

Keurusselän pirstekarttioiden tarkastelua

KARI A. KINNUNEN
JA SATU HIETALA

Vuonna 2003 geologian opiskelija Satu Hietala löysi Keurusselän rantakallioilta rakenteita, jotka silmämääräisesti muistuttivat impaktirakenteista kuvattuja pirstekartioita. Niiden perusteella Keurusselkä tulkittiin maamme 11. impaktirakenteeksi (Hietala ja Moilanen 2004 a ja b, Pesonen et al. 2004, Pesonen et al 2005, Pesonen et al. 2006, Ruotsalainen et al. 2006 a ja b, Hietala ja Moilanen 2007, Schmieder et al. 2009). Keurusselän pirstekartioita ei kuitenkaan ole näissä julkaisuissa tarkemmin tutkittu, lukuun ottamatta esiintymisaluetta ja havaintojen määrää sekä valokuvia. Sama puute koskee myös muita Suomen impaktikraattereita.





Keurusselän länsirannan Jylhänniemen tiheään rakoillut metavulkaniittinen silokallio, jossa hiertymien kautta avautuneilla raoilla on pirstekartiomainen pintarakenne. Muut raot ovat tasapintaisia. Kastuminen korostaa kalliopinnan rakenteita. Kivinäytteen läpimitta 8 cm. Kuvat: Kari A. Kinnunen.

ta. Pirstekartiorakenteita on kuvattu ja pidetty todisteena meteoriitin törmäyksestä mm. Ahvenanmaan Lumparnilla, Petäjäveden Karikkoselällä, Taivalkosken Saarijärvellä sekä Suvasveden eteläisen Haapaselän rannoilta.

Impaktirakenteita ja -kraattereita tunnetaan maapallolta tällä hetkellä n. 186 ja noin puolesta on kuvattu pirstekartioita (McHone

ja Dietz 1988). Näistä tunnetuimpia rakenteita ovat Etelä-Afrikan Vredefort, Saksan Ries ja Steinheim sekä Kanadan Sudbury. Pirstekartiot kuvattiin impaktikraatteriin liittyväksi ensimmäistä kertaa vuonna 1947 Kentlandista Indianan osavaltioista. Dietz (1947) esitti alueen kalkkikivissä kartiomaisten ja kohollaan olevien viuhkamaisten rakenteiden liitty-

vän meteoriitin törmäykseen. Sittemmin samanlaisia rakenteita löytyi mm. Sudburystä, joka on yksi maailman kookkaimmista impaktikraattereista (halkaisija ~250 km). Myöhemmin pirstekartioista sekä mm. Sudburyn impaktialkuperästä on esitetty kritiikkiä (mm. Fleet 1979). Nykyään pirstekartiot ja meteoriittikraatterit ovat geologiassa ja varsinkin geofysiikassa lähes paradigman asemassa ja usein ainut selitysmalli uusien kohteiden tutkimuksessa.

Pirstekartioita tutkittu hyvin vähän

Viitteitä jättimeteoriitin, asteroidin tai komeetan, törmäyksestä maankuoreen ovat kraatterimainen morfologia ja siihen paikallisesti liittyvät geofysikaaliset anomaliat. Kiistattomia tuntomerkkejä ovat merkit shokkimetamorfosista, meteoriittisen aineksen palaset tai geokemialliset jäämät (Koeberl 2002, Masaites 2005). Kiistattomia todisteita löydetään yleensä vain geologisesti melko nuorista impaktikraattereista. Syvälle kuluneista prekambrisista impaktirakenteista ne sitä vastoin useimmiten puuttuvat. Tästä syystä varsinkin Kanadan ja Fennoskandian kilpialueilla on pirstekartioita käytetty vuosikymmeniä impaktirakenteiden tuntomerkkeinä.

Varmoja kriteerejä aidon pirstekartiiorakenteen tunnistamiselle ei kuitenkaan ole esitetty, ja jopa itse rakenteen tarkka synty tapa on yhä kiistanalaista (Koeberl 1997). Monien maankuoren luontaistenkin murtumarakenteiden tuntemus on yhä vajavaista, ja Suomesakin ollaan hauraan deformaation tutkimusperinteitä vasta luomassa, mitä ovat edesauttaneet rakennettavuustutkimukset ja ydinjätteiden sijoitustutkimukset. Kilometrien syvyydelle kuluneiden prekambristen impaktirakenteiden tunnistaminen on useimmiten hajanaisten viitteiden kokoamista ja punnitsemista il-

man kovia yksittäisiä todisteita. Lopullista varmuutta voi olla vaikeaa saavuttaa – kuten tiedeessä yleensäkin.

Pirstekartioiden yleisyydestä huolimatta niiden mineralogialla ja mikrorakenteilla on tutkittu hyvin vähän, Suomessa ei ollenkaan. Harvat tutkimukset suurimmista vanhoista impaktirakenteista, kuten Sudburystä ja Vredefortista, ovat lisäksi synnyttäneet uusia kysymyksiä tuomalla esiin piirteitä, joita on ollut vaikea selittää varsinaisten shokkivaikutusten avulla (ks. Fleet 1979, Nicolaysen ja Reimold 1999).

Tästä syystä katsoimme aiheelliseksi tarkastella Keurusselän rakenteita lähemmin. Huolellinen mikroskopointi osoitti pirstekartioiden olevan erikoinen yhdistelmä semiduktiilin vaiheen hiertymiä ja hauraan vaiheen murtumia. Nämä rakenteet, jotka ulottuvat myöhäismetamorfosisista hiertopinnoista aina hyvin pinnalliseen rakoiluun, ovat vaatineet syntyäkseen shokista poiketen geologisesti pitkän ajanjakson. Osoituksena tästä ovat klooriitilla silautuneet hiertopinnat ja niitä myöten mutkitteleva kartiomaisia ja viirukkeisia pintarakenteita muodostava kaoliinipitoinen myöhäinen rakoilu. Myös muut shokkivaikutuksesta (minimi 8 GPa) kertovat piirteet puuttuvat Keurusselän näytteistä, mikä toisaalta oli odotettavaakin ottaen huomioon pirstekartioiden synnyn vaatiman alhaisen shokkipaineen, noin 2 GPa (ks. French 1998).

Pirstekartioiden määritelmiä

French (1998) on koonnut kirjaansa yhden harvoista kattavista yhteenvedoista pirstekartioiden merkittävistä piirteistä. French määrittelee pirstekartiot kartiomaisiksi rakoilupinnoiksi, joita voi syntyä vain asteroidin tai komeetan törmätessä kallioperään. Pirstekartiot syntyvät, kun shokkiaalto eli voimakas paine-

ja lämpöaalto kohtaa kallioperän ja kulkee sen lävitse. Niitä esiintyy yleensä törmäyskraatteiden pohjilla ja keskuskohoumissa sekä kraatterin reunan ulkopuolella. Pirstekartioille ominainen piirre on, että ne ovat kiven läpikotainen rakenne, eivät ainoastaan pintakuviointia. Näin ollen pirstekartiopintoja voidaan lohkoa esiin kivien sisältä. Ne näyttävät uurteilt, jotka kulkevat kaareutuen kiven eri pinnoilla ja muodostavat viuhkamaisia hevosenhantaa muistuttavia kuvioita.

Nykykäsityksen mukaan pirstekartioita ei voi sekoittaa mihinkään muuhun geologisissa prosesseissa syntyvään rakenteeseen. Virhetunnistuksen riski liittyy Frenchin (1998) mukaan tavallisiin rakoilu-, liuskeisuus- ja haarniskapintoihin (engl. *slickensides*). Pirstekartiot on erotettu näistä siten, että niiden pinnan tulisi olla ainakin jonkin verran kaareva ja uurteiden kulku on konvergoivaa. Kartioiden huipukulmat (engl. *apical angle*) vaihtelevat välillä 66°–122°, mutta ovat useimmiten 90°:n tuntumassa. Pirstekartioita syntyy kivilajista riippumatta, mutta karkearakeisissa kivissä rakenne on usein vaikeasti havaittavissa. Kartiot ovat näyttävimmillään kivissä, joiden lujuusominaisuudet ovat heikot, esimerkiksi sedimenttikivissä sekä hienorakeisissa vulkaanisissa kivissä. Kooltaan pirstekartiot voivat olla muutamista millimetreistä pariinkymmeneen metriin saakka.

Pirstekartioiden tunnusmerkit ovat vuosikymmenien ajan olleet samoja. Gibson ja Spray (1997) ovat esittäneet pirstekartiolle tuntomerkkejä, jotka ovat käytännössä samoja kuin jo aikoinaan Dietzillä (1960): 1) rakenne on kartiomainen tai osittain kartiomainen rikkoutumispinta, 2) harjannekouruviihutus (engl. *ridge-and-groove*) kapenee kartion kärkeen tai keskiviirun (engl. *central striae*) ja 3) rakenteen pitää olla läpikotainen, ei pinnallinen. Tämän kuvauksen perusteella mahdollisia pirstekartioita on vaikea erottaa maan-

kuoren tavanomaisen deformaation eräistä harvinaisemmista murtuma- ja hiertorakenteista. Gibsonin kolmas kohta puolestaan lieoneekin otettu mukaan määritelmään sedimenttikivien kartiorakenteiden (engl. *cone-in-cone*) erottamiseksi (ks. Lugli et al. 2005).

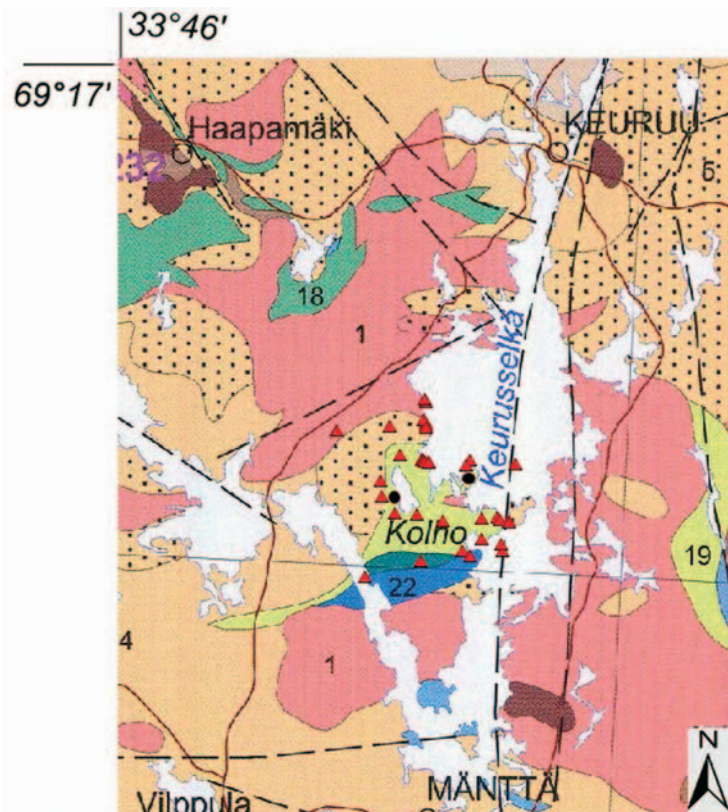
Pirstekartioiden määritelmät ovat siis ulkonäköön perustuvia. Oikeastaan ainoa todiste siitä, että ne liittyvät törmäystapahtumaan on se, että niitä esiintyy usein meteoriittikraattorien yhteydessä. Pirstekartioiden oletetaan syntyneen törmäyksen puristumisvaiheessa varsinaisen shokkiaallon tai sen jälkeisen ohentumisaallon vaikutuksesta ns. dynaamisina rakoina (Sagy et al. 2001, 2002, Baratoux ja Melosh 2003). Tällöin ne olisivat muodostuneet samaan aikaan kuin kvartsin shokkilamellit (vrt. Reimold 1998). Toisaalta ne voivat olla syntyneet myös myöhäisemmässä vaiheessa hiertoina, kun törmäyksessä kokoon puristunut maankuoren yläosa palautui litostaattiseen tasapainoon. Vredefortin muuten vaikeasti ymmärrettävät viirukkeiset rakoryhmät (engl. *multiple striated joint sets, MSJS*) ja niihin liittyvät pirstekartiot on haluttu selittää näin (Nicolaysen ja Reimold 1999). Kumasakin tapauksessa pirstekartioiden katsotaan syntyneen mallinnusten, kokeellisten töiden ja kraatterihavaintojen perusteella 2–6 GPa:n paineessa. Näin alhainen shokkipaine olisi mahdollistanut ainoastaan kvartsin asemataason suuntaisten shokkilamellien syntyminen, mutta ei vielä muita mineralogisia merkkejä tapahtumasta.

Jos pirstekartiot käsitetään dynaamisiksi raoiksi (ks. Sagy et al. 2001, 2002), ne olisivat avautuneet hyvin lähellä Rayleigh-aallon nopeutta (nopeus yli 0,9-kertainen Rayleigh-aaltoon verrattuna) (Sagy et al. 2004), siis jopa kilometrejä sekunnissa. Näin suuri nopeus erottaisi ne endogeenisistä rakojärjestelmistä ja osoittaisi ne varmuudella impaktiperäisiksi. Tunnistamiseen voi tällöin periaatteessa käyt-

tää poikkileikkauksen haaroittumusrakennetta ja pinnan mikrorakenteita, kuten Sagy työtovereineen on menetelty. Impaktissa kokoonpuristuneen kallioperän palautumiseen mahdollisesti liittyvien hiertojen erottaminen maankuoren oman tektoniikan aiheuttamista hierroista vaikuttaa sitä vastoin vielä mahdollisuuksien rajoittamalta tehtävältä, eritoten jos esiintymispaikalta ei löydetä varsinaisia todisteita shokista.

Keurusselän metavulkaniittien rakenteita

Pirstekartiomaisia rakenteita esiintyy Keurusselällä vuosina 2003–07 tehtyjen kartoitusten perusteella n. 65 paljastumalla. Lisäksi lohkarehavainnot on runsaasti ja kalliohaavainnot mukaan lukien havaintopisteitä on yhteensä 168 kp. (Hietala ja Moilanen 2007). Selviä pirstekartiomaisia rakenteita on kuitenkin vain alueen keskiosassa noin 2–7 km:n alueella 30 paljastumalla (Kuva 1). Nämä paljastumat ovat pääosin metavulkaniittialueella (Marmo 1963, Nironen 2003), joka on voimakkaasti kloriittiutunut ja paikoin hiertynyt myloniitiksi ja fylloniitiksi. Parhaiten rakenteet erottuvat Keurusselän länsirannan Jylhänniemen maasälpämeta-



Kuva 1. Keurusselän pirstekartioiden esiintyminen (punaiset kolmiot ja mustat pisteet) kartoitusten perusteella. Artikkelissa kuvatut näytteet mustien pisteiden kohdalta. Pirstekartioidet keskittyvät enimmäkseen synkinemaattisten granitoidien (punainen ja vaaleanruskea) ympäröimään maasälpämetaporfyryihin (keltainen). Kartta-alueen leveys 20 km. Pohjakartta: Nironen (2003).

Fig. 1. Shatter cone occurrences in Keurusselkä (red triangles and black circles). The localities described in detail are shown as black circles. Shatter cones occur mainly in metavolcanic rocks (yellow) and are surrounded by synkinematic granitoids (red and light brown). Map width represents 20 km. Bedrock map: Nironen (2003).



Kuvaaja: Satu Hietala.

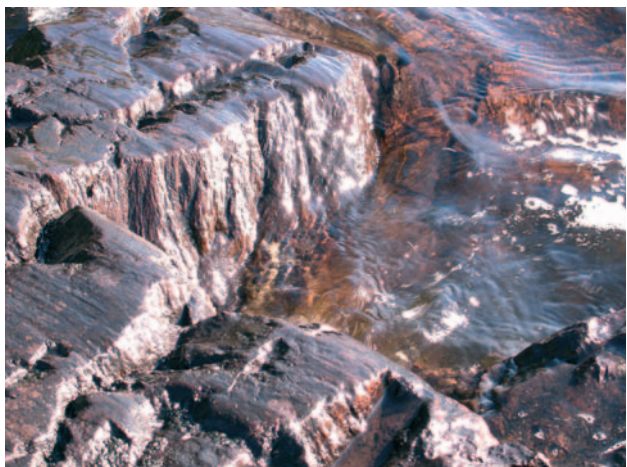


Kuva 2. Keurusselän länsirannan Jylhänniemen metavulkaniittiset rantakalliot ovat tiheästi rakoilleet. Rakopinnoilla on pirstekartiomaisia rakenteita. Kivinäytteen leveys 11 cm. Kuvat: Kari A. Kinnunen.

Fig. 2. Shatter cones in Jylhänniemi, west shore of Lake Keurusselkä. The metavolcanic rocks are densely fractured. Rock sample is 11 cm in length. Photos: Kari A. Kinnunen.

porfyryrissä (Kuva 2). Metavulkaniittialueen lisäksi pirstekartiomaisia piirteitä löytyy satunnaisesti graniitista ja granodioriitista 12 km:n läpimittaiselta alueelta, mutta niissä rakenteet muistuttavat enemmän yleisimpiä hiertopintoja. Alunperin Keurusselän rakenteen läpimitaksi on esitetty 12–14 km, johon on laskettu mukaan myös heikotkin pirstekartiiorakenteita muistuttavat viivaukset.

Metavulkaniittialuetta ympäröivissä synkinemaattisissa granitoideissa (itä- ja pohjoispuolella graniitti, länsipuolella granodioriitti ja porfyyrinen granodioriitti) pirstekartiomaisia rakenteita on vain muutamissa yksittäisissä paljastumissa. Keurusselän länsipuoleisten Kolhon tieleikkausten pirstekartiosta on tosin julkaistu kuvia (Pesonen et al. 2005). Ne voidaan kuitenkin paremmin tulkita graniitoidien haarniskapintojen piirteiksi, joita Petit (1987) ja Doblas et al. (1997) kutsuvat uurteisiksi sirppimurroksiksi (engl. *lunate fractures*). Samanlaisia piirteitä esiintyy myös Kolhon länsipuolisen suurehkon kiviaineslouhimon seinämällä.



Pirstekartioilla kaksivaiheinen syntyä

Keurusselän pirstekartiomaiset pinnat eivät ole olleet alunperin rakoja, kuten impaktimallisissa niiden pitäisi olla, vaan kloriitilla tiiviisti toisiinsa kiinnittyneitä hiertopintoja. Ne ovat toimineet heikkousvyöhykkeinä paljon myö-

hemmässä rakoilussa. Pirstekartioita muistuttava rakenne ilmenee kohdissa, joissa tällainen myöhäinen murtuma kulkee useiden vierekäisten aaltoilevien hiertopintojen kautta (Kuva 3). Tuloksena on hevosenhäntämäinen rakenne tietyistä suunnasta lankeavassa vinovalossa (Kuva 4, oikeanpuoleinen). Toisesta suunnasta valaistuna korostuu hiertopintojen kulku ja viirukkeisuus (Kuva 4, vasemmanpuoleinen). Monilla rantapaljastumilla murtumien rautasaostumat ja kosteus vielä korostavat pinnan kolmiulotteisuutta.

Rakenne on siis syntynyt kahdessa vaiheessa: ensin hiertymällä ja vasta lopuksi murtumalla. Tämä viimeinen tapahtumavaihe osittain kytkeytyä mannerjäätikön aiheuttaman painumisen purkautumiseen tai ikiroutavaiheen pakkasrikkoutumiseen. Tässä vaiheessa rakojen vesi olisi myös muuttunut ikirouta-alueella hapettavaksi, mikä osaltaan selittäisi rautapitoisten mineraloidien saostumisen diffuusio-koon murtumiin. Jäätymisen merkitystä arvioitiin jäädyttämällä vedellä imeytettyjä näytteitä pakastimessa ja sulattamalla niitä. Tois-



Kuva 3. Keurusselän pirstekartioiden pituussuuntaan sahattu leikkaus. Pirstekartiot ilmenevät hiertyneessä maasälpämetaporfyryssä punaisina hematitiin värjääminä hiertopintojen ryhminä, joita pitkin myöhempi rakoilu on edennyt. Kuva-alan leveys 3 cm. Löytöpaikka: Keuruu, Valkeajärven länsiranta. Kuva: Kari A. Kinnunen.

Fig. 3. Vertical section across shear surfaces (shatter cones) from Keurusselkä. Fracturing has reactivated some of the shears. Feldspar-metaporphry. Picture width 3 cm. Photo: Kari A. Kinnunen.



Kuva 4. Keurusselän Jylhänniemen metavulkaniittinäyte eri suunnista valaistuna. Hevosenhäntämäiset pirstekartiot erottuvat terävässä sivuvalossa, mutta pituussuunnasta tuleva valo korostaa hiertopintojen suuntausta. Näytteen pituus 10 cm. Kuvat: Kari A. Kinnunen.

Fig. 4. The direction of illumination emphasizes different structures in this Keurusselkä metavolcanic sample. Strong side light reveals shatter cone textures (right photo) but other directions depict shear planes (left photo). Sample length 10 cm. Photos: Kari A. Kinnunen.

tamalla jäädytys/sulatus useita kertoja näytteet saatiin murtumaan hiertymiä myöten pirstekartiomaisiksi pinnoiksi.

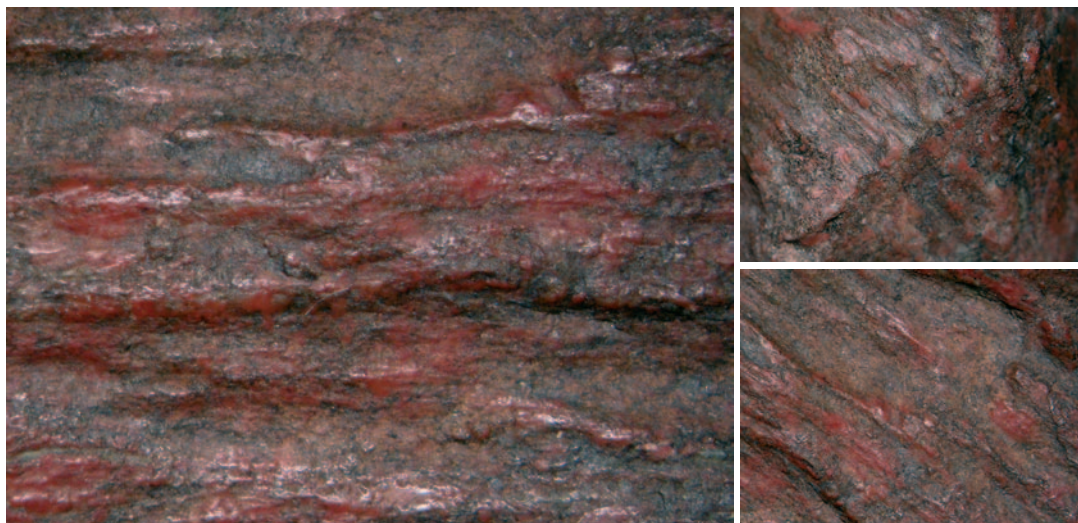
Hiertopintojen ominaisuudet

Rakenteiden kulkua kiven sisässä tutkittiin sahatuista kivileikkeistä (33 kpl), jotka olivat kahdesta paljastumasta Keurusselän länsirannalta, Jylhänniemenstä ja Valkeajärven länsipuolelta (Kuva 1, mustat pisteet). Lisäksi tutkittiin kiillotettuja ohuthieitä, jotka oli valmistettu rakenteiden pituus- ja poikkisuuntaan.

Pirstekartiopinta on kuin hioutuneen näköinen (Kuva 5), ja siinä esiintyy yhdensuun-

taisia, U:n muotoisia, 1–2 mm:n korkuisia ja senttimetrin pituisia, positiivisia ja negatiivisia harjanteita ja kouruja (engl. *ridge-and-groove*). Harjanteet ovat muodostuneet maasälpärakeista, joiden yli pinta on liukunut. Harjanteiden ja kourujen pinnalla on niiden suuntaisia mikroviiroja, joiden pituus on 1–5 mm ja syvyys noin 0,1 mm. Rakenne muistuttaa stereomikroskoopilla silokallion uurteita tai haarniskapinnan viirukkeisuutta.

Hiertopinnan ympärillä maasälvät ovat siis käyttäytyneet hauraasti muodostaen nyppylöitä tai murtuillen (Kuva 6). Kvartsi kuitenkin on muovautunut plastisesti, sillä se on voimakkaasti aaltosammuvaa ja vierekkäisiä kvartsi-



Kuva 5. Keurusselän maasälpämetaporfyirin pirstekartiopinnan viirukkeinen rakenne. Rakenne aiheutuu hiertopintoja pitkin edenneestä myöhemmästä rakoilusta. Punaiset harjanteet koostuvat maasälvistä ja tummat kohdat pinnan kloriittijäänteistä. Viirukkeisuus on yhdensuuntaista poiketen shokin aiheuttamista kartiomaisesta pintarakenteesta. Löytöpaikka: Keuruu, Valkeajärven länsiranta. Kuva-alan leveys 15 mm vasemman puoleisessa kuvassa. Kuva: Kari A. Kinnunen.

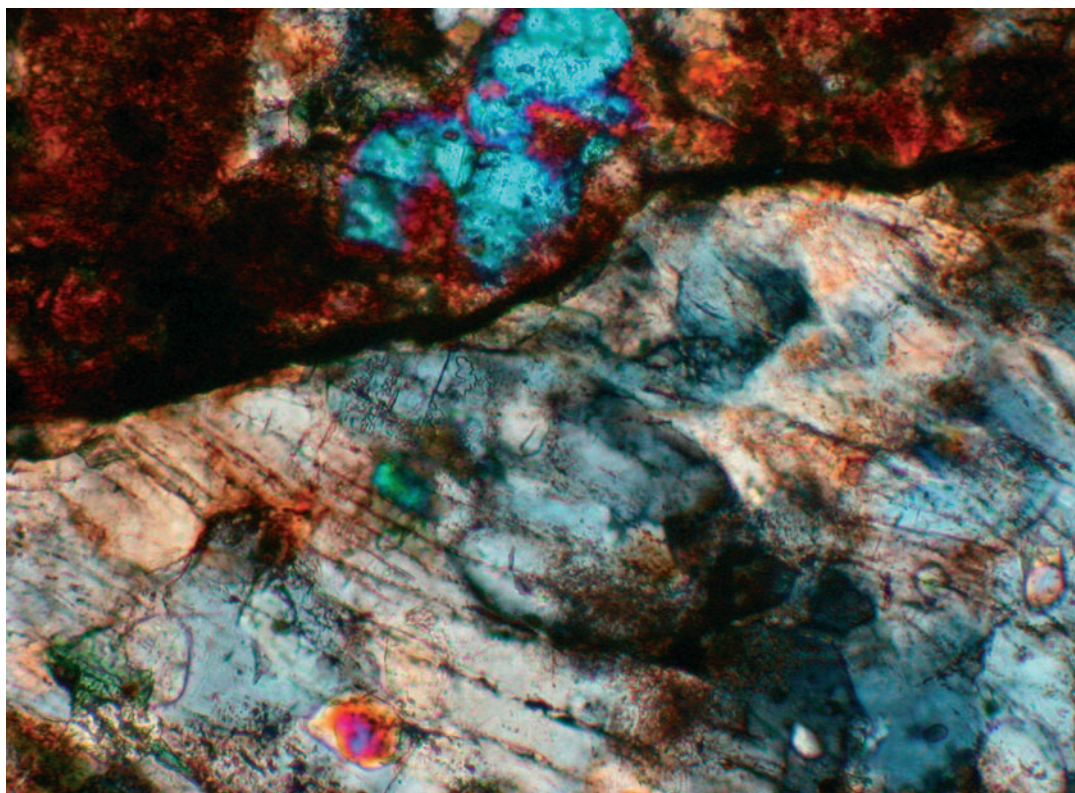
Fig. 5. Ridge and groove texture on shatter cone surface from Keurusselkä. Fractures have reactivated metamorphic, undulating shear surfaces. Feldspar grains form reddish knobs on this shear plane cutting feldsparmetaporphyry. Picture width 15 mm (left photo). Photo: Kari A. Kinnunen.

rakeita leikkaavat samansuuntaisesti kaarevat sekundaaristen fluidisulkeumien (hiilidioksidi ja vesi) sijaintipinnat (Kuva 6). Hiertopinnan ulkopuolella kivilajin kvartsirakeet ovat stressittömiä uuskiteitä tai vain heikosti aaltosammuvia.

Rakenteen poikki sahatussa suunnassa näkee, että se koostuu toisiaan lävistävästä hematitiin punaiseksi värjäämien pintojen verkostosta (Kuva 3). Kivi on hiertynyt lamelliparviksi, joissa yksittäiset lamellit ovat liikkuneet toistensa suhteen lyhyitä matkoja. Parvien etäisyys toisistaan on 6–15 mm. Verkostolla on kokonaisuutena kalanruotomainen tai kerrosmainen rakenne. Se vastaa siirrospintoihin liittyvää Riedel-mikrohiertymien rakennetta (ks. Petit 1987: Fig. 6). Impaktisynnylle karakteristista dynaamisen rakoilun äärimmäisen

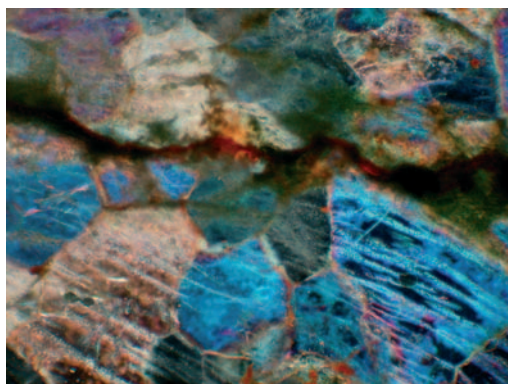
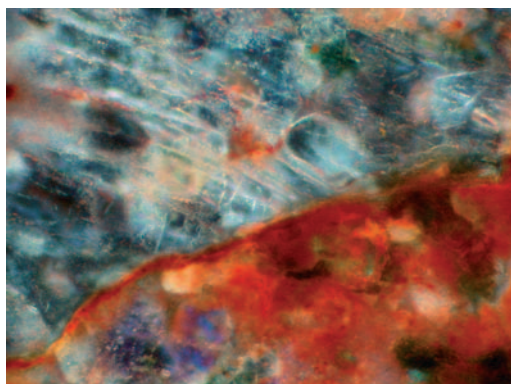
nopeuden aiheuttamaa viuhkamaista avautumiskuviota ei siis esiinny (vrt. Quinn 2007).

Hiertopintojen tummanvihreä silaus (paksuus keskimäärin 10–30 µm, maksimi 130 µm) koostuu kloriitista, serpentiinistä ja pienestä määrästä kvartsia ja ortoklaasia (XRD). Myöhemmät, hiertopintoja myöten risteilevät hiusraot ovat puolestaan täyttyneet saveksella (kaoliini, XRD) ja värjäytyneet mustalla rautasaostumalla. Maasälvät ovat pintojen ympäriltä millin parin vyöhykkeeltä hematitiittiutuneet punertaviksi. Muuttumisvyöhyke koostuu XRD:n perusteella albiitista, mikrokliinista (*intermediate*-tyyppi) ja kvartsista. Silikan korkean paineen muunnoksia ei havaittu röntgenajoissa. Kvartsin diffraktiopiikit olivat huomattavan teräviä, mikä sekin osoittaa shokki-vaikutuksen puuttumista. Ohuthieistä ei kvart-



Kuva 6. Poikkileikkaus maasälpämetaporfyryä leikkaavasta kloriitilla silautuneesta pirstekartiopinasta. Deformoitunutta kvartsia kuvan poikki mutkittelevan kartiopinnan alapuolella ja sen yläpuolella hematiitin värjäämää rakoillutta maasälpää. Kartiopinnan deformaatioon liittyvät mikroraot (vesi/hiilidioksidi-typin fluidisulkeumia) kulkevat samansuuntaisina kvartsirakeiden poikki. Löytöpaikka: Keuruu, Valkeajärven länsiranta. Kuva-alan leveys 0,6 mm. Ristiinpolarisoitu valo. Kuva: Kari A. Kinnunen.

Fig. 6. Shear surface (shatter cone) in feldsparmetaporphyry from Keurusjärvi. Quartz grains (grey) show distinct undulose extinction and feldspars (reddish pigment) brittle behaviour along the chloritic shear surface. Secondary, curved fluid inclusion planes show same direction when passing neighbouring quartz grains. Polished thin section, crossed polarized light, picture width 0.6 mm. Photo: Kari A. Kinnunen.

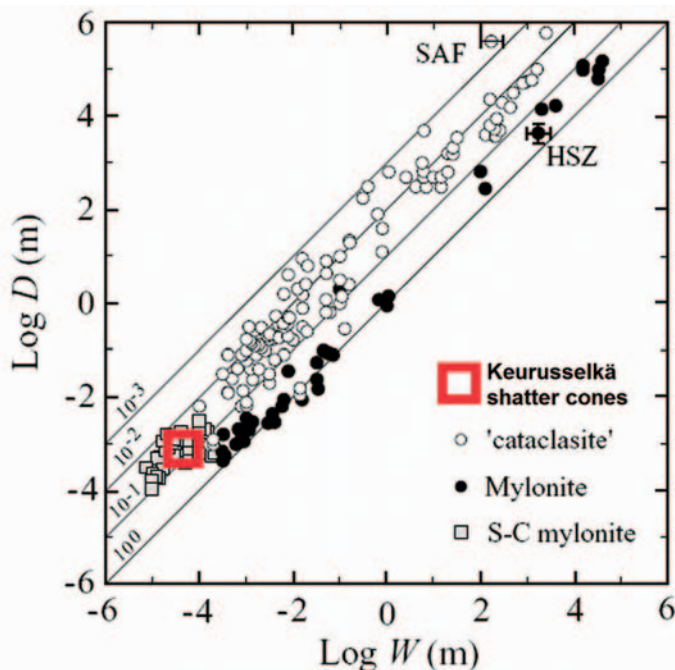


sisä myöskään löytynyt asematason suuntaista brasilian kaksoistumista (alimman shokkipaineen suunta).

Yhdessä näytteessä kloriitti koostui XRD-määrittelyn mukaan erittäin harvinaisesta baileykloorista (kolme pääpiikkiä rämsäivät). Tämä sinkkirikas kloriitti on kuvattu uutena mineraalina vuonna 1988 Australian Queenslandista andesiitista (Rule ja Radke 1988), mutta Suomesta sitä ei aikaisemmin ole tavattu. Alustavaa määrittystä ollaan vielä varmentamassa. Keurusselän metavulkaniiteissa on paikoin jo Vladi Marmon 60-luvulla tutkimia sulfidimineralisaatioita, joten baileykloorin esiintyminen on geologisesti mahdollista.

Semiduktiilia deformaatiota

Kloriittisen silauksen toisistaan erottamat hiertymäpinkkojen siirtymät ovat enimmäkseen oikeakätisiä ja vähäisiä. Pinnat ovat asettuneet tiiviisti limittäin ilman välitiloja. Siirtymän pinta (S) ja pinnan keskustan paksuus (P) mitattiin kivilevyjen hiertymien mikrosiirrosta maasälvistä (14 kpl). Keskimääräiseksi tulokseksi saatiin: P 0,009 mm, S 0,25 mm ja P/S 0,036. Tulokset siirrettiin Nakamuran ja Nagahaman (2002) logaritmiseen P/S-diagrammiin (Kuva 7). Se perustuu laajaan vertailuaineistoon ruhjevyöhykkeiden siirtymien jännitustulkinnasta eri maanosista ja eri mitataavoissa. Tämän mukaan Keurusselän rakenteet sijoittuvat hauraan ja duktiilin defor-



Kuva 7. Keurusselän pirstekartiomaisten rakenteiden poikki sahatuista pinnoista mitatut siirtymät (D) ja niitä vastaavat kloriittitäytteen paksuudet (W). Keurusselän havainnot punaisen neliön alueella. Pohjana mittausaineisto eri maiden hierto/siirrosvyöhykkeistä (Nakamura ja Nagahama 2002, Fig. 4).

Fig. 7. Width (W) / displacement (D) of the shear surfaces (shatter cones) in Keurusselkä samples (red square) plotted on worldwide shear zone data of Nakamura and Nagahama (2002, Fig. 4). SAF shows the range in San Andreas fault zone and HSZ in New Zealand.

maation välivaiheille yhdessä semiduktiilien S-C myloniittien C-pintojen kanssa.

P/S-suhde osoittaa Keurusselän rakenteiden ilmeisimmin muotoutuneen duktiileina haarniskapintoina (engl. *ductile slickensides*). Myös kloriittisilaukset ja pintojen viirukkeisuus (engl. *ridge-and-groove*) ovat tälle syntyvälle tyyppilliset (vrt. Lin ja Williams 1992, Nakamura ja Nagahama 2002). Syntyyolosuhteet vastaavat maankuoressa hauraan ja plastisen käyttäytymisen välistä vaihteluvyöhykettä.

Tavanomaisen orogeenisen geotermisen gradientin oloissa hiertymisen voi silloin arvioida tapahtuneen vähintään noin 10 km:n syvyydessä ja kallioperän tavanomaiseen metamorfoosiin liittyen. Hitaasti edennyt paineliukeneminen on ilmeisimmin ollut viirukkeisten hiertopintojen syntymekanismi.

Vastaavia viirukkeisia hiertopintojen rakenteita on kuvattu metamorfisista kivilajeista Kanadasta, Nova Scotiasta. Siellä ne on tulkittu S-C myloniitin hiertymisen haarniskapinnoiksi (Lin ja Williams 1992). Hiertyminen on tavanomaisista haarniskapinnoista poiketen tapahtunut semiduktiilin deformaation olosuhteissa. Tällaiset hiertopinnat ovat umpinaisia, kaareilevia ja viirukkeisia kiven sisäisiä heikkousvyöhykkeitä. Ne eivät ole olleet muotoutuessaan rakoja. Shimamoton (1989) kokeellisten töiden perusteella S-C myloniitit ovat syntyneet maankuoren semiduktiileissa olosuhteissa seismogeenisen syvyyden alarajalla.

Liittyminen suurrakenteisiin

Keurusselän metavulkaniitit ovat mineraali-koostumuksensa perusteella retrograadisesti alemmassa amfiboliittifasieksessa ja vihreäliuskefasieksessa muuttuneita. Tällainen muuttuminen on Keski-Suomen granitoidikompleksin (KSGK) ruhje- ja siirrosvyöhykkeissä tyyppistä (ks. Nironen 2003, Sjöblom 1990). Pirstekartiomaisissa hiertopinnoissa ja kiven sisäosissa muuttumism mineraalit ovat käytännössä samoja, mikä mielestämme osoittaa hiertymisten liittyvän nimenomaan tavanomaisen metamorfoosin loppuvaiheisiin.

Pirstekartiopaljastumien hiertymä/rakotiheys on erittäin korkea: noin 100 hiusrakoa metrillä (Kuvat 2 ja 3). Tällainen tiheys ilmentää tektonista ruhje/siirrosvyöhykettä ja osoittaa siihen voineen kytkeytyä voimakasta flui-

ditoimintaa (vrt. Tripp ja Vearncombe 2004). Keurusselän rakenteet voivat siten liittyä KSGK:n graniittien kiteytymisen (1,88 Ga) fluidivaikutuksiin (vrt. Nironen 2003), sillä ne keskittyvät graniittialueiden ympäröimiin metavulkaniitteihin (1,91–1,89 Ga). Graniittien kiteytyessä erkaantuneet jäännösfluidit olisivat pyrkineet kulkeutumaan ja rikastumaan silloisen maankuoren hauraan ja plastisen vyöhykkeen vaihettumiskerrokseen (vrt. Bellot 2007). Kohonnut fluidin paine olisi tällöin aiheuttanut retrograadista muuttumista heikentäen samalla kiviä mekaanisesti, jolloin ne olisivat herkemmin murtuilleet ruhje/siirrosvyöhykkeissä. Tässä vaiheessa kvartsi on ohuthiehavaintojen mukaan käyttäytynyt vielä osin plastisesti, mutta maasälpä hauraasti, mikä kuvastaa 300–450 °C lämpötilaa (vrt. Bellot 2007).

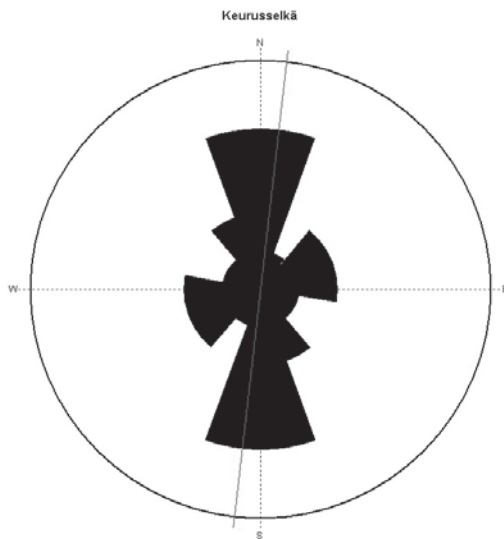
Keurusselän kohdalla (Kuva 1) kulkee Marmon (1963) kuvaama NNE–SSW-suuntainen ruhjevyöhyke ja Niroson (2003) esittämä N–S-suuntainen siirrosparvi Kyyjärveltä Keuruun kautta Kuorevedelle. Pirstekartiomaisten pintojen kulku (kohtisuora kartioiden keskisädettä vastaan) noudattaa paljastumamittausten perusteella Niroson (2003) esittämien alueellisten ruhje- ja siirrosvyöhykkeiden kulkua, sillä voimakas maksimi sijoittuu 7° kohdalle (Kuva 8). Rakojen konjugaattiluonteesta takia johtopäätösten vetäminen on kumminkin uskallettua.

Pajusen ja työtovereiden (2008) tektonisissa tulkinnoissa KSGK olisi kokonaisuudessaan käyttäytynyt kompetenttina alueena jo siinä vaiheessa kun Etelä-Suomen granitoidialue deformatui duktiilisti 1,86–1,83 Ga siten. Vaihettuvan deformaation vaihe ajoittuisi KSGK:ssa siten noin 1,87–1,86 Ga tienoille, kuten myös Nironen (2003) on päätellyt. Deformaatio olisi ollut oikeakätistä transpresiota, vinopuristusta (Pajunen et al. 2008). Pajusen ja työtovereiden (2008) tulkinnessa

KSGK:lla on transpressionaalinen NW-suuntaan kaatuva pinoutumisrakenne. Kivilajiblokit ovat tällöin osin kiertyneet toistensa suhteen. Lahtinen et al. (2005), Kosunen et al. (2006) ja Nironen et al. (2006) puolestaan ovat esittäneet, että KSGK:n alueella havaitut yläkuoren suksimaiset siirrosrakenteet (engl. *listric faults*) aiheutuisivat alakuoren ekstensiosista. Sen olisi synnyttänyt Lahtisen mallissa ylipaksuuntuneen svekofennisen kuoren gravitatiivinen romahtaminen. Nämä piirteet erotuvat suksimaisina heijasteina FIRE-aineistossa (Nironen et al. 2006). Nämä megapiirteet voivat olla yhteydessä pirstekartiomaisiin hiertymiin, mutta asia vaatisi alueelta jatkotutkimuksia.

Mikä rakenteen aiheutti?

Impaktimallin tueksi tarvittaisiin Keurusselän rakenteen osalta muita todisteita. Tällaiseksi on esitetty Keurusselän pirstekartiomaisia rakenteita leikkaavan pseudotakyliitin $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ikää. Schmieder et al. (2009) ovat vastikään julkaisseet sille 1,15–1,14 Ga iän ja korostaneet, että tuo ikä ei selittyisi mielekkäästi muulla kuin impaktimallilla. Tämä ikä on kuitenkin samaa luokkaa kuin Heeremansin ja Wibransin (1999) Etelä-Suomen ruhjevyöhykkeistä julkaisemat $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -iät 1,29–1,06 Ga. Myöhemmissä julkaisuissa näiden Etelä-Suomen ruhjevyöhykkeiden on tulkittu kuvastavan aineksen kuumentumista eikä todellista ikää. Kanadan Sudburyn impaktirakenteen pseudotakyliiteistä on niistäkin saatu anomaalisen nuoria $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ikää ja vieläpä aivan samaa luokkaa kuin Keurusselältä (vrt. Thompson et al. 1998). Samaa luokkaa on myös Etelä-Afrikan Vredefortin pseudotakyliittien $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -ikien nuorentuminen ilmeisimmin hydrotermisen muuttumisen seurauksena (Reimold 1998). Lisäksi havainto pirstekartiomai-



Kuva 8. Ruusudiagrammissa pirstekartioiden keskisäteiden sijaintipintojen kulku Keurusselän metavulkaniiteissa. Havaintojen lukumäärä 19 kpl. Mittaukset: Satu Hietala ja Jarmo Moilanen.

Fig. 8. Rose diagram showing the strike directions of shatter coned surfaces in Keurusselkä metavolcanic formation. Number of measurements 19. Measured by Satu Hietala and Jarmo Moilanen.

sia rakenteita leikkaavasta pseudotakyliitistä (tai oikeammin ultramyloniitista?) on Keurusselän impaktimallille ongelmallinen. Mutta jos kysymyksessä ovatkin maankuoren tavanomaiseen deformaatioon liittyvät piirteet, niin semiduktiileja pirstehiertoja leikkaava hauraan vaiheen kitkasula eli pseudotakyliitti olisi luonnollinen selitys.

Vakuuttavia todisteita Keurusselän impaktimallin puolesta olisivat impaktisulan löytyminen sekä breksiat, joiden mineraaleissa on shokkimuutoksia, kuten kvartsin shokkilamelleja. Kuten jo mainittiin, vain kvartsin asematason suuntaiset lamellit olisivat mahdollisia tässä tapauksessa. Shokkilamelleja on julkistettu yhdestä myloniittisesta irtokivestä, joka

on peräisin Keurusselältä pellolta ajetusta irtokivikasasta ja jonka alkuperästä ei ole tarkempaa tietoa. Lamellien kidekiteellisestä suuntauksesta ei ole esitetty U-pöytämittausten tuloksia. Omissa kallionäytteissämme ei kvartsin shokkilamelleja ole todettu, vaikka kvartsirakeita tarkasteltiin myös U-pöydällä.

Impaktitörmäyksen synnyttämä rakoilu ulottuisi syvyyteen, joka olisi noin 1/3 kraatterin halkaisijasta (French 1998). Keurusselän tapauksessa (pirstekartiomaisten rakenteiden alue noin 2–7 km) tämä vastaisi vain noin 2–3 km:n syvyyttä. Tälle syvyydelle maankuori siis olisi rakoillut, mutta Keurusselän kaltaisia duktiileja pirstekartiomaisia hiertoja siihen ei mielestämme olisi kyennyt muodostumaan. Kraatterin olisi pitänyt olla halkaisijaltaan vähintään 50 km, jotta törmäyksen aiheuttama puristuminen olisi tunkeutunut niin syvälle, että palautumisvaiheen duktiilit liikunnot olisivat olleet mahdollisia keskuskohouman ja reunusvallin muotoutuessa. Tällöin Keurusselän itäpuolisessa FIRE-profiilista pitäisi mielestämme löytyä jälkiä deformaatiosta. Keurusselän kohdalla kuoressa ilmenevä laaja synforminen vaakaheijaste noin 3–4 km:n syvyydessä kuitenkin kuvastanee ainoastaan ympäröivää graniittipahkua (vrt. Nironen et al. 2006).

Vastaavasti näin laajan impaktirakenteen pitäisi selkeästi ilmetä alueen magneettisilla kartoilla ja painovoimakartoilla. Pirstekartioiden esiintymisalue (oletettu keskuskohouma) ei kuitenkaan korreloi niiden kanssa. Vastikään julkistetuilla magneettisilla matalalentokartoilla Keurusselän alueen synkinemaattiset graniitoidit erottuvat heikosti magneettisina ja tekstuureiltaan plastisesti deformatuneina W–E-suuntaisina rakenteina. Keurusselän metavulkaniitit ovat näillä kartoilla voimakkaasti magneettisia ja hauraasti muovautuneita alueita graniitoidien välissä. Metavulkaniitteja leikkaavat melko suorat siirros/hiertovyöhykkeet, jois-



Kuva 9. Saksan Steinheimin mioseenikautisen (15 ± 1 Ma) meteoriittikraatterin kalkkikiven selväpiirteisiä pirstekartioita. Näytteen pituus 6 cm. Kokoelma: Satu Hietala. Kuva: Kari A. Kinnunen.

Fig. 9. Distinct shatter cones in limestone from Steinheim impact crater (15 ± 1 Ma), Germany. Sample length 6 cm. Collection: Satu Hietala. Photo: Kari A. Kinnunen.

sa magneettisuus on alentunut ilmeisesti magnetiitin paikallisesta hematiittiutumuksesta johtuen. Mahdolliseen törmäykseen liittyvää pyöreää, suunnikasmaista tai polygonimaista negatiivista magneettista anomaliaa ei tällä kohdalla havaita. Vuonna 2005 alueella suorite- tuissa painovoimamittauksissa, joita toinen kirjoittajista (SH) oli tekemässä, havaittiin n. 10 kilometriä läpimitaltaan oleva ja 9 mgal:n suuruinen negatiivinen anomalia pirstekartio- alueen keskikohdasta n. 5 km itään. Lähialueilta löytyi myös muita samansuuruisia ja muotoisia anomaliaita. Keurusselän itäpuolen anomalia kuuluu NE–SW-suunnassa kulkevaan Bouguer-minimivyöhykkeeseen, eikä se näin ollen yksistään tue impaktimallia (Ruotsalainen et al. 2006a). Parhaiten minimivyöhyke kuvastaa NNE–SSW-suunnassa kulkevien hierto- ja ruhjevyöhykkeiden sekä niihin liit-



Kuva 10. Pirstekartiorakennetta muistuttava murtopinta Helsingin Hietalahdenkadun ja Lönnrotinkadun kulman amfiboliitissa. Kuva: Kari A. Kinnunen.

Fig. 10. Pseudo shatter cones in amphibolite from Helsinki city, Finland. Photo: Kari A. Kinnunen.

tyvän rapautumisen aiheuttamaa kallioperän huokoisuuden kasvua.

Keurusselän tapaus osoittaa mielestämme, että mahdollisten impaktirakenteiden etsinnässä pirstekartioita olisi turvallisempaa kutsua kartiorakoiluksi tai kartiomaiseksi rakopinnan rakenteeksi. Tällä tavalla ei heti alkuun otettaisi lopullista kantaa syntymalliin. Pirstekartio on professori Martti Lehtisen käänös englanninkielisestä termistä shatter cone. Termi on geneettinen, ja siinä oletetaan piirteet ekstensionaaliseksi murtumiksi ja nimenomaan shokkiaallon vaikutuksesta syntyneiksi. Samoin vanha rakennegeologinen termi hevosenhäntä (engl. horsetailing) kytketään nykyään syntyvaltaan ainoastaan impaktirakenteisiin.

Kivilajien ja jopa mineraalien hien- ja murtumarakenteet voivat muistuttaa aitoja pirstekartioita (Kuva 9) silmämääräisesti tarkastellen niin paljon, että geneettisten tulintojen tekeminen on ilman työläitä mikrotektonisia ja fraktografisia tutkimuksia uskallettua. Esimerkiksi Unkarin mineraaleja esittelevässä kirjassa (Balacs ja Szakall 1991, s. 31)

on vakuuttavan tuntuinen kuva ”pirstekartioista” talkin murtopinnalla, löytöpaikka Felsöcsatar. Myös tavallisella amfiboliitilla voi joskus olla pirstekartiomainen murtumarakenne (Kuva 10). Rakenteiden visuaalinen samankaltaisuus ei siis ole aukoton todiste niiden samanlaisesta syntytavasta.

Kiitokset

Röntgenajot tekivät GTK:ssa geologi Petri Korkeakoski ja Mirja Saarinen. Kirjoittajat ovat kiitollisia heille ja lisäksi lukuisille geologeille, isotooppitutkijoille ja geofysikoille pirstekartioista käydyistä keskusteluista. Artikkeleissa esitetyistä näkemyksistä kirjoittajat ovat kumminkin yksin vastuussa.

KARI A. KINNUNEN

GTK, Espoo
kari.kinnunen@gtk.fi

SATU HIETALA

Asematie 1 B 8, 61300 Kurikka
satu.hietala@gmail.com

Summary:

On shatter cones in Keurusselkä area, Central Finland

In 2003 Satu Hietala discovered shatter cones from outcrops along the shore of Lake Keurusselkä (Figs. 1 and 2) and because of this find Keurusselkä was proposed to be an impact structure (Hietala and Moilanen 2004a, b, 2007, Pesonen et al. 2004, 2005, 2006, Ruotsalainen et al. 2006a, b, Schmieder et al. 2009). Shatter cones (0.01–1 m) were mainly found in a sheared and chloritized metavolcanic formation (3 x 7 km), which is surrounded by synkinematic granitoids devoid of distinct shatter cones.

Microscope observations showed that these fracture patterns, macroscopically similar to shatter cones, were formed in two separate deformation processes. The curved and striated surfaces were originally undulating shears crossing each other (Figs. 3–6). The width/displacement ratio is approximately 0.036 in these shear surfaces. This indicates semiductile deformation according to the data of Nakamura and Nagahama (2002) collected from worldwide shear zones (Fig. 7). The shear walls show undulose quartz and fractured or intact feldspars, and this supports the semiductile interpretation.

The Keurusselkä shear surfaces can be compared to the so-called ductile slickensides reported from Canada (see Lin and Williams 1992). Many of these shears were reactivated during a later brittle stage of deformation producing shatter cone-like patterns at the contacts of striated and undulating shear surfaces. XRD analyses show that the shears are composed of practically the same mineral

phases as the altered metavolcanic host rock. No glass in fractures, nor shock effects in the neighboring minerals and no branching fracture patterns characteristic of dynamic fractures (cf. Sagy et al. 2004) have been found.

Shatter cones are explained as dynamic fractures formed during compression by the impact induced shock wave or by later rarefaction waves (Sagy et al. 2001, 2002, Barattoux and Melosh 2003). However, the Keurusselkä structures were not originally fractures but shear surfaces tightly sealed with chlorite. They acted as local zones of weakness and were reactivated during much later fracturing (Fig. 3). Consequently a metamorphic, retrogressive origin is suggested for the shear surfaces with chlorite and a much later origin for the brittle fracturing (with kaolinite) that reactivated these old shears.





Kuva: Satu Hietala

Kirjallisuus

- Balazs, E. ja Szakall, S. 1991. Mineral rarities of Hungary. Fine Arts Publishing House, Budapest, 37 s.
- Baratoux, D. ja Melosh, H.J. 2003. The formation of shatter cones by shock wave interference during impacting. *Earth and Planetary Science Letters* 216, 43–54.
- Bellot, J.-P. 2007. Extensional deformation assisted by mineralised fluids within the brittle-ductile transition: Insights from the southwestern Massif Central, France. *Journal of Structural Geology* 29, 225–240.
- Dietz, R.S. 1947. Meteorite Impact Suggested by the Orientation of Shatter-cones at the Kentland, Indiana, Disturbance. *Science* 105 (2715), 42–43.
- Dietz, R.S. 1960. Meteorite impact suggested by shatter cones in rock. *Science* 131 (3416), 1781–1784.
- Doblas, M., Mahecha, V., Hoyos, M. ja Lopez-Ruiz, J. 1997. Slickenside and fault surface kinematic indicators on active normal faults of the Alpine Betic cordilleras, Granada, southern Spain. *Journal of Structural Geology* 19 (2), 159–170.
- Fleet, M.E. 1979. Tectonic origin for Sudbury, Ontario, shatter cones. *Geological Society of America Bulletin* 90, 1177–1182.
- French, B.M. 1998. Traces of Catastrophe. A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution No. 954, Lunar and Planetary Institute, Houston, 120 s.
- Gibson, H.M. ja Spray, J.G. 1997. Diagnostic criteria for the recognition of shatter cones. Large meteorite impacts and planetary evolution (Sudbury 97), Lunar Planet. Inst., Houston, Contribution 922, 16–17.
- Heeremans, M. ja Wijbrans, J. 1999. Late Proterozoic tectonic events in southern Finland, constrained by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ incremental heating and single spot fusion experiments on K-feldspars. *Terra Nova* 11, 216–222.
- Hietala S. ja Moilanen J. 2004a. Keurusselkä – a new impact structure in Central Finland, LPSC XXXV, Houston, Texas, USA (cd-rom)
- Hietala, S. ja Moilanen, J. 2004b. Keurusselkä on mui-nainen osuma.
- Tähdet ja Avaruus 1/2004, 24–29.
- Hietala, S. ja Moilanen, J. 2007. Keurusselkä – Distribution of Shatter Cones, *Lunar and Planetary Science XXXVIII*, (1762.pdf).
- Koeberl, C. 1997. Impact cratering: The mineralogical and geochemical evidence. Teoksessa: K. Johnson ja J. Campbell (toim.) *Proceedings, "The Ames Structure and Similar Features"*, Oklahoma Geological Survey Circular 100, 30–54.
- Koeberl, C. 2002. Mineralogical and geochemical aspects of impact craters. *Mineralogical Magazine* 66 (5), 745–768.
- Kosunen, P., Korja, A. ja Nironen, M. 2006. Post-collisional extension in central Svecofennian, Central Finland. Laajennettu abstrakti, *Lithosphere 2006 Symposium*, Espoo, 71–74.
- Lahtinen, R., Korja, A. ja Nironen, M. 2005. Paleoproterozoic tectonic evolution. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. A. ja Rämö, O. T. (toim.) *Precambrian geology of Finland: key to the evolution of the Fennoscandian Shield*. *Developments in Precambrian geology* 14, 481–531.
- Lin, S. ja Williams, P.F. 1992. The origin of ridge-in-groove slickenside striae and associated steps in an S-C mylonite. *Journal of Structural Geology* 14 (3), 315–321.
- Lugli, S., Reimold, W.U. ja Koeberl, C. 2005. Silicified cone-in-cone structures from Erfoud (Morocco): A comparison with impact generated shatter cones. Teoksessa: Koeberl, C. ja Henkel, H. (toim.) *Impact Tectonics*. *Impact Studies*, vol. 6, Springer, Heidelberg, 81–110.
- Marmo, V. 1963. Kallioperäkartan selostus. Kallioperäkarta – Prequaternary rocks, *lehti* 2232, Keuruu 1963, 55 s.
- Masaites, V.L. 2005. Morphological, structural and lithological records of terrestrial impacts: an overview. *Australian Journal of Earth Sciences* 52, 509–528.
- McHone, J.F. ja Dietz, R.S. 1988. Shatter cones: Diagnostic impact signatures. *Lunar and Planetary Inst. Contribution* 673, 118–119.
- Nakamura, N. ja Nagahama, H. 2002. Tribochemical wearing in S-C mylonites and its implication to

- lithosphere stress level. *Earth Planets Space* 54, 1103–1108.
- Nicolaysen, L.O. ja Reimold, W.U. 1999. Vredefort shatter cones revisited. *Journal of Geophysical Research* 104, 4911–4930.
- Nironen, M. 2003. Keski-Suomen granitoidikompleksi: karttaselitys. Summary: Central Finland Granitoid Complex – explanation to a map. *Geologian tutkimuskeskus. Tutkimusraportti* 157. 45 s. ja kartta.
- Nironen, M., Korja, A. ja Heikkinen, P. 2006. A geological interpretation of the upper crust along FIRE 2 and FIRE 2A. Teoksessa: Kukkonen, I. T. ja Lahinen, R. (toim.) *Finnish Reflection Experiment FIRE 2001–2005*. Geological Survey of Finland. Special Paper 43, 77–103.
- Pajunen, M., Airo, M.-L., Elminen, T., Mänttari, I., Niemelä, R., Vaarma, M., Wasenius, P., Wennerström, M. 2008. Tectonic evolution of the Svecofennian crust in southern Finland. Teoksessa: *Tectonic evolution of the Svecofennian crust in southern Finland – a basis for characterizing bedrock technical properties*. Geological Survey of Finland. Special Paper 47. Espoo: Geological Survey of Finland, 15–160 + 1 liite.
- Pesonen, L., Poutanen, M. ja Ruotsalainen, H.E. 2004. The Keurusselkä impact structure, Central Finland – preliminary geophysical data. 67th Annual Meteoritical Society Meeting (2004), 5068.pdf
- Pesonen L.J., Hietala, S., Poutanen, M., Moilanen, J., Lehtinen, M. ja Ruotsalainen, H.E. 2005. The Keurusselkä Meteorite Impact Structure, Central Finland: Geophysical Data, Proc. of the of the XXII General Assembly of the Geophys. Soc. Of Finland 19.–20.5.2005, Helsinki.
- Pesonen L.J., Hietala S., Poutanen M., Moilanen J., Lehtinen M. ja Ruotsalainen H. 2006. Gravity survey of the Keurusselkä meteorite impact structure. 27th Nordic Winter Meeting, January 9–12, Oulu, Finland. *Bull. Geol. Soc. of Finland, Spec. Issue* 1, 134.
- Petit, J.P. 1987. Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology* 9, 597–608.
- Quinn, G.D. 2007. *Fractography of Ceramics and Glasses*. National Institute of Standards and Technology Special Publication 960-16, 532 s.
- Reimold, W.U. 1998. Exogenic and endogenic breccias: a discussion on major problematics. *Earth-Science Reviews* 43, 25–47.
- Rule, A.C. ja Radke, F. 1988. Baileychlore, the Zn end member of the trioctahedral chlorite series. *American Mineralogist* 73, 135–139.
- Ruotsalainen H.E., Hietala, S., Poutanen, M., Moilanen, J. ja Pesonen, L.J. 2006a. Gravity survey of the Keurusselkä meteorite impact structure. Proc of the 27th Nordic Geological winter meeting, Geological Society of Finland.
- Ruotsalainen, H.E., Hietala, S., Dayioglu, S., Moilanen, J., Pesonen, L.J. ja Poutanen, M. 2006b. Keurusselkä impact structure – preliminary geophysical investigations. *Lithosphere 2006 Symposium*, November 9–10, 2006, Espoo, 163–167.
- Sagy, A., Reches, Z. ja Roman, I. 2001. Dynamic fracturing: field and experimental observations. *Journal of Structural Geology* 23, 1223–1239.
- Sagy, A., Reches, Z. ja Fineberg, J. 2002. Dynamic fracture by large extraterrestrial impacts as the origin of shatter cones. *Nature* 418, 310–313.
- Sagy, A., Fineberg, J. ja Reches, Z. 2004. Shatter cones: branched, rapid features formed by shock impact. *Journal of Geophysical Research* 109, no. B10, 20 s.
- Schmieder, M., Jourdan, F., Hietala, S., Moilanen, J., Öhman, T. ja Buchner, E. 2009. A High-Precision Late Mesoproterozoic $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age for the Keurusselkä Impact Structure (Finland). 40th Lunar and Planetary Science Conference, 1028.pdf
- Shimamoto, T. 1989. The origin of S-C mylonites and a new fault-zone model. *Journal of Structural Geology* 11, 51–64.
- Sjöblom, B. 1990. Mäntän kartta-alueen kallioperä. Summary: Pre-Quaternary rocks of the Mäntä map-sheet area. 1 : 100 000. *Geologian tutkimuskeskus, Espoo*, 64 s.
- Thompson, L.M., Spray, J.G. ja Kelley, S.P. 1998. Laser probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of pseudotachylite from the Sudbury Structure: evidence for post-impact thermal overprinting in the North Range. *Meteoritics & Planetary Science* 33 (6), 1259–1269.
- Tripp, G.I. ja Vearncombe, J.R. 2004. Fault / fracture density and mineralization: a contouring method for targeting in gold exploration. *Journal of Structural Geology* 26 (6–7), 1087–1108.

