

Laatikollisesta varaseismometrejä rift-alueen alakuoren syntyn jäljille

HEIDI SOOSALU, JANET KEY
JA ROBERT S. WHITE

Kun tulivuorikenttätöille antaa pikkusormen, onneksaassa tapauksessa ne vievät molemmat kädet. Pieni datankeruukokeilumme Pohjois-Islandissa on johtanut aineistoon ja kiehtoviin tuloksiin, joista alun perin emme olisi villeimmissäkään unelmissamme haaveilleet.

Kenttätöyt poikivat kenttätöitä

Kesä 2005 oli työntäyteinen Cambridgen yliopiston tutkimusporukallemme, sillä pyöritimme 30 aseman seismometriverkkoa Torfajökull-tulivuorella Etelä-Islandissa. Vaativissa oloissa on syytä olla hyvin varustautunut, joten meillä oli keskikesän datankeruumatkalla mukana viiden ylimääräisen seismometrin laatikko laitteisto-ongelmien varalta.



Islantia tutkivan seismologin päivärutiineihin kuuluu vilkaista Islannin meteorologian laitoksen nettisivulta (<http://en.vedur.is/#tab=skjalftar>), kuinka on saarella maa viime päivinä järissyt.



Kuva 1. Artikkelin kirjoittajat työn touhussa apureineen: seismisen aseman pystytys Islannin ylängöllä. Taustalla kohoa pöytävuori Herðubreið, Askjan alueen majesteettinen maamerkki. Kuva: Hilary R. Martens.

Fig. 1. The authors busy at work with their assistants: deploying a seismic station in the Icelandic highland. Table mountain Herðubreið, the majestic landmark of the Askja area in background. Photo: Hilary R. Martens.

Askja-tulivuori kalderakomplekseineen sijaitsee Pohjois-Islannin riftillä, jossa Euraasian ja Pohjois-Amerikan litosfääri-laatat repeytyvät toisistaan erilleen keskimäärin 2 cm vuodessa. Viimeisin purkaus siellä sattui vuonna 1961. Kiinnitimme edeltävän talven mittaan huomiota, että Askjan koillispuolella vaikutti olevan jatkuvaa pientä seismistä säpinää.

Mielissämme kypsyi idea, että jos varalaitteita ei tule käytetyksi, niin koukataanpa kentältä takaisin Reykjavíkiin pohjoisen ylängön kautta ja ripotellaan seismometrit akkujen kera Askjan maastoon. Näin tehtiinkin ja kolmen viikon miniprojektimme aikana havaitsimme yli 200 paikallista maanjäristystä.

Menestyksenkäs pilottikokeilumme rohkaisi meidät perusteellisempaan toimintaan, ja kesällä 2006 meillä oli Askjan seutuvilla jo parinkymmenen aseman verkko (Kuvat 1 ja 2). Islanti hemmottelee seismisen datan haalijaa: kahdessa kuukaudessa rekisteröimme hylpeet 1800 paikallista mikromaanjäristystä (magnitudi alle 2). Odotetusti niistä suurin osa sattui alle 7 km syvyydessä, hauraasti käyttäytyvässä yläkuoressa. Tapaukset ovat pääasiassa yläkuoren alaosan nitkahteluja, joiden perimmäinen aiheuttaja on laattojen liike. Globaalien tutkimusten ja laboratoriokeiden perusteella seismisyyttä ei juuri esiinny alakuoressa, jossa kallioperän lämpötila ylittää noin 600 °C ja jossa geologisessa liikkumisaikaskaalassa (Askjan tienoolla edellä mainittu pari senttiä vuodessa) kallioperä deformaatioita hitaasti virraten. Islannin maankuoren kokonaispaksuus näillä seuduilla on likimain 30 km ja se kasvaa kohti etelää, Vatnajökull-jäätikön alla sijaitsevaa Islannin kuumien alueiden keskusaluetta.

Havaitsimme kuitenkin jotain kummallista: paikannusohjelma heitti muutaman järjestäytyksen hyposentrin merkillisen syvälle, 12–25 kilometriin alakuoressa (Kuva 2). Koska meillä oli tiheä asemaverkko suoraan noiden

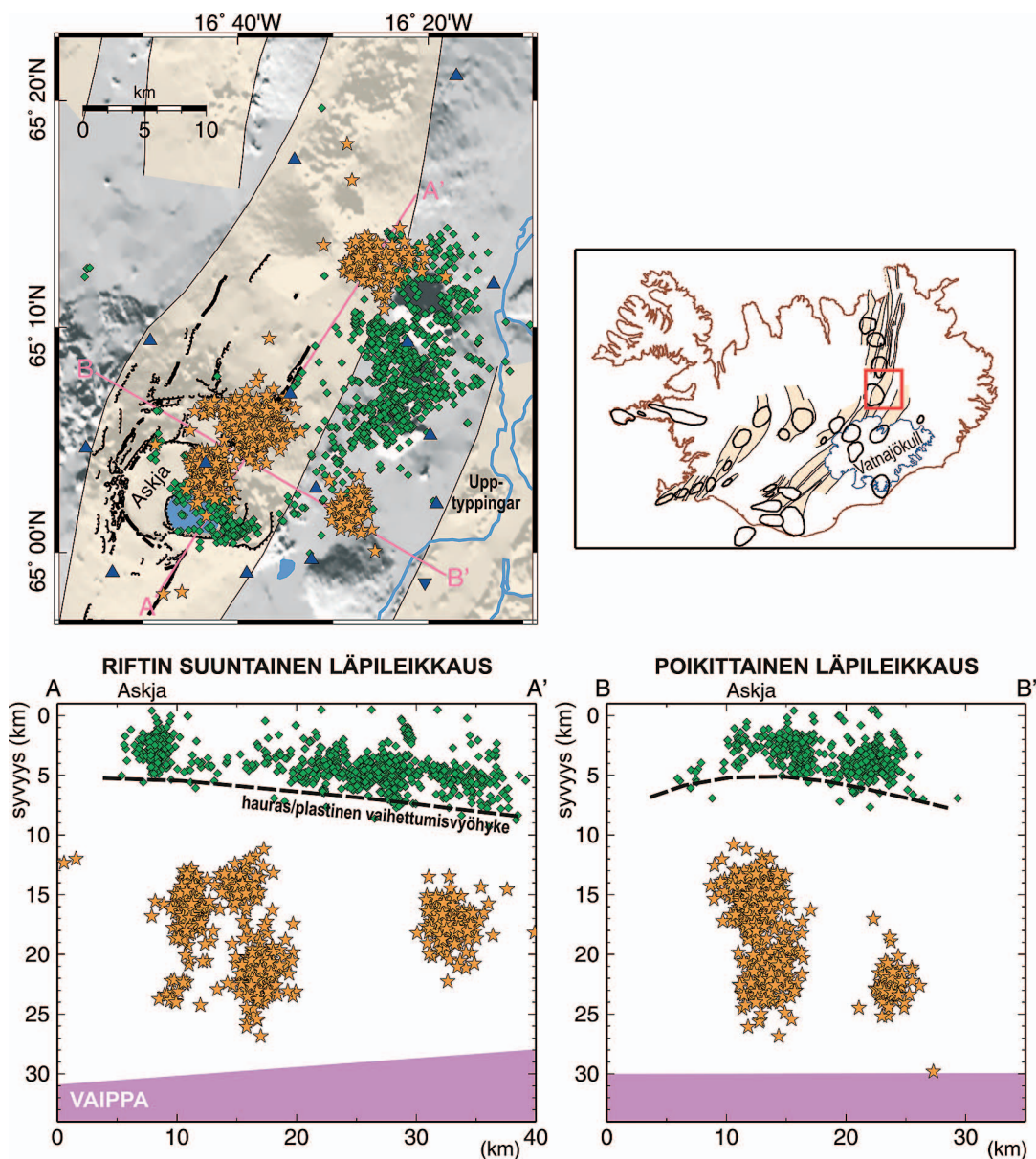
järjestysten yläpuolella, oli odottamattomia tuloksia syytä uskoa. Lisäksi näitä järjestäytyksiä – joiden seismogrammierekoitteenä olivat oudohkon näköisiä – alkoi kertyä data-analyysimme myötä lisää, lopulta kaikkiaan satakunta. Mutta siellä alakuoressa, ja vieläpä aktiivisen vulkanismin keskuksessa, piti materiaalin olla ihan liian kuumaa ja virtaavaa, jotta maanjäristyksiä voisi tulla!

Utelaisuutemme luonnollisesti heräsi, ja kesällä 2007 oli ihan pakko palata Askjalle taas parillakymmenellä seismometrillä varustautuneena. Harmillisesti pääsee Islannin karulla pohjoisylängöllä nauttimaan vain tynkäkentäkausista, koska alueella pystyy liikkumaan lähinnä heinä-elokuussa. Päätimme uhmata villiä luontoa ja jätimme loppukesällä 2007 kokeeksi viisi asemaa mittaamaan läpi talven, varustettuna aurinkopaneeliarsenaalilla, rekka-akuilla sekä tikun nokkaan viritetyllä GPS-kellolla ennakoiden talven kinoksia.

Sen koommin emme ole Askjan tienoolla oman onnensa nojaan jättäneetkään, vaan olemme tehneet mittauksia läpi vuoden vaihtelevien asemaverkkokombinaatioiden avulla. Yrityksen ja erehdyksen kautta on tullut opittua, kuinka monen aurinkopaneelin ja akun kanssa asema jaksaa painaa läpi arktisen talven sekä kuinka paksuja nietoksia ylänköalueilla tosiaan voi kasaantua. Olemme myös päässeet äimistelemään, millaisilta näyttävät hiekkamyrskypuhalletut aurinkopaneelit tai kuinka sekaisin GPS-kellon ajastus voi mennä, jos sitä kalauttaa hurrikaanituulen paiskaama kivenmurikka.

Alakuoren muodostumisen on-line havaintoja!

Sinnikkäät ponnistukset ovat tuottaneet tulosta: dataa on analysoitu kesän 2009 loppuun asti ja aineistossamme on jo tuhatkunta alakuoren tapausta, valtaosin siis syvyysvälillä 12–



Kuva 2. Rekisteröimämme Askjan alueen maanjäristykset vuosina 2005–2009 (ilman Upptýppingarin tapauksia). Oranssit tähdet: alakuoren järjestyksiä, vihreät vinoneliöt: hauraan yläkuoren tapauksia, siniset kolmiot: seismisiä asemia (kärki ylös – Cambridge, kärki alas – Islannin meteorologian laitos). Vaipan yläosan sijainti on suuntaa-antava. Indeksikarttaan on merkitty vulkaaniset systeemit: ympäröitynä tulivuoret ja beigellä värillä niiden rakoparvet (Key et al. 2011 mukailien).

Fig. 2. Earthquakes in the Askja area recorded by us in 2005–2009 (Upptýppingar events excluded). Orange stars: lower crustal earthquakes, green diamonds: events in the brittle upper crust, blue triangles: seismic stations (upright – Cambridge, inverted – Icelandic Meteorological Office). A–A': depth section along the rift, B–B': depth section perpendicular to the rift. Brittle-ductile boundary is marked with dashed line and the upper limit of the mantle is schematic. Index map shows volcanic systems: volcanoes circled and their fissure swarms coloured in beige (modified from Key et al., 2011).

25 km (Kuva 2). Nämä piskuiset (magnitudi tavallisesti reilusti alle 2) maanjäristykset sattuvat tyypillisesti lyhytaikaisina, joitakin minuutteja kestävinä parvina, joiden yksittäiset tapaukset sijaitsevat lähellä toisiaan. Useimmiten niitä ryöpsähtää kourallinen, enimmillään kymmenkunta.

Paikannetut järistykset kerääntyvät kolmeen ryppääseen, jotka ovat pysyneet aktiivisina koko sen ajan, kun olemme mittauksiimme tehneet. Selkeästi suurin järistyskeskittymä on Askja-tulivuoren pohjoisosien alla. Toinen rypäs sijaitsee kymmenkunta kilometriä Askjasta itään ja kolmas parisenkymmentä kilometriä Askjasta koilliseen.

Maanjäristysten synty on mahdollista aktiivisen vulkaanisen vyöhykkeen lämpimässä, normaalisti plastisesti käyttäytyvässä alakuoressa vain, jos deformaationopeus on tarpeeksi suuri. Jos magma etenee hitaasti, se tapahtuu aseismisesti. Mutta jos alakuoressa liikkuva magma työntyy äkillisesti eteenpäin, voi seurauksena olla ympäröivän aineksen hauras murtuminen, mikä ilmenee parvena pieniä maanjäristyksiä. Tällainen prosessi pystyy selittämään uskottavasti havaintomme.

Tulkitsemmekin havaitsemamme kolme seismisyyden rypästä alueiksi, missä magma liikuskelee alakuoressa. Magma näyttää suosivan samoja kanavia – ehkä rakojen tai juonien verkostoja – sillä nämä alakuoren järistyskeskittymät ovat olleet yhtäjaksoisesti aktiivisia useiden vuosien ajan. Jokaisen yksittäisen tapausparven aiheuttaja lienee uusi magmapulssi, joka avaa aiempien pulssien synnyttämiä repeytymiä.

Alakuoren maanjäristysten syvyyksillä on havaintojemme perusteella selvät ylä- ja alarajat. Tämän voi tulkita siten, että noilla kohdin on olemassa vaaka-asentoisia kerrosjuonia, joihin kivisula pysähtyy eikä todennäköisesti koskaan kulkeudu maanpinnalle asti. Datamme sopii hyvin yksin sellaisen kuorensynty-

mallin kanssa, jossa kuoren ala- ja keskiosat muodostuvat paikan päällä vähitellen peräkkäisten magmapulssien kiteytyessä eri-ikäisiksi kerrosjuoniksi. Monet havainnot maapallon repeämisvyöhykkeiltä ja ofoliiteista eli muinaisten merenpohjan esiin kohonneista osista tukevat tätä käsitystä. Löytömme tekee erityiseksi se, että tähän mennessä on vain aniharvoin onnistuttu seuraamaan kuorensyntyprosessia juuri samalla hetkellä, kun se on käynnissä.

Kaksi yhden hinnalla: Upptyppingarin intruusioepisodi

Lisäbonuksena Askjan naapurustossa, mannerjään alla syntyneen vaatimattoman näköisen Upptyppingar-vuoren (Kuva 2) alla tapahtui jotain ennenkokematonta. Upptyppingarin seismisyyskin oli ollut vaatimatonta viime aikoihin asti, sillä miesmuistiin niillä kulmin ei oltu havaittu tapahtuvan oikeastaan yhtään mitään. Mutta vuosina 2007–2008 Islannin meteorologian laitoksen seisminen asemaverkko rekisteröi siellä kuin tyhjästä polkaistuna ällistytävät 10 000 mikromaanjäristystä (magnitudi <2,2), joiden syvyudet vaeltelivat alakuoressa noin 14–22 km:ssa. Cambridgen tutkimusjoukkomme asemat kesällä 2007 täydensivät sopivasti meteorologian laitoksen verkkoa. Intensiivisestä seismisyysepisodista saatiin erinomaista dataa, joka tulkittiin alakuoreen tunkeutuvaksi magmaintruusioksi. Tämän vahvistavat GPS- ja satelliittikuvamittaukset.

Kesän 2007 seismisyyden perusteella voidaan hahmotella 50° kallellaan oleva magmajuoni, joka eteni kahden vaaka-asentoisen kerrosjuonen välillä n. 18 km syvyydeltä n. 15–16 km syvyydelle. Toistaiseksi Upptyppingarin alue on rauhoittunut lähes entiseen hiljaiseloonsa, mutta mahdotonta ei ole, että magmaattinen aktiivisuus alakuoren uumenissa

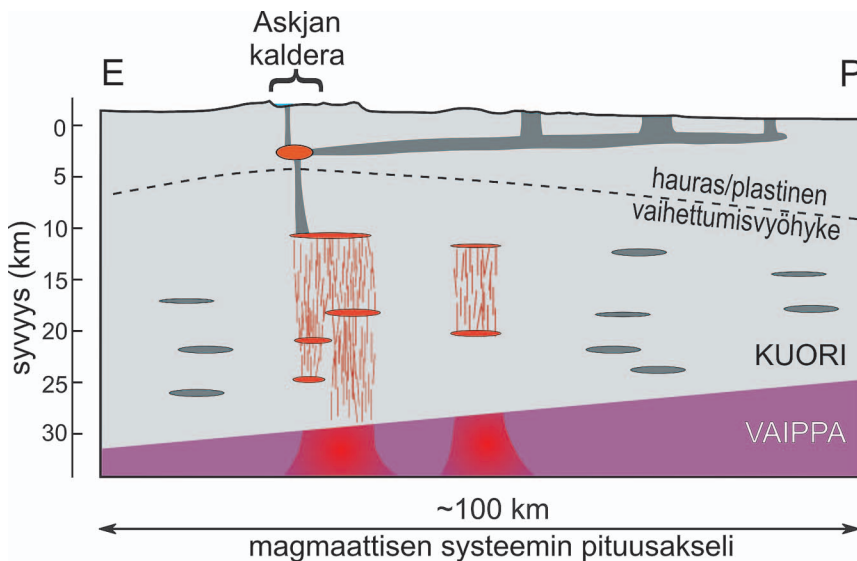
alkaa siellä uudelleen – eikä sekään, että Upp-typpingarilla koettaisiin lähitulevaisuudessa laavapurkaus.

Askjan saaga jatkuu

Ruokahalu kasvaa maanjäristyksiä rekisteröidessä. Jokainen väliaikaisia seismisiä verkkoja ylläpitänyt tutkija tietää, että kenträtöiden kiipein hetki on, kun on tullut aika irrottaa seismometri virtalähteestään ja pakata se auton takakonttiin. Me olemme onnistuneet hivuttamaan tuota hetkeä vuosi vuodelta kauem-

maksi tulevaisuuteen ja jopa lisäämään kapasiteettiamme.

Parhaillaan suunnitelmissamme on jatkaa rekisteröintejä Askjalla ainakin vuoteen 2014 ja itse asiassa laajentaa asemaverkkoa kattamaan koko Islannin pohjoinen rift-alue Vatnajökull-jäätiköltä pohjoisrannikolle. Tähän meidän on oltava valmiita. Tärkeimmät ongelmat ovat maankuoren rakennetutkimukset sekä muun muassa sen selvittäminen, ovatko havaitsemamme eksoottiset seismisyysparvet vain Askjan oikku vai esiintyykö niitä laajemminkin Pohjois-Islannin vulkaanisella vyöhykellä.



Kuva 3. Kaavamainen esitys alakuoren muodostumisesta Askjan vulkaanisessa systeemissä Pohjois-Islannin riftillä. Punaiset alueet muutoin violetissa vaipassa osoittavat kohtia, joiden kautta sulan magman liikkuminen kanavoituu. Oranssit viivat kuvaavat rakosysteemejä, joissa magma liikkuu ennen kuin pysähtyy ja leviää vaakasuuntaisiin kerrosjuoniin (oranssit linssit). Tummanharmaat linssit ovat jähmettyneitä kerrosjuonia, jotka ovat muodostuneet aiempien magmapulssien aikaansaamina. Oranssi ellipsi 3 km syvyydellä on geodeettisesti mallinnettu Askjan magmasäiliö. Tummanharmaat alueet yläkuoressa ovat magman aiempia reittejä aktiivisen purkaustoiminnan aikana joko kalderassa tai juonina Askjan rakoparvessa. (Key et al. 2011 mukaillen).

Fig. 3. Schematic model of the lower crust generation in the Askja area at the north Iceland rift. Brittle-ductile boundary is marked with dashed line and purple region is mantle with red zones showing focused melt supply. Orange lines represent networks of cracks through which melt flows before stalling in existing sills (orange ellipses). Dark grey ellipses are now frozen sills formed by former melt pathways. Large orange ellipse at 3 km depth is geodetically modelled shallow magma chamber. Dark grey zones in the upper crust are previous paths of magma during eruptions either in the caldera or in dykes along the fissure swarms (modified from Key et al. 2011).

Ja kaikki tämä alkoi laatikollisesta ylimääräisiä seismometrejä!

Kiitokset

Kiitämme lämpimästi lukuisia kenttätöiden tekijöitä sekä järjestelyissä auttaneita. Rahallista tukea on antanut Iso-Britannian National Environmental Research Council (NERC) ja seismometrejä meille lainannut laitteistopankki SEIS-UK.

Lisää luettavaa aiheesta on julkaisuissamme sekä niiden viitteissä:

- Key, J., White, R.S., Soosalu, H. ja Jakobsdóttir, S.S. 2011. Multiple melt injection along a spreading segment at Askja, Iceland. *Geophysical Research Letters* 38, L05301, doi: 10.1029/2010GL046264.
- Soosalu, H., Key, J., White, R.S., Knox, C., Einarsson, P. ja Jakobsdóttir, S.S. 2010. Lower-crustal earthquakes caused by magma movement beneath Askja volcano on the north Iceland rift. *Bulletin of Volcanology* 72:55–62, doi: 10.1007/s00445-009-0297-3.
- White, R.S., Drew, J., Martens, H.R., Key, J., Soosalu, H. ja Jakobsdóttir, S.S. 2011. Flipping thrust and normal faulting during dyke intrusion in the mid-crust of Iceland. *Earth and Planetary Science Letters*, doi: 10.1016/j.epsl.2011.02.038.

Summary:

From a box of spares to tracking down lower crust generation at a rift

Our Cambridge University research team was running a 30-station seismic network at the Torfajökull volcano in south Iceland in the summer 2005. During our midsummer site-check trip, we carried a box of five spare seismometers in case any had broken and needed changing.

The volcano Askja with its caldera complex is located in the north Iceland rift, and the most recent eruption was in 1961. The crustal thickness in the Askja area is ~30 km. We had heard about continuous small magnitude seismicity slightly to the NE of Askja and decided to deploy the spare instruments around Askja, if they were not needed in the south. This was done, and we recorded more than 200 local earthquakes during our 3-week miniproject.

Our success encouraged us to deploy a 20-station net around Askja in the summer of 2006, and we recorded 1800 local microearthquakes (magnitude <2). As we expected, most of them occurred in the 7-km thick brittle upper crust, concentrated in its lower portion. They are caused by plate spreading. Lower-crustal material behaves in a ductile manner at geological rates of movement (here ~20 mm/yr). However, we also observed odd-looking signals from peculiarly deep, lower-crustal earthquakes at 12–25 km depth. In total there were ~100 deep events. But here, particularly at an active volcanic centre, the material was supposed to be too hot and ductile for earthquakes to occur!

Unfortunately, the harsh north Iceland conditions allow only a short field season (July–August), but we needed more continuous observations to see whether this deep seismicity occurred year-round. So we left a trial network of five stations from the end of summer 2007 to run through the winter. Conditions are challenging, with temperatures down to -20°C and thick snow accumulations. Since that first winter deployment we have learnt how to operate in the demanding winter conditions, and now are able to record earthquakes continuously throughout the year.

So far data have been analysed up to the end of summer 2009, and we have discovered ~1000 lower-crustal events, mainly at depths

of 12–25 km. These tiny earthquakes occur typically in short-lasting (a few minutes) swarms, with events being spatially close. Normally there is a burst of events, typically around ten. We have found that there are three main clusters, which have been active throughout our observational period: the largest concentration (two-thirds of the events) is beneath the northern part of the active Askja volcano; another cluster lies some 10 km east of Askja; the third cluster lies further away, some 20 km to the northeast of Askja.

Earthquakes can be generated in plastically behaving lower crust of an active volcanic zone if strain rate is sufficiently high. If magma moves slowly, it occurs aseismically. But if magma propagates suddenly in an intrusion, it can create brittle failure in the form of a swarm of small earthquakes. This process can plausibly explain our observations.

We interpret the three seismicity clusters as regions where molten magma is moving within the lower crust. Magma seems to favour the same channels – perhaps networks of cracks or dykes – as these concentrations of earthquakes have been persistently active for several years. A single event swarm would be caused by a new magma pulse that opens cracks produced by former pulses.

These lower-crustal events have clear upper and lower depth limits. This can be interpreted as representing sills where the molten rock stalls. Most of the melt never reaches the surface, but freezes to form the lower crust. Our data fit a crustal creation model where the lower and central parts of the crust are formed in situ, as these sills with various ages crystallize. This helps explain many geological observations from rifts and ophiolites elsewhere in the world, although rarely is the crust caught actually in the process of being generated by melt intrusion.

As a bonus, the area of Mount Upptyp-

pingar in the vicinity of Askja became suddenly active while we were working there. During 2007–2008, the seismic network of the Icelandic Meteorological Office recorded some 10,000 microearthquakes (magnitude <2.2), with depths varying from ~14–20 km. This intense episode of seismicity was interpreted as caused by a lower-crustal magma intrusion, confirmed by GPS and satellite image measurements. Based on our summer 2007 observations combined with the Meteorological Office data, it is possible to define a dyke dipping at 50° and propagating between two sills from about 18 km depth up to ~15–16 km depth.

As our enterprises have turned out to be so fruitful, our current plans are to keep recording at Askja at least until 2014, and to expand the network to cover the whole northern rift zone of Iceland from the Vatnajökull glacier to the northern coast. We are aiming to study the whole crustal structure and to resolve whether the exotic deep seismic swarms attributed to melt movement in the crust are only a whim of Askja or whether they occur more widely along the north Iceland volcanic zone. – And all this started from a box of spare seismometers!

HEIDI SOOSALU^{1,2,3},

JANET KEY¹

ROBERT S. WHITE¹

¹ Bullard Laboratories
Department of Earth Sciences
University of Cambridge

Nykyiset osoitteet:

² Geological Survey of Estonia

³ Department of Mining,
Tallinn University of Technology