

Katsauksia – Översikter

Grímsvötnin vedet purkautuvat jökulhlaupina

KARI KAJUUTTI

Maantieteen laitos, Helsingin yliopisto/Maantieteen laitos, Turun yliopisto

Marraskuussa 1996 tiedotusvälineet kertoivat Islannin kaakkoisosan jättimäisestä tulvasta, jonka olivat aiheuttaneet Vatnajökullin jäätiköltä syöksyvät valtavat vesimassat (kuva 1). Jäätikön edustalla oleva Skeiðararsandur peittyi veden alle, ja sandurin halki kulkeva valtatie no. 1 katkesi 20 km:n matkalta. Tällaisia tulvia, joita nimitetään islanninkielisellä sanalla *jökulhlaup* (jäätikköjuoksu), esiintyy alueella melko säännöllisin väliajoin. Tämä kirjoitus tarkastelee sitä, mistä jökulhlaupeissa on kysymys.

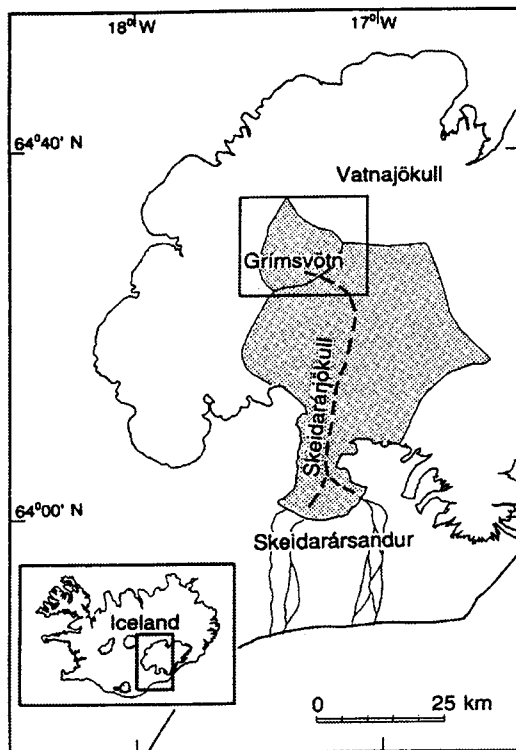
Jökulhlaup-termillä tarkoitetaan äkillistä veden purkautumista jäätiköstä (Thorarinsson 1953: 267; Björnsson 1975: 2; Sugden & John 1976: 295–296; Costa 1988: 450). Jäätikköön patoutunut järvi purkautuu tyypillisesti loppukesällä, jolloin sulaa vettä on eniten ja jäätikön tunneliverkosto on pisimmälle kehittynyt. Vulkaaninen toiminta voi kuitenkin aiheuttaa jökulhlaupin mihin vuodenaikaan tahansa. Historian suurimpana jökulhlaupina pidetään Yhdysvaltojen luoteisosassa sattunutta ns. Spokanen tulvaa 16 000–12 000 vuotta sitten, jolloin jäätikkö patosi Missoula-järveen arviolta 2×10^{12} km³ vettä (Sugden & John 1976: 295–296; Costa 1988: 450).

Vettä ja hiekkaa, jälleen

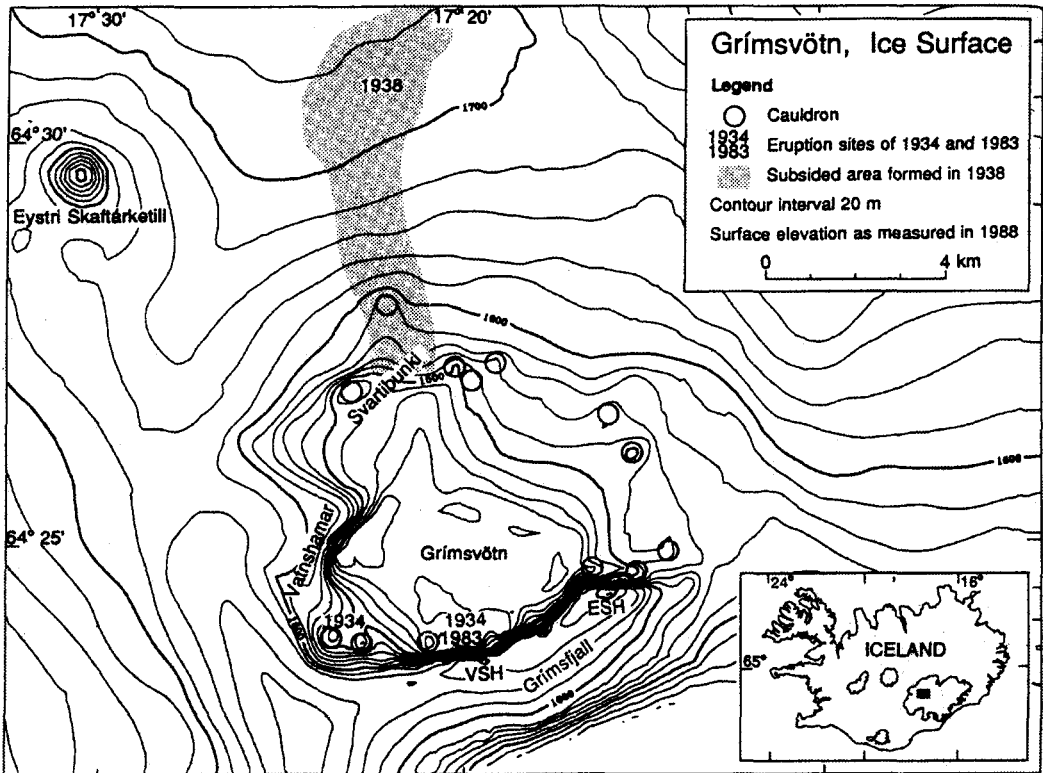
Skeiðararsandurille marraskuussa 1996 tulvineet vedet olivat peräisin 50 km Vatnajökullin reunalta olevasta Grímsvötnin kalderajärvestä (kuvat 1 ja 2). Kaldera muodostaa 20 km² laajuisen umpinaisen altaan, josta ei ole laskujokea. Kun järveen kertyy yhä enemmän vettä, sen pinta nousee, kunnes vesi purkautuu yhtäkkisenä rajuna tulvana (Björnsson 1974; Guðmundsson *et al.* 1995).

Syksyn 1996 jökulhlaup alkoi yhtäkkisesti, ja vettä syöksyi sandurille 3–5 metriä korkeana seinämänä (Brandsdóttir 1996). Jökulhlaupin hydrografi onkin tyypillisesti sellainen, että virtaama kohoa hyvin nopeasti valtaviin mittoihin, mutta tulva myös laantuu nopeasti. Toisinaan laantumisen

on hitaampaa, kuten vuonna 1938, jolloin virtaama pieni viikkoa kahden viikon ajan (Björnsson 1974: 5–7; Guðmundsson & Björnsson 1991: 26). Grímsvötnin vesimäärältään vähäisin jökulhlaup oli vuonna 1983, jolloin vettä purkautui 0,6 km³. Vastaavasti suurin on ollut vuoden 1938 jökulhlaup, jossa Skeiðararsandurille



Kuva 1. Vatnajökullin lakijäätikkö. Skeiðararjökullin ja Grímsvötnin valuma-alueet on varjostettu. Jökulhlaupien arvioitu kulkureitti on osoitettu katkoviivalla. Nelioity alue Grímsvötnin ympärillä on esitetty kuvassa 2 (Guðmundsson *et al.* 1995).



Kuva 2. Jäätikön topografia Grímsvötnin alueella. ESH = Svíahnúkur Eystri ja VSH = Svíahnúkur Vestri ovat jäätiköstä kohoavia vuorenhuippuja (Guðmundsson & Björnsson 1991). Syksyn 1996 tulivuorenpurkaus tapahtui lähellä vuoden 1938 purkauspaikkaa.

syöksyi 4,7 km³ vettä. Erityisesti vuosisadan alkupuolen jökulhlaupit arvioitiin aiemmin tätäkin suuremmiksi. Esimerkiksi Thorarinsson (1974, *cit.* Guðmundsson *et al.* 1995: 263) arvioi vuoden 1938 volyymiksi seitsemän kuutiokilometriä. Aiemmin arviot perustuiivat karkeisiin massabalanssilukuihin ja sandurilla virtaavien jokien virtaamisen muutoksiin. Uudet luvut pohjautuvat Björnssonin mittauksiin Grímsvötnin geometriasta (taulukko 1) (Guðmundsson *et al.* 1995: 263–264, 267–268). Jökulhlaupit kuljettavat mukanaan myös valtavaa sedimenttikeruunaa. Vuoden 1972 jökulhlaupin vesimäärä 2,1 km³ oli varsin normaali. Silti koko sedimenttikuljetukseksi laskettiin 29,5 miljoonaa tonnia (Tómasson 1974: 31). Syksyn 1996 jökulhlaupin arvioidaan kuljettaneen jopa sata miljoonaa tonnia sedimenttejä (Brandsdóttir 1996).

Grímsvötnin varhaisin jökulhlaup tunnetaan vuodelta 1332, mutta näin kauan aikaa sitten tapahtuneista tulvista tiedetään vain vähän. Vuosina

1600–1934 jökulhlaupeja on arvioitu esiintyneen keskimäärin joka kymmenes vuosi, ja vettä purkautuneen huomattavasti nykyistä enemmän (lukuun ottamatta syksyä 1996). 1940-luvulta lähtien jökulhlaupeja on ollut noin 4–6 vuoden välein. Esiintymistiheys riippuu siitä, kuinka korkealle veden pinnan on Grímsvötnissä kohottava ennen kuin jökulhlaup alkaa, ja siitä, kuinka nopeasti vaadittu korkeus saavutetaan. Vielä vuosisadan alkupuolella järven pinta saattoi kohota noin 1 500 metrin korkeuteen mpy, mutta sittemmin kriittiseksi korkeudeksi on riittänyt noin 1 450 metriä (kuva 3) (Björnsson 1974, 1992; Björnsson & Kristmannsdóttir 1984: 25–27; Grönvold & Jóhannesson 1984: 2). Poikkeuksena on syksyn 1996 jökulhlaup, jolloin järven pinta kohosi 1 510 metriin ennen kuin purkaus käynnistyi (Brandsdóttir 1996).

Tulvarajan aleneminen 1940-luvulla selitettiin aiemmin siten, että ilmaston lämpeneminen on ohentanut jäätikköä, ja siten riittävä paine jääti-

Taulukko 1. Grímsvötnin jökulhlaupit vuosina 1934–1996. Vuoden 1996 tiedot saattavat vielä muuttua; esim. vesimäärä lienee minimiarvio. (Lähteet: Guðmundsson *et al.* 1995; Brandsdóttir 1996).

Vuosi	Järven pinta-ala km ²	Lautta- jäätikön paksuus m	Järven pinnan korkeus			Vesi- määrä km ³	Huippu- virtaama 10 ³ m ³ s ⁻¹
			Ennen m	Jälkeen mpy	Muutos m		
1934	37	150	1440	1280	160	4,5	25-30
1938	27+15*	150	1400	1300*	100*	4,7	25-30
1939	<25	150	1340*	1300*	40*	1,0	-
1941	<25	150	1360*	1305*	55*	1,4	-
1945	32	150	1425	1325	100	2,6	8-10
1948	27	150	1400	1310*	90*	2,2	-
1954	33	150	1435	1305	130	3,2	10
1960	30	155	1428	1338	90	2,1	5-6
1965	29	175	1432	1317	115	2,5	6
1972	27	195	1436	1330	106	2,1	5
1976	26	210	1439	1350	89	1,7	3,5-4
1982	22	230	1447	1380	67	1,2	2
1983	15	230	1412	1370	42	0,6	0,6
1986	17	230	1430	1350	80	1,15	2
1991	22	230	1452	1370	82	1,45	2
1996	?	?	1454	1380	74	1,1	?
1996	?	?	1510	1345	165	≥3	45

* karkea arvio

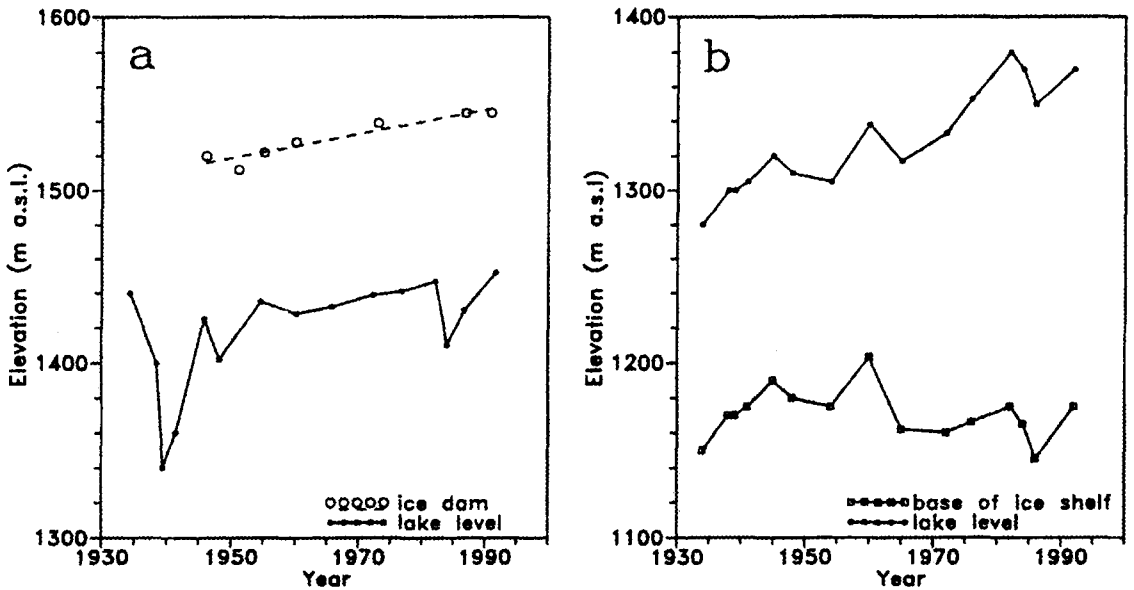
* tulivuorenpurkaus aiheutti 15km² laajuisen alueen vajoamisen järven pohjoispuolella

kön kohottamiseksi saavutetaan vähäisemmällä vesimäärällä. Uusimmissa tutkimuksissa jäätikön ohenemista ei kuitenkaan ole havaittu. Päinvastoin Grímsvötnin alueen massabalanssin lasketaan olevan selvästi positiivinen. Tämän oletetaan johtuvan siitä, että geotermistä lämpöä virtaa entistä vähemmän. Järveä peittävän lauttajäätikön paksuuden on todettu kasvaneen 70–80 metriä vuodesta 1960. Samoin järven ympärillä jäätikön paksuus on kasvanut vuodesta 1946 vuoteen 1987 50–100 metriä. Samalla järven pinta-ala ja tilavuus ovat pienentyneet. Tällainen kehitys on johtanut siihen, että jökulhlaupissa purkautuvan veden määrä on vähentynyt samalla, kun tulvan alkamiseen riittävä veden pinnan korkeus on vähitellen kohonnut. Tilanne voi kuitenkin muuttua, jos alueen vulkaaninen aktiivisuus kasvaa (Guðmundsson *et al.* 1995: 268–272).

Valtaosa Grímsvötnin vedestä on sulanut jäästä ja lumesta, joskin noin 15 prosenttia on peräisin geotermisistä lähteistä. Tähän on päädytty tut-

kimalla järven lämpötilaa ja kemiallista koostumusta. Suurin osa alueen sateista tulee lumena, mutta kesällä järvi saa myös vähän sadevettä. Vettä kertyy noin 300 km²:n laajuiselta alueelta. Grímsvötnin valuma-alue ei määräydy ainoastaan kallioperän muotojen mukaan, vaan sen kokoon vaikuttaa myös geotermien lämpö, joka aiheuttaa jäätikköön painauman. Geotermien lämpö samoin kuin tulivuorten purkaukset valuma-alueella sulattavat huomattavasti enemmän jäätä kuin alueen ilmasto-olosuhteet edellyttävät. Tällöin jökulhlaupien väli lyhenee. 1930-luvulta lähtien vulkaaninen aktiivisuus on kuitenkin heikentynyt (Björnsson & Kristmannsdóttir 1984: 25–27; Grönvold & Jóhannesson 1984: 2–3). Sen sijaan maanjäristyksillä ei ole havaittu yhteyttä jökulhlaupien esiintymiseen (Brandsdóttir 1984: 148; Einarsson & Brandsdóttir 1984: 22).

Syksyn 1996 jökulhlaupin voimakkuus poikkeaa selvästi viime vuosikymmenten kehityksestä. Edellinen tulva oli tapahtunut huhtikuussa,



Kuva 3. a) Jäätikön pinnan korkeus Grímsvötnin itäpäässä (=ice dam), josta jökulhlaupit lähtevät liikkeelle, ja Grímsvötnin pinnan korkeus (=lake level) niiden alkaessa. Tulivuorenpurkauksen (1938 ja 1983) jälkeen jökulhlaupit alkoivat alemmalla pinnan korkeudelta (Guðmundsson *et al.* 1995). Ennen vuotta 1934 ei tarkkoja mittauksia ole tehty; jökulhlaupien kuitenkin tiedetään aiemmin alkaneen korkeammalta. Syksyn 1996 jökulhlaup alkoi 1510 metrin korkeudelta mpy (Brandsdóttir 1996).

b) Järven pinnan ja lauttajajäätikön pohjan korkeudet jökulhlaupien päättyessä. Järven pinnan korkeuden nousu johtuu lauttajajäätikön paksuuntumisesta. Sen sijaan lauttajajäätikön pohjan korkeudessa ei vastaavaa kehitystä ole havaittavissa (Guðmundsson *et al.* 1995).

joten voidaan olettaa, että syksyn tulivuorenpurkaus sulatti hyvin nopeasti paljon jäätä. Vesimassojen lähdettyä liikkeelle tulvasta tulikin vuosisadan pahimpia. Myös vuoden 1983 tulivuorenpurkausta seurasi jökulhlaup, vaikka edellinen oli ollut vain vuotta aiemmin. Tällöin purkaus tapahtui Grímsvötnin kalderassa, ja purkauksen tuottama lämpö sulatti lähinnä järven lauttajajäätikköä (kuva 2). Tulva jäi hyvin pieneksi. Ehkä parhaiten syksyn 1996 tapahtumia voidaan verrata keväeseen 1938, jolloin samalla alueella purkautui tulivuori, mitä myös pian seurasivat jökulhlaup ja poikkeuksellisen suuri tulva. Seuraavan kymmenen vuoden aikana oli tavanomaista useammin jökulhlaupeja (1939, 1941, 1945 ja 1948), joiden on selitetty johtuneen vuosia jatkuneen sulamisen aiheuttamasta vesivirrasta purkausalueelta Grímsvötniin (Guðmundsson & Björnsson 1991: 25, 28, 38). On mielenkiintoista seurata tapahtuuko näin nytkin.

Jökulhlaupien mekanismi

Jökulhlaupien mekanismista on annettu monenlaisia selityksiä (Costa 1988: 450–451). Varhaisim-

mista mielenkiintoisimpia ovat Thorarinssonin (1953) ja Glenin (1954) kehittämät mallit. Thorarinsson selitti veden paineen kohottavan jäätikön irti alustastaan. Glenin mukaan taas veden paine aiheuttaa jään deformatiivista, mikä johtaa jökulhlaupiin, kun järvi on saavuttanut riittävän syvyyden. Ennen kaikkea Björnsson on kehittänyt malleja eteenpäin (esim. Björnsson 1974, 1992). Tässä ovat auttaneet mm. kaikuluotainmittausten kehittyminen ja tulosten yhdistäminen vanhoihin Grímsvötnistä otettuihin valokuviin (Guðmundsson *et al.* 1995: 263–264, 267–268). Thorarinssonin mallissa ongelmana on se, että siihen perustuvissa mittauksissa veden paine ei ole riittänyt kohottamaan jäätikköä. Viimeisimmissä mittauksissa paine-eroksi on todettu 5–7 baaria. Selitykseksi on esitetty, että järven pohjassa on vuosisatojen aikana tapahtuneiden jökulhlaupien kaivama uoma. Tällaisen uoman kohdalla järvi olisikin syvempi ja veden paine siten laskettua suurempi. Toinen mahdollinen selitys olisi se, että veden pinnan kohotessa järven kantana oleva noin 220–260 metriä paksu lauttajajäätikkö taipuu ja vähentää jäätikön alustansa kohdistamaa painetta (Björnsson 1974: 9–11, 19–20; Guðmundsson *et al.* 1995: 264).

Itse asiassa sekä Thorarinsson että Glen olivat oikeilla jäljillä. Jökulhlaup voi uusimman käsityksen mukaan alkaa kahdella eri tavalla. Ns. normaaleissa jökulhlaupeissa vesi sulattaa jäätä järven ympäriltä, jolloin vesi ikään kuin kaivaa tiensä jäätikön läpi. Grímsvötnin valuma-alueen tulivuoren-purkaukset voivat kuitenkin tuoda järveen vettä niin nopeasti, että jäätikkö alkaa veden paineen takia kellua jo ennen kuin vesi on ehtinyt sulattaa sitä riittävästi. Tällöin veden pinta voi kohota paljon normaalia korkeammalle, ja vettä myös purkautuu järvestä tavallista enemmän. Kun veden pinta on laskenut noin 150 metriä, jäätikkö painuu jälleen tiukasti alustansa vasten. Normaaleissa jökulhlaupeissa järven pinta laskee vain 80–100 metriä. Paljonko vettä purkautui marraskuussa 1996 ei ole vielä täysin selvillä. On jopa mahdollista, että koko järvi on tyhjentynyt, mitä ei tiedetä koskaan aiemmin tapahtuneen (Brandsdóttir 1996).

Veden reitti Grímsvötnistä jäätikön reunalle tunnetaan varsin hyvin (kuva 1). Purkaus alkaa aina järven kaakkoispäästä, jossa kallioperän aiheuttama kynnys on matalin. Kun vesi on lähtenyt jäätikön alitse liikkeelle, virtaavan veden muodostama kitkalämpö sulattaa jäätä, ja vesi muovaa tunneleita alas Skeiðararjökullia. Korkeusero Grímsvötnin pohjan ja Skeiðararjökullin reunan välillä on noin 900 metriä. Vaikka jäätikön aiheuttama paine pyrkii sulkemaan tunnelit, uutta tunnelia syntyy kuitenkin nopeammin (Björnsson 1974). Yleensä veden lämpötila on vain vajaan asteen nollan yläpuolella. Tulivuorenpurkaus saattaa kuitenkin lämmittää vettä, jolloin jää tunnelien seinämissä sulaa nopeammin. Tämä vauhdittaa veden virtausta: marraskuussa 1996 jökulhlaup kestitkin vain kolme päivää (Brandsdóttir 1996). Vesi purkautuu Skeiðararjökullin reunalla noin kymmenestä tunnelista. Tunnelien suut sijaitsevat eri puolilla jäätikön reunaa, mikä johtuu siitä, että vesivirta haarautuu ylempänä jäätikössä olevien putousten kohdalla (Björnsson 1974: 5; Tómasson 1974: 37–38). Kun veden virtaus järvestä loppuu, tunnelit sulkeutuvat muutamassa tunnissa (Björnsson 1974: 20).

Skeiðararjökullilla *surge*-ilmiö (jäätikön nopea eteneminen) on havaittu vain kahdesti tällä vuosisadalla. Vuosisadan ensimmäinen *surge* tapahtui vuonna 1929, eli viisi vuotta ennen vuoden 1934 suurtulvaa. Skeiðararjökullin toinen *surge* oli vuonna 1991, siis jälleen viisi vuotta ennen poikkeuksellisen suurta tulvaa. Ei ole pystytty selvittämään, muuttiko vuoden 1929 *surge* esim. jäätikön paksuutta Grímsvötnin kynnyskohdassa. Vuoden 1991 *surgen* vaikutuksia alettiin tutkia heti tapahtuman jälkeen, ja seuranta jatkuu edelleen. (Guðmundsson *et al.* 1995: 272). Oliko surgella

jokin osuus syksyn 1996 jökulhlaupiin, vai onko kyse vain sattumasta, jää nähtäväksi.

Jökulhlaupien esiintymistiheys, järven pinnan kriittinen korkeus ja tulvien voimakkuus riippuvat Grímsvötnin kaakkoiskulman kynnyskohdan päällä olevan jäätikön paksuuden, järveä peittävän lauttajäätikön paksuuden sekä järven pinta-alan ja syvyyden välisistä suhteista. Näiden kehitykseen vaikuttavat ilmasto ja ennen kaikkea alueen vulkaaniset muutokset, jotka voivat myös muuttaa systeemin rakennetta esim. kohottamalla tai laskemalla kynnyskohdan kallioperää, tai jopa siirtämällä järven purkautumiskohtaa. Syksyn 1996 jökulhlaup antoi poikkeuksellisuudessaan paljon uutta tietoa ilmiön luonteesta. Kun vesi Grímsvötnissä lokakuussa 1996 nousi nousemistaan, ihmeteltiin mitä on tapahtumassa. Ilmiö saa järkevän selityksen, mikäli käsitys jökulhlaupien kahdesta erilaisesta käynnistysmekanismista osoittautuu oikeaksi.

KIRJALLISUUS

- Björnsson, H. (1974). Explanation of jökulhlaups from Grímsvötn, Vatnajökull, Iceland. *Jökull* 24, 1–26.
- Björnsson, H. (1975). Subglacial water reservoirs, jökulhlaups and volcanic eruptions. *Jökull* 25, 1–12.
- Björnsson, H. (1992). Jökulhlaups in Iceland: prediction, characteristics and simulation. *Annals of Glaciology* 16, 95–106.
- Björnsson, H. & H. Kristmannsdóttir (1984). Grímsvötn geothermal area, Vatnajökull, Iceland. *Jökull* 34, 25–50.
- Brandsdóttir, B. (1984). Seismic activity in Vatnajökull in 1900–1982 with special reference to Skeiðararhlaups, Skaftarhlaups and Vatnajökull eruptions. *Jökull* 34, 141–150.
- Brandsdóttir, B. (1996). Jökulhlaup updates (based on information provided by H. Björnsson, M. Guðmundsson, P. Einarsson & F. Pálsson). *Internet: <http://www.rhi.hi.is/ummh/gos/vat-update.html>* University of Iceland 5.–8.11.1996.
- Costa, J. (1988). Floods from dam failures. *Teoksessa* Baker, V. R. Kochel & P. Patton (toim.): *Flood geomorphology*, 439–464. John Wiley & Sons, New York.
- Einarsson, P. & B. Brandsdóttir (1984). Seismic activity preceding and during the 1983 volcanic eruption in Grímsvötn, Iceland. *Jökull* 34, 13–23.
- Glen, J.W. (1954). The stability of ice-dammed lakes and other waterfilled holes in glaciers. *Journal of Glaciology* 15, 316–318.
- Grönvold, K. & H. Jóhannesson (1984). Eruption in Grímsvötn 1983; course of events and chemical studies of the tephra. *Jökull* 34, 1–11.
- Guðmundsson, M. & H. Björnsson (1991). Eruptions in Grímsvötn, Vatnajökull, Iceland, 1934–1991. *Jökull* 41, 21–45.

- Guðmundsson, M., H. Björnsson & F. Pálsson (1995). Changes in jökulhlaup sizes in Grímsvötn, Vatnajökull, Iceland, 1934–91, deduced from in-situ measurements of subglacial lake volume. *Journal of Glaciology* 41, 263–272.
- Sugden, D.E. & B.S. John (1976). *Glaciers and landscape*. 376 s. Butler & Tanner, London.
- Thorarinsson, S. (1953). Some new aspects of the Grímsvötn problem. *Journal of Glaciology* 2, 267–275.
- Tómasson, H. (1974). Grímsvatnahlaup 1972; mechanism and sediment discharge. *Jökull* 24, 27–39.