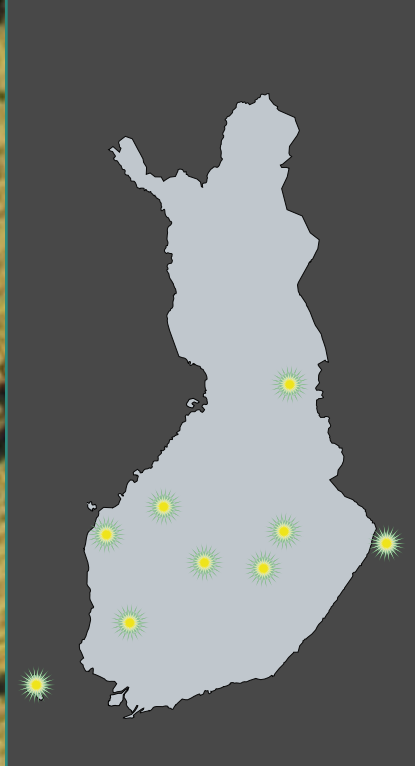




METEORIITTI- TÖRMÄYS- KRAATERIT

—
maan ja taivaan
kohtauspaikat

Martti Lehtinen

Koulussa opittiin aikoinaan, että Suomessa on kaksi tulivuoren kraateria tai kraaterijärveä, Jänisjärvi Laatokan pohjoispuolella ja Lappajärvi Etelä-Pohjanmaalla. Sodan seurauksena Jänisjärvi jäi rajan taakse, ja Lappajärvi todistettiin jo 1960-luvun lopulla (samoin kuin myöhemmin Jänisjärvikin) meteoriittitörmäyskraateriksi. Näin katosivat Suomesta nuoret tulivuoret kraatereineen ja kraaterijärvineen.

Suomesta on sen sijaan löytynyt jo kahdeksan meteoriittitörmäyskraateria eli lyhyesti törmäyskraateria. Kraatereista suurin ja kaunein on *Lappajärvi*, mutta myös *Sääksjärvi* Pohjois-Satakunnassa, *Söderfjärden* (Sulva) Vaasassa ja *Lumparn* Ahvenanmaalla ovat sangen komeita, sen sijaan *Iso-Naakkimaa* Savossa ei heti törmäyskraateriksi arvaisikaan. Viimeisimmät kraaterilöydöt ovat *Suvasvesi* Savosta ja *Karikkoselkä* Keski-Suomesta. Kesällä 1997 varmistui, että myös pieni *Saarijärvi* Taivalkoskella on törmäyskraateri.

Maapallolle putoaa vuodessa muutama tuhat nyrkinkokoista tai sitä suurempaa meteoriittia, niistä löydetään viisi tai kuusi. Viime vuosina meteoriitti on ainakin pari kertaa osunut autoon, ihmistä ei meteoriitin tiedetä surmanneen. Koostumuksensa perusteella meteoriitteja on kahta päätyyppiä eli kivi- ja rautameteoriitteja, lyhyesti vain *kiviä* ja *rautoja*. Nikkelipitoisten rautojen arvellaan vastaavan Maan ydintä, oliviinista ja pyrokseeneista koostuvien kivien Maan vaippaa. Suomesta on löydetty 13 meteoriittia, niistä kuuden on nähty putoavan.

Maan ehkä tunnetuin meteoriitin synnyttämä törmäyskraateri on Arizonan Meteor Crater (läpimitta n. 1 200 m ja ikä 49 000 vuotta). Suuri meteoriitti (asteroidi) voi Maahan törmätessään ja räjähtäessään aiheuttaa valtaisan tuhoa koko maapallolla, kuten tapahtui liitu- ja tertiäärikauden vaihteessa 66 miljoonaa vuotta sitten, jolloin nykyisen Meksikon alueelle (Chicxulub) törmännyt asteroidi aiheutti mm. dinosaurien joukkotuhon. Suuret meteoriittitörmäykset (räjähdyskraaterit) ovat onneksi harvinaisia. Lappajärven kaltaisia meteoriittitörmäyskraatereita tunnetaan Maasta tällä hetkellä vain runsaat 150.

12.1. Kraateritutkimuksen historiaa

Se alkoi Kuusta

Suurten meteoriittitörmäysten ja Maan meteoriitti(törmäys)kraatereiden tutkimuksessa on Kuu kraatereineen näytelty tärkeää osaa (Lehtinen 1982). Oikeastaan meteoriittikraateritutkimus alkoi Kuusta ja jo 1600-luvulla, kun englantilainen Robert Hook teki savi- ja kipsivellillä koikeita selvittääkseen Galileo Galilein 1610 löytämien Kuun kraatereiden alkuperän. Hooke päätyi vuonna 1665 siihen, että kraaterit ovat vulkaanisia. Tulos oli täysin ymmärrettävä, sillä tuolloin ei vielä tunnettu pikkuplaneettoja eikä meteoriiteistakaan tiedetty juuri mitään. Maapallolta sen sijaan tunnettiin runsaasti tulivuorenkraatereita. Kiista Kuun kraatereista ratkesi vasta 300 vuotta myöhemmin Apollo-lentojen myötä: kraaterit ovat pääosin meteoriittien ja asteroidien (eli pikkuplaneettojen) törmäysten synnyttämiä.

Varsinaisen meteoriittitutkimuksen katsotaan alkaneen vuonna 1794, kun saksalainen fysiikan professori Ernst Chladni esitti Berliinissä, etteivät meteoriitit ole mitään salaman iskemiä, tulivuoresta lentäneitä kiviä tai ilmakehän pölykasauksia, vaan ne tulevat maapallon ulkopuolelta. Ajatus tuomittiin ensin epämoraalisena ja maailmanjärjestyksen kieltävänä, mutta jo 1803 Ranskan Akatemia, aikansa johtava tieteellinen laitos, hyväksyi sen.

Kuin ydinpommin räjähdys

Vielä 1950-luvulla ajateltiin yleisesti, että meteoriittien synnyttämät kraaterit ovat vain vähän meteoriittia suurempia iskukuoppia. Geologit pitivät kraateria meteoriitin synnyttämänä vain, jos siitä löydettiin meteoriitin kappaleita. Näin ei suuria kilomet-

rien läpimittaisia törmäyskraatereita voitu löytääkään, sillä vain pieni tai pienellä nopeudella Maan ilmakehään saapuva meteoriitti tekee maahan vähän itseään suuremman kuopan, jonka pohjalta meteoriitti löytyy.

Asia on kokonaan toinen, jos meteoriitti (tai asteroidi) on suuri ja sen nopeus törmäyshetkellä on vielä esimerkiksi 30 – 40 km/s. Tällöin meteoriitti käyttäytyy kuin ydinpommi tai kokoon puristettu kaasupallo: se räjähtää. Ratkaisevaa on meteoriitin nopeus, sillä kappaleen liike-energia on suoraan verrannollinen massaansa ja nopeuden toiseen potenssiin. Eli meteoriitin massan kaksinkertaistuessa sen liike-energiakin kaksinkertaistuu, mutta nopeuden kaksinkertaistuessa liike-energia nelinkertaistuu.

Räjähdyksessä meteoriitin energia leviää meteoriittiin ja törmäysalustaan ääntä nopeampana paine- ja lämpöaaltona, ns. *shokkiaaltona*. Samanlainen shokkiaalto liittyy mm. maanalaisiin ydinräjäytyksiin ja monet kraateritutkimuksessa tärkeät mineraalien muuttumisen merkit onkin löydetty tutkimalla maanalaisten ydinräjäytysten synnyttämiä muutoksia ympäristön kivissä. Shokkiaalto vaikuttaa kiven mineraalirakenteeseen vain sekunnin miljoonasosia, mutta äärimmäisen voimakkaana se ehtii kuitenkin rikkoa mineraalien kiderakenteita ja synnyttää uusia korkeapainemuotoja.

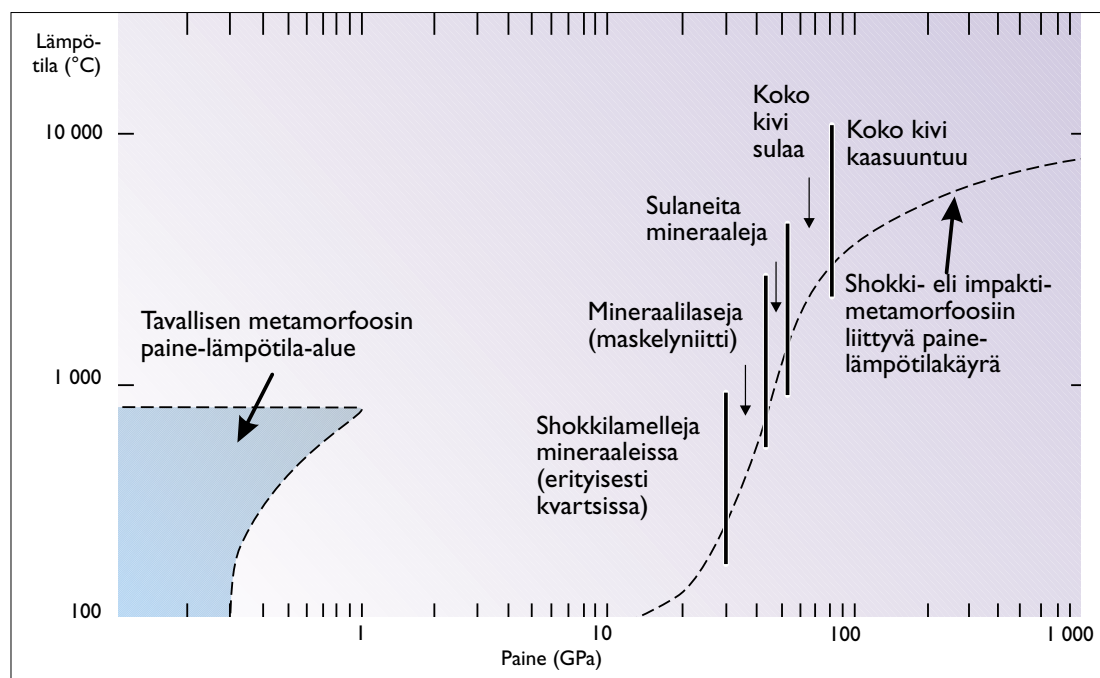
Kokeissa ja teoreettisissa laskelmissa havaittiin lisäksi, että voimakkaaseen shokkiaaltoon liittyy aina korkea lämpötila: kivet sulavat ja kaasuntuuvatkin. Räjähtävä meteoriitti synnyttää näin muutamassa sekunnin murto-osassa kraaterin, joka on läpimitaltaan 10 – 50 kertaa meteoriittia suurempi. Räjähdyksessä rikkoutuvan, sulavan tai kaasuntuuvan kallioperän ja meteoriitin ainekset sekoittuvat ja lopputuloksena saatetaan syntyä kokonainen sarja hyvin erikoisia kiviä, jotka paljain silmin katsottaessa saattavat kyllä muistuttaa laavakiviä.

Palapelin kokoaminen

Törmäyskraaterin tutkiminen on kuin palapelin kokoamista. Palapelin näkyvin pala on tietysti itse kraateri. Nuori törmäyskraateri on aluksi pyöreä, mutta myöhemmin näkyvän kraaterin muotoa muuttavat mm. kallioperän deformaatio, rapautuminen ja kiviaineksen kerrostuminen kraateriin ja sen ympärille jopa niin, ettei kraateria ole enää kartalla tai ilmakuvissa näkyvissä.

Shokkiaallon synnyttämän shokki- eli impaktimetamorfoosin merkit alkavat näkyä kivissä vasta, kun paine ylittää 10 GPa, samalla kun lämpötila voi kohota tuhansiin asteisiin. Palapelin monissa palasissa onkin runsaasti todisteita korkeista paineista ja lämpötiloista. Tavallisissa geologisissa prosesseissa – esim. tulivuoritoiminnassa tai vuorijononmuodotuksessa – paine on aina alle 1 GPa ja lämpötila alle 1 200 °C (vrt. Kuva 12.1).

Korkean paineen merkit näkyvät mineraaleissa. Kvartsista voi syntyä *coesiittia* ja *stishoviittiä*, grafiitista (hiilestä) *timantteja* tai *chaoiittia*. Korkea paine ja paineen äärimmäisen nopea muutos myös rikkovat mineraalien kiderakenteita, jolloin varsinkin kvartsiin syntyy erikoisia lamelleja, *shokkilamelleja* (Kuva 12.2). Shokkilamellit näkyvät kvartsissa lähekkäisinä, yhdensuuntaisina ja jyrkkärajaisina tasoina, joiden suunnat määrää kiderakenne ja paineaallon voimakkuus. Merkittävää on myös se, että kvartsirakeessa on vähintään kaksi toisiaan leikkaavaa tasoparvea. Shokkilamelleja on tavattu monissa muissakin mineraaleissa kuten maasälvissä, pyrokseeneissa, sillimanii-tissa, granaateissa, zirkonissa ja apatiitissakin. Suomuisiin kiillemineraaleihin ja grafiittiin voi syntyä myös *sykkyräpöimuja* (engl. *kink band*), joissa kiilteen suomupinkka on kuin mutkilla. Samankaltaisia poimuraken-



Kuva 12.1. Paine ja lämpötila tavallisessa ja shokki- eli impaktimetamorfoosissa. Tavallisessa metamorfoosissa kohonnut paine ja lämpötila vaikuttavat kivessä jopa vuosimiljoonia, shokkimetamorfoosissa vain sekunteja tai sen murto-osia. Kuva piirretty Stöfflerin (1971) mukaan.

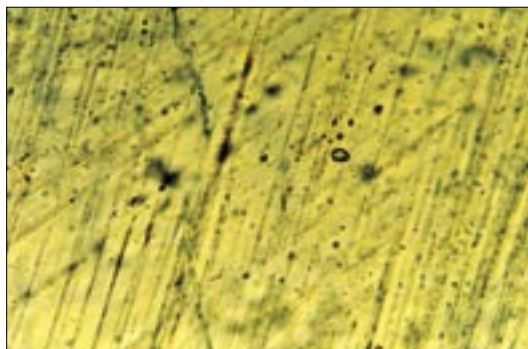
teita voi kiilteeseen syntyä toki kallioperän liikunnoissakin.

Paineaalto saattaa rikkoa mineraalin myös suoraan lasiksi ilman, että se sulaa. Tällainen maasälpälasi löydettiin jo 1872 meteoriitista. Sitä luultiin uudeksi mineraaliksi ja sille annettiin oma nimikin, *maskelyniitti*. Kraaterin reunan kiviin voi heikentynyt paineaalto synnyttää kartiomaisia rikkoutumISRakenteita, *pirstekartioita* (Kuva 12.3), joiden kärki näyttää usein kraaterin keskisteeseen.

Korkean lämpötilan merkit näkyvät räjähdysen synnyttämässä laavamaisissa kivilajeissa. Kun sulavan kallioperän ainekset ja meteoriitti sekoittuvat ja mukaan joutuu myös sulamattomia tai osittain sulaneita kivenkappaleita ja -siruja, syntyy laavamaisia kiveä, *impaktiilaavaa*. Lappajärvellä tällaista kiveä kutsutaan *kärnätiiksi*. *Sueviitti* on kivilaji, joka koostuu räjähdyksessä ilmaan lentäneestä kiviaineksesta. Siinä on sekaisin kivimurskaa ja sulaneen kiven pommimaisia heitteitä. Näissä heitteissä näkyy virtausrakenteita (Kuva 12.4). Sueviitti ja impaktiilaava vaihtuvat toisikseen. Sueviitti vaihtuu myös breksiaksi (murskalekiveksi), joka on yhteeniskostunutta kivimurskaa. Tällaisen breksian kvartsisiruissa voi esimerkiksi nähdä shokkilamelleja ja kiilteissä sykkyräpoimuja.

Koska impaktiilaava ja sueviitti syntyvät törmäyskohdan kallioperästä, täytyy niiden kemiallisen koostumuksen olla selitettävissä ympäröivän kallioperän koostumuksen avulla. Koska meteoriitti on kraateriin nähden pieni, sen vaikutus koostumukseen näkyy vain eräiden hivenalkuaineiden kuten nikkelin, koboltin, platinan tai iridiumin kohdalla. Näiden hivenalkuaineiden paljous-suhteiden avulla voidaan toisinaan määrittää meteoriittityypin.

Kraateripalapeliin kuuluu myös joukko geofysikaalisia palasia, todisteita nopeista muutoksista kivilajeissa ja törmäyspaikan kallioperässä. Räjähdyksessä rikkoutunut



Kuva 12.2. Kaksi parvea shokkilamelleja rapakivigraniitin kvartsissa Lumparnin kraaterissa Ahvenanmaalla. Mikroskooppikuvan pitkä sivu on luonnossa 0,45 mm. Kuva Martti Lehtinen.

(murskautunut tai vain rakoillut) kallioperä on ehjää kiveä kevyempää. Tämä näkyy painovoimakartassa poikkeamana, pyöreänä anomaliana, josta saadaan selville kraaterin koko. Myös magneettisessa kartassa voi törmäyskraaterin kohdalla näkyä anomalia, rikkoutumisesta johtuva magneettisten häiriöiden tasoittuminen, tai, jos kraaterissa on impaktiilaavaa, pyöreä magneettinen kohouma. Rikkoutumiseen voi liittyä myös kiven magneettisten hiukkasten kääntyminen ja asettuminen törmäyshetkellä vallitsevan Maan magneettisen kentän mukaan. Tätä voidaan hyödyntää törmäyksen ikää määrittäessä (paleomagneettinen mittaus).

Suuret Maan ja Kuun kraaterit ovat muodoltaan rengasrakenteisia. Kraaterin alkupe-
räiset reunat ovat ikäänkuin vajonneet sen sisään, tai kraaterissa voi olla keskuskohouma, jonka kohdalla maankuori on törmäyksen jäljiltä kohonnut ylöspäin.

Arvoitukset ratkeavat

Maapallolla on kaksi klassista esimerkkiä arvoituksellisista kraatereista, joiden synnystä kiisteltiin pitkään. *Arizonan kraateri*, Meteor Crater, on geologisesti hyvin nuori (ikä 49 000 vuotta) ja hyvin säilynyt. Kraa-



A



B

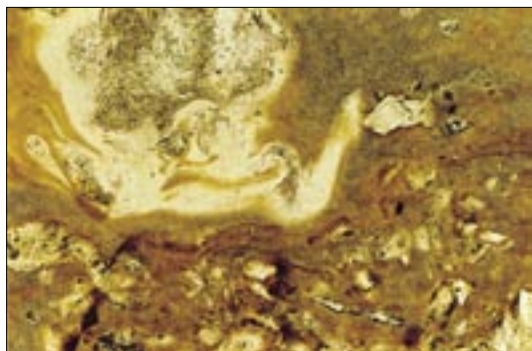
Kuva 12.3. (A) Pirstekartio kalkkikivessä, Steinheim, Saksa. (B) Pirstekartio graniitissa, Karikkoselkä, Petäjävesi. Linssisuijuksen läpimitta on 5 cm. Kuvat Martti Lehtinen.

terin läpimitta on runsaat 1 200 m ja syvyys lähes 200 m. Kraateria pidettiin aluksi vulkaanisena, kaasu- ja höyryräjähdysen synnyttämänä, vaikka sen ympäriltä olikin jo vuonna 1891 löytynyt rautameteoriitin kappaleita.

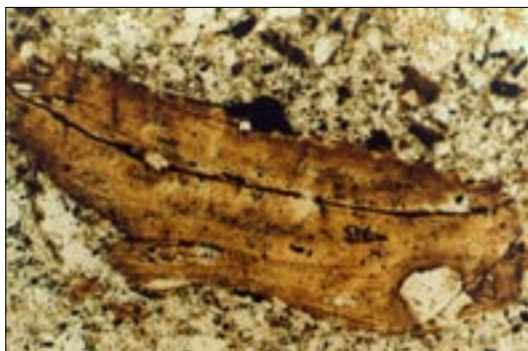
Kaivosinsinööri Daniel Barringer tutki Arizonan kraateria vuosina 1902 – 1929. Hän oli vakuuttunut, että kraaterin synnytti suuri, ehkä kilometrin läpimittainen rautameteoriitti ja että sen pääosa oli vielä jäljellä, hautautuneena jonnekin kraaterin pohjalle. Pohjan kairauksissa ei kuitenkaan löytynyt jälkeäkään suuresta rautamöykystä. Eikä ihme, sillä vuonna 1929 osoitti tähtitieteilijä

F.R. Moulton, että kraaterin synnyttänyt meteoriitti olikin läpimitaltaan vain 25 – 50 m. Meteoriitti törmäsi maahan *kosmisella nopeudella*. Seuranneessa valtavassa räjähdyksessä meteoriitti tuhoutui täysin.

1960-luvun alussa amerikkalainen geofyysikko E.M. Shoemaker selvitti kraaterin syntymekanismien ja geologi Ed Chao löysi kraaterin ”kovia kokeneesta” hiekkakivestä kaksi uutta mineraalia, coesiitin ja stishoviitin, jotka olivat syntyneet kvartsista äärimmäisen korkeissa paineissa. Näitten mineraalien löytymistä pidetään erittäin vakuuttavana todisteena siitä, että Arizonan kraateri – tai mikä tahansa vastaava kraateri



A



B

Kuva 12.4. (A) Virtausrakenteista lasia Lappajärven sueviitissa. (B) Virtausrakenteinen lasinkappale Suvasveden (Kukkarinselkä) sueviitissa. Mikroskooppikuvien pitkä sivu on luonnossa n. 0,9 mm. Kuvat Martti Lehtinen.

– on meteoriitin synnyttämä.

Riesin kraateri (Nördlinger Ries) Etelä-Saksassa on syntynyt 14,7 miljoonaa vuotta sitten. Kraaterin läpimitta on 25 km. Kraateri ja sieltä löytynyt erikoinen kivilaji, sueviitti, kuvattiin ensi kerran jo 1830-luvulla, mutta koska Riesistä ei löytynyt selviä merkkejä tulivuoritoiminnasta eikä meteoriitin kapaleita, siitä muodostui saksalaisille ”suuri geologinen arvoitus”. Arvoitus ratkesi vasta 1960-luvun alussa, ja nykyään Ries on eräänlainen suurten törmäyskraatereiden perustyyppi.

Uppsalan yliopiston geologian professori A.G. Högbom esitti – ehkä Barringerin tutkimusten innoittamana – v. 1910, että Ruotsissa Mienin ja Dellenin ”tulivuorijärvet” ovat meteoriittikraatereita. Ajatus oli rohkea ja aikaansa edellä; se jäikin unhoon puoleksi vuosisadaksi. Uudet kraateritutkimukset aloitettiin Ruotsissa 1960-luvun alussa professori Frans Wickmanin johdolla. Ruotsista tunnetaankin jo toistakymmentä törmäyskraateria, niistä suurin on rengasrakenteinen *Siljan*, sen läpimitta on noin 60 km.

12.2. Suomen törmäyskraaterit (meteoriittitörmäyskraaterit)

Suomesta tunnetaan tällä hetkellä yhteensä kahdeksan meteoriittitörmäyskraateria. Niiden sijainti on esitetty *Kuvassa 12.5*. Kraatereista viiden ikä tunnetaan, nuorin näistä on Lappajärvi (77 miljoonaa vuotta) ja vanhin ilmeisesti Iso-Naakkima (n. 1 200 miljoonaa vuotta).

Lappajärvi, Etelä-Pohjanmaa

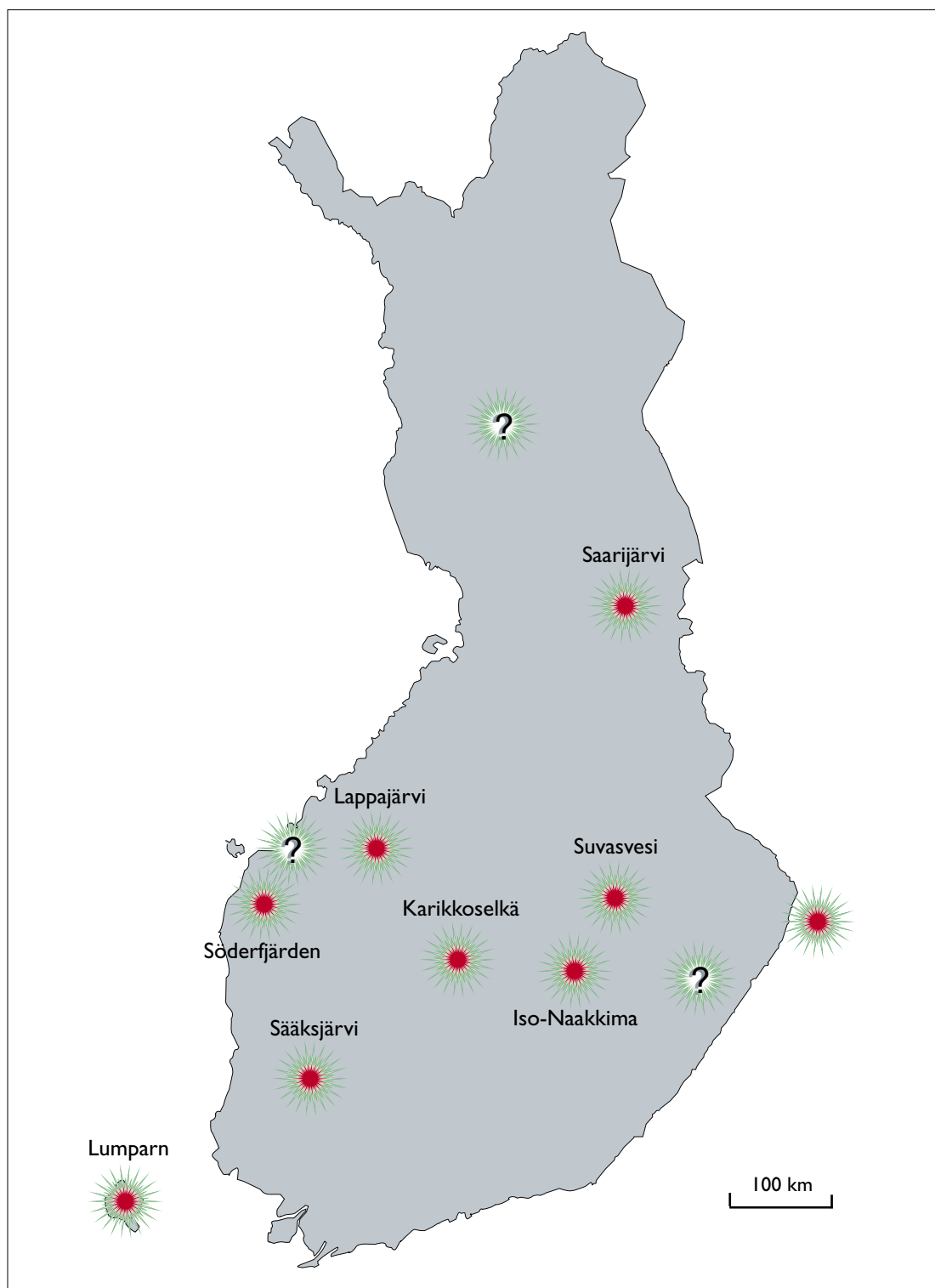
Vielä 1960-luvulla Lappajärveä pidettiin tulivuoren kraateriin syntyneenä järvenä. Esimerkiksi kirjassa ”Suomen geologia” pro-

fessori Ahti Simonen 1964 kirjoittaa sivulla 115 seuraavasti: ”Lappajärven Kärnäsaarella on todisteita muinaisesta vulkaanisesta toiminnasta. Siellä on tiivistä vulkaanista kiveä, joka sisältää maasälpähajarakkeita ja ... pieninä murskaleinä erittäin runsaasti ympäristön peruskallion kiteisiä kivilajeja. Tämä osoittaa, että kivi on vulkaaninen breksia, joka syntyi magmaan liuenneiden kaasujen erkaantuessa kivisulasta räjähdysten kaltaisen purkauksen aikana.”

Lappajärven kraaterin uusi tutkimus alkoi Suomessa vasta keväällä 1967, kun professori Th.G. Sahama palasi matkaltaan Saksasta. Hän oli siellä tammikuussa ja uudelleen maaliskuussa, jolloin hän osallistui mm. retkeilyyn edellä mainitun Riesin törmäyskraaterin alueella. Heiluvassa junassa Tübingenin ja Zürichin välillä Sahama kirjoitti 15.1.1967 matkapäiväkirjaansa: ”Käynti Tübingenissä aiheuttaa sen, että Lappajärveä on vakavasti harkittava. Siitä on ensin saatava esiin coesiitti. Sitten voi Lehtinen tehdä siitä lisensiaattityön.” Coesiitti löytyikin kesällä 1968, ja lisensiaattityö valmistui syyskuussa 1969.

Myöhemmin Lappajärvestä on tehty kaksikin väitöskirjaa (Lehtinen 1976a sekä Reimold 1982). Lehtinen tutki erityisesti Lappajärven kivilajeja ja niiden mineraaleja, Reimold Saksassa Lappajärven kivien geokemiallisia ominaisuuksia. Saksassa (Jesserberger ja Reimold 1980) myös määritettiin argon-argonmenetelmällä Lappajärven kärnäitin ja siis kraaterin ikä: tulos on 77,3 miljoonaa vuotta. Kraaterin synty varmistettiin vielä syväkairauksin (4 reikää) vuosina 1988 – 1990 (Pipping 1991, Pipping ja Lehtinen 1992). Lisäksi Lappajärvestä on tehty useita geofysikaalisia tutkimuksia (mm. Elo ym. 1991 ja 1992), joiden perusteella alkuperäisen kraaterin läpimitaksi on päätelty 17 km. Koko painanteen läpimitta on tällä hetkellä noin 24 km.

Lappajärveltä on löydetty tai Lappajärven törmäyskraateriin liittyy liki kaikki



Kuva 12.5. Suomen törmäyskraaterit (tilanne syksyllä 1997) sekä Jänisjärvi itärajan takana. Kysymysmerkki Paasiveden, Vaasan Kalotfjärdenin ja Lapin Marras-rakenteen kohdalla.

törmäyskraatereille ominaiset piirteet ja todisteet (palapelin palaset). Lappajärveltä löytyy kärnäitiin lisäksi kokonainen sarja törmäyksessä (räjähdyksessä) syntyneitä kivilajeja kivimurskasta (breksiasta) sueviittiin asti. Nämä kivilajit vaihtuvat toisiinsa ja ovat syntyneet äärimmäisen nopean rikkoutumisen, sulamisen, sekoittumisen ja osin nopean jäähtymisenkin tuloksena (Lehtinen 1976a, Bischoff ja Stöffler 1984). Tästä kertoo esimerkiksi se, että niissä saattaa olla rinnan tuore kiillesuomu ja sulanut maasälpäkappale; yhdessä pienessä lamelleja sisältävässä kvartsisirussa voi olla myös coesiittia, tridymiittia ja sulamalla syntynyttä kvartsilasia.

Mineralogisia todisteita ovat coesiitti, maskelyniitti sekä shokkilamellit (lamelliparvet) kvartsissa ja muissakin (maasälvät, sillimaniitti, apatiitti, granaatti, zirkoni) mineraaleissa. Tähän voidaan lukea myös kiillemineraalien ja grafiitin sykkyräpöimut (Lehtinen 1976a ja b).

Lappajärven kivistä (ympäristön ja törmäyspaikan kallioperä, kärnäittipaljastumat ja kairasydännäytteet) on tehty suuri määrä kemiallisia analyysejä. Kärnäittipaljastumista (Lehtinen 1976a ja Reimold 1982) ja kairasydännäytteistä (Lehtinen 1990 ja 1991, Pipping 1991, Pipping ja Lehtinen 1992) tehdyt analyysit kertovat, että kärnäitti on hyvin homogeeninen kivilaji, joka on syntynyt ennen muuta kiillegneissin ja granodioriitin mutta myös graniitin ja amfiboliitin sulaessa ja sekoittuessa. Mukana on myös ”riipaus taivaallista tavaraa”, meteoriittiaineesta, mikä näkyy huomattavasti kohonneina nikkelin, koboltin, kromin ja platinametallien (mm. iridiumin) pitoisuuksina. Näiden metallien paljousuhteet puolestaan osoittavat, että Maahan törmännyt taivaankappale oli kondriittinen kivimeteoriitti (Göbel ym. 1980), jonka läpimitta oli ehkä 300 – 500 m.

Lappajärven kairaukset ja geofysikaaliset tutkimukset (mm. Pipping 1991, Elo

ja Jokinen ym. 1991 ja 1992) paljastivat, että Lappajärvi on kompleksinen kraateri, ts. siinä on kärnäitiin ja sueviitin muodostama keskuskohouma, jota kiertää rengasmainen painauma (graben). Alueella on meteoriittitörmäyksen sattuessa ollut vanhoja mikrofossiilipitoisia (Uutela 1990) sedimenttikiviä (silttikiveä ja hiekkakiveä), jotka ovat kraaterin syntyessä vajonneet reunoilta painaumaan (Pipping ja Lehtinen 1992) ja säilyneet paksujen (jopa 75 m) maaperäkerrosten alla.

Sääksjärvi, Pohjois-Satakunta

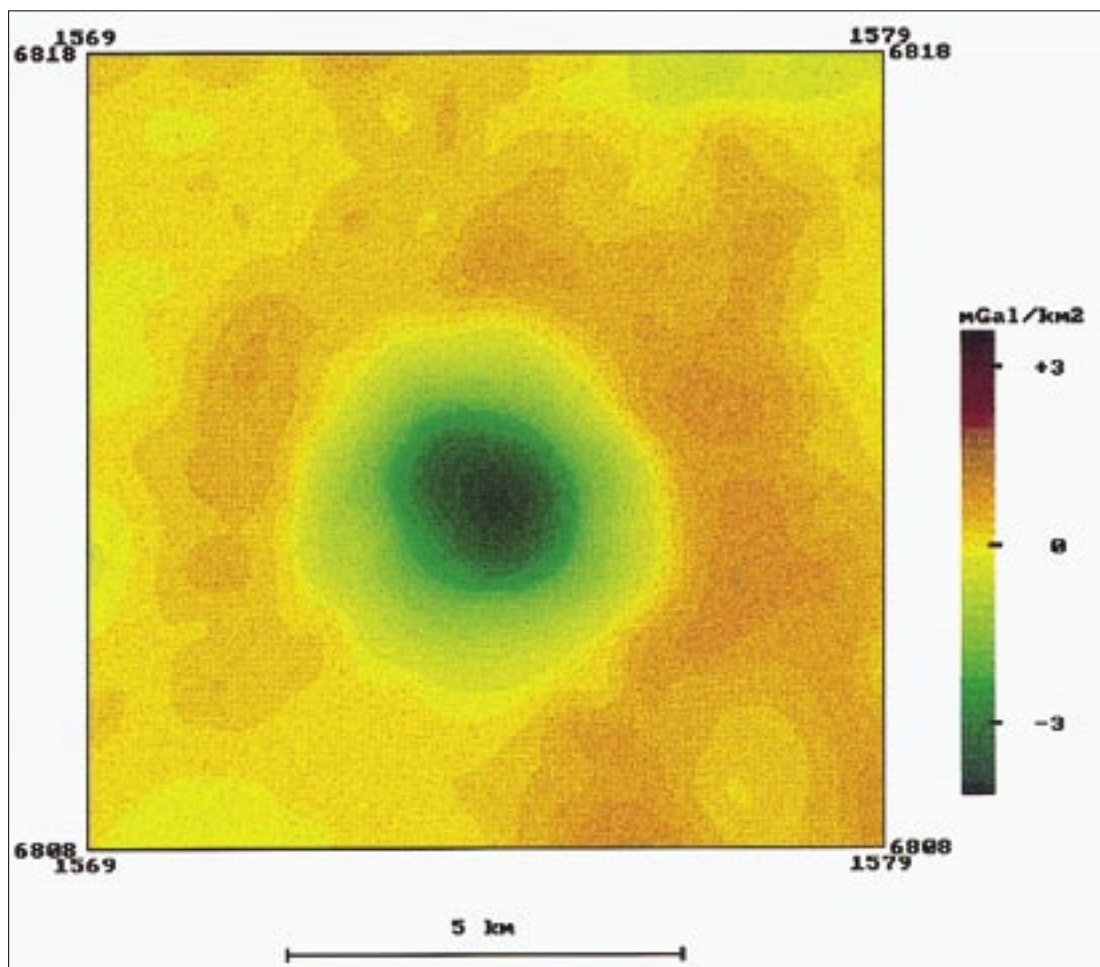
Huittisten ja Kokemäen seudun erikoiset laavamaiset, akaattipitoiset lohkarieet paikallistettiin 1960-luvun lopulla Kokemäen Sääksjärveen (Kinnunen 1994). Mineralogi Yrjö Vuorelainen arveli niiden olevan kimberliittia, mutta professori Heikki Papunen määritteli ne 1969 shokkimetamorfisiksi kiviksi, jotka ovat syntyneet joko meteoriittitörmäyksessä tai räjähdysmäisessä vulkaanisessa purkauksessa. Lohkareista löytyi mm. shokkilamelleja täynnä olevia kvartsirakeita, plagioklaasista syntynyttä maskelyniittia ja sykkyräpöimuisia kiillesuomuja. Myös mikrorakenteeltaan kivet muistuttavat suuresti esimerkiksi Lappajärven breksioita, kärnäittia ja sueviittiäkin.

Sääksjärveä ympäröivä kallioperä koostuu lähinnä suonigneisseistä, tonaliittista ja granodioriittista. Koska lohkarieet sisältävät keskimäärin selvästi enemmän kaliumia ja piitä mutta vähemmän kalsiumia kuin järveä ympäröivä kallioperä, arveli Papunen 1973, että Sääksjärvi olisi syntynyt ”vain” jonkinlaisen vulkaanisen räjähdysksen tuloksena. Tapani Mutanen osoitti kuitenkin 1979, että koostumuserot voidaan selittää siten, että paikalla oli peruskallion päällä hiekkakivikerrostumia (Satakunnan hiekkakiviä). Irtokivinä löydetty lohkarieet vastaavat alueen peruskallion kivien ja hiekkakivien sekoittuessa syntynyttä sulaa. Kivi on myös

hemmin kuumien liuosten vaikutuksesta – akaattien syntyessä – vielä kemiallisesti muuttunut.

Uudet geofysikaaliset tutkimukset, ikämääritykset sekä ennen muuta jäältä tehdyt kairaukset ja kairasydänten kivilajien (sueviitti, impaktilaava ja breksiat) alustavat tutkimukset (Elo ym. 1992) ovat varmistaneet Sääksjärven törmäyskraateriksi. Myös impaktilaavan ja sueviitin kohonneet iridium-, palladium-, nikkeli-, koboltti- ja kromipitoisuudet osoittavat, että nämä

kivilajit syntyivät, kun meteoriitti sekoittui räjähdyksessä peruskallion kiviin. Kraaterin läpimitta on noin 5 km. Siihen liittyy mm. kaunis pyöreä painovoima-anomalia (*Kuva 12.6*), magneettinen anomalia (magneettisten häiriöiden tasoittuminen) sekä sähköisiä anomaliaita. Kraaterin iäksi on Saksassa (Müller ym. 1990) saatu noin 560 miljoonaa vuotta.



Kuva 12.6. Sääksjärveen liittyvä negatiivinen painovoima-anomalia (Elo ym. 1992). Kartta on laskettu mittaustuloksista poistamalla niistä alueellinen muutos, jolloin itse kraateriin liittyvä anomalia tulee selkeästi näkyviin.

Söderfjärden, Vaasa

Söderfjärdenin eli Sulvan kraateri löydettiin satelliittikuvien perusteella 1970-luvun puolivälissä (Talvitie ym. 1975 ja Laurén ym. 1978). Kraateri sijaitsee 8 km Vaasan keskustan eteläpuolella ja on nykyisin kuivattu peltoaukeama, jonka muoto on kuusikulmainen ja läpimitta noin 5,5 km. Kraaterin reunavalli kohoaa 20 – 40 m merenpinnan yläpuolelle. Söderfjärdeniin liittyy pyöreähkö negatiivinen painovoima-anomalia.

Kairauksen (7 reikää) ja seismisten luotausten perusteella tiedetään, että Söderfjärdenin kraaterissa on paikoin jopa 74 m paksut kvartäärikerrostumat. Kraateri on yli 300 m syvä rengasmaisen allas, jossa on keskuskohouma niin, että syvyys keskellä on vain 30 – 40 m (Laurén ym. 1978, Lehtovaara 1984, 1985 ja 1992). Kraateri on syntynsä jälkeen täyttynyt nopeasti savivaltaisilla sedimenteillä, jotka ovat kovettuneet vuorotteleviksi hiekka-, siltti- ja savikiviksi. Niistä löytyneitten mikrofossiilien ja muiden elämänmerkkien perusteella on päätelty (Tynni 1978), että sedimentit kerrostuivat jo varhaiskambrikaudella eli noin 550 – 600 miljoonaa vuotta sitten.

Tähän mennessä on löydetty (Laurén ym. 1978, Lehtovaara 1984, 1985 ja 1992) vain heikkoja merkkejä meteoriittitörmäyksestä (shokkimetamorfoosista). Laavamaista, siis esimerkiksi kärnäiitin kaltaista kiveä tai sueviittia ei Söderfjärdenistä ole tavattu. Kairauksissa löytyi kyllä breksioita, jotka ovat syntyneet paikallisesta kallioperästä ns. Vaasan graniitista, joka on harmaa gneissimäinen granaattipitoinen kivi. Breksioissa näkyy kvartsissa selviä shokkilamelleja (lamelliparvia) ja biotiitissa sykkyräpoimuja. Kraaterin synnyn kannalta merkittävä on kraaterin alla graniitissa juonimaisesti esiintyvä tuffimainen breksia (juonibreksia), joka on syntynyt nopeasti rikkoutuneesta ja jauhautuneesta Vaasan graniitista.

Lumparn, Ahvenanmaa

Ahvenanmaalla fossiileja tutkinut yhdysvaltalainen paleontologi Glen Merrill esitti jo 1979, että Lumparn (läpimitta n. 10 km) voisi olla törmäyskraateri. Hänen todisteensa olivat sen verran viitteellisiä tai epäsuoria, ettei niitä otettu tuolloin kovin vakavasti.

Kesällä 1992 löysi ruotsalainen geologi Nils-Bertil Svensson Lumparnin kallioista pirstekartiota. Selvimmät pirstekartiot ovat Lumparnin lounaisnurkan rantakallioissa. Lumparnia oli kyllä tutkittu ja kairattu 1960-luvulta alkaen mutta vain sieltä löydetyn kambrikautisen kalkkikiven takia. Keväällä 1993 löysin noista vanhoista Lumparnin kairasydämistä graniittisia breksioita ja niistä paikoin runsaastikin kvartsirakeita, joissa on selvät shokkilamellit (ks. *Kuva 12.2*), sekä sueviittista kiveä. Näin Lumparn varmistui törmäyskraateriksi.

Lumparn sijaitsee rapakivigraniitissa. Se on hyvin syvälle rapautunut kambrikautta vanhempi kraateri, jonka ikä lienee noin 1 000 miljoonaa vuotta.

Iso-Naakkima, Pieksämäki

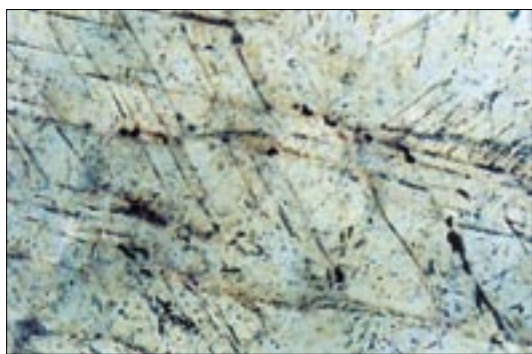
Pieksämäen maalaiskunnasta löydettiin vuonna 1989 painovoimamittausten avulla pyöreä negatiivinen poikkeama, jonka halkaisija on noin 2 km. Alustavissa tutkimuksissa tämän Iso-Naakkimajärven luoteisrannalla olevan painovoimaminimin arveltiin johtuvan joko taloudellisesti arvokkaasti kaoliinirapautumasta tai meteoriitin törmäyksessä syntyneestä kraaterista, joka on täyttynyt kivimurskalla ja nuoremmilla sedimenttikivillä.

Vuonna 1990 Geologian tutkimuskeskus kairasi alueelle neljä reikää, jotka osoittivat, että maljamaisen kraaterin syvyys on runsaat 140 m. Kraaterin alla on kiillegneissia (suonigneissia), josta löytyi parista kohtaa (189 ja 158 metrin syvyydeltä) voimakkaasti breksioitunutta kiveä (juonibreksiaa). Lähellä kraaterin pohjaa kiillegneissi on

rapautunutta ja rikkoutunutta. Pohjalla on ensin liki kolmimetrisen kerros konglomeraattista hiekkakiveä. Sen päällä on kerros kaoliinisavea ja kvartsihiekkakiveä sekä yli 26 metriä paksu punertava silttikivikerros. Silttikiveä seuraa noin 100 metrin syvyydessä kerros hiekkakiveä. Sen päällä on 10 metriä punaista saviliusketta ja ylinnä yli 30 metriä paksu kerros violettiä saviliusketta, joka sisältää runsaasti myöhäisproterotsooisia (noin 600 – 1 000 miljoonaa vuotta vanhoja) mikrofossiileja. Kaikki nämä sedimenttikivet ovat peräti 40 metriä paksujen, jääkaudella kerrostuneiden hiekka- ja moreenikerrosten peittämiä (Elo ym. 1993).

Iso-Naakkiman synnyn suhteen on merkittävää, että aivan kraaterin pohjalta löytyi kerros konglomeraattista hiekkakiveä, jonka lähes kaikissa kvartsirakeissa on runsaasti todisteita shokkiaallosta eli shokkilamelilleja tai lamelliparvia (*Kuva 12.7*). Lisäksi kraaterin alapuolella on kallioperässä murskautuneen kiven täyttämiä juonia kuten Söderfjärdenin kraaterissakin.

Yläosan saviliuskeen sisältämien mikrofossiilien perusteella Iso-Naakkiman kraateri on hyvin vanha ja syvälle kulunut, alustavien paleomagneettisten tutkimusten mukaan (Järvelä ym. 1995) sen ikä on n. 1 200 miljoonaa vuotta. Meteoriiitin törmäyksessä syn-



Kuva 12.7. Shokkilamelilleja ja -lamelliparvia Iso-Naakkiman kvartsissa. Mikroskooppikuvan pitkä sivu on luonnossa n. 0,45 mm. Kuva Martti Lehtinen.

tnyt ja myöhemmin rapautunut allas täyttyi sorasta, hiekasta ja savesta, jotka aikojen kuluessa kovettuivat konglomeraatiksi, hiekkakiveksi, silttikiveksi ja saviliuskeeksi. Myöhemmissä maankuoren liikunnoissa allas vajosi, ja näin sedimenttikivikerrostumat ovat säilyneet nykypäiviin asti.

Suvasvesi, Savo

Suvasvesi koostuu kahdesta pyöreähköstä järvestä Kukkarinselästä (läpimitta n. 4 km) ja sen eteläpuolella olevasta Haapaselästä (läpimitta n. 5 km). Suvasvesi voi näin olla harvinainen *kaksoiskraateri* kuten Clearwater Lakes Kanadassa. Järvi sijaitsee etelä- ja keskiosiltaan svekofennisen (graniitteja, suonigneissejä ja liuskeita) ja pohjoisosaltaan arkeaisen (graniitteja) kallioperäalueen rajalla. Kesällä 1995 tehdyissä kenttätöissä ei Kukkarinselän rantakallioista löydetty merkkejä pirstekartioista, mutta kenttätutkimuksia vaikeuttaa alueen pohjoisosan halki kulkeva suuri ruhjevyöhyke.

Kukkarinselkä on oloissamme poikkeavan syvä järvi, sen suurin syvyys on lähes 100 m. Järven keskustaan liittyy voimakas negatiivinen magneettinen häiriö, jota tutkittiin veneestä kesällä 1993. Talvella 1994 Malmikaivos Oy teki häiriöön tutkimuskairauksen. Osoittautui, että Kukkarinselän pohjassa on noin 80 m paksu kerros hyvin samanlaisia kiviä kuin Lappajärvellä: kärnäitien kaltaista laavamaista kiveä ja sueviittia (*Kuva 12.4b*). Niissä on myös voimakasta paineaallosta kertovia lamellirakenteita kvartsissa, kolmekin lamelliparvea samassa kiteessä.

Karikkoselkä, Petäjävesi

Elokuussa 1995 kävin saamiene vihjeiden perusteella Keski-Suomessa tutustumassa pariin mahdolliseen törmäyskraateriin. Toisen näistä, Petäjäveden Karikkoselkä, 24 km Jyväskylästä länteen, osoittautui heti sangen

kiintoisaksi törmäyskraateriksi. Karikkoselkä on poikkeuksellisen pyöreä, maljamainen järvi, jonka läpimitta on n. 1 400 m (eli se on vähän Arizonan kraateria suurempi) ja suurin syvyys 25,5 m.

Karikkoselän kohdalla kallioperä on punaista porfyyrista graniittia, joka sisältää kalimaasälpää hajarakeina. Järven rantakalliot ovat rikkonaisia ja niissä näkyy komeita pirstekartioita (*Kuva 12.3b*), jotka ovat paljon näyttävämpiä kuin esim. Lumparnissa. Suurimmat kartiot ovat yli metrin pituisia ja niiden kärjet osoittavat yleensä järven keskusta. Kallioissa näkyy myös hyvin voimakasta rakoilua (usein kolme liki toisiaan vastaan kohtisuorassa olevaa suuntaa) ja rakopinnoilla liukumisen merkkejä.

Rantakallioiden voimakkaasti rikkoutuneissa (breksioituneissa) kohdissa ja kesällä 1996 löytyneessä breksialohkareessa on kvartsirakeissa runsaasti shokkilamelleja (lamelliparvia, vrt. *Kuva 12.2*). Maasälvissä ja kiilteissä (biotitissa) näkyvät niin ikään tyypilliset shokkimetamorfoosin merkit. Myös alustavat tulokset Geologian tutkimuskeskuksen tekemistä geofysikaalisista mittauksista vahvistavat käsityksen, että Karikkoselkä on meteoriitin kraaterissa.

Uusia löytöjä

Suomen kraaterikartassa (*Kuva 12.5*) on pohjoisin kraateri ollut pitkään Lappajärvi. Vastaava tilanne on Ruotsissakin, missä pohjoisin kraateri Lockne sijaitsee Vaasan korkeudella. Tosin on esitetty (Korhonen 1993), että Keski-Lapin graniittialuetta ympäröivä suuri metamorfisten kivien muodostama ympyrärakenne (ns. Marras-rakenne) olisi jäänne hyvin suuresta prekambrisesta kraaterista. Oletusta ei ole toistaiseksi voitu osoittaa oikeaksi jos ei vääräksiään.

Kesällä 1997 varmistui, että Taivalkoskella sijaitseva pieni *Saarijärvi*, läpimitta n. 1,5 km, on törmäyskraaterissa (Pesonen

ym. painossa). Kraaterin sedimenttikivet, ikä ja syntytyapa ovat kiinnostaneet geologeja jo yli 60 vuotta (Matisto 1958, Tynni ja Uutela 1985).

Järvi sijaitsee arkeaisella Suomussalmen lohkokalla, joka koostuu täällä tonaliittisesta gneissigraniitista ja diabaasijuonista. Talvella 1997 tehdyt kairaukset lävistivät koko sedimenttikivitäyhteisen kraaterin ja sen pohjan. Sedimenttikivikerrostumien, jotka koostuvat pääasiassa vihertävistä ja punertavista savi-, siltti- ja hiekkakivistä (vrt. Muhoksen muodostuma, Luku 11), paksuus on n. 155 m. Sedimenttikivien alla on breksioitunutta kallioperää. Parhaat merkit shokkimetamorfoosista löytyivät syvyydestä 156,4 m, missä breksian kvartsiklasteissa on kolmessakin eri suunnassa olevia shokkilamelleja ja -lamelliparvia. Myös geofysikaaliset tutkimukset (Elo ym. 1983, Pesonen ym. painossa) tukevat käsitystä, että Taivalkosken Saarijärvi on Iso-Naakkimaa muistuttava törmäyskraateri.

Edellä lueteltujen törmäyskraatereiden lisäksi Suomessa on joukko pyöreähköjä järviä tai kallioperän rakenteita, jotka saattavat olla meteoriitin synnyttämiä. Osaa niistä tutkittu (mm. Paasivesi Savonlinnan ja Joensuun välissä, Kalotfjärden Vaasan koillispuolella jne.), osa on vielä tutkimatta. Uusia meteoriittikraatereita voi siis Suomessa vielä löytää varsinkin, kun nyt on opittu niitä etsimään.

Kiitokset

Kiitän Lauri Pesosta monista keskusteluista ja pitkäaikaisesta yhteistyöstä ”kraaterinmetäsästyksessä”. Tapani Rämö teki joukon arvokkaita muutos- ja korjaus ehdotuksia käsikirjoitukseen. Seppo Elo kiitän kuvasta 12.6.

Viiteluettelo

- Elo, S., Jokinen, T. & Turunen, T., 1983. Saarijärven savikiviesiintymän geofysikaaliset tutkimukset. Sivut 101 - 116 teoksessa L. Eskola (toim.) Geofysiikkaa geologeille. Geologinen tutkimuslaitos, Tutkimusraportti 58.
- Elo, S., Jokinen, T., Kivekäs, L. & Soininen, H., 1991. Lappajärven meteoriittikraatterin geofysikaalisista tutkimuksista. *Geologi*, 43, No. 1, s. 10 - 12.
- Elo, S., Jokinen, T. & Soininen, H., 1992. Geophysical investigations of the Lake Lappajärvi impact structure, western Finland. *Tectonophysics*, 216, s. 99 - 109.
- Elo, S., Kivekäs, L., Kujala, H., Lahti, S.I. & Pihlaja, P., 1992. Recent studies of the Lake Sääksjärvi meteorite impact crater, southwestern Finland. *Tectonophysics*, 216, s. 163 - 167.
- Elo, S., Kuivasaari, T., Lehtinen, M., Sarapää, O. & Utela, A., 1993. Iso-Naakkima, a circular structure filled with Neoproterozoic sediments, Pieksämäki, southeastern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 65, s. 3 - 30.
- Göbel, E., Reimold, W.U., Baddenhausen, H. & Palme H., 1980. The projectile of the Lappajärvi impact crater. *Zeitschrift für Naturforschung*, 35a, s. 197 - 203.
- Jessberger, E. K. & Reimold, W.U., 1980. A Late Cretaceous ^{40}Ar - ^{39}Ar age for the Lappajärvi impact crater, Finland. *Journal of Geophysics*, 48, s. 57 - 59.
- Järvelä, J., Pesonen, L.J. & Pietarinen, H., 1995. On the palaeomagnetism and petrophysics of the Iso-Naakkima impact structure, southeastern Finland. *Geologian tutkimuskeskus, julkaisematon raportti No. Q 19/29. 1/3232/95/1*.
- Kinnunen, K.A., 1994. Huittisten akaattilohkaareet ohjasivat Sääksjärven meteoriittikraatterille. *Kivi*, 12, No. 1, s. 14 - 25.
- Korbonen, J.V., 1993. Maapallon meteoriittikraatterit. *Tähdet ja Avaruus*, 23, No. 1, s. 4 - 7.
- Laurén, L., Lehtovaara, J. & Boström, R., 1978. On the geology of the circular depression at Söderfjärden, western Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 297, s. 5 - 38.
- Lehtinen, M., 1968. Coesiitista ja sen esiintymisestä Lappajärvellä. *Esitelmä (julkaisematon) Suomen Mineralogisen Seuran kokous 5.11.1968*.
- Lehtinen, M., 1969. Meteoriitti-impaktiteoria ja Lappajärvi-muodostuma. *Julkaisematon lisensiaattityö, säilytetään Helsingin yliopiston geologian laitoksella*, 140 s.
- Lehtinen, M., 1976a. Lake Lappajärvi, a meteorite impact site in western Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 282, 92 s.
- Lehtinen, M., 1976b. Lappajärven shokkimetamorfisista kivistä. *Geologi*, 28, No. 7, s. 81 - 86.
- Lehtinen, M., 1982. Meteoriittitutkimuksen historiaa. *Tähdet ja Avaruus*, 12, No. 3, s. 86 - 90.
- Lehtinen, M., 1990. Petrology and mineralogy of the impact melt and breccias in the deep drill core, Lake Lappajärvi, western Finland. *Sivu 19 teoksessa L.J. Pesonen & H. Niemisara (toim.) Symposium Fenno-scandian impact structures (Espoo and Lappajärvi, Finland, May 29 - 31), Programme and Abstracts, Geological Survey of Finland, Espoo 1990*.
- Lehtinen, M., 1991. Lappajärven shokkimetamorfisista kivistä. *Geologi*, 43, No. 1, s. 12 - 14.
- Lehtinen, M., 1994a. Mikä tappoi dinosaurit - romahtiko taivas vai pettikö maa? *Luonnon Tutkija*, 98, No. 1, s. 16 - 20.
- Lehtinen, M., 1994b. Taivaan merkit Maassa. *Tiede* 2000, No. 7, s. 42 - 47.
- Lehtovaara, J.J., 1984. Vaasan Söderfjärden - sedimenttiaineksen suojaama kambrikaudella muodostunut kraatteri. *Terra*, 96, No. 1, s. 23 - 33.
- Lehtovaara, J.J., 1985. ^{40}K - ^{40}Ar dating of the Söderfjärden crater, Vaasa, western Finland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 107, s. 1 - 6.
- Lehtovaara, J.J., 1992. Söderfjärden: a Cambrian impact crater in western Finland. *Tectonophysics*, 216, s. 157 - 161.
- Matisto, A., 1958. Taivalkosken Metsäkyllän kvartsiitti-kaoliinimuodostuman stratigrafisesta asemasta. *Geologi*, 10, No. 6, s. 42 - 44.
- Merrill, G.K., 1979. Ordovician conodonts from the Åland Islands, Finland. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, 101, s. 329 - 341.
- Mutanen, T., 1979. Sääksjärvi on sittenkin astrobleemi. *Geologi*, 31, No. 9 - 10, s. 125 - 130.
- Müller, N., Hartung, J.B., Jessberger, E.K. & Re-

- Reimold, W.U., 1990.* ^{40}Ar - ^{39}Ar ages of Dellen, Jänisjärvi, and Sääksjärvi impact craters. *Meteoritics*, 25, s. 1 - 10.
- Papunen, H., 1969.* Possible impact metamorphic textures in the erratics of the Lake Sääksjärvi area in southwestern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 41, s. 151 - 155.
- Papunen, H., 1973.* Chemical composition and origin of the shock metamorphic rocks of the Sääksjärvi area, Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 45, s. 29 - 34.
- Pesonen, L.J., Lehtinen, M., Tuukki, P. & Abels, A., 1990.* The Lake Saarijärvi structure, Taivalkoski - a new meteorite impact crater in Finland.
- Pipping, F. & Lehtinen, M., 1992.* Geology, stratigraphy and structure of the Lappajärvi meteorite crater, western Finland: preliminary results of deep drilling. *Tectonophysics*, 216, s. 91 - 97.
- Reimold, W. U., 1982.* The Lappajärvi meteorite crater, Finland: petrography, Rb - Sr, major and trace element geochemistry of the impact melt and basement rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46, s. 1203 - 1225.
- Simonen, A., 1964.* Kallioperä. Sivut 49 - 124 teoksessa K. Rankama (toim.) Suomen geologia. Kirjayhtymä, Helsinki, 414 s.
- Stöffler, D., 1971.* Progressive metamorphism and classification of shocked and brecciated crystalline rocks at impact craters. *Journal of Geophysical Research*, 76, No. 23, s. 5541 - 5551.
- Talvitie, J., Pernu, T. & Raitala, J., 1975.* The circular Vaasa structure in the Baltic shield, western Finland. Department of Geophysics, University of Oulu, Contribution No. 59, 15 s.
- Tynni, R., 1978.* Lower Cambrian fossils and acritarchs in the sedimentary rocks of Söderfjärden, western Finland. *Geological Survey of Finland, Bulletin* 297, s. 39 - 81.
- Tynni, R. & Uutela, A., 1985.* Myöhäis-prekambriinin ajoitus Taivalkosken savikivelle mikrofossiilien perusteella. *Geologi*, 37, No. 4 - 5, s. 61 - 65.
- Uutela, A., 1990.* Proterozoic microfossils from the sedimentary rocks of the Lappajärvi impact crater. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 62, s. 115 - 121.