

silla, joissa saimme tilaisuuden tutustua stromatoliitteihin ja näyttäviin poimurakenteisiin. Kenttävierailut jatkuivat toisena päivänä Vähäjoen Fe-Cu-Co-Au-esiintymän alueella, noin 20 km itään Tervolasta. Siellä tutkimme breksioituneita ja mineralisoituneita dolomiittipaljastumia kolmessa eri paikassa. Päivä jatkui Runkausvaarassa, jossa tehtiin havaintoja arkeisesta gneissistä ja sen päällä esiintyvistä basaltista. Toinen ekskursionpäivä päättyi Varevaaran kvartsiitissa esiintyviä tekstuureja tutkien. Viimeinen kenttäpäivä alkoi käynnillä Ahvenlammen dolomiittilouhokselle, jossa löysimme kvartsijuonia ja breksioituneita lohkareita. Päivä jatkui tutustumisella Pukinselän

doleriittilouhokseen: siellä tutkimme poimutuneita kiviä ja teimme havaintoja pienestä orogeenisesta kultaesiintymästä. Louhoksen kiviainesta on käytetty mm. Tervolan rautateiden kunnossapitoon, joten totesimme, että Tervolassa on kullanarvoiset rautatiet! Päivä päättyi käynnillä Sukulanrakan hiidenkirnuilla, jonka jälkeen veimme kerätyt näytteet GTK:n näytevarastoon Rovaniemelle. Tällä ekskursionpäivällä tehdyistä havainnoista ja niiden pohjalta syntyvistä keskusteluista on ollut paljon hyötyä REPower-CEST-projektin Peräpohjan liuskealueeseen kohdistuneissa tutkimuksissa.

Kaivannaisjätealueet kriittisten raaka-aineiden lähteinä – FutuRaM-projekti ja tapaus Otanmäki

TEEMU KARLSSON, JANNE HOKKA JA TUOMAS LESKELÄ

Kriittisten raaka-aineiden tarve kasvaa vihreän siirtymän myötä, erityisesti aurinkopaneelien, tuuliturbiinien ja sähköajoneuvojen yleistyesä. Euroopan unionin (EU) uusi raaka-aineasetus (European Commission 2024) edellyttää, että vuoteen 2030 mennessä vähintään 15 % kriittisten raaka-aineiden kulutuksesta kateetaan kierrätyksellä. Tämä on lisännyt kiinnostusta myös sekundäärisiin lähteisiin, kuten kaivosten jätealueisiin, joista toivotaan löytävän merkittäviä raaka-ainevarantoja.

Suomessa Geologian tutkimuskeskus (GTK) osallistuu nelivuotiseen (2022–2026) Horizon Europe -ohjelman rahoittamaan FutuRaM-projektiin (*The Future Availability of Secondary Raw Materials*), jonka tavoitteena on mm. luoda tietokanta sekundääristen raaka-ai-

neiden saatavuudesta ja hyödynnettävyydestä EU:ssa. Osana projektia arvioitiin suomalaisen suljettujen kaivannaisjätealueiden raaka-ainepotentiaalia erityisesti EU:n kriittisiksi määrittelemien raaka-aineiden osalta. Lisäksi projektissa tutkittiin tarkemmin Otanmäen rikastushiekka-alueen sisältämän ilmeniitin (FeTiO_3) resurssipotentiaalia.

Kaivannaisjätteet Suomessa

Suomessa syntyy vuosittain noin 100 miljoonaa tonnia (Mt) kaivannaisjätettä, pääosin rikastushiekkaa (kuva 1) ja sivukiveä. Tämä vastaa 74 % kaikista tuotetuista jätevirroista. Kaivostoiminnan historian aikana (1500-lu-



Kuva 1. Vaahdotusprosessissa syntynyt rikastushiekka pumpataan rikastushiekka-alueille. Kuva: Teemu Karlsson.

Figure 1. The tailings sand produced in the flotation process is pumped to tailings storage facilities. Photo: Teemu Karlsson.

vulta lähtien) Suomessa on louhittu yli 1 100 Mt sivukiveä (Puustinen 2003; Karlsson ym. 2024). Rikastusprosessien kehittyessä vaahdotusmenetelmä otettiin käyttöön 1900-luvun alussa, josta lähtien on tuotettu noin 500 Mt rikastushiekkaa.

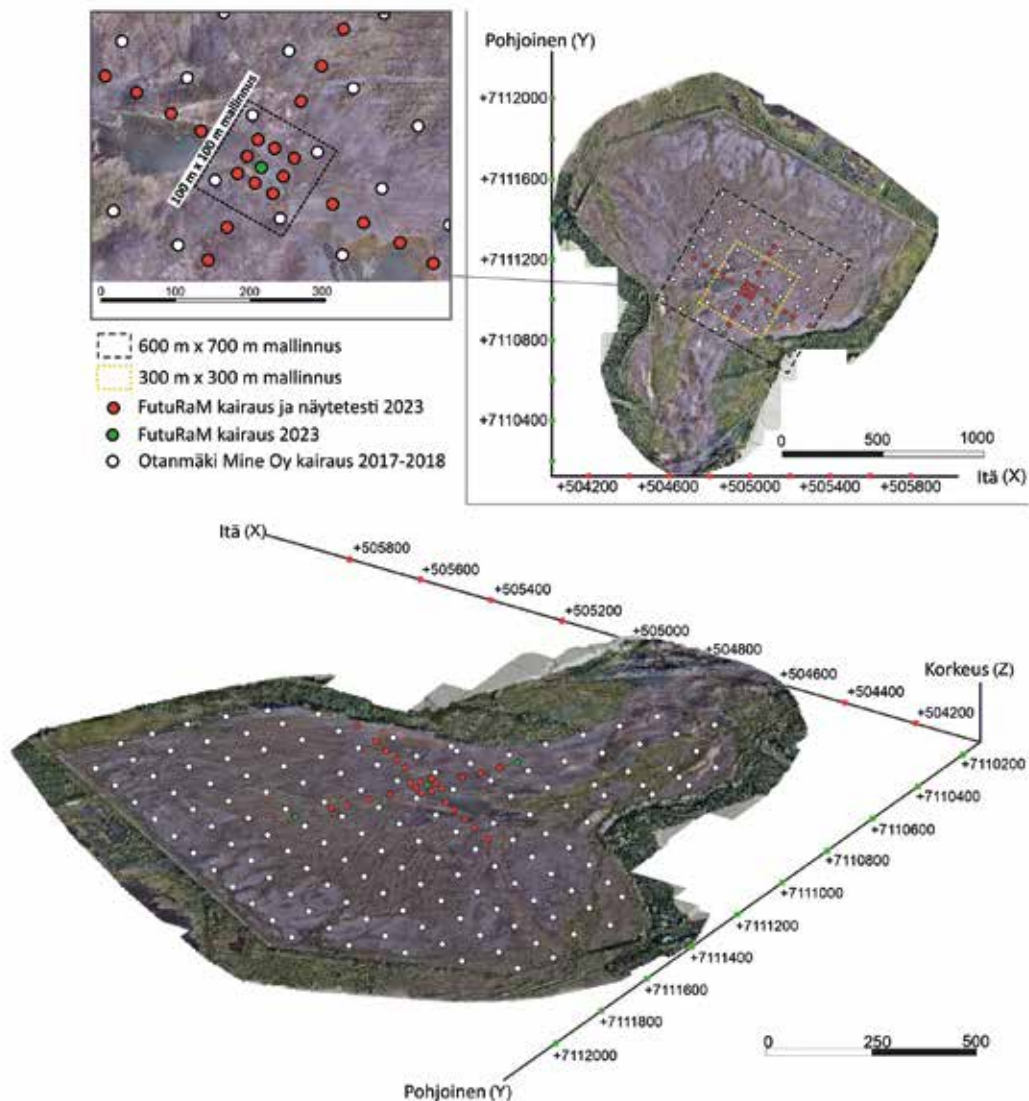
FutuRaM-projektissa GTK on koonnut tietoa 24 suurimmasta suljetusta metallikavosalueesta, joista 20:ssä on rikastushiekkaa ja kahdeksassa läjitettyä sivukiveä. Tavoitteena on ollut arvioida kriittisten raaka-aineiden määriä näissä kaivannaisjätteissä yhdistämällä historiallisia tuotantotietoja ja GTK:n ympäristötutkimuksista sekä muista avoimista lähteistä saatuja pitoisuustietoja. Tiedot on tallennettu GTK:n tietokantaan, joka tulee toimimaan tietolähteenä kaivannaisjätteiden sekundäärisestä raaka-ainepotentiaalista.

Tarkastellut suljetut kaivannaisjätealueet sisältävät arvion mukaan yhteensä noin 22 300 tonnia kobolttia, 103 400 tonnia kuparia ja 92 600 tonnia nikkeliä (Karlsson ym. 2024).

Näistä suurin osa sijaitsee rikastushiekka-alueilla, joissa on yhteensä: 21 500 t Co, 90 200 t Cu ja 74 600 t Ni. Sivukivien arvioitiin sisältävän noin 800 t Co, 13 200 t Cu ja 18 000 t Ni.

Kaivannaisjätteiden hyödyntämisen haasteita

Vaikka kaivannaisjätteet vaikuttavat lupaukselta kriittisten raaka-aineiden lähteiltä, liittyy niiden arviointiin merkittäviä epävarmuuksia. Useimmat pitoisuustiedot perustuvat pienimuotoisiin ympäristötutkimuksiin, joissa näytteiden määrät ovat rajallisia ja analyysimenetelmät (esim. kuningasvesiuutto) eivät anna alkuaineiden kokonaispitoisuuksia. Lisäksi jätteiden määrät on usein arvioitu epäsuorasti vanhojen tuotantotietojen perusteella, eikä tarkkoja tiheys- ja määrätietoja ole saatavilla.



Kuva 2. Otanmäen rikastushiekka-alueen digitaalinen korkeusmalli ja näytteenottopisteet. Punaiset ja vihreät pisteet edustavat vuonna 2023 kerättyjä FutuRaM-projektin näytteenottopisteitä. Vihreät pisteet kuvaavat näytteenottomenetelmän testipisteitä. Valkoiset pisteet edustavat vuosina 2017–2018 kerättyjä vanhoja näytteenottopisteitä, joita käytettiin tausta-arvoina uuden tutkimuksen resurssimallinnuksessa. Eri mallinnusalueet (600 m × 700 m, 300 m × 300 m ja 100 m × 100 m) on esitetty katkoviivoin ylemmissä kuvissa. Ylävasemmalla pienoiskuvassa on keskiosan 100 m x 100 m mallinnusalue tarkemmin. Kuva muunnettu lähteestä Leskelä ym. 2025.

Figure 2. Digital elevation model of the Otanmäki tailings facility and sampling points. The red and green dots represent sampling points collected in 2023 as part of the FutuRaM project. The green dots indicate test points for sampling method evaluation. The white dots represent older sampling points collected in 2017–2018, which were used as background values in the new resource modeling. Different modeling areas (600 m × 700 m, 300 m × 300 m, and 100 m × 100 m) are shown with dashed lines in the upper images. The inset in the upper left corner shows a more detailed view of the 100 m × 100 m modeling area in the center. Image modified from Leskelä et al. 2025.

Kaivannaisjätteiden sisältämien kriittisten raaka-aineiden metallipitoisuuksien havaittiin olevan tyypillisesti 0,002–0,2 % eli selvästi alhaisempia kuin perinteisissä malmeissa. Tämä tekee rikastamisesta teknisesti ja taloudellisesti haastavaa. Lisäksi esimerkiksi suurin osa Hieturan kaivoksen rikastushiekan sisältämästä nikkelistä on todennäköisesti sitoutunut silikaattimineraaleihin, joiden prosessointi on vaikeaa.

Kaivannaisjätteiden sisältämien raaka-aineiden hyödyntäminen ei ole useinkaan taloudellisesti kannattavaa. Kinnunen ym. (2022) korostavatkin kokonaisvaltaista lähestymistapaa kaivannaisjätteiden hallintaan. Metallien talteenoton lisäksi tulisi arvioidaan myös muiden materiaalien, esimerkiksi silikaattisten päämineraalien käyttömahdollisuuksia sementtiteollisuudessa tai hiilidioksidin talteenotossa. Lisäksi ympäristövaatimusten suhteen puutteellisesti suljettujen vanhojen jätealueiden uudelleenprosessointi voi toimia osana kestävästä ympäristöratkaisusta.

Otanmäen ilmeniittihanke ja kaivannaisjätteiden UNFC-luokitus

Yksi pisimmälle edenneistä kaivannaisjätteiden uudelleenprosessointiin tähtäävistä projekteista on Otanmäen ilmeniittihanke, jossa tavoitteena on tuottaa ilmeniittiä Otanmäen historiallisen rikastushiekka-alueen aineksesta. Kajaanissa sijaitseva Otanmäen kaivos oli toiminnassa vuosina 1953–1985, jonka aikana kaivoksesta louhittiin noin 25,5 Mt rauta-vanadiinimalmia. Rikastushiekkaa syntyi noin 9,8 Mt, joka on varastoitu 145 hehtaarin kokoiselle rikastushiekka-alueelle. Kaivosta operoi aluksi Otanmäki Oy ja myöhemmin Rautaruukki Oy. Nykyisin kaivosaluetta ja Otanmäen ilmeniittihanketta kehittää Otanmäki Mine Oy.

Aiemmissa tutkimuksissaan Otanmäki

Mine Oy on arvioinut rikastushiekan sisältävän noin 16 % ilmeniittiä. Ilmeniittiä hyödynnetään muun muassa titaanidioksidin tuotannossa, joka on tärkeä pigmentti esimerkiksi maaleissa ja muoveissa. Lisäksi ilmeniitistä voidaan erottaa titaania, joka kuuluu EU:n määrittelemiin kriittisiin raaka-aineisiin.

EU kannustaa käyttämään kaivannaisjätteiden raaka-ainepotentiaalin arvioinnissa UNFC-luokitusta (*United Nations Framework Classification for Resources*; UNECE 2019). Luokituksessa resurssia ja kehityshanketta arvioidaan kolmen ulottuvuuden kautta: ympäristö- ja sosioekonominen hyväksyttävyys (E-akseli), tekninen toteutettavuus (F-akseli) ja geologinen varmuus (G-akseli). UNFC-luokituksessa jokaiseen akseliin liittyvää epävarmuutta kuvataan numeroilla 1–4 siten että paras luokitus on 1. Otanmäen ilmeniittihanke on nykyisin luokiteltu koodilla E2F2G2, mikä tarkoittaa potentiaalisesti toteuttamiskelpoista projektia. Useimmat suomalaiset kaivannaisjätealueet sijoittuvat tätä korkeimpiin epävarmuusluokkiin (esim. E3F3G4).

Otanmäki ja FutuRaM-projekti

Otanmäki Mine Oy ja Otanmäen rikastushiekka-alue toimivat GTK:n esimerkkikohteenä FutuRaM-projektissa (kuva 3). GTK:n tutkimuksissa selvitettiin näytteenottotiheyden vaikutusta ilmeniittiresurssin arviointiin ja testattiin kolmea eri näytteenottomenetelmää edustavien näytteiden keräämiseksi.

Ensimmäisessä testatussa menetelmässä käytettiin putkinäytteenotinta, joka koostuu muoviputkesta ja läppäventtiilistä. Menetelmää pidetään tehokkaana vaihtelevissa olosuhteissa, mutta se on melko hidas. Toisessa menetelmässä käytettiin läpivirtausterää eli terää, jonka alaosa maan-ainetta kulkeutuu läpi terän sen tunkeutuessa maahan. Kolmannessa menetelmässä käytettiin auger-tyyppistä kierrekairautta. Siinä maan-ainekseen kairataan



Kuva 3. Näytteenotto käynnistymässä Otanmäen rikastushiekka-alueella osana FutuRaM-projektia. Näytteenotossa käytettiin GTK:n GM50-kairakonetta. Uusia reikiä kairattiin 33 kappaletta, joiden keskisyyvyys oli 6,9 metriä. Kuva: Teemu Karlsson.

Figure 3. Sampling is starting at the Otanmäki tailings facility as part of the FutuRaM project. Sampling was carried out using GTK's GM50 drill rig. A total of 33 new holes were drilled, with an average depth of 6.9 meters. Photo: Teemu Karlsson.

reikä kierteisellä terällä, ja näyte kerätään terästä kaapimalla. Auger-menetelmä on nopea, mutta kairareian seinämistä irtoava materiaali saattaa aiheuttaa näytteen kontaminaatiota.

Tutkimuksessa havaittiin putkinäytteenottimen ja auger-kairaukseen perustuvan menetelmän tuottavan samankaltaisia tuloksia Otanmäen rikastushiekan suhteellisen alhaisessa kosteudessa. Putkinäytteenotin osoitautui tarkemmaksi, vaikka sen näytemäärä on pienempi. Läpivirtausterä oli epätarkin,

pääasiassa näytehäviön vuoksi terän ylösvedon aikana.

Geostatistinen mallinnus osoitti, että ilmeniittiresurssin aiempi arviointi 100 x 100 metrin näytteenottoruudukolla on ollut luotettavaa: pitoisuudet ja tonnimäärät muutuivat vain vähän näytteenottotiheyden tai mallin mittakaavan muuttuessa. Tulokset viittaavat siihen, että Otanmäen rikastushiekka-alueen ilmeniittiresurssi voitaisiin luokitella UNFC-järjestelmän mukaisesti korkean

luotettavuuden (G-akseli) kategoriaan. Virallisen luokituksen päivittämiseksi tarvittaisiin kuitenkin koko rikastushiekka-alueen kattava uusi resurssimalli.

Tutkimuksessa korostui kaivannaisjäte-aluekohtaisesti räättälöityjen näytteenottostrategioiden ja geostatistisen mallinnuksen merkitys resurssipotentiaalin tarkassa arvioinnissa. FutuRaM-projekti tuottaa arvokasta tietoa rikastushiekka-alueiden tehokkaasta tutkimisesta ja luokittelusta, mikä tukee sekundääristen raaka-aineiden hyödyntämistä.

FT TEEMU KARLSSON
(teemu.karlsson@gtk.fi)

FM JANNE HOKKA
(janne.hokka@gtk.fi)

FM TUOMAS LESKELÄ
(tuomas.leskela@gtk.fi)

Kirjoittajat työskentelevät Geologian tutkimuskeskuksella ja ovat osallistuneet FutuRaM-projektin toteuttamiseen.

Summary

Extractive waste sites as sources of critical raw materials – The FutuRaM project and the Otanmäki case

The EU Raw Materials Act highlights the role of recycling in securing the availability of critical raw materials. Geological Survey of Finland (GTK) is participating in the FutuRaM project (2022–2026), which assesses the potential of closed extractive waste sites as potential sources of secondary raw materials. Although extractive wastes contain significant amounts of critical raw materials such as cobalt,

copper, and nickel, their utilization is generally limited by low concentrations and technical challenges. In the project, GTK focused particularly on the Otanmäki tailings facility and its ilmenite content. Among the closed Finnish extractive waste sites, the Otanmäki ilmenite project has progressed the furthest and has been classified as potentially feasible under the UNFC system. Research conducted within the FutuRaM project emphasizes the importance of tailored sampling strategies and geostatistical modeling in accurate resource assessment.

Lähdeluettelo

- European Commission, 2024. Critical Raw Materials Act. https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials/critical-raw-materials-act_en [10.4.2024]
- Karlsson, T., Hokka, J., Kauppila, P., Tornivaara, A. & Baldassarre, G., 2024. Potential of Critical Raw Materials in Closed Finnish Mine Waste Sites: A Preliminary Review. In: Proceedings, ICARD 2024 – 13th International Conference on Acid Rock Drainage; Halifax, Nova Scotia, Canada.
- Kinnunen, P., Karhu, M., Yli-Rantala, E., Kivikytö-Reponen P. & Mäkinen, J., 2022. A review of circular economy strategies for mine tailings. Cleaner Engineering and Technology 8, 100499. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100499>
- Leskelä, T., Hokka, J. & Karlsson, T., 2025. Geostatistical modelling of mine tailings and comparative analysis of sampling methodologies: A case study of the Otanmäki ilmenite tailings storage facility project. Journal of Geochemical Exploration 274, 107759. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2025.107759>
- Puustinen, K., 2003. Suomen kaivosteollisuus ja mineraalisten raaka-aineiden tuotanto vuosina 1530–2001, historiallinen katsaus erityisesti tuotantolukujen valossa. Geological Survey of Finland, Report M0.1/2003/3, 578 s.
- UNECE, 2019. United Nations Framework Classification for Resources, Update 2019. UNECE Energy Series 61, 20 s.