



Pirstekartioista Keurusselällä ja maailmalla

TEEMU ÖHMAN

Oli erittäin ilahduttavaa huomata, että jo Marmon (1963, s. 16) mitä ilmeisimmin kuvaamia, joskaan ei törmäyssyntyisiksi tulkitsemia Keurusselän pirstekartioita on intouduttu tutkimaan mineralogisesta näkökulmasta (Kinnunen ja Hietala 2009, jatkossa KH09). Myös mielipiteiden nopea vaihtuminen (KH09 vs. esimerkiksi Hietala ja Moilanen 2004, 2007, Pesonen *et al.* 2005, Ruotsalainen *et al.* 2006 ja vielä Schmieder *et al.* 2009) on virkistävä poikkeus usein hyvin jääräpäisessä geotieteellisessä tutkimuksessa. Kuten KH09 toteavatkin, ei pirstekartioiden mineralogiaan ole maailmallakaan järin paljon huomiota kiinnitetty, ja pirstekartioiden synty on useammastakin teoriasta huolimatta edelleen hämärän peitossa. KH09 esittävät kuitenkin niin huomattavasti vallitsevista käsityksistä poikkeavia näkemyksiä, että jokunen vasta-argumentti on paikallaan. Käyn seuraavassa KH09:n artikkelia lävitse suunnilleen järjestyksessä, keskeisimpiin ongelma-kohtiin niin yleisessä taustoituksessa kuin Keurusselän tapauksessakin puuttuen.

Se, että pirstekartiot ja törmäyskraatterit olisivat “geologiassa ja varsinkin geofysiikassa lähes paradigman asemassa ja usein ainut selitysmalli” (KH09) on vähintäänkin rohkea väite. Pirstekartioilla on hyvin vähän tekemistä yleensä geofysiikkaan laskettujen ilmiöiden kanssa. Suomen kraatterienetsintäohjelma on tosin ollut erittäin menestyksenkäs, ja siinä geofysikaalisten anomalioiden tulkinnalla (esim. Deutsch 1998, Pesonen *et al.* 2000) ja joskus myös pirstekartioilla on ollut mer-

kittävä vaikutus jatkotutkimusten ohjaamisessa lupaavimpiin kohteisiin. Geofysiikalla ei kuitenkaan koskaan todisteta mahdollisen kraatterin synnystä tai pirstekartioista sitä eikä tätä. Se, että törmäysmalli selittää muutoin käsittämättömiksi jäävät havainnot, joita “perinteisin” teorioiden on turhaan yritetty ymmärtää, usein vuosikymmenien ajan, on varsin vahva viite mallin oikeellisuuden puolesta, eikä suinkaan kerro siitä, etteikö muita selitysmalleja olisi yritetty näihin kohteisiin soveltaa.

KH09:n väite, että kiistattomia todisteita törmäyksistä löydettäisiin vain “geologisesti melko nuorista” kraattereista, on yksinkertaisesti väärä, ellei sitten lähdetä tieteenfilosofiseen hetteikköön pohtimaan sitä, mikä on kiistaton todiste. Pääsääntöisesti kraatteritutkijat eivät törmäyskraattereiksi edes hyväksy joitakuita poikkeuksia lukuun ottamatta muita rakenteita kuin niitä, joista mineralogisia tai geokemiallisia todisteita on löydetty. Kohdalaisen harvassa ovat törmäyskraatterit, joissa lopullinen törmäystulkinta nojaa vain pirstekartioihin. Karkeita virheitäkin sattuu, esimerkkinä vaikkapa taannoiset väitteet niin sanotusta Gilf Kebirin kraatterikentästä, mutta tässäkin tapauksessa räikeät virheet korjattiin kriittisen kraatteritutkijayhteisön toimesta nopeasti (Orti *et al.* 2008). Vanhimmat tarkasti ajoitetut Maapallolta tunnetut törmäyskraattereiden jäänteet ovat Vredefort (2023 ± 4 Ma) ja Sudbury (1850 ± 3 Ma), pienemmästä kokoluokasta hyvä esimerkki on Jänisjärvi (682 ± 4 Ma: Jourdan *et al.* 2008), eikä näistä yhdenkään törmäyssynnystä ole enää pienintäkään epäilystä. Kaikki on suhteellista - geologinen aika-

käsitys etenkin - mutta melko nuorina näitä tuskin voidaan pitää. KH09:n mainitseman Fleetin (1979) kritiikkikin Sudburyn ja pirstekartioiden törmäyssyntyä vastaan on jo aikaa sitten osoitettu pitämättömäksi (esim. Gibson ja Spray 1998, Naldrett 1999).

KH09 (s. 71) katsoivat myös tarpeelliseksi käyttää sanatarkkaa lainausta allekirjoittaneen pro gradu -tutkielmasta (Öhman 2002, s. 47) lähdettä mainitsematta, mutta sanottakoon tässä yhteydessä, että pirstekartioiden huippukulmat ovat menettäneet entisestäänkin merkitystään tunnistuskriteerinä. Nytemmin nimittäin ainakin Vredfortilta on mitattu 135°:een yltäviä huippukulmia (Wieland *et al.* 2006). Itse en pitäisi minkäänlaisena ihmeenä, mikäli pirstekartioiden ja *multiply striated joint set* (MSJS) -tyyppiset törmäyskraattereilta tavattavat pirstekartioiden liittyvät rakoryhmät (Nicolaysen ja Reimold 1999) vaihettuisivat toisikseen ilman mitään tarkkoja rajoja. Samoin kuin pirstekartioiden huippukulmat, myös Sagyn ja kumppaneiden (2002, 2004) pirstekartiopinnoilta mitaamat uurteiden ja harjanteiden "V-kulmat" lienevät merkityksettömiä, ainakin shokkipaineen indikaattoreina (Wieland *et al.* 2006).

Toisin kuin KH09 antavat ymmärtää, eivät pirstekartioiden esiintymiset kraatterien reunojen ulkopuo-

lella, silloin kun puhe on aidosta pian törmäyksen jälkeen havaittavasta kraatterista. Deutsch ja Langenhorst (1998) esittävät, että pirstekartioiden syntyä niin sanotun kaivautumiskraatterin (engl. mm. *transient cavity*) reunan ulkopuolella, mutta tämä ei ole luonnossa havaittavissa oleva rakenne, vaan ainoastaan varhainen ohimenevä kehitysvaihe kraatterin syntyprosessissa. Tietyksi luonnosta ei ole havaittu ainuttakaan varmaa pirstekartiota kraatterin reunalta, tai vallankaan sen ulkopuolelta, sillä shokkipaine on siellä liian alhainen. Esimerkiksi Karikkoselän ja Saarijärven pirstekartioiden voivat tässä mielessä herättää hämmennystä, ne kun sijaitsevat tällä hetkellä havaittavan kuopan reunoilla, mutta kun ottaa huomioon eroosion eli sen, että nykyään katselemme vain kraatterien pohjien alinta painannetta, mahtuvat pirstekartioiden hyvin tarvittavan parin GPa:n shokki-isobaarien sisään. Tämän, kieltämättä hyvin karkean approksimaation perusteella voi väittää näiden kraattereiden alkuperäisen läpimitan olleen lähempänä neljää kilometriä.

Itse en ole mineralogisesti riittävän sivistynyt ymmärtääkseni, miten pirstekartiopinnoilla esiintyvä kloriitti todistaisi pintojen synnystä yhtään mitään. Kloriittia kun tuppaa rakopinnoilla usein esiintymään. Erikoista on, että KH09 eivät lain-

kaan mainitse niiden tutkimuksien tuloksia, joissa pirstekartiopinnojen mineralogiaa on tutkittu (Gibson ja Spray 1998, Nicolaysen ja Reimold 1999, ks. myös Gay *et al.* 1978, Hargraves ja White 1996, Wieland *et al.* 2006 ja Fackelman *et al.* 2008). Gibsonin ja Sprayn (1998) ja Nicolaysenin ja Reimoldin (1999) tutkimuksissa törmäyksen jälkeen syntynyt kloriitti on osoittautunut melko yleiseksi mineraaliksi pirstekartiopinnoilla. Lisäksi Maapallolla käytännössä kaikkiin törmäyskraattereihin syntyy vähintään jonkinlainen hydrotermiini systeemi, joissa kloriittia hyvinkin usein muodostuu (esim. Naumov 2005). Sitä paitsi, jos hyväksytään Schmiederin ja kumppaneiden (2009; mukaan lukien niin



Pirstekartioiden permikautisessa hiekkakivessä Karajoen itärannalla, Karan törmäyskraatterilla Pohjois-Venäjällä. Kuva: Teemu Öhman.

Shatter cones in Permian sandstone on the east bank of Kara river, near Tohorei-yakha in Kara impact structure, Russia. Photo: Teemu Öhman.

Satu Hietala kuin joukon jatkona allekirjoittanutkin, tosin kaikesta päätellen nyttemmin keskenään varsin erilaisia näkökantoja edustaen) ilmoittaman iän 1140 ± 6 Ma edustavan Keurusselän kraatterin syntyikää, olisi suoranainen ihme jos tuosta kuluneena aikana ei olisi alueella liikkunut minikäänlaisia fluideja, joista olisi kloriittia päässyt pirstekartiiorakoihin kiteytymään.

KH09:n mainitsemat 1–5 mm:n mikroviirut eivät myöskään osoita törmäysmallin toimimattomuutta, sillä muutaman millin siirrokset ja hierrot ovat pirstekartioidelle normaaleja (Nicolaysen ja Reimold 1999, Sagy *et al.* 2004). Lisäksi Gibsonin ja Sprayn (1998) pirstekartiomallissa, jota tosin esimerkiksi Wieland *et al.* (2006) ovat kritisoineet, vähäinen edestakainen hierto kuuluu aivan keskeisenä osana pirstekartioiden syntyyn. Lugli *et al.* (2005) tiivistävät katsauksessaan, että pirstekartiopinnalla tapahtuneista liikunnoista löytyy runsain määrin todisteita. Kloriittiutuneet pinnat, joilla havaitaan vähäistä hiertymistä, eivät siis osoita törmäysmallin olevan epäkelpo selittämään Keurusselän pirstekartioita, vaan ovat päinvastoin täydessä sopusoinnussa sen kanssa.

KH09 esittävät ideansa tueksi kauniin diagrammin (KH09 kuva 7), mutta sen todistusvoima jättää melkoisesti toivomisen varaa. KH09:n mittaukset Keurusselän kivistä muodostavat käytännössä yhden pisteen diagrammilla, joka on tarkoitettu (minun tulkintani mukaan) vallan toisen ilmiön kuvaamiseen. Tilanne olisi huomattavasti mielenkiintoisempi, jos diagrammille olisi vertailukohdaksi piirretty myös muiden kraattereiden pirstekartiopintojen kloriitteja, jolloin olisi edes päästy näkemään, onko Keurusselkällä millään tavoin muista poikkeava. Nyt näin ei ole, joten Keurusselän havaintoja kuvaava pieni neliö diagrammilla ei todista mitään mihinkään suuntaan.

Todettakoon tässä vielä sekin, ettei KH09:n mainitsema 100 hiusrakoa (neliö?)metrillä suinkaan ilmennä vain tektonista ruhje- tai siirrosvyöhykettä, vaan lukema sopii oikein hyvin myös törmäyskraattereiden pohjien kiviin. Esimerkiksi Ruotsin Locknelta löytyy 1000 rakoa/m², vaikka pienimmät raot on jätetty huomiotta (Bäckström 2005).

Ruusudiagrammi (KH09 kuva 8), jota on käytetty pyrkimyksenä osoittaa pirstekartioiden yh-

teys alueen siirrosvyöhykkeisiin, jää minulle täysin käsittämättömäksi. Diagrammista on saatu kauniin symmetrinen käyttämällä esitettävänä suurena kulkua, ja samalla siis on hävitetty tieto siitä, että mitatussa horisontaalisuunnassa pirstekartioiden “osoittama” suunta kattaa 360°. Se, miksi mittausaineistolle on lisäksi pitänyt tehdä 90°:n pyöräytys, ei minulle avaudu. Yhdeksäntoista metavulkaniittimittauspisteen sijainti olisi myös ollut mukava tietää, jotta tätä uutta aineistoa olisi voinut verrata Hietalan ja Moilasan (2007, kuva 2) koko alueella mittaamiin ja yksikäsitteisesti esittämisiin kahdenkymmenen mittauksen tuloksiin. Nyt ainakaan minä en ole lainkaan varma, ovatko uudet ja vanhat tulokset keskenään ristiriidassa vai sopusoinnussa.

Yksi hämmäntävimmistä väitteistä, jonka KH09 esittävät, on Schmiederin ryhmän (2009) kuvaaman tumman, pirstekartiota leikkaavan pseudotakylitiittimäisen breksiajuonen sopimattomuus törmäysmalliin. Kuten KH09 aivan oikein toteavat, ovat pirstekartiot kraattereissa varhain syntyvä rakenne. Ne muodostuvat kraatteroitusprosessin puristumisvaiheessa, juuri sen vaihettuessa kaihautumisvaiheeksi.

Kuten edellä kävi ilmi, on pirstekartioiden syntymälle lukuisia erilaisia, mutta nykyisin ollaan kohtalaisen yksimielisiä siitä, että ne eivät synny itse shokkiaallon, vaan sitä seuraavan purkuaallon (engl. mm. *rarefaction*, *release* ja *decompression wave*, tunnetaan suomeksi hankalan kuvaamattomasti ohentuma-aaltona) vaikutuksesta tensionaalina rakoina (esim. Baratoux ja Melosh 2003, Sagy *et al.* 2004, Wieland *et al.* 2006). Aitoja pseudotakylitiittejä eli kitkasulia ja niiden kaltaisia juonibreksioita sen sijaan voi syntyä niin puristumisvaiheessa kuin myöhemmin muokkautumisvaiheeseen (mm. Reimold ja Gibson 2005). Vredfort ei parin-kolmensadan kilometrin kokonsa ja monivaiheisen kehityksensä vuoksi ole paras mahdollinen vertailukohta pienemmille törmäyskraattereille, mutta todettakoon, että pirstekartioita leikkaavia pseudotakylitiittijuonia löytyy sieltäkin, mutta leikkaussuhde voi olla toisinkin päin (Reimold ja Colliston 1994).

Ottaen huomioon Keurusselän pseudotakylitiittimäisen breksiajuonen, samoin kuin ylipäättään keskeisen pirstekartiialueen sijainnin kraatterin

oletetun entisen keskuskohouman alueella, on pirstekartion ja juonen leikkaussuhde aivan kuten sen törmäysmallissa pitäisi ollakin. Toisin sanoen keskuskohouma syntyy kraatterin muokkautumisvaiheessa, siis pirstekartioiden jälkeen, ja sen synty edellyttää voimakkaita törmäystektonisia liikuntoja. Näissä liikunnoissa syntyy pseudotakyliittimäisiä breksiajuonia aivan samoin kuin tavanomaisen endogeenisten siirrostentkin kyseessä ollen. En yksinkertaisesti ymmärrä, kuinka tämän voidaan tulkita sotivan törmäysmallia vastaan.

KH09:n tapa laskea törmäyksen synnyttämän rakoilun syvyyssulottuvuus on melkoisen suurpiirteinen. Siinä ei sinänsä ole mitään pahaa, mutta olisi ollut suotavaa mainita, että KH09:n käyttämä laskutapa antaa vain joltisenkinmoisen minimiarvion rakoilun syvyydestä. Kuten he toteavat, on törmäyssyntyisen rakoilun mainittu yltävän noin $1/3 \times$ kraatterin halkaisijan syvyydelle (French 1998). Ongelmana kuitenkin on, että Keuruselän alkuperäisestä läpimitasta on vain karkeita enemmän tai vähemmän valistuneita arvauksia. Myöskään siitä ei ole tietoa, kuinka syvää leikkausta oletetusta keskuskohoumasta nykyinen eroosiotaso edustaa. Jonkinlaisen vertailukohdan kuitenkin antaa se, että topografisen keskuskohouman tyven läpimita on noin $0,22 \times$ kraatterin halkaisija (esim. Melosh 1989), joten kuuden-seitsemän kilometrin keskuskohoumaa edustava pirstekartioalue antaisi läpimitaksi kolmisenkymmentä kilometriä. KH09:n ”vaatima” 50 kilometriäkään ei ole mahdottomuus nykyisten vähäisten tietojen perusteella.

Joka tapauksessa on selvää, että mikäli pirstekartioalue todella edustaa keskuskohoumaa, kraatterin alkuperäinen läpimita on ollut pirstekartioalueen kokoa merkittävästi suurempi. Näin ollen myös törmäyksen synnyttämä rakoilu olisi yltänyt jonnekin huomattavan paljon syvemmälle kuin KH09:n mainitsema noin 2–3 km. Syvimät näistä raoista olisivat tosin litostaattisen paineen

vuoksi todennäköisesti sulkeutuneet hyvin nopeasti syntynsä jälkeen.

En voi väittää Keuruselkää järin aktiivisesti itse tutkivani, mutta tällä hetkellä ei ainakaan minun tiedossani ole yhtään havaintoa, joka jollain luotettavalla tavalla määrittäisi Keuruselän kraatterin halkaisijan heti sen synnyn jälkeen. Ja kun jälleen otetaan huomioon, että kraatteri on erodoitunut käytännössä näkymättömiin ja nykyinen eroosiotaso lienee alkuperäisen pohjan alapuolella, ei ole mitään syytä olettaa KH09:n tapaan, että kraatteri ilmenisi tänä päivänä selväpiirteinä geofysikaalisina anomalioina. Heikkoja viitteitä törmäyksestä geofysiikassa voi toki Keuruselälläkin edelleen näkyä (Ruotsalainen *et al.* 2006, Raiskila *et al.* 2009), mutta miksi törmäyksessä rakoilleet happamat vulkaniitit ja granitoidit ylipäättään erotuisivat selvästi alueen hierto/siirrosvyöhykkeiden rikkomista samanlaisista kivistä painovoima- tai magneettisilla kartoilla?

Tässä suhteessa hyvän vertailukohdan tarjoaa Ruotsissa sijaitseva Siljan (377 ± 2 Ma, Reimold *et al.* 2005). Sen alkuperäinen läpimita lienee ollut jossain 70–80 km:n tienoilla ja se on nykyisinkin näkyvissä erinomaisesti niin geologisesti kuin mor-



Pirstekartioita arkeisessa fylliitissä Venterskroonin lähellä Vredefortin törmäyskraatterilla Etelä-Afrikassa. Kuva: Teemu Öhman.

Shatter cones in the Archean phyllites of Booyens Shale Formation, near Venterskroon, Vredefort Dome, South Africa. Photo: Teemu Öhman.

fologisestikin. Silti Siljanilla ei ole selväpiirteistä yksiselitteisesti kraatteriin liittyvää painovoima-anomaliaa, ja selvin magneettinenkin anomalia rajoittuu kraatterin keskustan rengaskohouman sisäosiin (Henkel ja Aaro 2005). Tämä anomalia voi hyvin vertautua Keurusselän pirstekartioalueen ympäristöään hieman korkeampaan magneettiseen susceptibiliteettiin (Raiskila *et al.* 2008, 2009).

Keurusselän alueen siirroksista puhuttaessa kannattaa muistaa, että huomattavin pirstekartio-alue rajoittuu suuren NNE-SSW-suuntaisen ruhjevöhykkeen länsipuolelle. Ei liene kovinkaan kaukaa haettu ajatus, että alkuperäinen pirstekartio-alue on voinut olla suurempi, mutta myöhemmät (pystysuuntaiset) siirrokset ovat tehokkaasti estäneet sen näkymisen nykyisin tai hävittäneet sen eroosion avustuksella kokonaan.

Steinheimin kraatterin klassisen kauniita pirstekartioita ei voi koskaan esitellä liikaa, joten sikäli KH09:n kuva 9 oli ilo silmälle. Ihmetyttää vain, miksei sen parina ollut kuvaa jostain litologialtaan enemmän Keurusselkää muistuttavan törmäyskraatterin pirstekartiosta. Hienorakeinen kalkkikivi on kuitenkin pirstekartioidenkin kannalta koko lailla eri asia kuin keskisuomalainen maasälpämetaporfyryi tai granitoidi. Makroskooppisesti tarkastellen Keurusselän pirstekartiot eivät kuitenkaan mitenkään eroa eri puolilla maailmaa törmäyskraattereilla näkemistäni kivilajiltaan suunnilleen vastaavista pirstekartioista, ovatpahan vain usein melkoisen näyttäviä esimerkkejä.

Pelkkien kuvien perusteella ei tietenkään pitäisi kommentoida näytteistä juuri mitään, mutta koska en Helsingin Hietalahdenkadun ja Lönnrotinkadun kulmasta löytänyt mitään KH09:n kuvan 10 tapaista (tunnustettakoon tarkasteluni tapahtuneen lumisateen vaikeuttaessa tilannetta), on nyt siihen tyytyminen. Kuvan perusteella minä en pitäisi tuota rakopintaa pirstekartiota muistuttavana, ja vakaa uskoni on, ettei kovin moni muukaan erilaisiin kiviin syntyneitä pirstekartioita nähnyt kraatteritutkija helposti tässä tapauksessa erehtyisi. Kaunis murto- tai hiertopinta kuvassa kyllä on ja rakenne on hyvin kiehtova, mutta kiven uurrokset näyttävät kovin yhdensuuntaisilta. Lisäksi jos pirstekartiouurteet ovat noin hienopiirteisiä, aidossa pirstekartiossa näkyy monesti useita pirstekartiopintoja päällekkäin, hieman eri mittakaa-

vassa. Ja mittakaavasta on vielä todettava sekin, että pirstekartioita tutkittaessa mittakaava ja kiven rae-
koko on välittämättä huomioitava. Keurusselän metavulkaniitit ja granitoidit ovat sen verran karkearakeisia kiviä, että KH09 kuvan 5 mittakaavassa on täysin mahdotonta sanoa, ovatko uurteet ja harjanteet todellisuudessa yhdensuuntaisia vai konvergoivia.

KH09:n ehdottama geneettisesti neutraali terminologia pirstekartiomaisille rakopinnoille on tietenkin periaatteessa hyvä ajatus. Tässä kuitenkin tulee muistaa, ettei kukaan asiaan perehtynyt kraatteritutkija kutsu uurteista kiven pintaa pirstekartioksi ennen kuin sen on todettu täyttävän pirstekartion tunnistuskriteerit. Kuten myös KH09 toteavat, pirstekartiot eivät ole pelkkää pintakuviointia, vaan kiven läpikotainen rakennepiirre, joka muodostuu kaarevalla pinnalla olevista konvergoivista uurteista ja harjanteista. KH09:n esittämät mikrotektoniset ja fraktografiset tutkimukset olisivat toki toivottavia, mutta ainakaan toistaiseksi ei tunneta mitään keinoa, jolla mainituilla menetelmillä pirstekartiot voitaisiin muista rakopinnoista erottaa. Robert Dietzin (1946, 1947) päivästä lähtien on kuitenkin tultu toimeen suunnilleen yllä mainitulla määritelmällä ja sillä tosiasialla, että luonnosta – vallankaan syvä- tai metamorfisista kivistä – ei vain ole löydetty mitään muuta rakennetta, joka täyttäisi tuon määritelmän ja lisäksi, niin epätieteellistä kuin tämä onkin, näyttäisi pirstekartiolta. Sedimenttisyntyiset *cone-in-cone* -rakenteet taas on helppo erottaa pirstekartioista (esim. French 1998, Lugi *et al.* 2005). Keurusselän pirstekartiot täyttävät määritelmän ja vastaavat monilta muilta rakenteellisilta ja mineralogisiltakin piirteiltään (kuten KH09 tutkimuksellaan osoittivat) toisilta törmäyskraattereilta tavattuja pirstekartioita, joten minusta on erittäin perusteltua jatkossakin käyttää mainiota ja vakiintunutta termiä ”pirstekartio” geneettisessäkin merkityksessä myös Keurusselän tapauksessa.

Keurusselkä on Suomen törmäyskraattereiden jäänteiksi tulkituista rakenteista ainoa, josta puuttuu niin nykyisellään havaittava kuoppa, kuin myös geokemialliset tai mineralogiset todisteet törmäyssynnystä. Näin siis tosin vain siinä tapauksessa, että KH09:n tapaan sivuutetaan lohkarelöydön toistaiseksi indeksoimattomat erittäin paljon kvartsin

shokkilamelleja (engl. *planar deformation feature*, PDF) muistuttavat rakenteet (Hietala ja Moilanen 2004), samoin kuin pseudotakylittimäisen juonen yhteydessä tavatut kvartsin *planar fracture* (PF) -tyyppiset, hieman alhaisempaa noin 5–8 GPa:n shokkipainetta (esim. French 1998) indikoivat tasomurtumat (Schmieder *et al.* 2009). Tasomurtumista (PF) on mahdollisia hyvin heikkoja viitteitä myös muissa pirstekartioissa (Poikolainen 2008), mutta ne eivät täysin kiistattomia shokkimetamorfoosin todisteita ole (esim. French 1998). Joka tapauksessa nämä alhaisen shokkimetamorfoosin merkit yhdessä pirstekartioiden esiintymisen kanssa sopivat erinomaisesti yhteen Keurusselän syvän eroosiotason kanssa.

Keurusselän pirstekartiot ovat makroskooppisesti tarkastellen erittäin vakuuttavia ja hyvin kehittyneitä, ja jos pirstekartiot Keurusselältä eivät ole törmäyssyntyisiä, nousee esiin roppakaupalla uusia kysymyksiä. Yksi keskeisimmistä on, miksei sitten pirstekartioita ole yli kuudenkymmenen vuoden aikana löydetty mistään muualta kuin paikoista, joissa on muitakin viitteitä törmäyksestä? Miksi pirstekartiot rajoittuisivat törmäyskraattereiden alueelle, jos ne syntyvät endogeenisten prosessien seurauksena? Mikä Keurusselästä tekee näin ainutlaatuisen kohteen? KH09 esittävät runsaasti kiinnostavia havaintoja, jotka sopivat täysin yhteen vallitsevien törmäyskraattereita ja pirstekartioita koskevien käsitysten kanssa, joten miksi pitäisi kehittää aivan uusi ongelmallinen ajatusmalli havaintojen selittämiseksi?

Summary:

Shatter cones in Keurusselkä impact structure, Finland

Kinnunen and Hietala (2009) described a new, non-impact hypothesis to explain the origin of shatter cones (Hietala and Moilanen 2004, 2007) in Keurusselkä structure, central Finland. They put a lot of emphasis on the observations that shatter cone surfaces appear to be sheared and they are currently covered by chlorite. They, however, seem to neglect the fact that minor shearing up to a few millimetres is very common in shatter cones (e.g. Gibson and Spray

Yhteenvedona todettakoon, että niin ansiokas kuin Kinnusen ja Hietalan (2009) artikkeli onkin nostessaan esille aurinkokuntamme tärkeimmän geologisen prosessin – törmäyskraattereiden synnyn – ja sen yhden erittäin heikosti tunnetun ilmenemismuodon, olisi vähän tarkempi perehtyminen niin pirstekartioihin kuin yleisesti törmäyskraattereihin ja kraatteroitumisprosessiin mielestäni ollut paikallaan. Kritiikki vallitsevia, usein luutuneitakin ajatusmalleja kohtaan on aina lämpimästi tervetullutta ja välttämätöntä tieteen kehittymistä ajatellen, mutta jotta kritiikillä olisi vaikutusta, saivat sen perustelut olla hieman vahvemmalla pohjalla.

Kiitokset

Kiitän useita koti- ja ulkomaisia kollegojani heidän kanssaan käymistäni Keurusselkää koskevista antoisista keskusteluista ja yhteistyöstä. Tässä vastineen suomenkielisessä osiossa esitetyt näkemykset ovat kuitenkin luonnollisesti vain ja ainoastaan omiani.

TEEMU ÖHMAN

Kandintie 3 C 23, 90570 Oulu

Geotieteiden laitos, ja
Fysikaalisten tieteiden laitos,
PL 3000, 90014 Oulun yliopisto
teemu.ohman@oulu.fi



1998, Nicolaysen and Reimold 1999, Sagy *et al.* 2004, Lugli *et al.* 2005), and that chlorite is not a rarity on shatter cone surfaces (Gibson and Spray 1998, Nicolaysen and Reimold 1999). Also the reported undulose extinction of quartz and fractured feldspars fit perfectly the impact origin of shatter cones (e.g. Hargraves and White 1996, Fackelman *et al.* 2008).

We agree with Kinnunen and Hietala (2009) that the shatter cone surfaces were probably “cracked open”

during later fracturing in the area, thus obtaining their current mineral composition, but again this fits perfectly the impact model. If chlorite was not formed on shatter cone surfaces in the hydrothermal phase following the impact (chlorite being a very common impact-induced hydrothermal mineral: e.g. Naumov 2005), there has been plenty of possibilities for it during the 1140 ± 6 Ma (Schmieder et al. 2009) since the impact event.

The significance of Kinnunen and Hietala's (2009) Figure 7 is somewhat elusive. Their data does fall within the data from shear zones, but without any comparative data from other shatter cone surfaces this does not prove anything, one way or the other. We also note that the pseudotachylitic breccia vein cutting a shatter cone (Schmieder et al. 2009) is exactly as predicted by the impact model: shatter cones form in the compression stage of the cratering process, whereas pseudotachylitic breccia veins are commonly a late stage phenomenon, forming in the modification stage. As the vein in question is located in the presumed central uplift area, the cross-cutting relationship is the one expected in a complex crater setting.

The pseudotachylitic breccia vein displays planar fractures in quartz (Schmieder et al. 2009), indicative of low shock pressure up to ~ 8 GPa (e.g. French 1998). Based on our on-going studies of the breccia boulder described by Hietala and Moilanen (2004), we are also convinced planar deformation features (PDFs) - unequivocal evidence for shock metamorphism - are present in Keurusselkä, although Miller indices of the PDFs are yet to be determined. To us, these observations taken together with the well-developed shatter cones present ample evidence for the impact origin and subsequent deep erosion of the Keurusselkä structure.

The mineralogy of shatter cone surfaces is a sub-discipline of impact cratering studies that has not received much attention in the past. Therefore, the observa-

tions by Kinnunen and Hietala (2009) are a valuable addition to our knowledge about shatter cones. However, we strongly disagree with their conclusions. All of their observations fit established ideas of impact crater and shatter cone formation. Thus, we see no reason to assume that Keurusselkä is the first known location on Earth where well-defined shatter cones would be caused by a non-impact process. Instead, we believe (as noted in Schmieder et al. 2009), that the shatter cones in Keurusselkä area represent heavily eroded remains of a Late Mesoproterozoic impact structure.

TEEMU ÖHMAN

Department of Geoscience and Department of Physical Sciences, PO Box 3000, FI-90014, University of Oulu, Finland
teemu.ohman@oulu.fi

MARTIN SCHMIEDER

Institut für Planetologie, Universität Stuttgart, Herdweg 51, D-70174 Stuttgart, Germany
martin.schmieder@geologie.uni-stuttgart.de

FRED JOURDAN

Western Australian Argon Isotope Facility, Applied Geology & John de Laeter Centre for Mass Spectrometry, Curtin University of Technology, GPO Box U1987, Perth WA 6845, Australia
F.Jourdan@exchange.curtin.edu.au

ELMAR BUCHNER

Institut für Planetologie, Universität Stuttgart, Herdweg 51, D-70174 Stuttgart, Germany
elmar.buchner@geologie.uni-stuttgart.de

SELEN RAISKILA

Department of Physics, Geophysics Unit, PO Box 64, FI-00014, University of Helsinki, Finland
selen.raiskila@helsinki.fi

Kirjallisuus

- 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.
- Bäckström, A. 2005. A Study of Impact Fracturing and Electric Resistivity Related to the Lockne Impact Structure, Sweden. Teoksessa: Koeberl, C. ja Henkel, H. (toim.). *Impact Tectonics*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 389–404.
- Deutsch, A. 1998. New Pathfinders to Impact Structures: The Finnish Way. *Meteoritics & Planetary Science* 33:3.
- Deutsch, A. ja Langenforst, F. 1998. Mineralogy of Astroble-

- mes - Terrestrial Impact Craters. Teoksessa: Marlunin, A.S. (toim.). *Advanced Mineralogy, Volume 3, Mineral Matter in Space, Mantle, Ocean Floor, Biosphere, Environmental Management, and Jewelry*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 76–95.
- Dietz, R.S. 1946. Geological Structures Possibly Related to Lunar Craters. *Popular Astronomy* 54:465–467.
- Dietz, R.S. 1947. Meteorite Impact Suggested by the Orientation of Shatter-Cones at the Kentland, Indiana, Disturbance. *Science* 105:42–43.
- Fackelman, S., Morrow, J. R., Koeberl, C. ja McElvain, T.H.

2008. Shatter Cone and Microscopic Shock-Alteration Evidence for a Post-Paleoproterozoic Terrestrial Impact Structure Near Santa Fe, New Mexico, USA. *Earth and Planetary Science Letters* 270:290–299.
- 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, 120s.
- Gay, N.C., Collins, N.R. ja Simpson, C. 1978. The Composition of Spherules and Other Features on Shatter Cone Surfaces from the Vredefort Structure, South Africa. *Earth and Planetary Science Letters* 41:372–380.
- Gibson, H.M. ja Spray, J. G. 1998. Shock-induced Melting and Vaporization of Shatter Cone Surfaces: Evidence from the Sudbury Impact Structure. *Meteoritics & Planetary Science* 33:329–336.
- Hargraves, R.B. ja White, J.C. 1996. Micro-Shock Deformation adjacent to the Surface of Shatter Cones from the Beaverhead Impact Structure. *Montana. The Journal of Geology* 104:233–238.
- Henkel, H. ja Aaro, S. 2005. Geophysical Investigations of the Siljan Impact Structure – a Short Review. Teoksessa: Koerber, C. ja Henkel, H. (toim.). *Impact Tectonics*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 247–253.
- Hietala, S. ja Moilanen, J. 2004. Keurusselkä – a New Impact Structure in Central Finland. *Lunar and Planetary Science XXXV*. Lunar and Planetary Institute, Houston, U.S.A., #1619 (CD-ROM).
- Hietala, S. ja Moilanen, J. 2007. Keurusselkä - Distribution of Shatter Cones. *Lunar and Planetary Science XXXVI*. Lunar and Planetary Institute, Houston, U.S.A., #1762 (CD-ROM).
- Jourdan, F., Renne, P.R. ja Reimold, W.U. 2008. High-Precision Ar/Ar age of the Jänisjärvi Impact Structure (Russia). *Earth and Planetary Science Letters* 265:438–449.
- Kinnunen, K.A. ja Hietala, S. 2009. Keurusselän pirstekartioiden tarkastelua. *Geologi* 61:68–85.
- Lugli, S., Reimold, W.U. ja Koerber, C., 2005. Silicified Cone-in-Cone Structures from Erfoud (Morocco): a Comparison with Impact-Generated Shatter Cones. Teoksessa: Koerber, C. ja Henkel, H. (toim.). *Impact Tectonics*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 81–110.
- Marmo, V. 1963. Suomen geologinen kartta 1:100000. lehti 2232 Keuruu. Kallioperäkartan selitys. Geologinen tutkimuslaitos, Helsinki. 55 s.
- Melosh, H.J. 1989. *Impact Cratering: a Geologic Process*. Oxford University Press, New York. 245 s.
- Naldrett, A.J. 1999. Summary: Development of Ideas on Sudbury Geology, 1992–1998. Teoksessa: Dressler, B.O. ja Sharpton, V.L. (toim.). *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution II*. Geological Society of America Special Paper 339. Geological Society of America. Boulder. 431–442.
- Naurnov, M.V. 2005. Principal Features of Impact-Generated Hydrothermal Circulation Systems: Mineralogical and Geochemical Evidence. *Geotitles* 5:165–184.
- Nicolaysen, L.O. ja Reimold, W.U. 1999. Vredefort Shatter Cones Revisited. *Journal of Geophysical Research* 104:4911–4930.
- Orti, L., Di Martino, M., Morelli, M., Cigolini, C. Pandeli, E. ja Blizzigoli, A. 2008. Non-impact Origin of the Crater-Like Structures in the Gilf Kebir Area (Egypt): Implications for the Geology of Eastern Sahara. *Meteoritics & Planetary Science* 43:1629–1639.
- Pesonen, L.J., Abels, A., Lehtinen, M. ja Plado, J. 2000. Meteorite Impact Cratering - Implications for the Fennoscandian Lithosphere. Teoksessa: Pesonen, L.J., Korja, A. ja Hjelt, S.-E. (toim.). *Lithosphere 2000*. Report S-41, Institute of Seismology. University of Helsinki. 113–119.
- 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. Teoksessa: Viljanen, A. ja Mäntyniemi, P. (toim.). *XXII Geofysiikan päivät*. Geofysiikan seura. Helsinki, 165–169.
- Poikolainen, J. 2008. Alhaisen shokkimetamorfoosin vaikutus mineraaleihin Keurusselällä. Julkaisematon luonnontieteiden kandidaatintutkielma, Oulun yliopiston Geotieteiden laitos, 28s.
- Raiskila, S., Elbra, T., Öhman, T. ja Pesonen, L.J. 2008. Petrophysical and Palaeomagnetic Studies of the Keurusselkä Impact Structure, Finland. *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV*, 17-21 August 2008, Vredefort Dome, South Africa, #3056 (CD-ROM).
- Raiskila, S., Leväniemi, H., Ruotsalainen, H. ja Pesonen, L.J. 2009. Geophysical Investigations of the Keurusselkä Impact Structure, Central Finland. *XXIV Geofysiikan Päivät*, Helsinki, 13-14.5.2009.
- Reimold, W.U. ja Colliston, W.P. 1994. Pseudotachylites of the Vredefort Dome and the Surrounding Witwatersrand Basin, South Africa. Teoksessa: Dressler, B.O., Grieve, R.A.F. ja Sharpton, V. L. (toim.). *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution*. Geological Society of America Special Paper 293. Geological Society of America, Boulder, 177–196.
- Reimold, W.U. ja Gibson, R.L. 2005. “Pseudotachylites” in Large Impact Structures. Teoksessa: Koerber, C. ja Henkel, H. (toim.). *Impact Tectonics*. Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1–53.
- Reimold, W.U., Kelley, S.P., Sherlock, S.C., Henkel, H. ja Koerber, C. 2005. Laser Argon Dating of Melt Breccias from the Siljan Impact Structure. Sweden: Implications for a Possible Relationship to Late Devonian Extinction Events. *Meteoritics & Planetary Science* 40:591–607.
- Ruotsalainen, H., Hietala, S., Dayioglu, S., Moilanen, J., Pesonen, L.J. ja Poutanen, M. 2006. Keurusselkä Impact Structure - Preliminary Geophysical Investigations. Teoksessa: Kukkonen, I., Eklund, O., Korja, A., Korja, T., Pesonen, L.J. ja Poutanen, M. (toim.) *Lithosphere 2006*. Report S-46, Institute of Seismology. University of Helsinki, 163–167.
- 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 Fractures Formed by Shock Impact. *Journal of Geophysical Research* 109:B 10209, doi: 10.1029/2004JB003016.
- Schmieder, M., Jourdan, F., Hietala, S., Moilanen, J., Öhman, T. ja Buchner, E. 2009. A High Precision Late Mesoproterozoic Ar/Ar Age for the Keurusselkä Impact Structure (Finland). *Lunar and Planetary Science XXXX*. Lunar and Planetary Institute, Houston, U.S.A., #1028 (CD-ROM).
- Wieland, F., Reimold, W.U. ja Gibson, R.L. 2006. New Observations on Shatter Cones in the Vredefort Impact Structure, South Africa, and Evaluation of Current Hypotheses for Shatter Cone Formation. *Meteoritics & Planetary Science* 41:1737–1759.
- Öhman, T. 2002. Kraatteroitusprosessin merkit Saarijärven törmäyskraatterin alueella. Julkaisematon pro gradu -tutkielma, Oulun yliopiston Geotieteiden laitos, 180 s.