnasamsetningu vatnsins. Í framhaldi af öflun bakgrunnsgagna fyrir efnabreytingar í jökulánum voru settir upp nokkrir leiðnimælar í tilraunarekstri samhliða eldri vatnshæðarmælum. Í kjölfar gossins og hlaupsins í Vatnajökli 1996 hófust tilraunir með hönnun og uppsetningu samtímakerfis. Uppbygging kerfisins hófst með uppsetningu stöðva í Skjálffandafljóti við Aldeyjarfoss, Jökulsá á Fjöllum við Upptyppinga og Kreppu haustið 1998 og í kjölfar goss í Grímsvötnum í desember 1998 en þá var sett upp stöð í Skeiðará með stuðningi frá Vegagerðinni. Sumarið 1999 var reist stöð í Skaftá við Sveinstind. Þá hefur Ríkisstjórnin kostað uppsetningu og rekstur sjö stöðva í vatnsföllum kringum Mýrdals- og Eyjafjallajökul vegna jarðhræringa þar.

Efnavöktunarkerfið samanstendur af alls níu mælum, sem vakta afrennsli frá norðanverðum Vatnajökli um Jökulsá á Fjöllum við Grímsstaði, útrennslí úr Grímsvötnum um Skeiðará, útrennslí úr Skaftárkötum um Skaftá við Sveinstind, afrennsli Mýrdalsjökuls um Hólmsá, Skálsm, Múlakvísl, Jökulsá á Sólheimasandi og Markarfljót auk afrennslis Eyjafjallajökuls um Gígið. Á öllum þessum stöðum er mæld vatnshæð, vatnshiti og rafleiðni árvatnsins. Stöðvarnar eru allar í farsímasambandi og forritaðar þannig, að ef vatnshæð eða leiðni fara yfir valin viðmiðunarmörk gera þær aðvart með upphringingu. Í samtímakerfinu eru að auki reknar tíu stöðvar, sem mæla vatnshæð auk ýmissa veðurmælinga. Þrjár af þessum tíu stöðvum eru forritaðar með aðvörunargildum fyrir vatnshæð en þær eru staðsettar í Kreppu við Lónshnjúk, Jökulsá á Fjöllum við Upptyppinga og í Múlakvísl við Lérefthöfuð. Þá er rekið sérstakt tölvukerfi á skrifstofu VM í Reykjavík. Tölvukerfið sér um að sækja gögn í stöðvarnar, framkvæma fyrstu meðhöndlun gagna auk framsetningar þeirra á formi línurita, sem skoða má innanhúss eða á vefnum. Að baki þessum aðgerðum liggar LabView hugbúnaður, forritaður á Verkfræðistofunni Vista.

Grunneining hverrar mælistöðvar er stafrænt skráningartæki frá Campbell Scientific. Skráningartækið samanstendur af tengibretti og lítilli tölvu með nákvæmum mælibrúum. Í upphafi er tölvunni sent forrit þar sem tilgreint er, hvað á að mæla, hvernig geyma eigi gögnin í minni stöðvarinnar auk þess sem skildgreind eru aðvörunargildi fyrir vatnshæð og leiðni. Fari önnur hvor stærðin yfir valin aðvörunargildi gerir stöðin aðvart með því að hringja í vaktsíma Neyðarlínunrar.

Vatnshæð er mæld með þrýstiskynjurum frá Druck. Algengt mælisvið eru 10 psi g, sem svarar til 7 m vatns. Í skynjaranum er viðnámsbrú sem verður fyrir þrýstingi vatnsins um málmpynnur og breytir við það móttöðu sinni (strain gauge). Mælingin er

framkvæmd á þann hátt, að sett er föst spenna yfir brúna og mældur mættismunur milli hliða hennar en stærð hans er í réttu hlutfalli við vatnshæðina.

Rafleiðni árvatnsins er mæld með sérstökum skynjara, sem framleiddur er fyrir Campbell Scientific. Í skynjaranum er hitanemi auk þriggja rafskauta úr ryðfríu stáli, en þau eru í snertingu við vatnið. Mælt er rafviðnám vatnsins milli skautanna og vatnshitinn notaður til að reikna leiðréttu leiðni miðað við 25°C. Oftast er leiðninemanum komið fyrir í plaströri nálægt botni árinnar en í ám með miklum aurburði er nemanum komið fyrir í flotholti, sem flýtur á yfirborði árinnar.

Samið hefur verið við Neyðarlínuna um að taka á móti upphringingum frá sjálfvirku stöðvunum. Við upphringingu opnast "mál" hjá Neyðarlínunni og er fyrsta viðbragð að hringja í einn af 10 vaktmönnum Vatnamælinga. Vaktmaður byrjar síðan á því að hringja til baka í stöðina, sækja gögn og færa viðmiðunargildi. Þá skal tekin ákvörðun um, hvert fjögurra staðlaðra skilaboða skal komið til Neyðarlínunnar en þau eru 1) upphringingunni olli hættulaus atburður og máli er lokið, 2) vaktmaður þarf meiri tíma til að skoða gögn, máli er haldið opnu og Almannavarnir látnar vita, 3) atburðurinn er talinn getað valdið hættu, haft er samband við Almannavarnir, Veðurstofuna og þrjá vatnamælingamenn til viðbótar, 4) vekja skal alla vaktmenn vatnamælinga til aðgerða.

Lögð hefur verið sérstök áhersla á að koma upp vöktunarstöðvum til mælinga á vatnshæð, vatnshita og rafleiðni fremur en að þróa fleiri skynjaragerðir þar sem svo virðist, sem rafleiðni og vatnshæð geti í flestum tilfellum gefið nægilega góða viðvörun. Þá hefur mikilvægur hluti verkefnisins falist í gerð sjálfvirks gagnasöfnunar- og gagnaskoðunarkerfis ásamt vefsíðugerð, sem tryggir almennan aðgang að gögnunum.

Auðvelt var að fylgjast með aðdraganda hlaupanna í Skeiðará í febrúar og nóvember 1999 með fyrrgreindum vöktunarbúnaði. Þá var unnt að fylgjast með framrás hlaups úr Hnútlóni í Kverká, Kreppu og Jökulsá á Fjöllum en það varð um mánaðarmótin júlí-ágúst 1999. Í ljós kom að haustið 1999 urðu allmög smáhlaup í Múlakvísl og Jökulsá á Sólheimasandi, sem sáust greinilega út frá leiðnimælingunni þó rennslisaukning væri óveruleg. Fullvist er talið, að smáhlaupunum hafi valdið leki jarðhitavatns frá kötlum í barmi Kötluöskjunnar.