

Ei hukkaan vaan hyötykäyttöön –kiertotalous kaivosteollisuuden tulevaisuutena

NEEA HEINO



Euroopan unionin
osarahoittama

Kaivosteollisuus on yksi maailman keskeisimmistä raaka-aineiden tuottajista, mutta samalla se on myös merkittävä ympäristövaikutusten aiheuttaja. Perinteinen lineaarinen malli – ”ota, käytä, hävitä” – ei ole kestävä vaihtoehto, kun luonnonvarat hupenevat ja ympäristön kantokyky ylittyy. Tässä tilanteessa kiertotalous tarjoaa kaivosteollisuudelle uuden suunnan. Kestävyyden kannalta ensisijaista on jätteiden määrän minimoiminen, mutta myös resurssien tehokkaampi käyttö ja materiaalien elinkaaren pidentäminen.

Kiertotalous ei ole vain ympäristötekoja – se on myös taloudellisesti järkevää. Materiaalien uudelleenkäyttö ja sivuvirtojen hyödyntäminen voivat vähentää tuotantokustannuksia, parantaa resurssitehokkuutta ja avata uusia liiketoimintamahdollisuuksia. Lisäksi kiertotalous tukee vastuullisuustavoitteita ja vastaa yhä tiukempiin sääntelyvaatimuksiin sekä sidosryhmien odotuksiin.

Kaivosteollisuuden kiertotalouden toteuttaminen ei ole yksinkertainen tehtävä, mutta se on välttämätöntä kestävämmän kaivostoiminnan toteuttamiseksi. Se vaatii syvällistä ymmärrystä geologisista prosesseista, materiaalivirroista, teknologisista ratkaisuista ja ympäristövaikutuksista. Tässä tutkimuksella on keskeinen rooli. Tutkimus tuottaa tietoa, jonka avulla voidaan kehittää uusia menetelmiä esimerkiksi sivukivien ja rikastushiekkojen hyödyntämiseen, metallien talteenottoon sekundäärisistä lähteistä sekä prosessien energiatehokkuuden parantamiseen.

Sekundääristen teollisuusvirtojen arvonlisäys ja tuotteistus – SETELIT-hanke

Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) koordinoimassa SETELIT-hankkeessa (Sekundääristen teollisuusvirtojen arvonlisäys ja tuotteistus, 2023–2025) Savonian osaaminen betoniteknikassa, 3D-tulostuksessa ja vesitekniikassa yhdistettiin GTK:n asiantuntemukseen geokemiassa, mineralogiassa, röntgentomografiasa, geomateriaalien 3D-tulostuksessa ja kaivosteollisuuden ympäristövaikutusten hallinnassa. Hankkeen yrityskumppaneita olivat Agnico Eagle Finland Oy, Alva Oy, Fatec Oy, Fescon Oy, LKAB Minerals Oy, Sibelco Nordic Oy, Sika Finland Oy ja Yara Suomi Oy. Euroopan aluekehitysrahaston osarahoittamalla hankkeella pyrittiin vahvistamaan tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoimintaa kestävässä kehityksessä ja kiertotalouden edistämiseksi. Hankkeen tavoitteena oli lisätä kaivosten rikastushiekkojen hyödyntämistä sekä kaivosalueella että sen ulkopuolella vähentäen läjitettävän jätteen määrää, ympäristöriskejä ja kaivostoiminnan maimemavaikutuksia.

Hankkeessa tutkittiin rikastushiekkan ja teollisuuden muiden sekundääristen materiaalivirtojen, kuten puunpolton lentotuhkan ja terästeollisuuden masuunikuonan, vähähiilistä hyödyntämistä betonin kaltaisena materiaalina sekä kovettuvana kaivostäyttönä.



Kuva 1. Keko Geopolymeerit Oy:n valmistama pöytälevy, jossa on käytetty rikastushiekkaa ja materiaali on kovetettu geopolymeeritekniikalla. Kuva: Jouni Rissanen.

Figure 1. A tabletop manufactured by Keko Geopolymeerit Oy using tailings and hardened using geopolymers technology. Photo: Jouni Rissanen.

Innovatiiviset materiaaliratkaisut ja tuotteistus

Sementtivapaiden rikastushiekkapohjaisten tuotteiden kehittäminen edistää kaivannaisjätteen ja mahdollisten muiden sekundääristen raaka-aineiden muuttamista potentiaalisesti tuottaviksi materiaalivirroiksi. Rikastushiekan kovettamiseen etsittiin vähähiilisiä keinoja hyödyntämällä mm. tuhkaa ja kuonaa sementin sijaan. Onnistuessaan tämä tukisi energia- ja materiaalitehokkuutta, kiertotaloutta ja hiilineutraaliutta kaivannaisjätteen määrän vähentyessä ja primäärien raaka-aineiden, kuten hiekan ja sementin, tarpeen laskiessa. Lisäksi sementin valmistuksessa syntyvät CO₂-päästöt vähenevät vaihtoehtoisia sideaineita

käytettäessä. SETELIT-hankkeen aikana geopolymersoinnin sekä 3D-printtauskokeiden avulla demonstroititiin korkeamman lisäarvon tuotteiden kehittämistä rikastushiekkaa käyttäen. Keko Geopolymeerit Oy suoritti geopolymersointia käsittelevän osatutkimuksen, jonka aikana valmistettiin pöytälevy (kuva 1). 3D-printtausta toteutettiin pienessä mittakaavassa GTK:lla ja isommassa mittakaavassa Savonia-ammattikorkeakoululla.

Käytännön työkalut ja ohjeistuksia kaivoksille

Jätteen luokittelun päättymisen (ei enää jätettä, EEJ) on prosessi, jossa materiaali lakkaa olemasta jätettä ja muuttuu tuotteeksi tai

raaka-aineeksi. Tällöin siihen ei enää sovelleta jätelainsäädäntöä, vaan tuotelainsäädäntöä. Hankkeen tavoitteena oli tarjota kaivoksille nykyistä enemmän tukea ja ohjeistusta kaivannaisjätteen ei enää jätettä -prosessiin ja tuotteistuksen toteuttamiseksi. Useilla kaivoksilla on halua hyödyntää kaivannaisjätettään nykyistä tehokkaammin, mutta kaivannaisjätteen jätestatuksen purkaminen ja tuotteistus kaivoksen ulkopuoliseen käyttöön vaatii paljon resursseja, pitkäjänteisyyttä ja osaamista. Aiemmat projektit ovat tuoneet esille mahdollisuuksia erilaisille rikastushiekan hyödyntämiskohteille, mutta varsinaista hyötykäyttöä ei ole toteutettu teollisessa mittakaavassa eikä jätestatusta purettu. Rikastushiekkojen ei enää jätettä -prosessia ja tuotteistamisen vaatimia toimenpiteitä dokumentoituin kattavaksi oppaaksi, jonka avulla suomalaisten kaivosten on helpompaa aloittaa rikastushiekan tuotteistusprosessi erityisesti nyt, kun jätelaki on uudistumassa kiertotalouslaiksi ja nykyiset aluehallintovirastot (AVI) ja ELY-keskukset uudelleenorganisoituvat valtakunnalliseksi Lupa- ja valvontavirastoksi sekä kymmeneksi alueelliseksi elinvoimakseksiksi.

Tutkimusinfrastruktuurin kehittäminen: Flow Loop ja digitaalinen reseptikirjasto

SETELIT-hankkeen tavoitteena oli myös kehittää ja edistää kovettuviin kaivostäyttöihin liittyviä tutkimuspalveluita ja niiden toteuttamiseen tarvittavaa infrastruktuuria. Metallimalmikaivosten rikastushiekat saattavat sisältää kaivosalueen ulkopuolista tuotteistusta haittaavia alkuaineita ja yhdisteitä, jolloin niiden hyödyntäminen kannattaa keskittää kaivosalueelle sellaisiin kohteisiin, joista ei liukene haitta-aineita ympäristöön.

SETELIT-hanketta edeltäneessä Kove-Pro-hankkeessa tutkittiin rikastushiekan hyödyntämistä kovettuvana kaivostäyttönä, mikä

on oikein toteutettuna ympäristöystävällinen tapa hyödyntää rikastushiekkaa louhostilojen tukirakenteena. Lisäksi Kove-Pro-hankkeessa kehitettiin *Flow Loop* -testauspalvelua, joka on pastamaisten kaivannaisjätteiden tutkimuksessa ainoa laatuaan Suomessa. *Flow Loopin* avulla pystytään tutkimaan materiaalin reologisia ominaisuuksia, erityisesti pumpattavuutta. Tähän mennessä kaivokset ovat ostaneet palvelun ulkomailta, ja siksi onkin ollut tärkeää keskittyä kehittämään tätä kotimaista vaihtoehtoa SETELIT-hankkeessa Savonia-ammattikorkeakoululla. Kovettuvien kaivostäyttöjen reseptien suunnittelun perustana on pastan kulkutumisominaisuuksien optimointi. Pasta on saatava kulkemaan putkistossa täyttöpaikalle, näin ollen reseptin testauksen on lähdettävä liikkeelle *Flow Loop* -testauksesta. *Flow Loop* -testauspalvelun kehittäminen ja digitaalisten mittausensorien integrointi palveluun SETELIT-hankkeen aikana on luonut ainutlaatuista kotimaista osaamista ja palvelutarjontaa teollisuuden hyödynnettäväksi.

Hankkeessa kehitettiin myös digitaalista reseptikirjastoa, joka kokoaa Kove-Pro- ja SETELIT-hankkeiden karakterisointitulokset yhteen. Tiedon louhimista datakokonaisuudesta kokeiltiin itseorganisoiuvalla kartalla (*self-organising map*, SOM), jonka avulla tulokittiin reseptiin liittyvien parametrien suhdetta tuotteen ominaisuuksiin. Digitaalisen reseptikirjaston ja -työkalun kehitys tulee jatkumaan SETELIT-hankkeen jälkeenkin.

Materiaalien karakterisointi

Keskeisenä osana tutkimusta on materiaalien tuntemus niiden hyötykäytön edistämiseksi. Betonin kaltaisia materiaaleja tutkitaan yhä enemmän kiertotalousprojekteissa, joissa teollisuuden sivutuotteita hyötykäytetään. Näiden materiaalien – erityisesti niiden amorfisten faasien ja reaktiotuotteiden – karakterisointi aiheuttaa kuitenkin merkittäviä analyyttisiä

Kuva 2. Koekappaleita karakterisointitutkimuksia varten. Koekappaleissa on eri määrasuhteilla kahden eri kaivoksen rikastushiekkoja ja kappaleet ovat kovetettu vaihtoehtoisilla sideaineilla. Kuva: Pasi Heikkilä.

Figure 2. Test specimens for characterization studies. The test specimens contain tailings from two different mines in different proportions and the specimens are hardened with alternative binders. Photo: Pasi Heikkilä.



haasteita. Joihinkin näistä voidaan vastata hyödyntämällä edistyneitä röntgendiffraktio- ja pyyhkäiselektronimikroskopiotekniikoita. Hankkeen aikana GTK isännöi koulutustapahtumaa nimeltä ”Betonin kaltaisten materiaalien mineraloginen karakterisointi”. Koulutuksen toteuttivat asiantuntijat Bauhaus-Universität Weimarin Finger-instituutista. Heidän luentoja ja käytännönläheisen ohjauksensa ansiosta GTK:n tutkijat oppivat betonin kaltaisille materiaaleille räätälöityjä työnkuluja ja analyttisiä strategioita. Tapahtuman tavoitteena oli syventää ymmärrystä ja parantaa valmiuksia karakterisoida erityisesti kaivostoiminnasta ja metallur-

gisista sivutuotteista peräisin olevia materiaaleja.

Pumpattavuusominaisuustutkimuksen lisäksi SETELIT-hankkeen aikana suoritettiin kattavasti lähtömateriaalien ja koekappaleiden ominaisuuksien karakterisointia eri menetelmin (kuva 2). Materiaalien ominaisuuksia tutkittiin mm. kemiallisin, fysikaalisin ja mineralogisin menetelmin (kuva 3). Lisäksi koekappaleiden huokoisuutta ja rakennetta tutkittiin kolmiulotteisesti röntgentomografian avulla GTK:n tutkimuslaboratoriossa Espoossa. Tarvittavat alkuaine- ja liukoisuusanalyysit teetettiin akkreditoidussa kaupallisessa laboratoriossa.



Kuva 3. Röntgendiffraktiolaitteisto. Kuva: Geologian tutkimuskeskus / Matti Immonen.

Figure 3. X-ray diffractometer. Photo: Geological Survey of Finland / Matti Immonen.

Katsaus seminaariin: lisääarvoa sekundäärisistä teollisuusvirroista

Kuopiossa järjestettiin 20. marraskuuta 2025 Savonia-ammattikorkeakoululla seminaari, jonka teemana oli teollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen ja arvonaluonti kiertotalouden kontekstissa. Tapahtuma toimi SETE-LIT-hankkeen päätösseminaarina ja kokosi yhteen asiantuntijoita tutkimuslaitoksista, korkeakouluista ja teollisuudesta.

Seminaarin keskeisenä tavoitteena oli tarkastella, miten kaivannaisteollisuuden sivuvirtoja – erityisesti rikastushiekkoja – voidaan hyödyntää resurssina sen sijaan, että ne jäisivät jätteeksi. Tapahtuma tarjosi monitieteisen foorumin, jossa yhdistyivät geotieteet, materiaalitekniikka, prosessitekniikka ja ympäristötutkimus.

Ohjelmassa kuultiin useita asiantuntijapuheenvuoroja, jotka käsitelivät muun muassa seuraavia aiheita:

- Mineraaliesiintymä – meidän vastuullemme annettu -puheenvuorossa korostettiin mineraalivarojen vastuullista hyödyntämistä,
- Ei enää jätettä -ohjeistus rikastushiekkojen hyödyntämismahdollisuuksista helpottamaan rikastushiekan tuotetusprosessin aloitusta suomalaisilla kaivoksilla,
- *Flow Loop* -pumpattavuuden tutkimuspalvelu, joka esitteli uusia tapoja tutkia materiaalien käsiteltävyyttä,
- Datat hallinnan ja hyödyntämisen reseptityökalu, joka tarjoaa apua sivuvirtojen tehokkaaseen hyödyntämiseen,

- *Tailings in 3D printing* – innovatiivinen katsaus siihen, miten rikastushiekkaa voidaan hyödyntää 3D-tuloksessa,
- Geopolymerisoinnilla kohti lisäarvoa, jossa esiteltiin vaihtoehtoja sidosteknologiaa jätevirtojen jalostamiseen korkeamman lisäarvon tuotteiksi.

Monialainen yhteistyö ja tulevaisuuden suuntaviivat

Sekä seminaari että SETELIT-hankkeen aikainen yhteiskehittäminen yritysten kanssa osoittivat, että tehokas sivuvirtojen hyödyntäminen edellyttää tiivistä yhteistyötä tutkimuksen, teollisuuden ja hallinnon välillä. Hanke onnistui avaamaan uusia kumppanuuksia ja vahvistamaan jo olemassa olevia. Lisäksi seminaarituloisuus tarjosi osallistujille mahdollisuuden verkostoitua, jakaa tutkimustuloksia sekä keskustella uusista tutkimus- ja kehityssuunnista. Hanke ja seminaari vahvistivat käsitystä siitä, että siirtymä lineaarisesta taloudesta kohti kiertotaloutta on paitsi mahdollinen, myös välttämätön – ja tieteellä on tässä keskeinen rooli.

FM NEEA HEINO

(neea.heino@gtk.fi)

Kaivosympäristöt ja sivuvirrat
Vesi- ja kaivosympäristöratkaisut
Geologian tutkimuskeskus

Kirjoittaja on ympäristögeologi, joka on työskennellyt tutkijana Geologian tutkimuskeskuksessa (GTK) vuodesta 2013 sekä SETELIT-hankkeen koordinaattorina vuodesta 2023. Hänen asiantuntemuksensa kattaa kaivosympäristöt, kaivannaisjätteiden hallinnan ja niiden hyötykäytön mahdollisuudet, ja hänen työnsä edistää kestävämmän kaivostoiminnan kehittämistä.

Summary

Circular Economy in Mining – Turning Waste into Value

Mining produces essential raw materials but also significant environmental impacts. The traditional “take, use, dispose” model is unsustainable. A circular economy offers a more responsible path by minimizing waste, improving resource efficiency, and extending material lifecycles. Implementing circular economy in mining requires deep expertise in geology, material flows, technology, and environmental impacts – areas where research is crucial.

The SETELIT project, led by the Geological Survey of Finland (GTK) in collaboration with Savonia University of Applied Sciences, focused on reusing mine tailings and other industrial by-products like fly ash and slag. Project partners included companies Agnico Eagle Finland Oy, Alva Oy, Fatec Oy, Fescon Oy, LKAB Minerals Oy, Sibelco Nordic Oy, Sika Finland Oy and Yara Suomi Oy. Co-funded by the European Regional Development Fund, the project aimed to strengthen research, development and innovation for sustainable development and circular economy. The goal was to reduce waste and environmental risks by developing low-carbon materials for use both within and outside mining areas. Innovative demonstrations included 3D printing, geopolymerization (Fig. 1) and test specimens (Fig. 2). These approaches help transform mining waste into valuable materials, reduce CO₂ emissions, and support circular economy and carbon neutrality.

End-of-Waste (EoW) is a process in which a material ceases to be classified as waste and becomes a product or raw material. At that point, waste legislation no longer applies, and product legislation takes effect. The SETELIT project aimed to support mines in transitioning

from waste to resource by providing practical guidance for End-of-Waste process and productizing mining waste. Although many mines are willing to utilize their tailings more effectively, removing waste status and enabling external use requires significant resources and expertise. Previous research has shown potential uses for tailings, but without formal reclassification, results have remained unused. SETELIT produced a comprehensive guide to help Finnish mines begin productization, especially during the transition from the Waste Act to the Circular Economy Act and the reorganization of regulatory authorities.

Another key goal was to improve research infrastructure for hardened mine backfill. Some tailings contain elements and compounds that limit external use, making internal applications more viable. Building on the earlier Kove-Pro project, SETELIT advanced the Flow Loop testing service – unique in Finland – for optimizing paste flow in pipelines. Previously, mines relied on foreign services, so developing a domestic alternative at Savonia was essential.

Additionally, the project initiated a digital recipe library to consolidate characterization data from SETELIT and Kove-Pro. Using self-organizing maps (SOM), researchers explored relationships between recipe parameters and material properties. This tool will continue to be developed after the project.

Understanding material properties is crucial for reuse. Industrial by-products used in concrete-like materials pose analytical challenges, especially in characterizing amorphous phases and reaction products.

Advanced techniques like X-ray diffraction (Fig. 3) and scanning electron microscopy were used, and GTK hosted a training event led by experts from Bauhaus-Universität Weimar to enhance skills in mineralogical characterization. Alongside pumpability testing, the project conducted extensive characterization of raw materials and test samples using chemical, physical, mineralogical, and 3D imaging methods (e.g., X-ray tomography). Analyses were performed at GTK's Espoo research laboratory and by accredited commercial labs.

On November 20, 2025, a seminar on utilizing secondary industrial streams within the circular economy was held at the Savonia University of Applied Sciences in Kuopio. The event served as the closing seminar for the SETELIT project and brought together experts from research institutions, universities, and industry. The seminar explored how mining by-products – especially tailings – can be transformed from waste into valuable resources. It provided a multidisciplinary platform combining geosciences, materials engineering, process technology, and environmental research.

The SETELIT project demonstrated that effective reuse of industrial side streams requires close cooperation between research, industry, and public authorities. The seminar fostered networking, knowledge sharing, and discussion on future research directions. It reinforced the view that transitioning from a linear to a circular economy is not only possible but essential – and that science plays a central role in this shift.