



Lappeenrannan kalkkikaivoksen maanparannusaineeksi tuotteistettua rikastushiekkaa. Kuva: Kari Kuusipuro, Nordkalk.

Mine tailings of a limestone quarry in Lappeenranta have been productized and utilized as soil amendment. Photo: Kari Kuusipuro, Nordkalk.

Rikastushiekan arvon nostaminen ja tuotteistaminen parantaa ympäristön tilaa, säästää kustannuksia ja luo uutta yritystoimintaa

SOILI SOLISMAA

Kaivannaisjätteiden läjitys maanpinnalle luo, jätteen laadusta riippuen, ympäristöriskejä ja kustannuksia. Tulevaisuuden ideaalina on huomaamaton ja mahdollisimman ympäristöystävällinen kaivostoiminta, jonka seurauksena ei juurikaan muodostuisi kaivannaisjätteitä. Tämä onnistuu optimoimalla malmin louhinta- ja rikastusmenetelmät huippuunsa. Kaikki louhinnan seurauksena muodostuva materiaali, kuten sivukivet ja

malmin prosessoinnin sivutuotteena syntyvä rikastushiekka, hyödynnettäisiin mahdollisimman tarkasti.

Tähän ideaaliin pyrkiminen on tärkeää etenkin siksi, että tulevaisuudessa metallien ja teollisuusmineraalien tarpeen kasvaessa myös kaivannaisjätteiden määrä kasvaa. Lisäksi malmeissa esiintyvien arvoaineiden pitoisuus laskee, kun helpoimmin löydettävissä olevat rikaimmat esiintymät on jo hyödynnetty. Näin louhinnan tarve ja sen myötä rikastusjätteen

määrä on kasvamassa suuremmaksi kuin aikaisemmin.

Olemme siirtymässä uusiutuvan energian käyttöön pikavauhdilla. Aurinkovoima, tuuli-voima ja sähköisten kulkuneuvojen akut vaativat metalleja. Tähän tarpeeseen eivät kierrätysmetallit tule riittämään. Metallien lisäksi myös muiden kallioperästä louhittavien materiaalien tarve kasvaa kaupungistumisen ja väestönkasvun seurauksena. Metallien ja teollisuusmineraalien tarpeen kasvaessa on muistettava näiden vastuullinen tuottaminen. Kaivostoimintaa ei voi jättää sellaisten kehittyvien maiden harteille, joissa ihmisoikeuksia ei kunnioiteta ja joilla ei ole tarvittavaa tietotaitoa tai lainsäädäntöä kaivosten ympäristövaikutusten hallitsemiseksi. Hyvistä käytännöistä huolimatta kaivostoiminta, kuten lähes kaikki muukin ihmistoiminta, aiheuttaa aina jonkinasteisia epätoivottuja ympäristövaikutuksia.

Kaivannaisjätteiden hyötykäyttö vähentää niiden varastointi-, seuranta- ja loppusijoituskustannuksia sekä jätteistä aiheutuvia ympäristöriskejä. Tämän lisäksi jätteiden hyödyntäminen kaivosalueella ja sen ulkopuolella vähentää primäärien raaka-aineiden louhinnan tarvetta. Tämä tukee kiertotaloutta ja tavoitetta hiilineutraalista yhteiskunnasta vuoteen 2035 mennessä.

Rikastushiekan hyötykäyttömahdollisuudet

Millä tavoin kaivannaisjätteitä sitten voi hyödyntää? Sivukiviä ja rikastushiekkaa voidaan laadusta riippuen hyödyntää kaivosalueella esimerkiksi patorakenteissa, teiden pohjarakenteissa ja kaivostäyttömateriaalina. Kovettuvien kaivostäyttömateriaalien ominaisuuksia tutkitiin vastikään päättyneessä Kove-Pro-projektissa (Solismaa ym. 2021; kuva 1).

Kaivannaisjätteitä voidaan myös tuotteistaa ja hyödyntää kaivosalueen ulkopuolella. Sivukivien murskaus ja jauhaminen laajentaisivat niiden hyötykäyttömahdollisuuksia,

mutta prosessointi on kallista. Tässä kohtaa katseet kääntyvät rikastushiekkaan, joka on jo valmiiksi murskattua ja jauhettua materiaalia. Rikastushiekka on käynyt läpi useita energiaa kuluttavia prosesseja: tätä rikastushiekkoihin sidottua pääomaa ja hiilijalanjälkeä voidaan hyödyntää jalostaessa rikastushiekkoja korkeamman arvon tuotteiksi. Rikastushiekka-altaissa lojuu kasapäin käytettävissä olevaa materiaalia ja energiaa, toisin sanoen rahaa.

Kemiallisesti stabiilin eli pysyvän rikastushiekan käyttö sellaisenaan, ilman jatkojalostusta ja prosessointia, voi osoittautua taloudellisesti kannattavaksi, jos käyttökohde löytyy riittävän läheltä. Mikäli selkeää hyötykäyttökohdetta ei löydy lähialueelta, toimintaa on vaikeaa saada taloudellisesti kannattavaksi. Kuljetuskustannukset ja primäärien raaka-aineiden hankkimisen helppous ja edullisuus pitävät tästä huolen. Lappeenrannan kalkki-kaivoksen rikastushiekka on tuotteistettu ja tätä kalsiittirikasta hiekkaa hyödynnetään muun muassa maanparannusaineena. Harmillisesti toimijat käyttävät mieluummin tuttuja primäärejä raaka-aineita ja käyttökohteet ovat toistaiseksi jääneet vähäisiksi. Useita Lappeenrannan kalkki-kaivoksen rikastushiekkaan liittyviä tutkimuksia on meneillään, ja kun tuotteelle pystytään luomaan sen arvoa nostavia, tarpeellisia ja hyvin toimivia käyttösovelluksia, on suosiokin taattu. Lisätietoa tutkimuksista löytyy esimerkiksi Greenreality-sivustolta (Greenreality Network 2022).

Hyvä esimerkki rikastuksessa ylijäävän materiaalin tuotteistuksesta on myös Siilinjärven apatiittikaivoksella sivutuotteena muodostuva kiille, jota käytetään muun muassa automaalin raaka-aineena. Kaivoksen toiminnasta syntyy tästä huolimatta runsaasti kiillepitoista rikastushiekkaa, jolle etsittiin korkeamman arvon hyötykäyttökohteita poikkitieteellisessä SA CERATAIL-projektissa (Sreenivasan ym. 2017; Solismaa ym. 2018).

Metallimalmiesiintymät ovat usein sulfidirikkaita (pois lukien oksidimalmit), jolloin



Kuva 1. Kovettuvien kaivostäyttömateriaalien pitkäaikaistutkimuksen koejärjestely. Kahdessa ensimmäisessä kolonnissa on pelkkää rikastushiekkaa ja lopuissa sementin ja kuonan avulla kovetettuja rikastushiekkaa sisältäviä kappaleita murskattuina ja kokonaisina. Tutkimuksessa materiaaleja käsiteltiin kaivosvedellä yhdeksän kuukauden ajan ja saadut tulokset julkaistaan myöhemmin. Kuva: Soili Solismaa.

Figure 1. Test arrangements for the long-term behavior study of cemented paste backfill materials. Two first columns contain only mine tailings and rest of the columns contain crushed and whole mine tailings based test specimens hardened with cement and blast furnace slag. Materials were exposed to mine water for nine months and the results of the study will be published later. Photo: Soili Solismaa.

myös niiden louhinnan seurauksena syntyvät rikastushiekat sisältävät sulfidimineraaleja kuten rikki- tai magneettikiisua. Nämä mineraalit ovat ongelmallisia ympäristövaikutusten hallinnan ja jätteen hyötykäytön suhteen. Sulfidipitoinen rikastushiekka reagoi veden ja hapen kanssa muodostaen rikkihappoa, jonka vaikutuksesta veteen liukenee metalleja. Ilmiötä kutsutaan happamaksi kaivosvalumaksi (*acid mine drainage, AMD*). Sulfidipitoisen rikastushiekan hyötykäyttö on kuitenkin mahdollista, mikäli sulfidien määrä on vähäinen (luonnostaan tai jatkoprosessoinnin seurauksena) tai se stabiloidaan niin, etteivät sulfidimineraalit pääse hapettumaan käyttökohteessaan.

Toisaalta pelkkä rikkikiisu voi olla tuote. Pyhäsalmen Zn-Cu-kaivos toimittaa sivutuotteena muodostuvaa rikkikiisua Yaran lannoite-

tehtaalte, jossa rikkikiisusta valmistetaan rikkihappoa. Yaran tuottama apatiittirikaste käsitellään rikkihapolla, jolloin muodostuu fosforihappoa lannoitusteollisuuden tarpeisiin ja prosessin sivutuotteena kipsiä, jota puolestaan käytetään maanparannusaineena ja lannoitteiden valmistuksessa. Suurin osa kipsistä kuitenkin läjitetään, koska näin isolle kipsimäärälle ei ole vielä löytynyt sopivaa käyttökohdetta.

Miten rikastushiekkojen arvoa sitten voisi nostaa niin, että niiden hyötykäyttö voisi tuoda isompia tuloja kaivokselle tai jopa synnyttää uutta yritystoimintaa? Ympäristön tilaa parantavat asiathan toteutuvat tehokkaimmin lainsäädännön vaatimusten lisäksi taloudellisen kannattavuuden kautta. Rikastushiekasta on mahdollista valmistaa tuotteita rakennus-, keraami-, eriste- ja suodatinteollisuudelle sekä monille muille aloille prosessoimalla sitä

eteenpäin ja kovettamalla esimerkiksi sementin, sementtiä korvaavien materiaalien tai geopolymerisoinnin avulla.

Kovettuakseen rikastushiekka tarvitsee käytännössä aina jonkin aktivointimenetelmän lisäämään reaktiivisuutta. Aktivointimenetelmistä mainittakoon jauhaminen, kuumennus tai reaktiivisen lisäaineen käyttö. Jauhamisella on tarkoitus lisätä amorfisen aineksen osuutta, jolloin reaktiivisuus paranee ja uusien yhdisteiden syntymismahdollisuudet paranevat, kun materiaalia lisäksi kuumennetaan tai käsitellään muulla tavoin. Kuumennuksen avulla mineraalit sulavat muuttuen toisiksi faaseiksi, jolloin hiekka saadaan kiinteään muotoon (Solismaa ym. 2018; Karhu ym. 2019, 2020). Rikastushiekan aktivaattorina voidaan käyttää esimerkiksi erityyppisiä sementtejä tai sementtiä korvaavia sekundaarisia materiaaleja kuten kuonaa tai tuhkaa. Sementin tuotanto aiheuttaa tunnetusti hiilidioksidipäästöjä, joten olisi hyvä käyttää mahdollisuuksien mukaan sementtiä korvaavia raaka-aineita. Rikastushiekka tai jotkin sen sisältämät mineraalit – kuten Sotkamon talkkikaivoksen rikastushiekassa runsaana esiintyvä magnesiitti – voivat toimia osana sementoitusprosessia (esim. Ismailov ym. 2020) tai jopa sementtiä korvaavana raaka-aineena (Simonsen ym. 2020). Geopolymerisoinnissa rikastushiekka aktivoidaan vahvalla alkaliaktivaattorilla, kuten natrium- tai kaliumhydroksidilla. Geopolymerisoinnin onnistumiseksi tarvitaan usein myös Al-Si-lisäystä, kuten kaoliiniittia, jonka kemiallinen kaava on $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (esim. Kinnunen ym. 2018).

Rikastushiekan käyttöä hiilidioksidin varastona on tutkittu Åbo Akademiella jo pitkään (esim. Lavikko 2017). Uudempi, testaamista vaille valmis, ajatus on rikastushiekan muokkaaminen hiilidioksidikäsitteilyllä paremmin hyödynnettävään muotoon. Tällöin saadaan kaksi erilaista hyötyä: hiilidioksidin sitominen, sekä prosessin seurauksena syntyvä sekundääri-nen jatkokäytettävä materiaali. Rikastushiekan

magnesiumsilikaattimineraalit on mahdollista muuttaa karbonaattimuotoon hiilidioksidikäsitteilyn avulla ja magnesiumkarbonaatille on olemassa selkeämpiä käyttökohteita kuin käsittelemättömälle magnesiumsilikaattirikkaalle rikastushiekalle. Aihetta tutkitaan vastikään alkaneessa Åbo Akademin koordinoimassa BF PILCCU -projektissa.

Rikastusmenetelmien kehittyessä on tullut mahdolliseksi ottaa malmin metallit tarkemmin talteen. Tämä on lisännyt kiinnostusta vanhoja metallipitoisia rikastushiekkoja kohtaan, koska niiden uudelleenprosessointi voi olla taloudellisesti kannattavaa. Ainakin Chilen suurilla kuparikaivoksilla metalleja otetaan talteen historiallisista rikastushiekoista tälläkin hetkellä. Kotimainen esimerkki metallien talteenotosta löytyy 1980-luvulta, jolloin Outokummun kobolttipitoisia rikastushiekkoja prosessoitiin uudelleen. Metallien talteenotto vanhoista rikastushiekoista voi jättää jälkeensä paremmin hyödynnettävissä olevaa materiaalia, josta on poistettu hyötykäytön kannalta haitallisia metalleja ja sulfidimineraaleja. Toisaalta vanha rikastushiekka on rapautunutta ja siinä mahdollisesti esiintyvät sekundaariset saostumat voivat tuottaa päänsäivä uudelleenprosessoinnissa.

Kaivannaisjätteiden ominaisuudet vaihtelevat malmiesiintymän mineralogian ja malmin prosessointimenetelmän mukaan. Pohdittaessa kaivoksella muodostuvan rikastushiekan hyötykäyttöä, on jokainen kohde tutkittava ja arvioitava erikseen perusteellisesti (kuva 2). Lisäksi rikastushiekan tuotteistusprosessi vaatii resursseja, osaamista ja pitkäjänteisyyttä. Kaivannaisjätteiden hyötykäytön ympärillä on tällä hetkellä paljon pohdintaa siitä, millä työkaluilla päästäisiin tuotteistamaan rikastushiekat. Työ- ja elinkeinoministeriö julkaisi vastikään selvityksen (Vesa 2020), jonka pohjalta kaivannaisjätteiden hyötykäytön asiantuntijoita pyritään kokoamaan yhteen kansalliseksi koordinaatioryhmäksi, joka pyrkii edistämään käytännön toimenpiteillä kaivannaisjätteiden



Kuva 2. Rikastushiekan hyötykäyttötutkimus lähtee liikkeelle tutkimuksen suunnittelusta ja näytteenotosta. Kuvassa otetaan rikastushiekanäytteitä Mätäsvaaran suljetun molybdeenikaivoksen rikastushiekkalueelta. Kuva: Teemu Karlsson.

Figure 2. Utilization study of mine tailings starts from planning and sampling. Figure is taken from the Mätäsvaara closed molybdenum mine site. Photo: Teemu Karlsson.

hyödyntämistä. Työn pohjalta kootut jatko-toimenpide-ehdotukset on tarkoitus julkaista loppuvuodesta 2022.

Yhteenveto

Kaivannaisjätteiden hyötykäyttö vähentää niiden varastointi-, seuranta- ja loppusijoituskustannuksia sekä ehkäisee jätteistä aiheutuvia ympäristöriskejä. Tämän lisäksi jätteiden hyötykäyttö kaivosalueella ja sen ulkopuolella vähentää primäärien raaka-aineiden louhinnan tarvetta. Erityisen kiinnostava kaivosjäte hyötykäytön kannalta on rikastushiekka, joka on käynyt läpi useita energiaa kuluttavia prosesseja sisältäen näin jo lähtökohtaisesti hyödynnettävissä olevaa pääomaa.

Pohdittaessa kaivoksilla muodostuvan rikastushiekan hyötykäyttöä, on jokainen kohde tutkittava ja arvioitava erikseen perusteellisesti. Asiaan on herätty monella taholla ja todettu, että hyötykäyttöä tukevia toimenpiteitä tarvitaan tulevaisuudessa.

Kiitokset

Aiheeseen liittyvä tietämykseni pohjautuu yhteisrahoitteisissa projekteissa (SA CERATAIL ja EAKR Kove-Pro) tehtyyn yhteistyöhön. Kiitokset lähtevät siis GTK:n asiantuntijoiden, Oulun yliopiston, VTT:n, Tampereen teknillisen yliopiston, Savonia-ammattikorkeakoulun ja projektien rahoittajien suuntaan.

FM SOILI SOLISMAA

(soili.solismaa@gtk.fi)

Geologian tutkimuskeskus, PL 1237,
FI-70211 Kuopio

Kirjoittaja on geologi, joka valmistelee väitöskirjatyötä Aalto-yliopistolle aiheesta: Rikastushiekkapohjaisten tuotteiden ympäristöominaisuudet. Hän on työskennellyt GTK:lla yli kymmenen vuotta: tällä hetkellä tutkijana GTK:n kiertotalouden ratkaisut yksikössä.

Summary

Valorization of mine tailings improves the state of the environment, saves costs and creates new business possibilities

The utilization and valorization of extractive waste reduces the storage costs, monitoring and disposal costs, and the possibility of environmental disadvantages caused by wastes. In addition, the utilization of extractive wastes reduces the need to extract primary raw materials.

Waste rocks and tailings can be utilized inside the mining area, for example in dam and road structures and as backfill material. Extractive waste can also be commercialized and utilized outside the mine site. Crushing and grinding waste rocks would expand their potential for utilization, but processing is expensive. Mine tailings are already crushed and ground material. Tailings have undergone several energy-consuming processes, which is value tied up in the mine tailings. This value can be reclaimed when mine tailings are re-processed into higher value products. Processing may include, for example, drying, grinding, heating, re-enrichment, or combining with other materials. The added value generated by processing can make the utilization of mine tailings a profitable business.

The properties of mine tailings vary depending on the mineralogy of the ore deposit and the used ore processing method. When considering the valorization of mine tailings, each site must be thoroughly investigated and evaluated separately. In addition, the production process of tailings requires its own resources, know-how and perseverance.

The Ministry of Economic Affairs and Employment of Finland is willing to contribute to the utilization of extractive waste by setting up a national coordination group which is tasked to enhance the utilization. The

proposal for further measures of the coordination group is published later.

Lähdeluettelo

- Greenreality Network, 2022. Urban Infra Revolution (UIR) -hanke. <https://www.greenreality.fi/urban-infra-revolution-uir-hanke> [5.5.2022].
- Ismailov, A., Merilaita, N., Solismaa, S., Karhu, M. & Levänen, E., 2020. Utilizing mixed-mineralogy ferroan magnesite tailings as the source of magnesium oxide in magnesium potassium phosphate cement. *Construction and Building Materials* 231, 117098. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117098>.
- Karhu, M., Lagerbom, J., Honkanen, M., Huttunen-Saarivirta, E., Kiilakoski, J., ym., 2020. Mining tailings as a raw material for glass-bonded thermally sprayed ceramic coatings: microstructure and properties. *Journal of the European Ceramic Society* 40, 4111–4121. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceram-soc.2020.04.038>
- Karhu, M., Lagerbom, J., Solismaa S., Honkanen, M., Ismailov, A., ym., 2019. Mining tailings as raw materials for reaction-sintered aluminosilicate-ceramics: Effect of mineralogical composition on microstructure and properties. *Ceramics International* 45, 4840–4848. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.11.180>
- Kinnunen, P., Ismailov, A., Solismaa, S., Sreenivasan, H., Räisänen, M. L., ym., 2018. Recycling mine tailings in chemically bonded ceramics – A review. *Journal of Cleaner Production* 174, 634–649. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.280>
- Lavikko, S., 2017. Geological and mineralogical aspects on mineral carbonation. Väitöskirja. *Geologia ja mineralogia, Luonnontieteiden ja tekniikan tiedekunta, Åbo Akademi, Turku*, 54 s. <https://www.doria.fi/handle/10024/130096>
- Simonsen, A., Solismaa, S., Hansen, H. & Jensen, P., 2020. Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. *Waste Management* 102, 710–721. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.037>
- Solismaa, S., Torppa, A., Kuva, J., Heikkilä, P., Hyvönen, S., ym., 2021. Substitution of cement with granulated blast furnace slag in cemented paste backfill: evaluation of technical and chemical properties. *Minerals* 11, 1068. <https://doi.org/10.3390/min11101068>

Solismaa, S., Ismailov, A., Karhu, M., Sreenivasan, H., Lehtonen, M., ym., 2018. Valorization of Finnish mining tailings for use in the ceramics industry. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 90, 33–54. <https://doi.org/10.17741/bgsf/90.1.002>

Sreenivasan, H., Kinnunen, P., Heikkinen, E.-P. & Illikainen, M., 2017. Thermally treated phlogopite as magnesium-rich precursor for alkali activation

purpose. *Minerals Engineering* 113, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.08.003>.

Vesa, J., 2020. Kaivosten sivukivien ja rikastushiekan hyödyntämismahdollisuudet – esiselvitys. *Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 2021:48*. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki, 90 s. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-713-7>

Firma- ja rekrypäivä Turun Geotalolla

PIETARI SKYTTÄ, KAISA NIKKILÄ JA KIRSI PÄÄKKÖNEN

Turun Geotalolla kokoonnuttiin torstaina 21.4.2022 yhden iltapäivän mittaiseen firma- ja rekrypäivään. Tapahtuman järjestivät Turun yliopiston ja Åbo Akademin geologian yksiköt sekä yksiköiden opiskelijoiden yhteinen ainejärjestö Pulterit ry. Päivän päätavoite oli saattaa yhteen geotalalla toimivia firmoja ja opiskelijoita. Päivä oli ensimmäinen laatuaan ja heti menestys! Menestyksen takeena olivat osaltaan kevään mittaan helpottaneet koronarajoitukset, jotka mahdollistivat kasvotusten tapahtuneet keskustelut, mutta etenkin opiskelijoiden tarve saada tietoa valmistumisen jälkeen hämmäyttävän työelämän mahdollisuuksista. Tapahtumaa lähdettiin alun perin suunnittelemaan, koska opiskelijoilla on jo pitkään ollut toiveita paremmista kontakteista työelämän puolelle. Erityisesti on huomattu,

että monet geotalan firmat saattavat olla opiskelijoille tuttuja nimensä puolesta, mutta ei ole kuitenkaan täysin selvää millaisia työmahdollisuuksia geologin paperit voivat avata eri yrityksissä. Näihin toiveisiin pyrittiin vastaamaan kutsumalla paikalle toimijoita, jotka edustaisivat geotalaa mahdollisimman laajasti. Yritysten kanssa keskusteltiin ennakkoon päivän yleisistä tavoitteista ja tämänkaltaisen tapahtuman tarpeellisuudesta, mutta tarkempia linjauksia päivän painotuksista ei tehty.

Varsinaisessa tapahtumassa paikalla oli edustus yli kymmenestä geologian alan toimijasta, geologian opiskelijoita sekä Turun yliopistosta että Åbo Akademiasta, sekä myöhemmin iltapäivällä lisäksi Turun yliopiston vanhemmista alumneista, ”Kakoliiteista”. Iltapäivä avattiin tietoisuilla (kuva 1), jotka sisäl-

Kuva 1. Firma- ja rekrypäivä Turun Geotalolla avattiin lyhyillä yritysten esittelyillä. Kuva: Kirsi Pääkkönen.

Figure 1. Oral presentations opened the Company and Recruitment Day at the Geohouse of Turku. Photo: Kirsi Pääkkönen.

