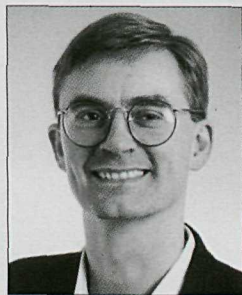


„ELDHIJARTA ÍSLANDS“



INGI Þ. BJARNASON

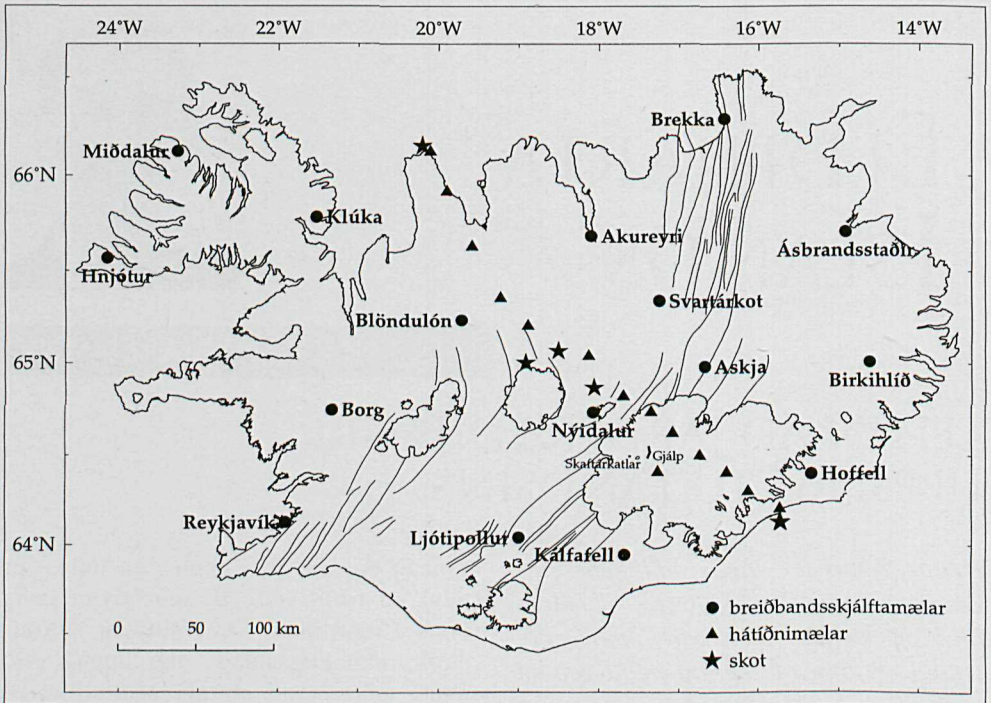
LEITIN AÐ JARÐFRÆÐILEGRI UPPSPRETTU LANDSINS

Heitur reitur er landsvæði sem ein-kennist af mikilli eldvirkni og jarðhita og stendur hátt yfir umhverfið. Ísland er einn af stærstu heitu reitum jarðar og gnæfir 2–4 km yfir venjulega hæð Norður-Atlantshafshryggjarins sem gengur í gegnum landið. Markmið fjölþjóðlega jarðskjálftaverkefnisins ÍSBRÁÐ (bráðin sem myndar Ísland) er að rannsaka þessa jarðfræðilegu uppsprettu landsins. (Ingi Þ. Bjarnason o.fl. 1996). Raunvísindastofnun leiðir þetta verkefni en samstarfsaðilar eru frá Bandaríkjunum, Bretlandi og ýmsum stofnunum hér á landi.

Margt er óþekkt um eðli heitra reita, en það liggur í augum uppi að þeir eiga rætur að rekja til aukins hita á afmörkuðum svæðum inni í jörðinni. Ekkert hefur hins vegar verið

Ingi Þorleifur Bjarnason (f. 1959) lauk B.Sc.-prófi í jarðeðlisfræði frá Edinborgarháskóla 1983, meistaraþrófi frá Utah-háskóla 1986 og doktorsprófi frá Columbia-háskóla 1992. Hann var aðstoðarkennari við Columbia-háskólann 1987–88, vann við rannsóknir á Carnegie-stofnuninni í Washington 1993–94 og í hlutakennslu við Háskóla Íslands 1996. Frá 1995 hefur Ingi starfað sem sérfræðingur á Raunvísindastofnun Háskóla Íslands.

sannað um uppruna hitans, en líklegt er talið að hann stafi af uppstreymi heits efnis í möttlinum, svokölluðum möttulstrók, sem hugsanlega eigi upptök við mörk möttuls og kjarna. Möttullinn er þykkasta lag jarðar. Hann er á föstu formi en seigfljóttandi og liggur á milli jarðskorpunnar, sem er 5–70 km þykk, og kjarnans sem er á 2900 km dýpi. Við uppstreymi heits efnis í möttlinum lækkar þrýstingur á því og bræðslumark. Ýmis rök hníga að því að á bilinu frá nokkrum tugum kílómetra niður á nokkur hundruð kílómetra dýpi sé hitinn það hár í möttulstróki að hluti hans bráðni; þar er svokallað bræðslusvæði. Þannig verður til bergkvika sem stígur upp vegna þess að hún er eðlisléttari en grannbergið og myndar jarðskorpuna þegar hún storknar í ysta lagi jarðar. Kristján Tryggvason o.fl. (1983) eru frumkvöðlar í gerð myndar af möttulstróknum undir Íslandi. Þeir sáu áhrif möttulstróksins nokkurn veginn undir miðju landsins sem hraðaminnkun niður á um 400 km dýpi. Við gerð myndar sinnar notuðu þeir ferðatíma P-skjálftabylgna (sjá almenna lýsingu Páls Einarssonar 1991a á jarðskjálftabylgjum) sem skráðar voru á síritandi flaumræna skjálftamæla hér á Íslandi. Mælióvissa flaumræna skjálftamæla er meiri en síðari tíma stafrænna mæla og getur slík óvissa komið fram í

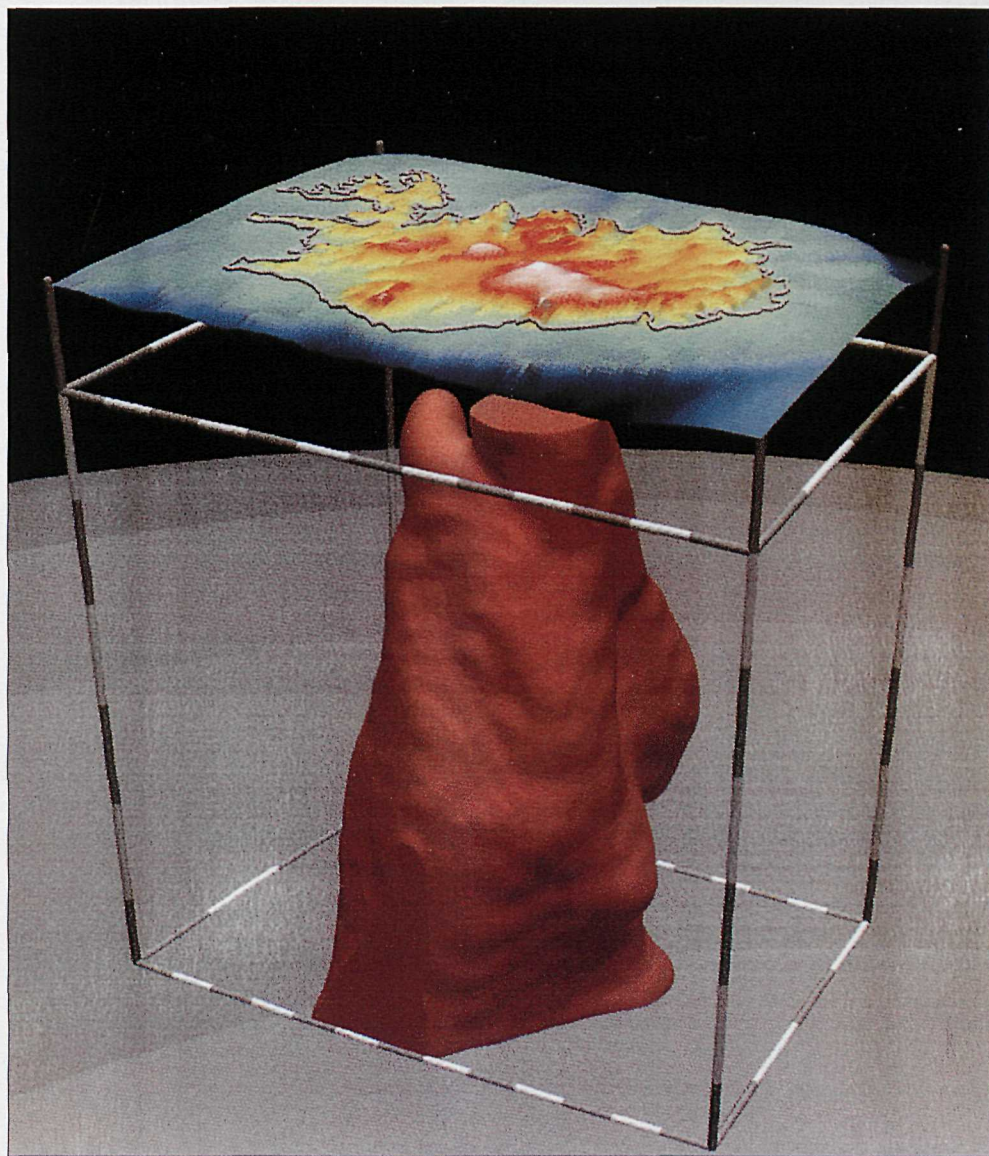


1. mynd. Staðsetning breiðbandsskjálftamæla ÍSBRÁÐAR-verkefnisins síðla sumars 1995 og 1996, en uppsetning mæla hófst 1993. Í Borgarfirði (að Borg) var sett upp alþjóðleg breiðbandsskjálftastöð 1994 á vegum IRIS-DMS og nýttast gögn frá henni. Að auki skráðu 14 háttíðnimælar á línu sem náði hvert yfir landið stöðugt í u.þ.b. 3 mánuði sumarið 1995. Sprengt var eftir línunni til þess að ákvarða þykkt jarðskorpunnar. Skjálftar undir Vatnajökli eru notaðir til þess að fylgjast með eldvirkni á því svæði. Sprungukerfi eru sýnd með grönnum línum. – The ICEMELT Broadband seismometer network from late summer 1995 to 1996. IRIS-DMT made data available from the broadband station at Borg in Borgarfjörður. In addition 14 short period seismometers were placed along a line across Iceland. They recorded continuously for 3 months in the summer of 1995. Shots were fired along the line to determine the thickness of the crust. Seismicity associated with the Vatnajökull volcanoes was recorded with seismometers buried in the glacier.

líkaninu sem byggt er á gögnunum. Eitt af markmiðum ÍSBRÁÐAR-verkefnisins er að freista þess að betrubæta fyrri mynd af möttulstróki Íslands með nákvæmari gögnum og staðsetja bræðslusvæðið í möttlinum og öðlast nánari skilning á ferð kvikunnar frá myndunarstað upp í jarðskorpuna. Langtímamarkmið er að geta fylgst með kviku neðanjarðar þannig að hægt sé að segja fyrir um eldgos, því að augljóslega er mikilvægt að vita um aðdraganda að stórum eldgosum.

■ MÖTTULSTRÓKURINN OG ELDHJARTAÐ

Við gerð myndar af möttulstróknum og við leitina að bræðslusvæðinu notum við bylgjur frá fjarlægum jarðskjálftum (erlendis frá) til þess að skyggjast inn í möttulinn og rannsaka dýptarbilið frá u.þ.b. 25 km niður á allt að 650 km. Skjálftabylgjur frá nálægum (innlendum) skjálftum eru notaðar til rannsókna á eiginleikum jarðskorpunnar. At-hyglinni er einnig beint að eldvirkni og hreyfingum jarðskorpunnar á Vatnajökuls-



2. mynd. Möttulstrókurinn sést sem stromplaga lághraðasvæði P-bylgju í möttlinum undir Íslandi á 100–650 km dýpi séð úr suðaustri. Innan strompsins eru hitaáhrif möttulstróksins mest og hraðinn hlutfallslega minnstur. Lághraðasvæði S-bylgju er svipað að lögun, sjá Wolfe o.fl. (1997). – The mantle plume in the form of a chimney of P-wave low-velocity zone in the mantle under Iceland at depths of 100–650 km, from southeast perspective. The low-velocity anomaly zone is defined by the region at which the perturbation drops below 37% of the maximum low perturbation value. The low-velocity anomaly zone of S-waves has a similar shape, see Wolfe et al. (1997).

svæðinu. Samstarfsaðilar verkefnisins reistu 15 stöðvar breiðbands-skjálftamæla víðs vegar um landið og nutu góðrar aðstoðar bænda við uppsetningu þeirra í byggð (1. mynd). Mælarnir eru næmir fyrir jarðskjálftum víðs vegar á jörðinni og söfnuðu stöðugt gögnum frá því þeir voru settir upp 1993–1995 og þangað til þeir voru teknir niður haustið 1996. Að auki settum við upp 14 mæla sumarið 1995 á línu sem náði þvert yfir landið – þar af sex á Vatnajökul. Þetta var gert til þess að fá sem nákvæmasta greiningu á innlendum skjálftum í nágrenni línunnar og til þess að safna upplýsingum um eldvirkni Vatnajökulssvæðisins (1. mynd).

Fyrstu stig úrvinnslu eru hafin og gerð þrívíðra mynda af hraðabreytingum rúmbylgna (P og S) í möttlinum undir Íslandi er lokið (Wolfe o.fl. 1997). Upplýsingar um hraða, hraðabreytingar og deyfingu jarðskjálftabylgna geta gefið vísbendingu um heit svæði og hugsanlega tilvist kviku í iðrum jarðar, því að hiti og kvika hægja á og deyfa skjálftabylgjur. Fram kemur að möttulstrókurinn er stromplaga og er miðja hans undir miðhálandinu og vesturhluta Vatnajökuls (2. mynd). Þvermál hans er u.þ.b. 150–300 km á 100–400 km dýpi og nær hann líklega a.m.k. niður á 650 km dýpi. Myndirnar hafa takmarkaðan skýrleika (upplausn) ofan 100 km og neðan 400 km dýpis. Af þeim má m.a. draga þá ályktun að möttullinn undir Íslandi er heitastur undir miðhálandinu og vesturhluta Vatnajökuls en kaldastur undir Austurlandi. Stromplögun möttulstróksins er samfelldari í líkani Wolfe o.fl. (1997) (2. mynd) en hjá Kristjáni Tryggvasyni o.fl. (1983). Þessi mismunur stafar líklega af meiri mælióvissu eldri gagna.

Til að afmarka bræðslusvæðið í möttlinum er nauðsynlegt að ákvarða bylgjuhraða sem fall af dýpi. Greining rúmbylgna sem lýst var hér að ofan gefur upplýsingar um hraðabreytingar, sem einar sér duga ekki til þess að afmarka bræðslusvæðið með nokkurri vissu, auk þess sem upplausn fjarlæggra rúmbylgna er takmörkuð ofan 100 km dýpis. Greining yfirborðsbylgna gefur hins vegar S-bylgjuhraða sem fall af dýpi. Frumniðurstöður úr greiningu yfirborðsbylgna sýna

tölverða hraðaminnkun (u.þ.b. 10%) í möttlinum á u.þ.b. 50 km dýpi undir miðju landsins og eftir gosbeltinu norðan Vatnajökuls. Líklegt er að þar liggi efri mörk bræðslusvæðis möttulsins þ.e. efri mörk hlutbráðins lindhvels á þessu landsvæði (Ingi Þ. Bjarnason 1997). Þessu svæði má líkja við ofn þar sem öll helstu jarðefni sem mynda landið Ísland verða til. Er við hæfi að kalla það „Eldhjarta Íslands“, eins og Einar Benediktsson skáld komst að orði í kvæði sínu „Heklusýn“.

■ ELDVIRKNI UNDIR VATNAJÖKLI

Vatnajökulssvæðið er eitt virkasta eldgosa- og jarðskjálftasvæði landsins. Líta má á það sem jarðfræðilega þungamiðju þess eða miðju heita reitsins. Efni margra stærstu eldgosa síðan ísöld leið hefur komið úr kvikuhólfum megineldstöðva sem eru undir jöklinum og í nágrenni hans. Mikil skjálftavirkni er á Vatnajökulssvæðinu (Páll Einarsson 1991b), og oft og tíðum eru náin tengsl milli jarðskjálfta og eldvirkni eða kvikuumbrota á Íslandi. Líklegt er að í framtíðinni verði hægt að fylgjast með aðdraganda eldgosa af meira öryggi en nú með frekari rannsóknum á skjálftavirkni ásamt öðrum þáttum. Ennþá vantar upp á þekkingu á ýmsum grundvallareiginleikum jarðskjálfta á Vatnajökulssvæðinu og tengslum þeirra við eldvirkni. Það stafar meðal annars af of mikilli fjarlægð fastra jarðskjálftamæla frá upptökum skjálftanna. Úr þessu var bætt tímabundið í þrjá mánuði sumarið 1995, þegar hópur ÍSBRÁÐAR-verkefnisins kom fyrir sex skjálftamælum á Vatnajökli (1. og 3. mynd). Slíku mælaneti hafði ekki áður verið komið fyrir á jöklinum sjálfum þar sem mælar skráðu stöðugt á stafrænu formi. Tölverð almenn skjálftavirkni mældist, en að auki kom fram óvanaleg virkni. Samhliða Skaftárhlaupi dagana 24.–28. júlí 1995 mældust stöðugar skjálftabylgjur (skjálftaórói) með öll einkenni gosóróa. Við nánari greiningu á þessum skjálftabylgjum teljum við að líklegasta orsök þeirra sé eldgos með upptök



3. mynd. Jarðskjálftamælingar á Vatnajökli sumarið 1995. – Fieldwork on the Vatnajökull glacier in the summer of 1995. Ljósmynd: Hrappur Magnússon.

undir ísnum nálægt eystri Skaftárkatli (1. mynd) (Bergþóra S. Þorbjarnardóttir o.fl. 1997). Eldgosið stóð í u.þ.b. tvo daga og kom Skaftárhlaupi af stað, því stærsta síðan mælingar hófust í Skaftá 1955 (Snorri Zóphóníasson og Svanur Pálsson 1996). Svipaðar athuganir benda til þess að annað minna gos hafi komið í kjölfar Skaftárhlaups dagana 9.–15. ágúst 1996. Það stóð í u.þ.b. hálfan dag og átti upptök nálægt vestari Skaftárkatli. Eldgosið í Gjalp, dagana 30. september til 13. október, fór ekki fram hjá neinum (1. mynd).

Ýmislegt bendir til að samhengi sé milli raða meðalstórra jarðskjálfta (stærð u.þ.b. 5) í Bárðarbungu síðustu 22 árin og eldgosanna þriggja undir Vatnajökli á árunum 1995–1996. Við höfum túlkað þessa atburðarás sem afleiðingu aukins kvikustreymis úr möttlinum inn undir norðvesturhluta Vatnajökuls sem veldur auknum þrýstingi í Bárðarbungu og hugsanlega fleiri eldfjöllum á þessu svæði í nærri aldarfjórðung (Ingi Þ. Bjarnason og Bergþóra S. Þorbjarnardóttir

1996). Gjálpargosið skilaði umtalsverðum gosefnum úr iðrum jarðar (u.þ.b. 0,5 km³) (Páll Einarsson o.fl. 1997) og má því gera ráð fyrir að nokkurt þrýstifall hafi orðið á svæðinu í kjölfar þess. Erfitt er að segja fyrir um framhaldið með nokkurri vissu, en komi fleiri meðalstórir Bárðarbunguskjálftar á næstu árum má telja líklegt að þeir séu fyrirboðar fleiri eldgosa í náinni framtíð í Bárðarbungu eða nágrenni.

Í jarðeðlisfræði eins og öðrum vísindagreinum er stöðug vinna í grunnrannsóknum nauðsynleg. Vegna eðlis vísindanna verður grunnurinn aldrei endanlega lagður. Skynsamleg hagnýting þekkingarinnar er því aðeins möguleg að haldgóð grunnþekking liggja fyrir. Samhliða hagnýtingu þekkingar verður að halda áfram uppbyggingu grunnsins. Þetta reyna jarðvísindamenn að hafa að leiðarljósi við vinnu að rannsóknum á heita reitnum. Þeir hafa í huga hvernig þekking á eðli hans getur komið þjóðinni til góða, t.d. við mat á eldfjallavá eða í nýtingu jarðhitans frá honum.



4. mynd. Höfundur við mælingar á Vatnajökli. – The author on the Vatnajökull glacier. Ljós.m./photo: Hrappur Magnússon.

■ ÞAKKIR

Ég þakka Birni Bjarnasyni, Birgi Bjarnasyni, Bryndísi Brandsdóttur, Hauki Brynjólfsyni, Kristni Egilssyni, Eyþóri Hannessyni, Tryggva Harðarsyni, Lárusi Helgasyni, Boga Ingimundarsyni, Haraldi Jónssyni, Einari Kjartanssyni, Hrappi Magnússyni, Adríönu og Randy Kuehnel, Pálma Sigurðssyni, Ragnari Þrúðmarssyni og starfsmönnum Landsvirkjunar fyrir aðstoð við að reisa og þjónusta jarðskjálftastöðvar fyrir gagnasöfnun þessa verkefnis. IRIS-DMS veitti aðgang að gögnum alþjóðlegu skjálfta-

stöðvarinnar á Borg í Borgarfirði. Bergþóra S. Þorbjarnardóttir og Gunnlaugur Ingólfsson lásu yfir handrit. Bergþóra S. Þorbjarnardóttir og Cecily Wolfe aðstoðu við gerð mynda. Þessi rannsókn var styrkt af bandaríska Vísindasjóðnum (NSF), Rannsóknarráði Íslands, Landsvirkjun, Vegagerð Íslands og Rannsóknarsjóði Háskólans.

■ HEIMILDIR

- Bergþóra S. Þorbjarnardóttir, Ingi Þ. Bjarnason & Páll Einarsson 1997. Seismic tremor in the Vatnajökull region in 1995–1996. Skýrsla Raunvísindastofnunar, RH-03-97. 38 bls.
- Ingi Þ. Bjarnason 1997. Steinhvel og linhvel Íslands. Vorráðstefna Jarðfræðafélags Íslands 1997. Ágrip erinda og veggspjalda. Jarðfræðafélags Íslands. 31 bls.
- Ingi Þ. Bjarnason & Bergþóra S. Þorbjarnardóttir 1996. Speculations on precursors and continuation of the 1996 volcanic episode under north-west Vatnajökull. Skýrsla Raunvísindastofnunar, RH-14-96. 19 bls.
- Ingi Th. Bjarnason, Wolfe, C. J., Solomon, S. C. & Gunnar Guðmundsson 1996. Initial results from the ICEMELT experiment: Body-wave delay times and shear-wave splitting across Iceland. Geophys. Res. Lett. 23. 459–462.
- Páll Einarsson 1991a. Jarðskjálftabylgjur. Náttúrufræðingurinn 61. 57–69.
- Páll Einarsson 1991b. Earthquakes and present-day tectonism in Iceland. Tectonophysics 189. 261–279.
- Páll Einarsson, Bryndís Brandsdóttir, Magnús Tumi Guðmundsson, Helgi Björnsson & Karl Grönvold 1997. Center of the Iceland hot spot experiences volcanic unrest. Eos 78. 369, 374–375.
- Kristján Tryggvason, E. S. Husebye & Ragnar Stefánsson 1983. Seismic image of the hypothesized Icelandic hot spot. Tectonophysics 100. 94–118.
- Snorri Zóphóníasson & Svanur Pálsson 1996.

Rennsli í Skaftárhlaupum og aur- og efna-
styrkur í hlaupum 1994, 1995 og 1996.
Skýrsla Orkustofnunar, OS-96066/VOD-7.
79 bls.

Wolfe, C. J., I. Th. Bjarnason, J. C. VanDecar &
S. C. Solomon 1997. Seismic structure of the
Iceland mantle plume. *Nature* 385. 245–247.

■ SUMMARY

An international geophysical project named ICEMELT (the melt that produces Iceland), is using means of seismology to illuminate the mantle under Iceland down to approximately 650 km depth to construct a model of the mantle plume under Iceland. The plume and its interaction with the Atlantic Ridge is the main source of the excessive volcanism in this region, and hence the source of the existence of Iceland.

The plume is imaged by analysing the effect it has on seismic waves, that are slowed down when they traverse the part of the mantle that is affected by the heat of the plume. For this task, data were collected continuously 1993–1996, with broadband seismometers, that are sensitive to earthquakes anywhere in the world. These measurements have confirmed a remarkably narrow plume with a diameter between 150–300 km at 100–400 km depth under Iceland. The plume probably reaches down to at least 650 km depth, and its geographic center is under central Iceland and the western part of Vatnajökull, which is also the location of the most powerful volcanic systems in Iceland. Analysis of surface waves has revealed a large reduction (approx. 10%) in S-wave velocity at approximately 50 km depth in the mantle under central Iceland and along the volcanic zone north of Vatnajökull. This velocity reversal probably marks

the upper extent of a partially molten asthenosphere, the melting region or oven where the materials that make Iceland are smelted.

Seismic activity associated with volcanoes under the Vatnajökull glacier was well recorded by seismometers located on the glacier and other places (1. and 3. figures). Three events of seismic tremor were recorded originating under the glacier. In July 1995 and August 1996 tremor was recorded in association with jökulhlaups from the Skaftá cauldrons, and in September–October 1996 eruption tremor was recorded from the Gjalp eruption. Comparison of these three tremor events indicate that the tremor from the Skaftá cauldrons could be associated with small volcanic eruptions, lasting approximately two days in July 1995 but only half a day in August 1996.

Ingi Þ. Bjarnason and Bergþóra S. Þorbjarnardóttir (1996) have interpreted the sequence of medium size (size approx. 5.0) earthquakes in the Bárðarbunga volcano as a manifestation of increased pressure in the volcano for at least 22 years, that resulted in the Gjalp eruption in 1996. The increased pressure is due to flow of magma from the mantle into the region under the volcano. It is difficult to predict the continuation of these events, but an additional medium size earthquake in Bárðarbunga should be a likely signal for further eruptions in this sequence.

PÓSTFANG HÖFUNDAR/AUTHOR'S ADDRESS

Ingi Þ. Bjarnason
Raunvísindastofnun Háskólans
Science Institute
University of Iceland
Hofsvallagata 53 / IS-107 Reykjavík