

Pirstekartioiden olemus ja ongelmallisuus

TEEMU ÖHMAN

Poljeskelin kauniina myöhäiskesän päivänä sähköpyörällä hiekkatietä pieneen myötälseen. Matka oli taitunut yllättävän joutuisasti, sillä luulin olevani vielä kilometrin–parin päässä etsimäni pellon laidasta. Loivan mutkan jälkeen olikin yhtäkkiä painettava jarrut pohjaan. Viidentoista metrin päässä peltokivistä tehdyn kasan päällä komeili suurin koskaan näkemäni pirstekartiolohkare (kuva 1).

Kuulin myöhemmin kollegoiltani, että näin **Lauri J. Pesonen** kyseisen lohkaaren oli alun perin löytänytkin – tosin auton ikkunasta katsellen (L. J. Pesonen ja S. Hietala, henkilökohtaisia tiedonantoja). Tämän lohkaaren ja myöhempien löytöjen myötä Summasesta tuli Suomen kahdestoista ja toistaiseksi viimeisin todistettu törmäyskraatteri (Plado ym. 2018).

Aina törmäyskraatterien tai pirstekartioiden tunnistaminen ei kuitenkaan ole näin yksinkertaista.

Pirstekartioiden tuntomerkit

Pirstekartioiden ovat ”harjanteiden” ja niiden välisten ”laaksojen” luonnehtimia kaarevia rakopintoja kivessä. Laaksot ja harjanteet lähtevät säteittäisesti kartion huipun alueelta, eivätkä ne täten ole yhdensuuntaisia. Kartiot eivät käytännössä koskaan ole täydellisiä, vaan näkyvissä on vain osa kartion pinnasta. Myös kartion terävä huippu yleensä puuttuu.

Pirstekartioiden voivat esiintyä missä kivilajissa tahansa, mutta tyypillisesti ne ovat komeimmillaan hienorakeisissa sedimenttikivissä (kuvat 2 ja 3, kansikuva). Pienimmät tunnetut pirstekartioiden ovat läpimitaltaan alle



Kuva 1. Yleensä pirstekartioiden eivät ole löytöhetkellä näin hyvin näkyvissä. Puolitoistametrinen, runsaasti erisuuntaisia pirstekartiopintoja sisältävä Summasen graniittilohkare on nykyisin esillä Lanneveden seurantaloon edustalla. Sen alla oikealla sijaitsevasta lohkaareesta löytyi myös suuri pirstekartiopinta. Se on esillä Summassaaren Kivikauden kylässä. Kompassin pituus on 12,5 cm. Kuva: Teemu Öhman.

Figure 1. Usually shatter cones are not as prominently displayed as this granitic 1.5 m diameter Summanen shatter cone boulder, which has numerous shatter cone surfaces. It is now exhibited at the Lannevesi village hall. The smaller less prominent shatter cone boulder to the lower right can be seen in the Stone Age Village outdoor museum. The length of the compass is 12.5 cm. Photo: Teemu Öhman.

sentin, suurimmat peräti toistakymmentä metriä. Keskeinen pirstekartioiden ominaisuus on, että ne ovat kiven läpikotainen rakennepiirre. Suuremman pirstekartioiden päällä on usein myös pienempiä pirstekartiopintoja. Jos pirstekartiota napauttaa vasaralla, sen sisältä paljastuu joskus toinen pirstekartiopinta. Tällöin voi käydä niin onnellisesti, että tuloksena on kaksi pirstekartiötä, eli saman



Kuva 2. Vasemmalla pirstekartio Saksassa sijaitsevan Steinheimin kraatterin kalkkikivessä (leveys 6 cm) ja oikealla sen lähellä sijaitsevan Riesin kraatterin kersantiitissa (leveys 7 cm). Kuvat: Johannes Baier.

Figure 2. Shatter cones from the type locality at Steinheim crater in Germany (left) and its larger neighbour Ries (right). Steinheim shatter cone (width 6 cm) is in limestone, Ries shatter cone (width 7 cm) is in kersantite. Photos: Johannes Baier.



Kuva 3. Pirstekartioista voi olla näkyvissä joko kupera ulkopinta (vasemmalla) tai kovera sisäpinta (oikealla) tai kuten tässä Venäjän Karan kraatterin silttisessä hiekkakivessä olevassa näytteessä: molemmat. Näytteen leveys on 13 cm. Kuvat: Teemu Öhman.

Figure 3. Shatter cone surfaces may be either convex (left) or concave (right). This 13 cm wide sample in silty sandstone from Kara impact structure in Russia displays both. Photos: Teemu Öhman.

pinnan kupera ja kovera muoto (kuva 3). (mm. French & Koeberl 2010; Baratoux & Reimold 2016; Zaag ym. 2016)

Pirstekartiopinnan harjanteet ja laaksot voivat olla suoria tai hieman kaarevia. Toisin kuin tavallisilla siirroksiin liittyvillä liukupin-

noilla (haarniskapinnoilla), pirstekartioiden harjanteet ja laaksot eivät ole teräväreunaisia vaan pyörityneitä, eikä pirstekartioissa myöskään esiinny haarniskapinnoille luonteenomaisia liikesuuntaa osoittavia askelmia (Baratoux & Reimold 2016).

Nimitys ”kartio” on nykytietämyksen valossa hieman virheellinen, sillä tarkkaan ottaen pirstekartiot muodostavat osia hyperboloidin tai paraboloidin pinnasta, eivät kartiosta (Wieland ym. 2006; Baratoux ym. 2016). Pirstekartiot voivat poikkileikkaukseltaan olla myös monikulmaisia. Tämä johtuu siitä, että pirstekartioiden esiintymistä ja kartioiden suuntaa voivat kontrolloida törmäystä vanhemmat rakosuunnat kivessä (Nicolaysen & Reimold 1999; Hasch ym. 2016; Zaag ym. 2016).

Luonnossa pirstekartioita on löydetty vain noin 80:sta törmäyskraatterista ja muutamista kivimeteoriiteista. Pirstekartiot näyttävät merkittävää osaa törmäyskraattereiden löytämisessä ja tutkimisessa, sillä ne ovat ainoa paljain silmin nähtävissä oleva varma todiste šokkimetamorfoosista.

Pirstekartioihin liittyy läheisesti piirre nimeltään *multiply striated joint sets* (MSJS), jolle ei ole suomenkielistä nimitystä. Ne ovat toistensa lähellä sijaitsevia pirstekartiopinnan kaltaisia laaksojen ja harjanteiden hallitsevia rakopintoja, joiden suunnat vaihtelevat eri pinnoilla. Pirstekartioista poiketen MSJS-pinnat voivat olla melkein tasomaisia. Lisäksi laaksot ja harjanteet ovat joskus lähes yhden-suuntaisia. MSJS:t esiintyvät pirstekartioiden yhteydessä ja saattaa olla, että ne vaihettuvat aidoiksi pirstekartioiksi. MSJS:iä ei pidetä varmana törmäystodisteena, mutta jos niitä havaitsee kalliosta, kannattaa etsiä myös aitoja pirstekartioita. (Nicolaysen & Reimold 1999; Wieland ym. 2006)

Hyvin kehittyneet pirstekartiot ovat vai-vatta tunnistettavissa. Valaistusolot voivat kuitenkin vaikuttaa niiden havaitsemiseen: joskus ne näkyvät helposti, toisena päivänä eivät juuri ollenkaan. Ahvenanmaan Lumparnin ja Yhdysvaltain Santa Fen törmäysrakenteiden pirstekartiot ovat tunnettuja esimerkkejä tällaisista kokeneillekin kraatteritutkijoille päänvaivaa aiheuttavista kohteista.

Kuten moni muukin törmäyskraattereihin liittyvä kysymys, myös pirstekartioiden

synty on hyvin huonosti tunnettu. Yksikään esitetyistä malleista ei selitä niiden kaikkia piirteitä. Monissa malleissa oletetaan, että asteroiditörmäyksen synnyttämä ääntä nopeampi šokkiaalto kohtaa jonkin kallioperän epähomogeenisen ominaisuuden, vaikkapa sulkeuman tai raon. Tällainen saa mahdollisesti šokkiaallon heijastumaan, taittumaan ja/tai interferoimaan siten, että lopputuloksena on pirstekartion kaareutuva rakopinta. Vaikka laaja yksimielisyys vallitseekin siitä, että pirstekartioiden on synnyttävä varsin varhain kraatteroitumisprosessissa, niiden tarkka syntyhetki on vielä epäselvä. (mm. Nicolaysen & Reimold 1999; Wieland ym. 2006; Baratoux & Reimold 2016; Zaag ym. 2016)

Pirstekartiot voivat muihin törmäystodisteisiin nähden syntyä varsin matalissa šokkipaineissa. Minimipaineeksi esitetään yleensä 1–2 gigapascalia (GPa) ja paineen ylärajaksi 30–45 GPa. Paineen lisäksi tarvittaneen hie-man hiettoa, sillä pirstekartioiden pinnoilla on havaittu todisteita kitkasulamaisesta. Tyypillisimmin pirstekartioita esiintyy suurempien ns. kompleksikraattereiden keskuskohoumissa ja kaiken kokoisten kraattereiden törmäysbreksioissa, mikäli ne ovat säästyneet myöhemmältä kulutukselta. Kraatterin koko ja eroosiotaso siis vaikuttavat merkittävästi pirstekartioiden esiintymiseen. (mm. Nicolaysen & Reimold 1999; Baratoux & Reimold 2016; Osinski ym. 2022)

Pirstekartioiden historiaa

Pirstekartiot ovat kiehtoneet geologeja 1900-luvun alkuvuosista lähtien. Vuonna 1905 saksalaiset **Wilhelm Branco** (1844–1928; koko nimeltään vuodesta 1907 alkaen Karl Wilhelm Franz von Branca) ja **Eberhard Fraas** (1862–1915) julkaisivat ensimmäisen kuvauksen pirstekartioista artikkelissaan *Das kryptovulcanische Becken von Steinheim* (Branco & Fraas 1905; ks. myös Baier 2018). Maapallolta ei tunnettu tuolloin vielä yhtään

törmäyskraatteria, joten he ymmärrettävästi pitivät eteläisessä Saksassa sijaitsevaa Steinheimia lähinnä tulivuoriperäisenä rakenteena. Ilmeinen ongelma kuitenkin oli, ettei Steinheimissa esiinny vulkaanisia kiviä, vaan se on syntynyt puhtaasti sedimenttikiviin. Niinpä Branco ja Fraas keksivät uuden termin ja kutsuivat Steinheimia kryptovulkaaniseksi rakenteeksi.

Steinheimin hienorakeisista kalkkikivistä Branco ja Fraas löysivät kapeiden säteittäisten harjanteiden ja laaksojen luonnehtimia kartiomaisia kiviä (kuva 2). Joskus kartioiden kärjet kohtasivat muodostaen tiimalasia muistuttavan rakenteen. Branco ja Fraas olivat kokeneita geologeja, mutta mitään tällaista he eivät olleet koskaan nähneet. He antoivat näille oudoille kiville nimen *Strahlenkalk*, vapaasti suomennettuna sädekalkki.

Vaikka Brancon ja Fraasin esittämä Steinheimin syntyteoria oli pielessä, heidän luomansa termit säilyivät. Kryptovulkanismin käsite oli aktiivisessa käytössä kuusi vuosikymmentä. *Strahlenkalk*-termille kävi vielä paremmin: sitä käytetään saksankielisessä kraatterikirjallisuudessa edelleen paitsi Steinheimin pirstekartioista, joskus myös muiden kraatterien kalkkikivipirstekartioista. Sittemmin siitä kehitettiin kaikkien kivilajien pirstekartioille sopiva *Strahlenkegel*-termi.

Yhdysvalloissa Brancon ja Fraasin artikkelista innostui saksalaistaustainen geologi **Walter H. Bucher** (1888–1965). Vuoden 1931 Geological Society of American kokouksessa hän kuvaili Tennesseeessä sijaitsevaa Wells Creekiä tyypilliseksi kryptovulkaaniseksi räjähdysrakenteeksi (Bucher 1932). Wells Creekin kartiomaisesti rakoilleet kivet olivat aivan yhtä komeita kuin Steinheiminkin. Niille hän antoi nimen *shatter cone*, joka on nykyinkin käytössä.

Wells Creekin lisäksi Yhdysvalloista löydettiin muutamia muitakin kryptovulkaanisia rakenteita. Kaikkia ajatus vulkanismista ilman vulkaanisia kiviä ei kuitenkaan miellyt-

tänyt. **John D. Boon** (1874–1952) ja **Claude C. Albritton Jr.** (1913–1988) julkaisivat 1930-luvun loppupuoliskolla useita artikkeleja, jotka olivat vuosikymmeniä aikaansa edellä. Vuonna 1936 he esimerkiksi ehdottivat, että Bucherin kryptovulkaaniset rakenteet olisivat itse asiassa törmäyskraattereita. Samalla he myös esittivät ensimmäisinä, että pirstekartiot olisivat asteroiditörmäyksen aiheuttaman räjähdys synnyttämiä (Boon & Albritton 1936). Kraatteritutkimuksen kehityksen kannalta oli kuitenkin harmillista, että he julkaisivat keskeiset artikkelinsa oman yliopistonsa julkaisusarjassa, jonka Boon oli perustanut. Sitä ei edes Yhdysvalloissa luettu laajasti.

Yksi harvoista, joka Boonin ja Albrittonin artikkeleihin kiinnitti huomiota, oli **Robert S. Dietz** (1914–1995). Jo kauan ennen kuin hän saavutti maailmanmainetta esittämällä valtameren leviävän keskiselänteillä, Dietz oli edelläkävijä Maan törmäyskraattereiden ja Kuun geologian tutkijana. Ensimmäisen pirstekartioartikkelinsa Dietz julkaisi jo vuonna 1947 laajalevikkisessä *Science*-lehdessä (Dietz 1947). Niinpä hänen kuvauksensa Indianassa sijaitsevan Kentlandin kraatterin synnystä ja pirstekartioiden olemuksesta saavuttivat paljon suuremman lukijakunnan kuin Boonin ja Albrittonin artikkelit. Mitä useampia pirstekartioesiintymiä Dietz löysi, sitä vakuuttuneemmaksi hän tuli siitä, että ne ovat varma todiste törmäyksestä.

Jo Boon ja Albritton sekä **Reginald A. Daly** (1871–1957) olivat ehdottaneet, että Etelä-Afrikan jättimäinen Vredefortin renasrakenne olisi törmäyssyntyinen (Boon & Albritton 1937; Daly 1947). Idea ei tosin juurikaan saanut kannatusta, vallankaan eteläafrikkalaisilta. Kuitenkin vuonna 1960 **Robert B. Hargraves** (1928–2003) Dietzin pyynnöstä etsi ja myös löysi runsaasti kauniita pirstekartioita Vredefortin kivistä (Dietz 1961; Hargraves 1961; kuva 4). Dietzille tämä oli varma todiste Vredefortin törmäyssynnystä. Kesti kuitenkin yli kaksi vuosikymmentä



Kuva 4. Pirstekartioita Etelä-Afrikassa Vredefortin törmäysrakenteen saviliuskeessa (vasemmalla) ja seriitti-kvartsiitissa (oikealla). Kompassin on pituus 12,5 cm. Kuvat: Teemu Öhman.

Figure 4. Shatter cones in argillaceous shale (left) and sericite quartzite (right) in Vredefort impact structure, South Africa. The length of the compass is 12.5 cm. Photos: Teemu Öhman.

ennen kuin Dietzin näkemyksestä tuli valtavirtaa.

Pahempaa oli kuitenkin luvassa. Vuonna 1964 Dietz ja **Louis W. Butler** (1934–2018) sohasivat muurahaispesää osoittamalla pirstekartioiden avulla, että valtavista nikkeli- ja kuparimalmeistaan tunnettu Kanadan Sudbury on itse asiassa törmäysrakenne (Dietz & Butler 1964). Kaikki malmigeologit ja magmapetrologit eivät ole toipuneet siitä vieläkään.

Todisteiden hiljalleen karttuessa yhä useampi tutkija alkoi uskoa pirstekartioiden ja törmäyskraattereiden yhteyteen. Nykyisellään pirstekartiot kuuluvat törmäyskraatteritutkimuksen perusteisiin: tämä on suurimmalta osin Robert Dietzin ansiota.

Suomen pirstekartioiden löytöhistoria

Pirstekartiot ovat näyttelleet merkittävää osaa myös Suomen törmäyskraatterien löytö- ja tutkimushistoriassa (kuva 5). Termin ”pirstekartio” esitteli tiettävästi ensimmäisenä **Martti Lehtinen** (1941–2020) lisensiaatintutkimuksessaan (Lehtinen 1969). Suomen ensimmäiset, vain muutamien senttimetrien kokoiset pirstekartiot hän löysi Lappajärven törmäys-

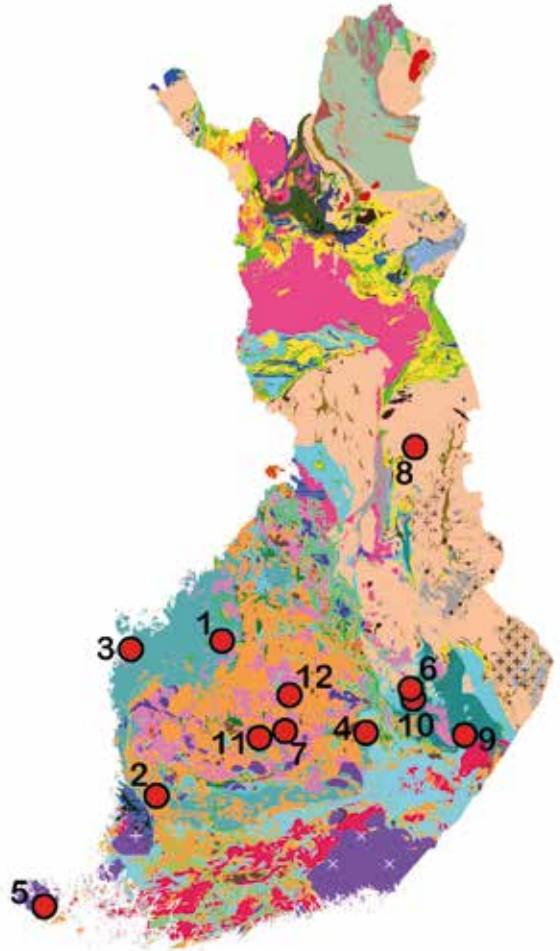
breksioista (Lehtinen 1976). Myöhemmin myös Lappajärven kallioperäkairauksissa onnistuttiin osumaan pieneen pirstekartioon (M. Lehtinen ja S. Hietala, henkilökohtaisia tiedonantoja). Hyvin vähälukuisia pirstekartiot Lappajärvellä kuitenkin ovat. Lappajärvellä pirstekartioiden harvinaisuus johtuu siitä, ettei se ole vielä kulunut pirstekartioiden otollisimmalle esiintymissyvyydelle.

Syksyllä 2003 tuolloin vielä geologian harrastajat, sittemmin osaamisensa yliopistojenkin silmissä virallistaneet **Satu Hietala** ja **Jarmo Moilanen** löysivät Keurusselän pirstekartioiden perusteella (kuva 6; Hietala & Moilanen 2004). Suomen vanhin ja suurin törmäysrakenne Keurusselkä on kulunut alkuperäisen kraatterin pohjan alapuolelle, joten lähes ainoat jäljellä olevat törmäyskivet ovat juuri pirstekartioita. Niiden esiintymisalueen perusteella Osinski ja Ferrière (2016) arvioivat Keurusselän kraatterin alkuperäiseksi läpimitaksi 36 km.

Lappajärven ja Keurusselän lisäksi varmoina pidettyjä pirstekartioita on kirjallisuudessa raportoitu ainakin Lumparnilta, Karikkoselältä, Suvasvesi Southilta, Saarijärveltä, sekä jo alussa mainitulta Summaselta. Näistä Lappajärven ja Keurusselän ohella vain Lumparn

Kuva 5. Suomen törmäyskraatterit kallioperäkartalla. Numerot kuvaavat järjestystä, jossa ne todistettiin törmäyssyntyisiksi: 1) Lappajärvi; 2) Sääksjärvi; 3) Söderfjärden; 4) Iso-Naakkima; 5) Lumparn; 6) Suvasvesi North; 7) Karikkoselkä; 8) Saarijärvi; 9) Paasselkä, 10) Suvasvesi South; 11) Keuruselkä ja 12) Summanen. Kuva: Teemu Öhman. Pohjakartta: GTK:n kallioperä 1:200 000 aineistoa, GTK avoin lisenssi Nimeä CC 4.0.

Figure 5: Finnish impact structures on a geologic map. The numbers depict the order in which their impact origin was proven: 1) Lappajärvi; 2) Sääksjärvi; 3) Söderfjärden; 4) Iso-Naakkima; 5) Lumparn; 6) Suvasvesi North; 7) Karikkoselkä; 8) Saarijärvi; 9) Paasselkä, 10) Suvasvesi South; 11) Keuruselkä, and 12) Summanen. Figure: Teemu Öhman. Background map: Geological Survey of Finland / GTK open license CC BY 4.0, including GTK's 1:200 000 bedrock data.



on niin suuri (halkaisija noin 9 km), että sen täytyy olla kompleksikraatteri, vaikkei morfologista keskuskohoumaa sieltä varmuudella ole paikannettukaan (Abels 2003).

Lumparnia oli epäilty kraatteriksi jo 1970-luvulla, mutta ensimmäiset törmäystodisteet – pirstekartiot – löysi aikoinaan Lappajärvenkin törmäyskraatteriksi osoittanut ruotsalainen **Nils-Bertil Svensson** (1927–2004) (Svensson 1993; Abels 2003). Kuten Lappajärvenkin tapauksessa, Svensson löysi ensimmäiset törmäystodisteet ja Lehtinen hoiti loput.

Karikkoselällä Lehtinen oli ensimmäisenä. Sinne hänet oli kesällä 1995 houkutelut yhteydenotto paikallisilta asukkailta, jotka kummastelivat pyöreää ja syvää järveään. Lehtinen

löysikin hyvin nopeasti Karikkoselän rantakallioista komeita pirstekartioita (kuva 6; Lehtinen ym. 1996; Arkonsuo 2000).

Taivalkosken Saarijärven pirstekartiot löysi Jarmo Moilanen keväällä 1998 (kuva 7). Tämä tapahtui vajaa vuosi sen jälkeen, kun Saarijärvi oli tunnistettu kraatteriksi. Saarijärven pirstekartioita on paikoin kallioissakin, mutta niitä esiintyy etenkin lohkarissa kraatterin luoteispuolella (Öhman 2002).

Lauri J. Pesosen vetämissä kenttätutkimuksissa kiinnostavimmat – mutta harvakuiset – Suvasvesi Southin pirstekartioehdotukset löytyivät järven rantakallioista kesinä 2001 ja 2002. Vaikka lohkarina löytyi vakuuttavia näytteitä, kallioiden pirstekartiot ovat hyvin heikosti kehittyneitä. Tällöin uurteiden tai



Kuva 6. Keurusselän (vasemmalla, kompassin pituus 12,5 cm) ja Karikkoselän (oikealla, näytteen leveys 18 cm) pirstekartiot syntyivät graniittisiin kiviin. Karikkoselän pirstekartiot ovat paljastumamittakaavassa selkeitä, mutta nyrkinäytteistä pirstekartiopinnan hahmottaminen on paljon vaikeampaa. Kuvat: Teemu Öhman.

Figure 6. Keurusselkä (left; the length of the compass is 12.5 cm) and Karikkoselkä (right; the sample width is 18 cm) shatter cones were formed in granitic rocks. Although the Karikkoselkä shatter cones are obvious in the outcrop scale, they are hard to discern in hand samples. Photos: Teemu Öhman.



Kuva 7. Taivalkosken Saarijärvellä pirstekartioita on niin granodioriittilohkareissa (vasemmalla) kuin metadiabaasipaljastumissakin (oikealla). Kompassin pituus on 12,5 cm. Kuvat: Teemu Öhman.

Figure 7. In Saarijärvi impact structure in Taivalkoski, shatter cones are present in granodiorite boulders (left) and metadolerite outcrops (right). The length of the compass is 12.5 cm. Photos: Teemu Öhman.

haarniskapintojen mahdollisuutta ei pystytty kiistattomasti sulkemaan pois (Lehtinen ym. 2002; Donadini ym. 2006).

Kraatterikirjallisuudesta voi välillä muodostua käsitys, etteivät pirstekartiot riittäisi enää törmäystodisteeksi (mm. Ferrière ym.

2010). The Meteoritical Society'n alaisuudessa toimivan uuden törmäyskraatterikomitean (Cavosie ym. 2023) esittelykokouksessa viime elokuussa kuitenkin vakuutettiin, että edelleenkin pirstekartiot hyväksytään törmäystodisteeksi, kunhan ne on dokumentoitu

kunnolla. Komitean on ensi vuoden aikana tarkoitus julkaista virallinen maapallon törmäyskraatterilista. Siinä kerrotaan, millaisten todisteiden perusteella kukin törmäyskraatteri on tunnistettu. On mielenkiintoista nähdä, moniko Suomen pirstekartioista hyväksytään tormäystodisteeksi.

Suomen pirstekartio-ongelma

Niin tärkeitä ja luonteenomaisia kuin pirstekartiot Suomen kraattereille ovatkin, ovat ne osin myös ongelmallisia. Lappajärvi ja Keuruselkä ovat pirstekartioiden osalta kohtuullisen helposti ymmärrettäviä tapauksia, joten seuraavassa käsittelen vain muiden edellä mainittujen Suomen kraatterien pirstekartioita.

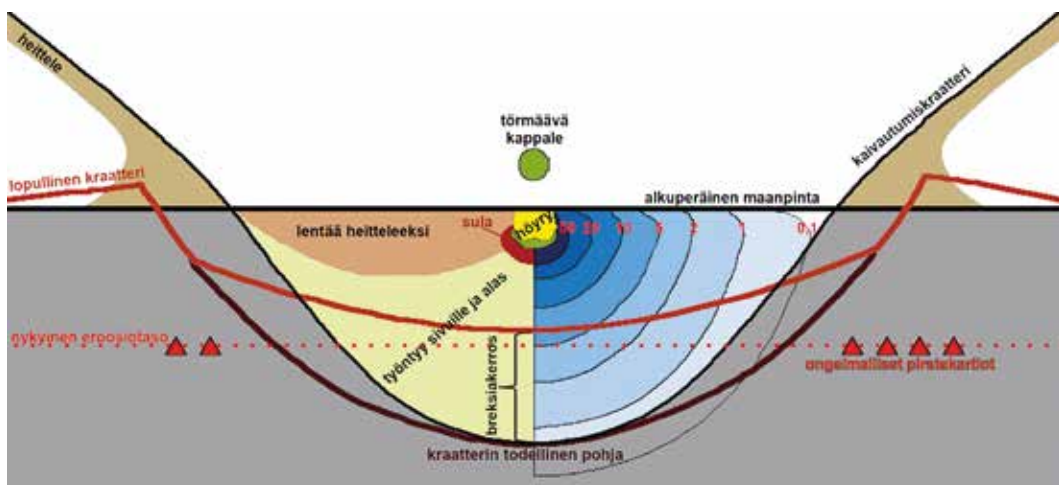
Suomen pienten kraatterien ja – eroosio- tasoon kantaa ottamatta – törmäysrakenteiden pirstekartioille on yhteistä, että ne on löydetty nykyisin havaittavissa olevan kuopan reunalta tai yleensä hieman sen ulkopuolelta. Pirstekartioiden sijaintia suhteessa kraatteriin ei toistaiseksi kattavimmassa – joskin monin osin valitettavan virheellisessä – Baratoux'n ja Reimoldin (2016) pirstekartiotietokannassa ole eritelty. Pienehköjen kraatterien reunoilta pirstekartioita on löydetty selvästi vähemmän. Baratoux ja Reimold (2016) jopa väittävät, ettei pirstekartioita esiinny muutamaa kilometriä pienemmissä kraattereissa jokusta, heidän mukaansa arveluttavaa poikkeusta, lukuun ottamatta (*“Distribution of shatter cones with respect to crater size and lithology suggests that shatter cones do not occur in impact craters less than a few kilometers in diameter, with a few, currently questionable exceptions.”*).

Suomen kraatterien nykyiset läpimitat ovat melko heikosti tunnettuja. Niiden alkuperäisistä läpimitoista ei systemaattista tutkimusta ole tehty. Tämän vuoksi eri lähteissä ilmoitetut läpimitat vaihtelevat. Jos vaikkapa tulkitaan Baratoux'n ja Reimoldin (2016) ilmauksen *“a few kilometers”* tarkoittavan neljää kilometriä ja poimitaan tuoreesta

kokoomateoksesta (Gottwald ym. 2020) Suomen törmäysrakenteiden läpimitat, päätyvät Keuruselkää, Lappajärveä ja Lumparnia lukuun ottamatta Suomen kaikki pirstekartiot Baratoux'n ja Reimoldin (2016) arveluttavien poikkeuksien listalle.

Vaikka asteroiditörmäyksessä muodostuu erittäin korkea paine, se myös laskee nopeasti. Käytännössä korkean šokkipaineen ja -lämpötilan kokee vain pieni alue kraatterin keskellä. Kuvassa 8 on eräs näkemys asteroiditörmäyksessä syntyvistä šokki-isobaareista eli samanpaineenkäyristä. Eri tutkijoiden esityksissä yksityiskohdat hieman vaihtelevat, mutta šokkipaineen on kraatterin reunan tuntumassa arvioitu olevan noin 0,5 gigapascalista selvästi alle 0,1 gigapascaliin (French & Koeberl 2010; Kenkmann ym. 2014; Stöffler ym. 2018). Kuten kuvasta käy ilmi, jäävät pirstekartioiden synnyn minimipainetta osoittavat 1–2 GPa:n isobaarit kauaksi kraatterin reunalta. Mitä syvempi leikkaus kraatterista on näkyvillä, sitä lähempänä kuopan reuna on riittävän korkea šokkipainetta (ks. kuva 8). Tällaisissa yksinkertaistetuissa esityksissä sitä ei kuitenkaan koskaan saavuteta. Kuten tuoreessa kanadalaisvetoisessa katsausartikkelissa todettiin: *“...the majority of the in situ target rocks in simple craters available for sampling (i.e., the crater wall and rim) were not subjected to shock pressures capable of forming shatter cones...”* (Osinski ym. 2022). Juuri tässä piilee Suomen törmäyskraattereiden pirstekartioihin liittyvä ongelma: ne esiintyvät alueilla, joilla niiden ei liian alhaiseksi jäävän šokkipaineen vuoksi pitäisi olla mahdollisia syntyä.

Summanen on erinomainen esimerkki. Viime kesänä Satu Hietala kollegoineen (2023) julkaisi tutkimuksen, jossa tutkittiin kalliossa hieman nykyisen Summasen kuopan ulkopuolella esiintyvien pirstekartioiden šokkimetamorfisia piirteitä. Pirstekartioista löytyi kvartsin šokkilamelleja, jotka osoittivat 20 GPa:n maksimipainetta. Šokkiaallon heijastumis- ja interferointi-ilmiöt sekä esimer-



Kuva 8. Yksinkertaistettu esitys törmäyskraatterin synnystä, siinä esiintyvistä šokkipaineesta ja monien Suomen törmäysrakenteiden pirstekartioiden ongelmallisesta esiintymisestä. Törmäävä kappale on esitetty sekä suunnilleen alkuperäisessä koossaan että törmäyksessä deformatiivisena. Mustat ohuet käyrät esittävät šokkipaineen isobaareja eli samannäköisiä isobaareja gigapascalissa (punaiset lukuarvot). Nykäsituksen mukaan pirstekartioiden vaativat syntyäkseen vähintään 1–2 GPa:n šokkipaineen: Suomen pienten törmäysrakenteiden pirstekartioiden on löydetty kraatterin reunaksi tulkitulta alueelta tai sen ulkopuolelta, kaukana näistä isobaareista. Kuva muokattu enimmäkseen Kenkmann ym. (2014) ja Hörz ym. (1991) pohjalta.

Figure 8. A simplified presentation of impact crater formation, shock isobars and the problematic occurrence of shatter cones in several Finnish impact structures. Shatter cone formation requires >1–2 GPa shock pressure. Green: projectile (shown both in approximately correct pre-impact size and deformed within the transient cavity). In the figure yellow represents vapour, brownish red impact melt and tan brown ejecta. Red numbers and thin black lines show shock isobars in gigapascals. Red triangles visualise the problematic shatter cone occurrences in Finland. Red dashed line shows the current erosion level, pale yellow the displaced zone, and medium brown the excavated zone. Brownish orange line shows the final crater at the end of the crater formation process and dark brown line the true crater floor. Black horizontal line is the original ground level, thick black curve the transient crater and left brace the impact breccia zone. Modified mostly after Kenkmann et al. (2014) and Hörz et al. (1991).

kiksi huokosten kokoonpuristuminen voivat paikallisesti ainakin mikrokooppisella tasolla nostaa šokkipaineen moninkertaiseksi (mm. Zaag ym. 2016). Huomattavasti korkeampaa painetta osoittavat Summasen šokkilamellit korostavat kuitenkin suomalaiskraatterien pirstekartioiden liittävää ongelmallisuutta.

Saarijärvi toimii toisena esimerkkinä: sen nykyisen kuopan läpimitta on noin 1,5 km, mutta pirstekartioiden esiintymisalue laajentaa törmäysrakenteen noin 2,1 km:n läpimitaiseksi. Lisäksi osa pirstekartioiden esiintyvien kuopan luoteispuolen lohkeissa, joten länsiluoteesta virrannut jäätikkö on kuljettanut

niitä alkuperäisiltä sijoiltaan ainakin hieman kesemmäksi törmäysrakennetta. Samalla alue, jossa esiintyy viitteitä törmäyksestä, on tietysti pienentynyt alkuperäisestä (Öhman 2002). Alueen pirstekartioiden ei ole löydetty šokkilamelleja, mutta ne osoittavat vähintään 1–2 gigapascalin paineen vaikuttaneen tuntuvasti kauempana kuin kraatteroitumismallien perusteella voitaisiin olettaa.

Kraatterien reunoiksi tulkituilla alueilla tai niiden ulkopuolella esiintyvät pirstekartioiden ovat herättäneet hämmästyttävän vähän kysymyksiä, vaikka kaikki Suomen pienten törmäysrakenteiden pirstekartioiden on esitelty

vertaisarvioituissa julkaisuissa. Käsitkseni mukaan omien ihmetteljeni (Öhman 2002, 2007) lisäksi asiaan on julkaisuissa kiinnittänyt huomiota vain **Andreas Abels** väitöskirjassaan (Abels 2003).

Saarijärven (Öhman 2002, 2007), Lumparnin (Abels 2003) ja hieman tulkiten myös Karikkoselän (Arkonsuo 2000) kohdalla on ehdotettu, että tavanomaisen malja- tai kompleksikraatterien sijasta nämä edustaisivat niin sanottuja konsentrisia kraattereita. Konsentrisessa kraaterissa syvempää sisäkraatteria ympäröi hyvin matala ulkokraatteri. Tunnetuin esimerkki konsentrisesta kraatterista on Ruotsin Lockne. Tällaiset kraatterit syntyvät kerrokselliseen kohteeseen, jossa kovemman pohjan (esimerkiksi prekambriksen magma-kiven) päällä on huomattavasti pehmeämpi kerros (esimerkiksi vettä ja paleotsooisia sedimenttikiviä). Geologisten ja mineralogisten todisteiden valossa juuri tällaisen tilanteen on oletettu vallinneen Saarijärvellä, Lumparnilla ja Karikkoselällä kraattereiden syntyessä.

Olisiko mahdollista, että Suomen pienempien pirstekartiokraattereiden nykyisin havaittavissa olevat kuopat edustaisivat konsentristen kraatterien syviä sisäosia? Tämän mallin mukaan kuopan reunan ulkopuolella olevat pirstekartiot olisivat syntyneet ulkokraatterin pohjalla. Saarijärven osalta tätä on esitetty (Öhman 2002, 2007), mutta tarkemmat tutkimukset puuttuvat.

Keskeinen avoin kysymys tämän hypoteesin kannalta on, kuinka korkea šokkipaine voi pienen konsentrisen kraatterin ulkokraatterin pohjalla olla. Ruotsin kraatterien esimerkit osoittavat, että matalaan mereen tapahtuvassa törmäyksessä paine riittää kyllä synnyttämään ulkokraatterin alueelle breksioita, joissa sedimentin seassa on myös magmakivien kappaleita. Pirstekartioiden vaatima 1–2 gigapascalin paine on kuitenkin jo kyseenalaisempaa.

Numeerisella mallinnuksella saisi asiaan lisävalaistusta. Huomattavasti suurempia ker-

rokselliseen kohteeseen syntyneitä kraattereita onkin viime aikoina mallinnettu (mm. Hopkins 2019), mutta moderneja Suomen kraattereihin soveltuvia mallinnuksia ei ole tiettävästi tehty.

Mallinnuksen lisäksi Suomen pirstekartioita voisi tutkia lisää myös perinteisin menetelmin. Löytyykö Summasen lisäksi muidenkin pienten kraatterien pirstekartiosta korkeammasta paineesta todistavia šokkilamelleja tai muita šokin aiheuttamia mineralogisia merkkejä? Tarkempaa kenttätutkimustakin tarvitaan, sillä etenkin Lumparnin ja Suvasvesi Southin kalliopaljastumissa esiintyvät pirstekartiot ovat varsin heikosti kehitettyjä.

Vaikka syvällisempää tutkimusta ei tehtäisi Suomen pirstekartiosta, kannattaa geologisten ja muiden kivistä kiinnostuneiden kuitenkin pitää ne mielessä. Maassamme on varmasti vielä useita löytämättömiä törmäysrakenteita: pirstekartiot ovat helpoin tapa tunnistaa ne.

Kiitokset

Kiitos Jarmo Moilaselle, Jouko Ritalalle, Lauri J. Pesoselle, Satu Hietalalle, edesmenneelle Martti Lehtiselle sekä lukuisille kansainvälisille kollegoilleni vuosikymmenten varrella käydyistä ajatuksista herättäneistä pirstekartio- ja törmäyskraatterikeskusteluista. Kiitokset myös Johannes Baierille kuvista ja Steinheimin varhaisia tutkimuksia koskeneista tiedoista sekä Jarmo Korteniemelle Jänisjärven pirstekartiosta.

FT TEEMU ÖHMAN

(teemu.ohman@planetaryscience.fi)

Arctic Planetary Science Institute

Kirjoittaja on vapaa tutkija, joka innostui Kuun kraattereista jo lapsena ja on pähköillyt törmäyskraattereita maapallolla ja muilla planeetoilla akateemisemminkin reilun neljännesvuosisadan.

Summary

Shatter cones, a very Finnish problem

Shatter cones are a pervasive fracture phenomenon that results in roughly conical surfaces with diverging striations. They provide the only macroscopic diagnostic evidence for shock metamorphism and, hence, have been widely utilised in impact studies.

In Finland, shatter cones have been reported at least from Lappajärvi, Keurusselkä, Lumparn, Karikkoselkä, Saarijärvi, Suvasvesi South and Summanen structures. Lappajärvi and Keurusselkä occurrences are rather easily understood, because they are so fresh (Lappajärvi) or eroded (Keurusselkä) that the presence of shatter cones in the allochthonous breccia (Lappajärvi) and in the central uplift (Keurusselkä) is 'as expected'.

The smaller Finnish impact structures, however, present a problem: shatter cones are present on or beyond the edge of the current apparent crater. According to schematic presentations (Fig. 8) as well as numerical models, the shock pressure is roughly an order of magnitude too low there. In micro scale the shock pressure is known to be highly heterogeneous, but given how common the Finnish shatter cones are, it seems peculiar that this microscopic heterogeneity would be the macroscopic norm.

It has been suggested that Karikkoselkä, Saarijärvi and Lumparn were covered by a layer of water and/or sedimentary rocks at the time of the impact. Thus, they could represent concentric craters, where the shatter cone zone marks the innermost part of the outer crater characterised by shallow excavation. Field work and numerical modelling are encouraged to determine whether the shock pressure could be high enough in the outer crater to enable the formation of shatter cones and the higher pressure shock effects that they contain.

Lähdeluettelo

- Abels, A., 2003. Investigation of impact structures in Finland (Söderfjärden, Lumparn, Lappajärvi) by digital integration of multidisciplinary geodata. *Julkaisematon väitöskirja*. Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Münster, 292 s.
- Arkonsuo, A., 2000. Impaktimetamorfoosi ja Karikkoselän kraatteri Petäjäviedellä. *Julkaisematon pro gradu -tutkielma*. Geologian laitos, Helsingin yliopisto, Helsinki, 123 s.
- Baier, J., 2018. Zur Entdeckung und Deutung der Strahlenkalke (Shatter-Cones) im Steinheimer Impaktkrater. *Geohistorische Blätter* 29, 55–68.
- Baratoux, D., Bouley, S., Reimold, W. U. & Baratoux, L., 2016. Morphometric analysis and classification of the three-dimensional geometry of shatter cones. *Meteoritics & Planetary Science* 51, 1460–1476. <https://doi.org/10.1111/maps.12610>
- Baratoux, D. & Reimold, W. U., 2016. The current state of knowledge about shatter cones: Introduction to the special issue. *Meteoritics & Planetary Science* 51, 1389–1434. <https://doi.org/10.1111/maps.12678>
- Boon, J. D. & Albritton, C. C. Jr., 1936. Meteorite craters and their possible relationship to "cryptovolcanic structures". *Field & Laboratory V* (1), 1–9.
- Boon, J. D. & Albritton, C. C. Jr., 1937. Meteorite scars in ancient rocks. *Field & Laboratory V* (2), 53–64.
- Branco, W. & Fraas, E., 1905. Das kryptovolcanische Becken von Steinheim. *Abhandlungen der königlich preußischen Akademie der Wissenschaften, Physikalische Abhandlungen I*, 1–64.
- Bucher, W. H., 1932. Wells Creek Basin, Tennessee, a typical crypto volcanic structure. *Bulletin of the Geological Society of America* 43, 147–148. <https://doi.org/10.1130/GSAB-43-1>
- Cavosie, A. J., Alwmark, S., Baratoux, D., Consolmagno, G., Ferrière, L., ym., 2023. Inauguration of the Meteoritical Society Impact Cratering Committee. 86th Annual Meeting of the Meteoritical Society, #6086.
- Daly, R. A., 1947. The Vredefort Ring-structure of South Africa. *Journal of Geology* LV, 125–145. <https://doi.org/10.1086/625423>
- Dietz, R. S., 1947. Meteorite impact suggested by the orientation of shatter-cones at the Kentland, Indiana, Disturbance. *Science* 105, 42–43. <https://doi.org/10.1126/science.105.2715.42>
- Dietz, R. S., 1961. Vredefort Ring Structure: Meteorite impact scar? *Journal of Geology* 69, 499–516. <https://doi.org/10.1086/626768>
- Dietz, R. S. & Butler, L. W., 1964. Shatter-cone orientation at Sudbury, Canada. *Nature* 204, 280–281. <https://doi.org/10.1038/204280a0>
- Donadini, F., Plado, J., Werner, S. C., Salminen, J., Pesonen, L. J. & Lehtinen, M., 2006. New evidence for impact from the Suvasvesi South Structure, Central

- East Finland. Teoksessa: Cockell, C., Koeberl, C. & Gilmour I. (toim.), Biological processes associated with impact events. Springer-Verlag, 287–307.
- Ferrière, L., Raiskila, S., Osinski, G. R., Pesonen, L. J. & Lehtinen M., 2010. The Keurusselkä impact structure, Finland – Impact origin confirmed by characterization of planar deformation features in quartz grains. *Meteoritics & Planetary Science* 4, 434–446. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2010.01032.x>
- French, B. M. & Koeberl, C., 2010. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews* 98, 123–170. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.10.009>
- Gottwald, M., Kenkmann, T. & Reimold, W. U., 2020. Terrestrial impact structures, The TanDEM-X Atlas, 2, Asia, Australia, Europe. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, 607 s.
- Hargraves, R. B., 1961. Shatter cones in the rocks of the Vredefort Ring. *Transactions of the Geological Society of South Africa* 64 (1), 147–161.
- Hasch, M., Reimold, W. U., Raschke, U. & Zaag, P. T., 2016. Shatter cones at the Keurusselkä impact structure and their relation to local jointing. *Meteoritics & Planetary Science* 51, 1534–1551. <https://doi.org/10.1111/maps.12676>
- Hietala, S. & Moilanen, J., 2004. Keurusselkä – A new impact structure in Central Finland. *Lunar and Planetary Science XXXV*, #1619.
- Hietala, S., Jokinen, J., Lerssi, J., Niskanen, M., Pesonen, L. J. & Plado, J., 2023. Summanen structure: Further geological and geophysical evidence of a meteorite impact event in Central Finland. *Meteoritics & Planetary Science* 58, 1002–1017. <https://doi.org/10.1111/maps.14033>
- Hopkins, R., 2019. Numerical simulations of complex crater formation in layered and mixed targets. *Julkaisematon väitöskirja*. The University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, 166 s.
- Hörz, F., Grieve, R., Heiken, G., Spudis, P. & Binder, A., 1991. Lunar surface processes. Teoksessa: Heiken, G. H., Vaniman, D. T. & French, B. M. (toim.), *Lunar sourcebook – a user's guide to the Moon*. Cambridge University Press, 61–120.
- Kenkmann, T., Poelchau, M. H. & Wulf, G., 2014. Structural geology of impact craters. *Journal of Structural Geology* 62, 156–182. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.015>
- Lehtinen, M., 1969. Meteoriiitti-impaktiteoria ja Lappajärvi-muodostuma. *Julkaisematon lisensiaattityö*. Geologian laitos, Helsingin yliopisto, Helsinki, 140 s.
- Lehtinen, M., 1976. Lake Lappajärvi, a meteorite impact site in western Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 282, 5–92.
- Lehtinen, M., Pesonen, L. J., Puranen, R. & Deutsch, A., 1996. Karikkoselkä – a new impact structure in Finland. *Lunar and Planetary Science XXVII*, 739–740.
- Lehtinen, M., Pesonen, L. J., Stehlik, H. & Kuulusa, M., 2002. The Suvasvesi South structure, Central Finland: New evidences of impact. *Lunar and Planetary Science XXXIII*, #1188.
- Nicolaysen, L. O. & Reimold, W. U., 1999. Vredefort shatter cones revisited. *Journal of Geophysical Research* 104, 4911–4930. <https://doi.org/10.1029/1998JB900068>
- Osinski, G. R. & Ferrière, L., 2016. Shatter cones: (Mis) understood? *Science Advances* 2, e1600616. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600616>
- Osinski, G. R., Grieve, R. A. F., Ferrière, L., Losiak, A., Pickersgill, A. E., ym., 2022. Impact Earth: A review of the terrestrial impact record. *Earth-Science Reviews* 232, 104112. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104112>
- Plado, J., Hietala, S., Kreitsmann, T., Lerssi, J., Nenonen, J. & Pesonen, L. J., 2018. Summanen, a new meteorite impact structure in Central Finland. *Meteoritics & Planetary Science* 53, 2113–2426. <https://doi.org/10.1111/maps.13134>
- Stöffler, D., Hamann, C. & Metzler, K., 2018. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. *Meteoritics & Planetary Science* 53, 5–49. <https://doi.org/10.1111/maps.12912>
- Svensson, N.-B., 1993. Lumparn Bay: A meteorite impact crater in the Åland Archipelago, southwest Finland. *Meteoritics & Planetary Science* 28 (3), 445.
- Wieland, F., Reimold, W. U. & 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. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2006.tb00449.x>
- Zaag, P. T., Reimold, W. U. & Hipsley, C. A., 2016. Microcomputed tomography and shock microdeformation studies on shatter cones. *Meteoritics & Planetary Science* 51, 1435–1459. <https://doi.org/10.1111/maps.12673>
- Öhman, T., 2002. Kraatteroitumisprosessin merkit Saarijärven törmäyskraatterin alueella. *Julkaisematon pro gradu -tutkielma*. Geotieteiden laitos, Oulun yliopisto, Oulu, 180 s.
- Öhman, T., 2007. The origin and tectonic modification of the Saarijärvi impact structure, northern Finland. *Bridging the gap II: Effect of target properties on the impact cratering process*, September 22–26 2007, Saint-Hubert, Canada, 85–86.

Kuvan 5 pohjakartan tiedot:

GTK Avoin lisenssi Nimeä CC 4.0, sisältää GTK:n kallioperä 1:200 000 aineistoa. © Geologian tutkimuskeskus. Lisenssin osoite: <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.fi>