

jälkiä impaktista vai tavanomaisesta deformaatiosta



KARI A. KINNUNEN JA SATU HIETALA

Kiitämme Teemu Öhmania ja kumppaneita kritiikistä (Öhman 2009, Öhman ym. 2009) Keuruselän pirstekartioista Geologi-lehdessä 3/2009 kirjoittamaamme uudelleenarviointiin. Totta on, että tietämyksemme impaktitutkimuksen geofysikaalisista mallinnuksista oli pinnallista.

Vastineesta meille puolestaan heräsi kysymys siitä, onko impaktitutkijoilla riittävää tuntemusta tavanomaisista endogeenisistä rakenteista. Nehän olisi kyettävä ensin tunnistamaan, jotta voitaisiin esittää poikkeuksellisia impaktiselityksiä. Suomen ja Ruotsin peruskallion post-Svekofenniset hauraat rakenteet ovat vasta viime aikoina alkaneet kiinnostaa geologeja. Tämä ilmenee tutkimuksissa rikkonaisuusvyöhykkeiden uudelleenaktivoitumisesta ja siihen liittyvästä rakoilusta (Mänttari ym. 2007, Sandström ja Tullborg 2009, Preenen ym. 2009). Suomenkin impaktirakenteiksi tulkitut rakenteet ovat löytyneet kivistä, jotka ovat enemmän tai vähemmän kataklasiitteja ja tektonisesti breksioituneita ja rapautuneita. Lisäksi tällaiset kraatterimaiset rakenteet sijoituvat lähes aina (Lappajärveä lukuun ottamat-

ta) kuoren mittakaavassa merkittävien deformaatiovyöhykkeiden läheisyyteen kuten koko maan kallioperäkartoilta havaitsee (Kuva 1).

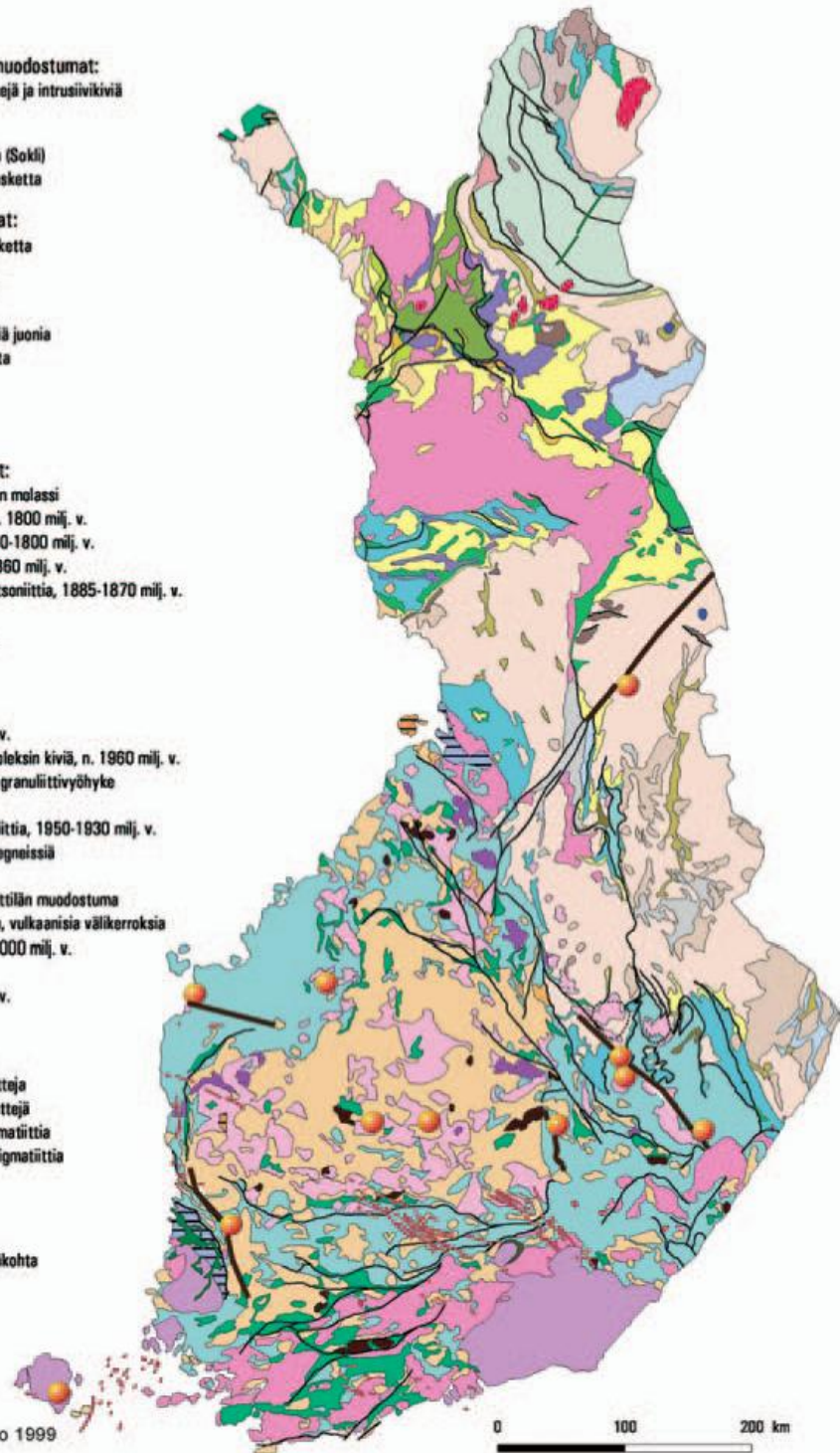
On myös huomattava, että törmäyskraatterien tieteelliselle hyväksymiselle ei ole kansainvälistä komiteaa kuten on ollut uusille meteoriiteille ja mineraaleille jo vuosikymmeniä. Käytännössä julkisella kirjallisella keskustelulla on jouduttu punnitsemaan esitettyjä impaktitulintoja. Ongelmana on ollut väitelyn lukkiutuminen, koska monet piirteet ovat samanlaisia endogeenisissä prosesseissa ja törmäyskraattereissa.

Asialla on vielä eettinen puolensa. Suomen Akatemia rahoittaa Keuruselän impaktimaliin nojaavaa geofysikaalista tutkimusta, mutta kohteen geologiaa ja mineralogaa on tutkittu jo vuosia ilmaistyönä (SH) ja oman toimen ohella (KAK). Alueen laajamittainen kallioperäkartoitus, koostuen lähes kahdestasadasta paikannetusta ja tutkitusta paljastumasta oli tehty jo ennen rahoituksen myöntämistä (SH & J. Moilanen). Lisäksi aiheesta oli kirjoitettu ja julkaistu abstrakteja mm. Houstonissa järjestettävässä vuotuisessa Lunar and Planetary Science-konferenssissa (Hietala ja Moilanen 2004a, Hietala ja Moilanen 2004b, Hietala ja Moilanen 2007).

Suomen kallioperä

1 : 5 000 000

- Kaledoniidien vuorijonoon kuuluvat muodostumat:**
- 1 Eri alkuperää olevia liuskeita, gneissejä ja intrusiivikiviä
- Paleotsooiset muodostumat:**
- 2 Alkalikiveä (liivaara) ja karbonaattisia (Sokli)
 - 3 Kambriakauden hiekkakiveä ja saviliusketta
- Myöhäisproterotsooiset muodostumat:**
- 4 Vendikauden hiekkakiveä ja saviliusketta
- Keskiproterotsooiset muodostumat:**
- 5 Doleriittijuonia, Pohjois-Suomi
 - 6 Jotunisia doleriittisiä kerrosmyötäisiä juonia
 - 7 Jotunista hiekkakiveä ja saviliusketta
 - 8 Rapakiveä
 - 9 Gabro-anortosiittia
 - 10 Alajotunisia doleriittijuoniparvia
- Varhaisproterotsooiset muodostumat:**
- 11 Kvartsittia ja konglomeraattia, Lapin molassi
 - 12 Postorogeenisia graniittisia kiviä, n. 1800 milj. v.
 - 13 Myöhäisorogeenisia graniitteja, 1850-1800 milj. v.
 - 14 Graniittia ja granodioriittia, 1880-1860 milj. v.
 - 15 Pyrokseenipitoista graniittia ja montsoniittia, 1885-1870 milj. v.
 - 16 Granodioriittia, 1890 milj. v.
 - 17 Gabro-dioriittia, 1890-1870 milj. v.
 - 18 Tonalittia, 1920-1910 milj. v.
 - 19 Killeliusketta ja migmatiittia
 - 20 Killeliusketta
 - 21 Metavulkaniitteja, 1920-1880 milj. v.
 - 22 Serpentiinitä ja muita ofioliittikompleksin kiviä, n. 1960 milj. v.
 - 23 Granaattigneissisiä ja diorittia; Lapin granulittivyöhyke
 - 24 Anortosiittia
 - 25 Suuntautunutta gabroa ja granodioriittia, 1950-1930 milj. v.
 - 26 Gneissimäistä graniittia ja sarvivälkegneissisiä
 - 27 Kvartsittia ja konglomeraattia
 - 28 Metavulkaniittia ja killeliusketta, Kittilän muodostuma
 - 29 Kalkkisiikaattikiveä, mustaliusketta, vulkaanisia välikerroksia
 - 30 Kvartsittia välikerroksin, n. 2300-2000 milj. v.
 - 31 Kerrosintrusioita, 2440 milj. v.
 - 32 Metavulkaniitteja, 2500-2000 milj. v.
- Arkeoiset muodostumat:**
- 33 Myöhäisarkeoisia graniittisia kiviä
 - 34 Vihreäkiviassosiaation metavulkaniitteja
 - 35 Vihreäkiviassosiaation metasedimenttejä
 - 36 Biotiitti ± sarvivälkegneissisiä ja migmatiittia
 - 37 Tonalitti-trondhjemittigneissisiä ja migmatiittia
- Siirroksia ja ylityöntövyöhykkeitä
- Kimberliittialueita
- Impaktiilavaa tai meteoritin isemäkohta



© Geologian tutkimuskeskus, Espoo 1999

Kuva 1. Useat Suomen 11 törmäyskraattereiksi tulkituista rakenteista (pallot) sijaitsevat päädeformaatiovyöhykkeiden (mustat viivat) vieressä. Näistä Paasselkä ja Suvasvesi N ja S samalla vyöhykkeellä. Kuvaa muokattu, GTKn kallioperäkartta pohjana.

Figure 1. Many of the 11 structures (orange spheres) interpreted as impact craters in Finland are located along principal deformation zones (black lines). Paasselkä and Suvasvesi N and S structures are positioned along the same deformation zone. Modified after GTK geological map.

Taulukko 1. Shokkipiirteiden luettelo Suomen törmäysrakenteista. Tiedot koottu 57 julkaisusta ja opinnäytteestä Frenchin ja Koeberlin (2010) esittämien kriteerien mukaan. Koonnut Satu Hietala.

Table 1. List of shock indicators and features from Finnish impact structures. Based on 57 publications and theses works according the criteria of French and Koeberl (2010). Compiled by Satu Hietala.

Diagnostiset piirteet - Diagnostic features												
Meteoriittifragmentit - Meteorite fragments												
Kemialliset ja isotooppien antamat viitteet projektiilista <i>Chemical and isotopic projectile signatures</i>	x	x								x		
Pirstekartiot - Shatter cones				x	x	x				x		x ^b
Korkean paineen (diaplektiset) mineraalilasit <i>High-pressure (diaplectic) mineral glasses</i>	x	x							x	x		
Mineraalien korkean paineen polymorfiset muodot <i>High-pressure mineral phases</i>	x											
Korkean lämpötilan kvartsilasi (lechatelieriiitti) ja sula <i>High-temperature glasses and melts</i>												
Tasomurtumat kvartsissa <i>Planar fractures (PFs) in quartz</i>												
Shokkilamellit kvartsissa <i>Planar deformation features (PDFs) in quartz</i>	x	x	x ^a	x	x	x	x	x	x	x	x ^a	x
Ei-diagnostisia piirteitä - Non-diagnostic features												
Pyöreä muoto - Circular morphology	x		x			x			x	x		
Rengasmaiset deformaatorakenteet <i>Circular structural deformation</i>												
Pyöreät geofysikaaliset anomaliat <i>Circular geophysical anomalies</i>	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x
Kivilajien rikkoutuneisuus ja breksioituminen <i>Fracturing and brecciation</i>				x	x	x			x	x		
Kiilteiden sykkyräpoimut - Kink banding in micas	x		x		x	x	x	x	x	x		
Kiteiden mosaiikkimainen rakenne <i>Mosaicism in crystals</i>	x					x				x		
Pseudotakyliti ja pseudotakylittinen breksia <i>Pseudotachylite and pseudotachylitic breccias</i>			x	x								x
Tietyt magmakivilajit ja lasit - Igneous rocks and glasses	x	x							x	x	x	
Sferulit ja mikrosferulit - Spherules and microspherules										x		
Muut problemaattiset kriteerit kuten fullereenit, rauta-rikkaat nanopartikkelit ja mikrofossiilien ruhjoutuminen <i>Other problematic criteria, e.g., fullerenes, iron-rich nanophase particles and damage in microfossils</i>												
^a PDF-rakenteita ei ole mitattu. ^a PDFs not measured.												
^b Keurusselän pirstekartiomaisista rakenteista on esitetty tektoninen selvitys (Kinnunen ja Hietala 2009)												
^b Shatter cones in Keurusselkä have been interpreted as endogenic (Kinnunen and Hietala 2009)												

Uudet ohjeet kraatterien tunnistamiseen

Törmäysrakenteiden tunnistamiseen suositeltavista kriteereistä on vastikään julkaistu yksityiskohtainen ohjeistus (French ja Koeberl 2010). Satu Hietala on laatimassa Helsingin yliopiston Geotieteiden ja maantieteen laitokselle opinnäytettä Suomen yhdestätoista törmäysrakenteeksi tulkitusta kohteesta tämän ohjeistuksen mukaan. Hietalan selvitys tulee perustumaan noin 57 aiheesta julkaistuun tutkimukseen ja opinnäytteeseen, joissa esitetyistä havainnoista hän on laatinut tähän alustavan yhteenvedon (Taulukko 1).

Taulukosta 1 puuttuvat merkinnät kvartsin tasomurtumien (PF) kohdalta, koska niitä ei ole tutkittu ja raportoitu siten, että niitä voitaisiin luotettavasti pitää diagnostisina kriteereinä. Lisäksi useimmat törmäyskraattereiden shokkipiirteistä on Suomessa raportoitu riittämättömästi kaavamaisesti vain mikroskooppivalokuvia käyttäen. Artikkeleista ei useinkaan ilmene mitä varsinaisia tutkimusmenetelmiä kunkin piirteen tunnistamiseen on käytetty. Tutkimukset kuitenkin vaatisivat Frenchin ja Koeberlin (2010) mielestä monipuolista laboratoriotason laitteistojen ja menetelmien hyödyntämistä kuten mineraalien ja lasien taitekertoimien määrittämiä, U-pöytämittauksia, kemiallisia kokokivianalyyssejä, elektronimikroanalyysointia (EMP), pyyhkäisyelektronimikroskooppia (SEM), transmisioelektronimikroskooppia (TEM), röntgen-diffraktiota (XRD), infrapunaspektroskopiaa (IR) ja Raman-spektroskopiaa optisen petrografian (ja mikroskooppivalokuvien) lisäksi.

Hietalan aineistosta havaitsee, että impaktitodisteita, kuten Frenchin ja Koeberlin (2010) vaatimia meteoriitin kemiallisia tai isotooppijäämiä ja yksikäsitteisiä mineralogisia shokkimuutoksia, on Suomen törmäyskraattereiksi eritellyissä rakenteissa vähän, paitsi

Lappajärven tapauksessa. Lisäksi, kuten tässä artikkelissa on todettu, joihinkin diagnostisiin kriteereihin liittyy väärintulkinnan riski silloin kun ne tutkitaan pelkästään silmämääräisesti eikä käytetä suositusten mukaisia tutkimusmenetelmiä. French ja Koeberl (2010) painottavat R.A.F. Grieven ja M. Pilkingtonin julkaisujen pohjalta, että geofysikaaliset tutkimukset, seisminen, painovoima ja magneettinen, eivät yksin tarjoa riittäviä todisteita shokkimetamorfoosista ja impaktista. Keurusselällä näistä mikään ei siis takuuvarmasti tue impaktimallia.

Kvartsin shokkilamellien tunnistamisesta

Suomen kaikista törmäyskraattereista on esitetty kvartsin PDF-tasojen eli shokkilamelleja impaktin todisteena (Taulukko 1). Havaintoihin sisältyy monia epävarmuustekijöitä, kuten usein tilastollisesti riittämätön mittaussaineisto, joten niitä ei voi kiistattomasti pitää Frenchin ja Koeberlin (2010) edellyttäminä shokin indikoijina.

Nuorissa kraattereissa shokkia ilmentävät lamellirakenteet ovat ohuita lasitäytteisiä taksoryhmiä ja yleisimmin kvartsin asemataso- ja romboedrisuunnissa. Vanhoissa törmäysrakenteissa lamellien lasi sitä vastoin on kiteytynyt ja tason kohdassa voi olla sekundaaristen fluidisulkeumien sijaintipintoja. Sekundareiksi fluidisulkeumapinnoiksi muuttuneiden vanhojen shokkilamellien tunnistaminen onkin todella haastava tehtävä. Ne voivat olla aivan samannäköisiä kuin tavanomaisen metamorfoosin synnyttämät fluidisulkeumapinnat tai duktiilissa deformaatioissa kvartsiin suotautumalla muotoutuneet sulkeumapiirteet. Impaktitutkijat kutsuvat niitä termeillä *decorated* (engl.) tai *helminauhat* (suom.), sillä sekundaarinen fluidisulkeumien sijaintipinta on ohuthieen poikkileikkauksessa kuin pienten



Paltamon Kivesvaaran liuskekilouhoksessa havaitsee myös melko selväpiirteisiä pirstekartiomaisia rakenteita, vaikka törmäysrakenteita ei lähistöltä ole kuvattukaan. Kuvat: Satu Hietala.

Shatter cone -like structures can be observed in Kivesvaara schist quarry in Paltamo, northern Finland without any known connection to impact structures. Photos: Satu Hietala.

tummien pilkkujen täplittämä jono eli kuin helminauha.

Kvartsin PDF-tasojen U-pöytämittauksiinkin sisältyy käytännön ongelmia, jotka huomaa vasta mittauksia tehdessä. Yhden yksittäisen shokkilamellitason kristallografista suuntaa ei ole mahdollista mitata U-pöydällä TEM:stä poiketen niin tarkasti, että sen pystyisi tieteellisellä varmuudella indeksoimaan. Tämä johtuu siitä, että U-pöydällä mittauksen tarkkuus on käytännössä 5–10 astetta suuntaan tai toiseen. Tämän takia shokkia mahdollisesti ilmentävien lamellien kristallografiset suunnat päätellään histogrammin huippujen sijainnista. Tilastollisesti merkittävän tuloksen saamiseksi tasoja olisi mitattava huomattavan runsaasti (50–100 kpl) ja indeksoimattomat suunnat olisi myös ilmoitettava. Samat asiat pätevät myös alhaisemmassa shokkivaikutuksessa syntyneiden kvartsin PF-tasojen mittaukseen.

Aivan kuten pirstekartioiden tunnistamisessa niin myös kvartsin shokkiperäisten deformaatorakenteiden (PDF ja PF) osalta on tärkeää osata erottaa samannäköiset endogeeniset rakenteet. Mikroskopioijan olisi hallitta-

va fluidisulkeumapetrografiaa eli tunnettava kvartsin metamorfisten sekundaarien fluidisulkeumien sijaintipintojen muodot ja esiintymistavat.

Suomen metamorfisten kivilajien kvartsin sekundaaristen fluidisulkeumien sijaintitasojen tuntomerkkejä on kuvattu jo vuosia fluidisulkeumatutkimuksissa (esim. Kinnunen 1981, 1989, ja Matti Poutiaisen työryhmien lukuisat tutkimukset). Fluidisulkeumaonteloiden täytteen tunnistaminen on samalla yksi keino erottaa alun perin lasimaiset PDF-tasot endogeenisista sulkeumista. Oletettuja shokkilamelleja pitäisi myös etsiä laimennetulla HF:llä, koska tällöin fluidisulkeumiin yleisesti liittyvät tunnusomaiset dislokaatorakenteet saadaan SEM:illä havaittaviksi (ks. Gratz ym. 1996).

Tammikuussa 2010 Osllossa pidetyssä kokouksessa (Nordic Geological Winter Meeting) Keurusselän geofysikaalisista tutkimuksista kertovassa posterissa on esitetty valokuva pirstekartiokiven kvartsin shokkilamelleista. Ikävä kyllä posterin kuvatekstissä eikä itse abstraktissa (Raiskila ym. 2010) ei kuitenkaan ole mainintaa siitä onko löydös peräisin lohkares-



Keurusselän pirstekartiorakenteet ovat tavallisimmin varsin epämääräisiä, toisiaan leikkaavia viirukkeisia pintoja. Kuvat: Satu Hietala ja Kari A. Kinnunen.

Typical shatter cones in Keurusselkä structure are striated surfaces crossing each other. Photos: Satu Hietala and Kari A. Kinnunen.



ta vai kalliosta sekä tärkeimpänä, onko oletettujen PDF- (tai mahdollisesti PF-) tasojen suuntia ja etäisyyksiä mitattu. Kuvan kvartsi-rakeen nk. decorated, helminauhamaiset PDF-tasot näyttäisivätkin olevan endogeenisen metamorfoosin loppuvaiheisiin liittyvän deformaation tuottamia sekundaaristen fluidisulkeumien sijaintipintoja eli Frenchin ja Koeberlin (2010) luokittelun endogeenisia MDL-tasoja.

Vastikään on Kanadassa tutkittu ulkomaisin voimin Lauri Pesosen ottamista Keurusselän pirstekartionäytteistä kvartsin sekundaareja fluidisulkeumatasoja, jotka sijaitsevat kvartsin asema- ja romboedrisuunnissa (Ferrière ym. 2010). Kirjoittajat tulkitsevat nämä piirteet PDF ja PF tyyppin shokkilamelleiksi ja -raoiksi, jotka heidän mukaansa osoittavat pirstekartioiden kokeneen 2–20 GPa shokkipaineen. Tutkimukseen on käytetty U-pöytää fluidisulkeumien sijaintipintojen suunnan määrittämiseen, mutta fluidisulkeumien täytettä ei ole selvitetty. Kirjoittajat mainitsevat, että tasojen fluidisulkeumilla on joskus negatiivisen kiteen muoto ja usein täytteenä kaksi faasia (neste ja höyryfaasi).

Mekin olemme havainneet tällaisia sulkeumia Keurusselän ohuthieiden kvartseissa, mutta olemme pitäneet niitä kaasutyyppin metamorfisina sekundaareina fluidisulkeumina. Eräissä kvartsirakeissa tasopinnat jatkuvat samassa suunnassa vierekkäisten kvartsirakeiden läpi, ja tämän katsoimme osoittavan endogeenisesta alkuperää. Muutamassa testatussa sulkeumaonkalossa havaitsimme täytteenä hiilidioksidia, ja tämäkin vaikuttaisi olevan ristiiridassa impaktimallin kanssa. Fluidisulkeumatutkimuksen uranuurtaja Edwin Roedder (1984, s. 377–378) kiinnitti samaan dilemmaan huomiota Etelä-Afrikan Vredefortin törmäysrakenteen kohdalla, sillä kvartsin tasomaisissa fluidisulkeumistoissa on siellä täytteenä metamorfista, tiheää hiilidioksidia.

Mineraalilasien tunnistamisesta

Suomesta on raportoitu ainakin Lappajärveltä, Sääksjärveltä, Paasselältä sekä Suvasveden eteläosasta maskelyniittia eli diaplektista plagioklaasilasia (Taulukko 1). Maskelyniitti löydettiin alun perin meteoriiteista ja sitä on nyttemmin tavattu myös impaktikraattereiden shokkautuneissa kivissä.

Maskelyniitti syntyy shokkiaallon “eturintamassa” suoraan shokkiaallosta eikä näin ollen käy läpi normaalia sulamisprosessia korkeassa lämpötilassa. Diaplektinen kvartsi ja diaplektinen maasälpä ovat samaan tapaan diagnostisia kriteereitä shokkimetamorfoosille kuin PDF:t tai pirstekartiot. Niiden tunnistaminen saattaa kuitenkin olla hyvin problemaattista geologisesti vanhoista törmäysrakenteista, joissa mahdolliset alun perin lasimaiset faasit ovat kiteytyneet mikrokiteiseksi massaksi. Suomen törmäysrakenteista mineraalilaseja on raportoitu enimmäkseen vain mikroskooppikuvina, joissa erottuu hienorakeisia, alun perin lasimaiseksi tulkittuja läikkiä. Tunnistaminen kuitenkin vaatisi kohteen muodon osoittamista pseudomorfiksi kvartsin tai maasälvän suhteen, kemiallista analytiikkaa mikroanalysaattorilla ja Ramanillakin, sekä U-pöytämittauksia ja XRD-ajoja. Näiden tutkimusten puuttuessa Suomessa maskelyniittia ei ole luotettavasti tutkittu kuin Lappajärveltä tai ainakaan sitä ei ole riittävällä tarkkuudella raportoitu. Virhelähteenä näyttäisi olevan maskelyniitin sekoittaminen läikikkäiden ruhjekivien muuttumistuloksiin ja saostumiin.

Mikrotektoniikan tulkitsemisesta

Rakomineraalien tutkimus on tektoniikassa uudehko menetelmäkokonaisuus. Tätä meidän olisi kloriitin yhteydessä pitänyt lähem-

min selostaa – kuten Öhman ym. (2009) huomauttavat. Radiogeenisten isotooppien avulla saatuja ikämääriä kytetään nykyään SEM EDS:llä ja XRD:llä tehtäviin mineraalitunnistuksiin, jolloin rakojen iästä ja syntyolosuhteista saadaan uudenlaista tietoa. Tällaisia rakomineraalitutkimuksia on tehty suunniteltujen ydinjätehautojen ympäristöstä Ruotsissa ja Suomessa. Niiden perusteella tiedetään, että Baltian kilvellä on tapahtunut rakojen uudelleenaktivoitumista useassa vaiheessa maankuoren jo stabiloiduttua svekofennisen orogeenian jälkeen. Uusimmat K-Ar ja Ar-Ar ikämääritykset rakomineraaleista Suomesta (Olkiluoto) ja Ruotsista (Forsmark, Oskarshamn) osoittavat tätä (Mänttari ym. 2007, Sandström ja Tullborg 2009, Sandström ym. 2009 a ja b).

Reaktivaatio, jossa kiteytyi kloriittia ja punaista maasälpää eli adulaaria (Keurusselällä adulaari ilmeni XRD:ssä ortoklaasina), voi liittyä mainittujen rakotutkimusten perusteella laattatektonisiin megatapahtumiin, kuten svekofennisen orogeenian loppuvaiheisiin (1,8–1,7 Ga), svekonorjalaisen orogeenian alkuun ja Rodinia-supermantereen muotoutumiseen (1,1 Ga). Svekonorjalaisten liikuntojen alkaminen on myös samaa luokkaa Keurusselän pseudotakyliteistä saatujen ^{40}Ar - ^{39}Ar ikien kanssa (1,14–1,15 Ga), jos niiden oletetaan edustavan kitkasulan kiteytymistä ja jos saatu ^{40}Ar - ^{39}Ar ikä on mahdollisista virhelähteistä riippumatta oikeansuuntainen (vrt. Kinnunen ja Hietala 2009).

Mielestämme Keurusselän duktiileja hiertopintoja (pirstekartioita) leikkaava pseudotakylittijuoni (ikä 1,1 Ga, Schmieder ym. 2009) on esitetyn kritiikin jälkeenkin sopusoinnussa endogeenisen tulkinnan kanssa mutta ei impaktimallin. On nimittäin hyvin vaikea ymmärtää miten noin yhdessä tunnissa (ks. French ja Koeberl 2010) muotoutuneessa impaktikraatterissa voisivat hiertymät muovau-

tua uudelleen kiteytymällä (petrografia!) ja vieläpä edeltää samassa tapahtumassa syntyneitä hauraan vaiheen kitkasulaa. Endogeenisessä tulkinnassa hiertopinnat sitä vastoin voisivat olla arviolta 1,8–1,7 Ga ja kitkasula (1,1 Ga, ^{40}Ar - ^{39}Ar) ikäisiä. Niillä olisi silloin geologistikin tarkastellen hyvin suuri ikäero. Asia voitaneen tulevaisuudessa ratkaista zirkonien ja muiden mineraalien radiogeenisten isotooppien avulla jos kysymys todella halutaan lopullisesti selvittää. Lisäksi olisi syytä ainakin kokeilla MC-ICP-MS-laitteistolla shokkautuneeksi oletetun pirstekartiokiven yksittäisten zirkonien isotooppitutkimuksia.

Rakopintojen siirtymä/paksuus tarkastelumme (W/D diagrammi, kuva 7, Kinnunen ja Hietala 2009) perustuu rakenteiden fraktaalisuuteen. Sama rakenne siis toistuu lähes samankaltaisena eri mittakaavoissa (senttimetreistä jopa kilometreihin). Tämän takia kyseisellä diagrammilla katsotaan voitavan tehdä päätelmiä suurrakennetektoniikasta mikromittakaavan perusteella – ja vastaavasti toisinpäin. Keurusselältä mittauksia oli 14 kpl ja kuvassa neliö osoitti niiden yhteistä sijoittumista (tavallaan hajontakuvio). Kyseessä ei siis ollut yksi ainoa havaintopiste kuten Öhman (2009) oletti. Julkaisujen valokuvista mitattiin myös Kanadan Sudburyn ja Etelä-Afrikan Vredefortin törmäysrakenteiden pirstekartiopintojen W/D arvoja. Mittauksia kertyi vain neljä. Arvot erosivat selvästi Keurusselästä, sijoittuen plastiiseen kenttään. Vaatimattoman lukumäärän takia niitä ei merkitty julkaistuun diagrammiin.

Johtopäätöksiä

Olemme siis edelleen sitä mieltä, että Keurusselän rakenteita selittävät riittävästi maankuoren tavanomaiset endogeeniset tapahtumat (katso kuvia s. 34 ja 35). Pirstekartiomaiset piirteet ovat mielestämme hauraassa vaiheessa

reaktivoituneita duktiileja hiertopintoja. Tämän tulkinnanhan myös Öhman ym. (2009) näyttivät hyväksyvän. Hiertopinnat olisivat ilmeisimmin muodostuneet kuoren tavanomaisessa deformaatioissa svekofennisen orogeenin loppuvaiheessa ja ne olisivat reaktivoituneet mahdollisesti svekonorjalaisen orogeenin etävaikutuksesta kratonin sisäosiin kun Rodinia-supermanner muotoutui. Näin siinä tapauksessa, että pseudotakyliitista tehdyt ^{40}Ar - ^{39}Ar ikämääritykset (Schmieder ym. 2009) todella kuvastavat oletetun kivisulan ikää (ks. Kinnunen ja Hietala 2009). Pirstekartiomaisten rakenteiden synty olisi siten ollut hidas ja monivaiheinen tapahtuma, eikä se kuvastaisi hetkellistä, noin yhden tunnin aikana, kallioperää muokannutta jäätikkatastrofia.

Summary

Keurusselkä structures in Central Finland: traces of impact or endogenic features

Ductile slickensides in the Keurusselkä area were reactivated during a later brittle stage, and this produced shatter cone -like surfaces. The cause of this deformation is controversial: impact (Öhman 2009, Öhman et al. 2009) or endogenic (Kinnunen and Hietala 2009). Critical analysis is needed, because no international committee exists for the confirmation of proposed impact craters. The Keurusselkä area is an intersection between highly tectonized deformation zones characterized by shearing, hydrothermal alteration, fracturing and brecciation. These features do not require an impact for explanation. Critical review on impact indicators from the eleven Finnish impact structures including the Keurusselkä structure is in preparation (SH). The preliminary results (Table 1) show that diagnostic fea-

tures for impacts are nearly all present at Lappajärvi but are sporadic in other Finnish crater-like structures. Shatter cones, PDFs/PFs and diaplectic mineral glasses have been reported almost routinely, but many of them should be reexamined using more sophisticated mineralogical methods as proposed in French and Koeberl (2010).

KARI A. KINNUNEN

kari.kinnunen@gtk.fi

SATU HIETALA

satu.hietala@helsinki.fi

Kirjallisuus

- Ferrière, L., Raiskila, S., Osinski, G.R., Pesonen, L.J. ja Lehtinen, M. 2010. The Keurusselkä structure (Finland) – impact origin confirmed by universal stage characterization of planar deformation features in quartz grains. 41st Lunar and Planetary Science Conference (2010), 1072.pdf.
- French, B.M. ja Koeberl, C. 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews* 98:123–170.
- Gratz, A.J., Fislser, D.K. ja Bohor, B.F. 1996. Distinguishing shocked from tectonically deformed quartz by the use of the SEM and chemical etching. *Earth and Planetary Science Letters* 142:513–521.
- 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).
- Kinnunen, K.A. 1981. Outokumpu-tyyppisten malmi-puhkeamien ja lohcareiden vertailu fluidisulkeumisto- jen avulla. Summary: Comparison of fluid inclusion assemblages of Outokumpu-type ore outcrops and boulders in eastern Finland. *Geologinen tutkimuslaitos, Tutkimusraportti n:o 51*, 40 s.
- Kinnunen, K.A. 1989. Determination of total contents of fluid inclusions in quartz using modal analysis: Examples from Proterozoic rocks and ore deposits

- in Finland. Bulletin of the Geological Society of Finland 61:197–208.
- Kinnunen, K.A. ja Hietala, S. 2009. Keuruselän pirstekartioiden tarkastelua. Summary: On shatter cones in Keuruselkä area, central Finland. Geologi 61:68–85.
- Mänttari, I., Mattila, J., Zwingmann, H. ja Todd, A.J. 2007. Illite K-Ar dating of fault breccia samples from ONKALO underground research facility, Olkiluoto, Eurajoki, SW Finland. Tiivistelmä: Eurajoen Olkiluodon ONKALON siirrosbrecciasavien illiittien K-Ar iät. Posiva. Working report 2007-67. Olkiluoto: Posiva. 40 s.
- Preeden, U., Mertanen, S., Elminen, T. ja Plado, J. 2009. Secondary magnetization in shear and fault zones in southern Finland. Tectonophysics 479:203–213.
- Raiskila, S., Leväniemi, H., Ruotsalainen, H., Salminen, J. ja Pesonen, L.J. 2010. The Keuruselkä impact structure, central Finland – Geophysical observations to support the impact origin. NGF Abstracts and Proceedings, no. 1, 2010:151–152. And Poster, Session on Impact Craters EG6-01P.
- Roedder, E. 1984. Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy, vol. 12. Mineralogical Society of America, 644 s.
- Sandström, B., Tullborg, E.-L., Larson, S.Å. ja Page, L. 2009a. Brittle tectonothermal evolution in the Forsmark area, central Fennoscandian Shield, recorded by paragenesis, orientation and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of fracture minerals. Tectonophysics 478:158–174.
- Sandström, B., Drake, H. ja Tullborg, E.-L. 2009b. Mineral i sprickor. Geologiskt Forum nr 63 / 2009:17–19.
- Sandström, B. ja Tullborg, E.-L. 2009. Episodic fluid migration in the Fennoscandian Shield recorded by stable isotopes, rare earth elements and fluid inclusions in fracture minerals at Forsmark, Sweden. Chemical Geology 266:135–151.
- Schmieder, M., Jourdan, F., Hietala, S., Moilanen, J., Öhman, T. ja Bucher, E. 2009. A high-precision Late Mesoproterozoic $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age for the Keuruselkä impact structure (Finland). 40th Lunar and Planetary Science Conference, 1028.pdf.
- Öhman, T. 2009. Pirstekartiosta Keuruselällä ja maailmalla. Summary (Öhman, T., Schmieder, M., Jourdan, F., Buchner, E. ja Raiskila, S.): Shatter cones in Keuruselkä impact structure, Finland. Geologi 61:190–197.
- Öhman, T., Schmieder, M., Jourdan, F., Buchner, E. ja Raiskila, S. 2009. Summary: Shatter cones in Keuruselkä impact structure, Finland. Geologi 61:195–197.

SUOMEN GEOLOGINEN SEURA

M. LEHTINEN (1992)

Kuukausikokous 1.10.1992,
Oulu, kirjastotalo



*Näky kraatteri kuvista kaukaa,
paikka oliko Sulva vai Laukaa?
Niitä montakin maassamme lie?*

*Siell' on maastossa mahtava monttu,
liekö tutkija viisas vai tonttu,
onko oikea tutkinnan tie?*

*Onko kraatteri terve vai sairas?
Kivitohtori lävitse kairas',
sydäntietoa reiästä saa.*

*Montun täytteenä breksiat, laava,
onko oikea tutkinnan kaava,
liekö taustalla taivas vai maa?*

*Mikroskoopinkin apuun hän luotti,
shokkilamellit esille tuotti,
polymorfeista selon hän sai.*

*Analyyseja laittein herkin,
teki kemisti, löytäen merkin,
joka varmisti asian kai.*

*Seuraa esitys Pesosen Laran,
myös on kuvia Lehtisen Maran,
Siis, olkaa hyvä ja kuunnelkaa,
avatkaa silmät ja katselkaa!*

Helsingin yliopiston geologian
laitoksen Alumnijuhla 30.1.2009