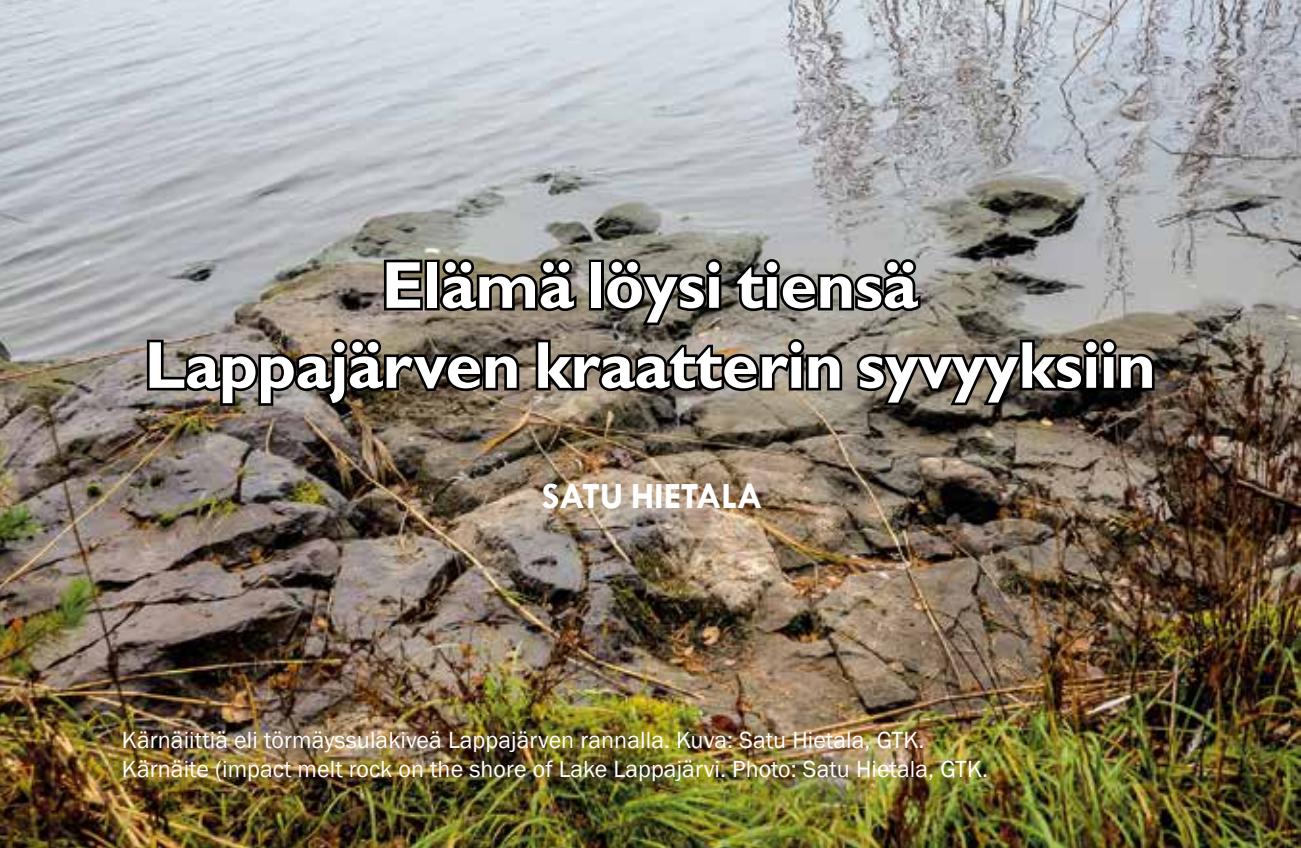




Elämä löysi tiensä Lappajärven kraatterin syvyyksiin

SATU HIETALA

Kärnäiittiä eli törmäyssulakiveä Lappajärven rannalla. Kuva: Satu Hietala, GTK.
Kärnäite (impact melt rock on the shore of Lake Lappajärvi. Photo: Satu Hietala, GTK.

Asteroidin törmäys kuumensi ja sterilisoi ympäristön elämästä, mutta lopulta jäähtyvä kraatteri Lappajärvellä muuttui pitkäaikaiseksi lämpökeitaaksi. Kun kraatteriallas viileni elinkelpoiseksi, mikrobit valtasivat kallioperän. Törmäyksessä syntyneet raot ja onkalot toimivat pohjaveden virtauskanavina ja mikrobien asuinpintoina. Tuoreessa Nature Communications -lehdessä julkaistussa artikkelissa tutkijat ovat ensimmäistä kertaa ajoittaneet mikrobielämän ilmaantumisen asteroiditörmäyksen jälkeen.

Lappajärven törmäyskraatteri on halkaisijaltaan noin 23 kilometriä ja iältään $77,85 \pm 0,78$ miljoonaa vuotta (U-Pb-määrittäminen; Kenny ym. 2019). Kraatterin synnyttänyt törmäys osui paleoproterotsooiseen kallioperään, jota peitti paikoin kambri- ja ordoviikkikautiset sedimenttikivet (Slater & Willman 2019).

Ilmasto oli myöhäisliitukaudella leuto ja boreaalinen. Lappajärven lähialueen meriveden vuotuinen keskilämpötila oli noin 17–19 °C, kun nykyinen Itämeri on keskimäärin noin 8 °C (de Winter ym. 2020). Saniais- ja havumetsien seassa kasvoi mahdollisesti var-

haisia lehtipuita (Ruotsin Skåne; Halamski ym. 2016). Alueella elävistä eläimistä parhaan kuvan antaa lähialueen Campanian-ai-
kainen (ikä 83,6–72,1 miljoonaa vuotta) fossiiliaineisto: matalassa, lämpimässä meressä eläneitä mosasaureja, plesiosaureksia, haita, merikilpikonna, sukelajalintuja ja saaristosi-
silla rannoilla esiintyviä pieniä dinosauruksia (Skåne; Surlyk & Sørensen 2010). Taivaalla puolestaan eteni arviolta noin 1 600 metrin kokoinen asteroidi, joka iskeytyi lakeuksille 60 000 kilometrin tuntinopeudella (Öhman ym. 2017).

Törmäyksessä kallioperä suli ja syntyi satoja metrejä paksu törmäyssulakivikerros, jota kutsutaan kärnäitiksi. Sulakerroksen lisäksi muodostui sueviittia sekä törmäysbreksioita ja kallioperä rakoili voimakkaasti.

Törmäyksen jälkeen kehittyi hydroterminen järjestelmä, jossa vesi reagoi törmäyssulakerroksen ja kuumentuneen sekä rakoilleen kallioperän kanssa. Törmäyksen alkuvaiheen šokkimetamorfoosissa syntyneen sulan lämpötila oli alussa noin 1 800–2 100 °C ja siihen muodostui kaasukuplia. Kuumat nesteet kiersivät kivien raoissa ja onkaloissa. Jäähtyminen eteni vaiheittain. Kiehumisen ja kaasuuntumisen ohjaamaa nopeaa viilenemistä seurasi pitkä hidas jäähtyminen, jolloin lämpötilat säilyivät jopa 200–250 asteisina vielä noin 1–1,6 miljoonaa vuotta törmäyksen jälkeen noin (Gustafsson ym. 2025).

Nuorimmat törmäystapahtuman ajoitustulokset ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -iät: $76,20 \pm 0,29$ ja $75,11 \pm 0,36$ miljoonaa vuotta) ovat 1–3 miljoonaa vuotta nuorempia kuin vanhemmat määritetyt iät, mikä heijastaa kraatterin eri osien pitkäaikaista vaihtelevaa jäähtymistä (Schmieder & Jourdan 2013; Gustafsson ym. 2025).

Varhaisessa jäähtymisvaiheessa kivien onkaloihin kiteytyi ensin savimineraaleja, rikkiä ja zeoliitteja. Tässä vaiheessa kiteytyneet rikkikiisi tulkitaan abioottiseksi, eli se saostui raudan ja epäorgaanisen rikkivedyn reagoidessa. Näistä onkaloista, jotka olivat alun alkaen kaasukuplia, tuli myöhemmin mikrobitoiminnan kasvupintoja.

Korkeiden lämpötilojen vuoksi olosuhteet olivat vielä elämälle epäsuotuisat. Elinkelpoiset olosuhteet saavutettiin vasta myöhemmässä, viileämmässä vaiheessa. Äärimmäistä kuumuutta suosivien mikrobien eli hypertermofilien nykyinen, vertaisarvioitu yläraja elävälle solukasvulle on noin 122 °C, joka on osoitettu arkeonille (*Methanopyrus kandleri*) korkeassa hydrostaattisessa paineessa (20 MPa) (esim. Takai ym. 2008).

Mikrobien ”kylpyläpäivää” vietettiin kraatterin lämmössä

Kraatteri viileni vähitellen lämpötiloihin, jotka ovat elämälle suotuisia. Kun neljä miljoonaa vuotta törmäyksen jälkeen lämpötila oli laskenut noin 47 °C:een, onkaloihin kiteytyneet kalsiitti ja samaan aikaan saostunut rikkiä osoittavat mikrobista sulfaattipelkistystä. Tämä on elämän ensimmäinen selkeä jälki Lappajärven kraatterissa.

Reilut 15 miljoonaa vuotta törmäyksen jälkeen, kun järjestelmä oli viilentynyt noin 30 °C:een, kalsiitin isotooppikoostumus viittaa metanogeneesiin. Metanogeneesi on arkeonien hapettomissa oloissa tapahtuva metaanin tuotto. Tämä vaihe ajoittuu hydrotermisen järjestelmän hiipumisen jälkimaininkeihin, kun viileä pohjavesi pääsi kulkemaan kallioperän onkaloissa ja raoissa. Näissä olosuhteissa energia- ja ravinnepuutte eivät enää syntyneet törmäyksen jälkilämmöstä vaan tavallisen pohjaveden kuljettamista kemiallisista yhdisteistä, joita mikrobit hyödynsivät veden kiertäessä kallioperän huokosverkostossa.

Noin 44 miljoonaa vuotta sitten kalsiitin muodostumislämpötila oli enää noin 8 °C, eli olosuhteet vastasivat jo nykyisiä pohjavesioloja. Kalsiitin hyvin ^{13}C -köyhät $\delta^{13}\text{C}$ -arvot ovat tyypillinen merkki metaanin anaerobisesta hapatuksesta. Hapen isotooppikoostumus viittaa meteoriseen, mahdollisesti osin glasiaaliseen veteen. Geologinen kokonaiskuva on, että varhaisen lämpimän vaiheen jälkeen kraatteri säilyi elinkelpoisena systeeminä pitkään, mutta olosuhteita hallitsivat jo kylmä maankuori ja sitä kiertävä pohjavesi.

Näin tutkimus tehtiin

Tutkimuksessa hyödynnetty aineisto kerättiin Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) Lopen kairasydänarkistossa olevista kahdesta Lappajärven kairasydäimestä, LA1 ja LA4, jotka



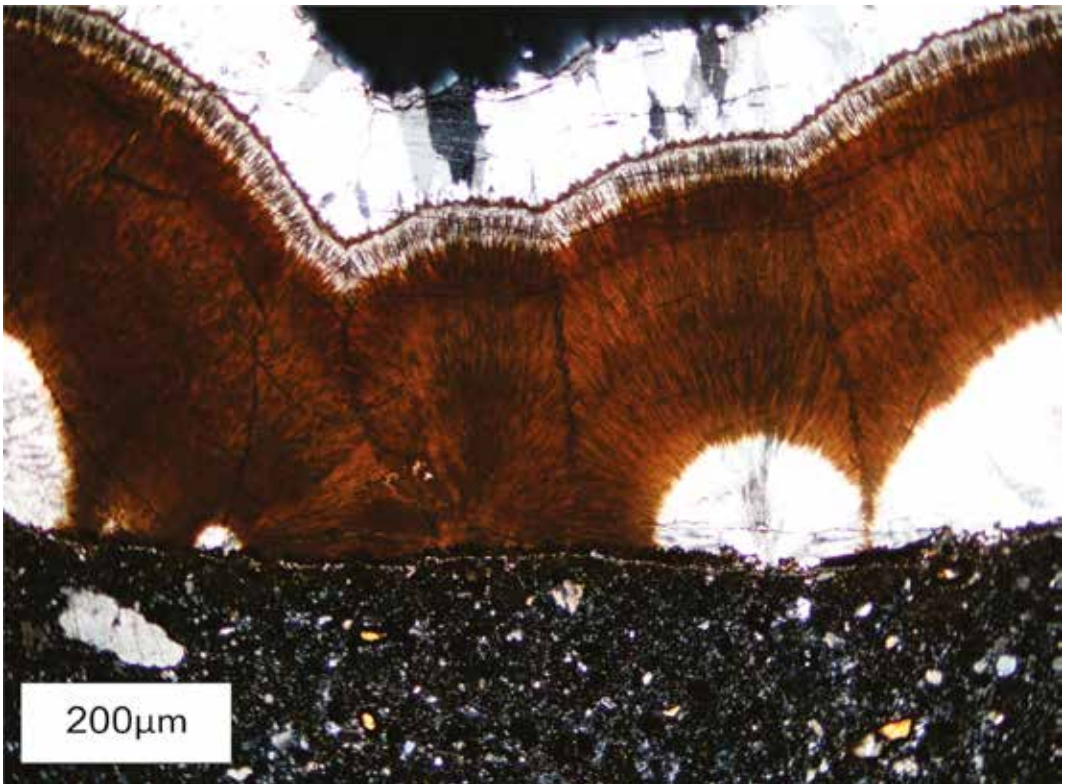
Kuva 1. Lappajärven törmäyssulapitoinen breksia (sueviitti), jossa on mineraaleilla täyttyneitä onkaloita. Tämä kairasydännäyte oli mukana tutkimuksessa. Kuva: Satu Hietala, GTK.

Figure 1. The impact melt-bearing breccia (suevite) from Lappajärvi, featuring cavities filled with minerals, was among the drill core samples included in the study. Photo: Satu Hietala, GTK.



Kuva 2. Kärnäiitin onkaloiden karbonaattimineraaleja. Kuva: Satu Hietala, GTK.

Figure 2. Carbonate minerals in vugs of kärnäite (impact melt rock). Photo: Satu Hietala, GTK.



Kuva 3. Ohuthiekuva karbonaattimineraalien (kalsiitti/sideriitti) ja törmäyssulakiven (kärnäitin) kontaktista ristipolarisaatiovalossa. Kuva: Satu Hietala, GTK.

Figure 3. Photomicrograph (thin section, cross-polarized light, XPL) of the contact between carbonate minerals (calcite/siderite) and impact melt rock (kärnäite). Photo: Satu Hietala, GTK.

koostuvat törmäyssulasta eli kärnäitistä sekä sueviitista (kuvat 1 & 2). GTK:n Lopen henkilökunta auttoi valmisteluissa, näytellogistiikassa ja näytteiden preparoinneissa.

Tutkimuksen kohteena olivat onkaloiden sekundääriset mineraalitäytteet, erityisesti kalsiitti (CaCO_3) (kuva 3) ja rikkikiisu (FeS_2). Ennen isotooppityötä mineraalit karakterisoi- tiin stereomikroskoopilla ja FEI Quanta FEG 650 -pintaskannaus-elektronimikroskoopilla (EDS-detektori Oxford T-Max 80). Tätä lähestymistapaa käytettiin mm. kasvuvaiheiden ja tekstuuriin rajaamiseen analyysipisteiden valikoimista varten.

C-, O- ja S-isotoopit mitattiin Nord-SIMS-laboratoriossa (Ruotsin luonnontieteel- linen museo, Tukholma) CAMECA IMS1280

-laitteella. SIMS-dataa kerättiin sekä rikkikii- susta ($\delta^{34}\text{S}$) että kalsiitista ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$), ja iso- toopit mitattiin yhtenäisinä profileina kiteen kasvuvyöhykkeiden poikki. Tuloksena syntyi mineraalikohtainen, kasvuvaiheisiin sidottu C–O–S-isotooppikartta kalsiitista ja rikkikii- susta, jolla erotettiin varhaiset abioottiset sul- faattimerkit myöhäisistä biosignaaleista.

Tutkimuksessa määritettiin myös kalsii- tin syntylämpötilaa tutkimalla, kuinka usein harvinaiset hiilen ja hapen isotoopit pääty- vät samaan karbonaattimolekyyliin. Tämä ‘parittuminen’ vähenee lämpötilan nous- tessa, joten sen perusteella saadaan mää- ritettyä lämpötila ja veden sormenjälki. Kalsiitin muodostumislämpötila määritettiin iso- tooppiparien termometrialla (Δ_{638}) Arizonan

yliopiston Environmental Isotope Laboratoryssa (ympäristöisotooppilaboratorio) TILDAS-menetelmää käyttäen.

Kalsiitin U–Pb-ajoitus tehtiin British Geological Surveyn Geochronology and Tracers Facilityssa LA-ICP-MS-menetelmällä. Laitteistona oli Elemental Scientific Lasers ImageGeo -eksimeerilaser yhdistettynä Nu Instruments Attom -merkkiseen ICP-MS-massaspektrometriin.

Yhdessä nämä tutkimukset muodostivat mineraalikidekohtaisen “aika + lämpötila + prosessi” -profiilin, joka osoitti mikrobien kolonisoineen Lappajärven kivien onkalot, kun törmäyksen synnyttämä hydroterminen kierto oli hiipumassa ja lämpötila laskenut elinkel-poiseksi.

Kalsiitti toimii sekä lämpömittarina että kellona. Sen isotooppikoostumukseen perustuva geotermometria kertoo, missä lämpötilassa kiteet kasvoivat. Samoista kohdista tehty uraani–lyijyajoitus kertoo, milloin kasvu tapahtui. Lisäksi kalsiitin hiilen isotoopit ($\delta^{13}\text{C}$) ja hapen isotoopit ($\delta^{18}\text{O}$) paljastavat, millaista hiilen kierto oli ja mistä vesi oli peräisin. Näin kalsiitti kertoo yhtä aikaa lämpötilan, iän ja ympäristön.

Rikkikiisu paljastaa, oliko mikrobeja mukana. Sen rikin isotoopit ($\delta^{34}\text{S}$) erottavat varhaisen, kuumen ja abioottisen sulfidisaostuksen myöhemmästä mikrobisesta sulfaatinpelkistyksestä, joka jättää selvästi kevyemmän rikin isotooppijäljen.

Kun rikkikiisun rikki ja kalsiitin hiili ja happi mitattiin samoista parageenisistä vaiheista, kemiallinen “allekirjoitus” saatiin sidottua sekä lämpötilaan että absoluuttiseen ikään.

Lappajärvi on erityinen

Hydroterminen järjestelmä kiersi kraatterirakenteessa poikkeuksellisen pitkään kahden tekijän vuoksi. Paksu törmäyssulakivikerros toimi lämmönlähteenä (vrt. kiuas) ja virtaava vesi kuljetti lämpöä rakoverkostoissa, mikä hidasti jäähtymistä. Lappajärven kallioperän kivet (kiillegneissit ja graniittipegmatiitit) ovat luonnostaan vähähuokoisia, mikä rajoittaa veden virtausta ja hidastaa lämmön poistumista. Törmäys avasi kallioperään uusia rakoja ja paransi läpäisevyyttä, mutta halkeamat eivät muodostaneet laajaa, yhtenäistä verkostoa, joten virtaus säilyi kohtuullisena. Näiden tekijöiden yhdistelmä tuotti ensin kiehumisvaiheen nopean lämmön johtumisen ja sen jälkeen pitkän hitaan jäähtymisen. Se pidensi hydro-

terminen järjestelmän hiipumisen miljoonien vuosien mittaiseksi ja avasi aikaikkunan, jossa varhainen sulfaattipelkistys, myöhempi metanogeneesi ja metaanin anaerobinen hapetus ehtivät jättää jälkensä.

Saman kokoluokan Haughtonissa (Kanada) hydrotermiset lämpötilat 50–120 °C kestivät mallinnusten mukaan vain noin 50 000 vuotta, ja Riesissä (Saksa) järjestelmä hiipui alle 250 000 vuodessa. Suurissa rakenteissa, kuten Chicxulubissa (Meksiko) ja Sudburyssa (Kanada), törmäyksen synnyttämä hydroterminen järjestelmä on voinut jatkua jopa satojatuhansia vuosia aina 1–2 miljoonaan vuoteen, kun taas pienissä, kuten Kärklässä (Viro), elinkel-poiset olot saavutetaan jo kymmenissä tai sadoissa vuosissa.

Onko Marsissa elämää?

Lappajärven aineistossa biosignaalit, lämpötilat ja iät sidottiin samoihin mineraaleihin, mikä antaa käytännöllisen viitekehysten myös Marsin näytteiden ja kairauskohteiden valinnalle. Jos näytteistä voidaan mitata kemialliset biosignaalit, muodostumislämpötilat ja ajoitukset samanaikaisesti, voidaan vastata kysymyksiin missä ja milloin mahdolliset elämänmerkit syntyivät. Keski- ja suurikokoiset törmäykset voivat luoda pitkäikäisiä hydrotermisiä systeemejä, jotka tarjoavat mikrobiin kasvualustan kraatterin jäähtyessä. Tämä tukee näkemystä, että kraatterit voivat toimia syväbiosfäärin kuumapisteenä elinympäristöinä Maassa ja analogisesti myös Marsissa.

Mitä uutta tutkimus toi tieteelle

Tutkimus todisti kuinka törmäyskraatteri voi muuttua katastrofista elinympäristöksi. Lappajärvellä törmäys loi ensin kuumaa, sitten vähitellen viilenevää lämpövarastoa, jossa vesi, lämmön ja kiven vuorovaikutus synnytti mikrobeille käyttökelpoisia kemiallisia energialhteita. Kun lämpötila laski elinkel-poiseksi, paikalliset mikrobit kolonisoivat kallioperän raot ja onkalot ja toiminta jatkui pitkään viileän pohjavesikierron ohjaamana. Kallioperän rakoihin kiteytyneet mineraalit toimivat kemiallisena muistikirjana: varhaisimmat elämänmerkit näkyvät rikkikiisussa ja kalsiitissa kraatterin vielä lämpimässä mutta jo viilenneessä vaiheessa.

Tutkimus selvitti miten iän, lämpötilan ja biosignaalien sidonta samaan mineraaliin ja samaan kasvuvaiheeseen antaa tarkan aikajanan elämän paluusta. Kalsiitista määritettiin sekä U–Pb-ikä että muodostumislämpötila, ja samassa parageenisessä vaiheessa rikkikiisun rikin isotoopit todentavat mikrobisen sulfatinpelkistymisen. Tämä suora aika–lämpötila–biosignaaliliitos on metodinen läpimurto

kraatteritutkimuksissa ja osoittaa tällaisten rakenteiden voivan toimia elinympäristöinä pitkään törmäyksen jälkeen. Tutkimuksen merkittävin tulos on, että havaittujen elämän merkkien syntyajankohta kyettiin määrittämään. Tämä antaa aikajanan sille, miten elämä löytää tiensä takaisin suuren mullistuksen jälkeen.

Tässä artikkelissa esitelty tutkimus on julkaistu lehdessä *Nature Communications* (Gustafsson ym. 2025) ja se on avoimesti saatavilla osoitteessa: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-63603-y>

FM SATU HIETALA

(satu.hietala@gtk.fi)

Kirjoittaja työskentelee geologina Geologian tutkimuskeskuksen Mineraalitalouden ratkaisut -yksikön Geokemian ja menetelmäkehityksen ryhmässä. Hän on Nature Communications -julkaisun Lappajärveä käsittelevän tutkimuksen kirjoittajaj ryhmän jäsen ja viimeistelee väitöstyötä Tarton yliopistossa Fennoskandian törmäyskraattereista.

Summary

Life's Comeback in Lappajärvi: Time–Temperature–Biosignature Evidence

The 23-km Lappajärvi impact structure (77.85 Ma) shows how a catastrophic event can evolve into a long-lived subsurface habitat. A thick impact-melt sheet initially sterilized the target rocks, but the impact-generated hydrothermal system persisted for ~1–1.6 million years as the crater slowly cooled. Using a multi-proxy, in-situ approach on the same minerals, the study ties time, temperature, and biosignatures together: calcite provided U–Pb ages and formation temperatures (via isotope-based thermometry) while coeval pyrite and calcite recorded $\delta^{34}\text{S}$ – $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ signals.

The earliest clear biosignature appears when conditions had cooled to warm but

habitable levels: calcite and co-occurring pyrite show microbial sulfate reduction in the waning hydrothermal phase. Later, as cool, meteoric groundwater increasingly dominated circulation, calcite records methanogenesis and, finally, the anaerobic oxidation of methane at near-ambient temperatures. In short, life did not arrive with the asteroid; local microbes colonized the pore space once the system became temperate, and water kept moving through the fractured rocks.

By anchoring biosignals to absolute ages and temperatures in single crystals, the work provides a robust timeline for the return of life after impact. This framework helps reassess other craters on Earth and guides target selection and measurements for Mars drilling and sample-return missions.

Lähdeluettelo

- de Winter, N. J., Ullmann, C. V., Sørensen, A. M., Thibault, N., Goderis, S., ym., 2020. Shell chemistry of the boreal Campanian bivalve *Rastellum diluvianum* (Linnaeus, 1767) reveals temperature seasonality, growth rates and life cycle of an extinct Cretaceous oyster. *Biogeosciences* 17, 2897–2922. <https://doi.org/10.5194/bg-17-2897-2020>
- Gustafsson, J., Osinski, G.R., Roberts, N.M.W., Quade, J., Wang, Z., Whitehouse, M. J., Jeon, H., Karlsson, A., Hietala, S. & Drake H., 2025. Deep microbial colonization during impact-generated hydrothermal circulation at the Lappajärvi impact structure, Finland. *Nature Communications* 16, 8270. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-63603-y>
- Halamski, A. T., Kvaček, J. & Vajda, V., 2016. Late Cretaceous (Campanian) leaf and palynoflora from southern Skåne, Sweden. *Geological Society, London, Special Publications* 434, 207–230. <https://doi.org/10.1144/SP434.16>
- Kenny, G., Schmieder, M., Whitehouse, M., Nemchin, A., Morales, L., ym., 2019. A new U-Pb age for shock-recrystallised zircon from the Lappajärvi impact crater, Finland, and implications for the accurate dating of impact events. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 245, 479–494. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.11.021>
- Schmieder, M. & Jourdan, F., 2013. The Lappajärvi impact structure (Finland): age, duration of crater cooling, and implications for early life. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 112, 321–339. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.02.015>
- Slater B. J. & Willman S., 2019. Early Cambrian small carbonaceous fossils (SCFs) from an impact crater in western Finland. *Lethaia* 52, 570–582. <https://doi.org/10.1111/let.12331>
- Surlyk, F. & Sørensen, A., 2010. An early Campanian rocky shore at Ivö Klack, southern Sweden. *Cretaceous Research* 31, 567–576. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2010.07.006>
- Takai, K., Nakamura, K., Toki, T., Tsunogai, U., Miyazaki, M., ym., 2008. Cell proliferation at 122 degrees C and isotopically heavy CH₄ production by a hyperthermophilic methanogen under high-pressure cultivation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 10949–10954. <https://doi.org/10.1073/pnas.0712334105>
- Öhman, T., Hietala, S., Kananoja, T. & Nenonen, J., 2017. Kraatterijärven Georeitti – Craterlake Geotrail. LEADER Aisapari, 130 s. <https://intolinkki.net/georeitti/>