



Kaivannaisjätealueilla muodostuva haitallinen suotovesi ja sen käsittely on yksi kaivosteollisuuden suurimmista ympäristöhaasteista. Kuva: Teemu Karlsson

Extractive waste originated low-quality drainage and its management is one of the biggest environmental challenges for the mining industry. Photo: Teemu Karlsson

Kaivannaisjätteiden ympäristöominaisuuksien arviointi

TEEMU KARLSSON

Kaivannaisjätealueilta peräisin olevat haitalliset suotovedet ja niiden hallinta ovat yksi kaivosteollisuuden suurimmista ympäristöhaasteista. Kaivannaisjätteiden ympäristöominaisuudet ja tulevien suotovesien laatu pitäisi selvittää jo ennen kaivostoiminnan käynnistämistä. Suotovesien laadun tarkka ennustaminen on vaikeaa, mutta lyhytkestoisilla laboratoriotesteillä voidaan tehdä alustavia arvioita. Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) tutkimuksissa pyritään kehittämään näitä testausmenetelmiä ja parantamaan arvioiden laatua

Haitallisten suotovesien synty

Kaivosten haitallisiin happamiin suotovesiin viitataan usein lyhenteillä AMD (*acid mine drainage*) tai ARD (*acid rock drainage*). Haitallisia suotovesiä syntyy erityisesti sulfidimineraaleja sisältäviä esiintymiä hyödyntävien kaivosten kaivannaisjätealueilla, kuten rikastushiekka-
altailla tai sivukivikasoilla (kuva 1). Happoa muodostuu sulfidimineraalien, erityisesti rikkikiisun (FeS_2) ja magneettikiisun ($\text{Fe}_{0,83-1}\text{S}$),

hapettuessa altistuttuaan ilmakehän hapelle ja vedelle (Singer & Stumm 1970). Haitallisen suotoveden muodostuminen riippuu kiviaineksen mineralogiasta, eli pääasiassa happoa tuottavien sulfidien ja happoa neutraloivien karbonaatti- ja silikaattimineraalien laadusta ja määrien suhteesta, sekä rapautuviin mineraaleihin sitoutuneiden haitta-ainemääristä (Blowes & Jambor 1990). Vaikka kiviaineksen neutralointikyky riittäisikin puskuroimaan muodostuvan hapon määrän, saattaa suotovesi silti sisältää korkeita haitta-ainepitoisuuksia. Tällöin haitallisesta suotovedestä voidaan käyttää lyhennettä NMD (*neutral mine drainage*).

Kaivannaisjätteiden ympäristöominaisuudet ja tulevien suotovesien laatu pitäisi selvittää kaivosprojektin varhaisessa vaiheessa, jo ennen varsinaisen kaivostoiminnan käynnistämistä. Tietoa tarvitaan esimerkiksi suunniteltaessa jätealueiden rakenteita, vesienkäsittelyn tarvetta, kaivoksen sulkemisratkaisuja, sekä kaivannaisjätteiden hyötykäyttöä. Tutkimuksiin sopivia näytteitä voidaan kerätä esimerkiksi malminetsintävaiheen



Kuva 1. Haitallista suotovettä muodostuu esimerkiksi sivukivikasoilla sulfidimineraalien hapettuessa. Kuva: Teemu Karlsson

Figure 1. Low-quality drainage is formed for example at the waste rock piles as a result of sulfide mineral oxidation. Photo: Teemu Karlsson

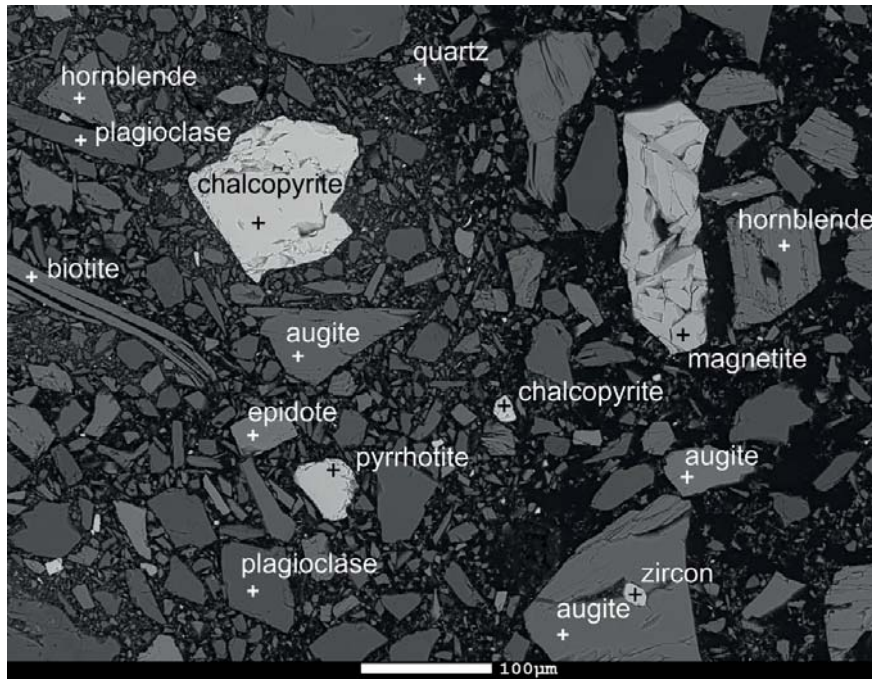
kairasydämistä ja rikastuskokeissa syntyneistä rikastushiekoista. Edustava näytteenotto on onnistuneen tutkimuksen perusedellytys. Suotovesien laadun tarkka ennustaminen on kuitenkin vaikeaa, sillä jätealueet ovat laajoja ja sisältävät usein sekalaista mineraalainesta. Suotoveden laatuun vaikuttavat esimerkiksi alueen ilmasto, sekä erilaiset mineralogiset, kemialliset, hydrologiset ja mikrobiologiset tekijät (Blowes & Jambor 1990).

Käytettyjä menetelmiä kaivannaisjätteiden ympäristöominaisuuksien selvittämiseen ovat esimerkiksi lyhytkestoiset hapontuottotestit, eri vahvuiset uutot, pitkäkestoiset kineettiset testit (kuten kosteuskammiotestit ja suurikoiset testikaset), geokemiallinen mallinnus, sekä jäteaineksen vertaaminen tunnettuihin kaivannaisjätealueisiin (Lapakko 2002). Tässä kirjoituksessa keskitytään GTK:n tutkimiin lyhytkestoisiin ja suhteellisen yksinkertaisiin laboratorioissa tehtäviin hapontuotto- ja uutotesteihin, joita käytetään yleensä tutkimusten alkuvaiheessa ja lähtötietoina suunniteltaessa

tarkempia jatkotutkimuksia. Viime vuosina GTK on kehittänyt myös kaivannaisjätteiden testausta pitkäkestoisissa lysimetrikokeissa, sekä geokemiallista mallinnusta, joiden tuloksiin voi tutustua esimerkiksi Muniruzzaman ym. (2021) julkaisussa.

Suotoveden happamuus

Kiviaineksen kykyä tuottaa hapanta suotovettä tutkitaan yleisesti standardin EN-15875 mukaisella ABA-testillä (*acid-base accounting*). Testi sisältää hapontuottopotentiaalin (*acid potential*, AP) arvioinnin näytteen rikkipitoisuuden perusteella, sekä neutralointipotentiaalin (*neutralization potential*, NP) arvioinnin happolla titraamalla. Näytteen kykyä tuottaa hapanta valumaa voidaan arvioida esimerkiksi NP- ja AP-lukujen suhteella. Näyte on todennäköisesti happoa tuottavaa, jos NP/AP-arvo on alle 1, epävarmuusalueella jos NP/AP-arvo on 1–3, ja happoa tuottamatonta, jos NP/AP-arvo on yli 3.



Kuva 2. Pyyhkäisyelektronimikroskopian (*scanning electron microscopy*, SEM) avulla voidaan selvittää kivi­näytteen tarkka mineralogia. SEM-kuvaan on tunnistettu mineraalit: sarvivälke (*hornblende*), plagioklaasi (*plagioclase*), biotiitti (*biotite*), augiitti (*augite*), epidootti (*epidote*), magneettikiisu (*pyrrhotite*), kuparikiisu (*chalcopyrite*), zirkoni (*zircon*), kvartsi (*quartz*) ja magnetiitti (*magnetite*). Kuva muokattu lähteestä Karlsson ym. (2021b).

Figure 2. Detailed mineralogy of the rock sample can be determined by the scanning electron microscope (SEM). Several minerals have been recognized in SEM image. Image modified from Karlsson et al. (2021b).

Suotoveden happamuuden ennustami­seen voidaan käyttää myös niin sanottua NAG-testiä (*net acid generation*). Testi perus­tuu sulfidimineraalien nopeaan hapettumiseen vetyperoksidin (H_2O_2) avulla, ja testiliuoksen pH:n mittaukseen tietyn ajan jälkeen (Smart ym. 2002). Näyteainees on todennäköisesti happoa tuottavaa, jos testiliuoksen pH on alle 4,5.

ABA- ja NAG-testeissä on kuitenkin mine­ralogiaan liittyviä ongelmia (Parbhakar-Fox & Lottermoser 2015). Hapontuottopotentialiaali voidaan yliarvioida, jos kiviaines sisältää muita sulfideja tai rikkimineraaleja, kuin runsaasti happoa tuottavaa rikkikiisua, joka on oletuksena rikin lähteeksi standardin EN-15875 mukaisessa ABA-testissä. Esimerkiksi Suomen sivukivialueilla yleisin sulfidimine­raali on magneettikiisu (Karlsson ym. 2022), jonka hapettumisreaktioissa syntyy rikkikiisua vähemmän happoa. Testeissä voidaan myös

aliarvioida näytteen neutralointipotentiaali, sillä ne keskittyvät nopeasti reagoiviin karbo­naattimineraaleihin, kuten kalsiittiin ($CaCO_3$) ja dolomiittiin ($CaMg(CO_3)_2$). Hitaammin reagoivien silikaattien neutralointikyky saattaa jäädä lyhytkestoisessa testissä huomaamatta. Suomen sivukivet sisältävät keskimäärin vä­hän karbonaatteja, ja silikaatit, kuten biotiitti ($(K(Mg,Fe)_3(AlSi_3O_{10})(OH,F)_2)$), ovat tärkeitä neutralointipotentiaal­in lähteitä (Karlsson ym. 2018a).

ABA- ja NAG-testien luotettavuutta voi­daan parantaa tarkastelemalla tuloksia yhdes­sä näytteen mineralogisten ominaisuuksien kanssa. Mineralogian voidaan analysoida esimerkiksi pyyhkäisyelektronimikroskopian (*scanning electron microscopy*, SEM) avulla (kuva 2). AP-luvun oikeellisuutta voidaan ar­vioida näytteen rikkiä sisältävien mineraalien perusteella, ja NP-lukua neutralointipoten­tiaalia omaavien karbonaattien ja silikaattien

määrän ja laadun perusteella. AP- ja NP-luvut voidaan myös laskea suoraan näytteen mineraalogian perusteella, jolloin eri sulfidimineraalien hapontuottopotentiaali ja myös silikaattien neutralointipotentiaali tulevat huomioiduiksi (Karlsson ym. 2018a).

Haitta-aineiden liikkuvuus

Kaivannaisjätteiden sisältämien haitta-aineiden liikkuvuus ja pitoisuudet suotovesissä liittyvät yleensä sulfidimineraalien hapettumiseen, sillä ne ovat haitta-aineiden lähde (Lapakko 2002). Näin ollen sulfidispesifiset uuttotestit ovat erityisen hyödyllisiä haitta-aineiden liikkuvuuden arvioimiseksi. Yksi käytetyimmistä menetelmistä on kuningasvesiuutto, johon viitataan myös maaperän kunnostustarpeen arvioimiseen liittyvässä asetuksessa (Vna 214/2007), sekä kaivannaisjätteen karakterisointiin liittyvässä asetuksessa (Vna 190/2013). Kuningasvesiuuttoisten pitoisuuksien onkin havaittu indikoivan hyvin haitta-aineita, jotka esiintyvät suotovesissä koholla olevina pitoisuuksina (Karlsson ym. 2021a). Kuningasvesi on väkevän typpihapon ja väkevän suolahapon seos. Koska se liuottaa sulfidien lisäksi osittain myös joitakin rapautumista kestäviä mineraaleja, saattavat kuningasvesiuuttoiset haitta-ainepitoisuudet (erityisesti kromin ja alumiinin osalta) antaa joissakin tapauksissa (erityisesti neutraaleissa suotovesissä) liian pessimistisen arvion. Toinen hyödyllinen menetelmä on H_2O_2 -ammoniumsitraattiuutto, joka on hieman kuningasvettä sulfidispesifisempi (Karlsson ym. 2021b). Tässä uutossa esimerkiksi kromipitoisuus vastaa paremmin tilannetta suotovesissä, mutta toisaalta alumiinipitoisuus voi jäädä liian alhaiseksi happamiin suotovesisysteemeihin verrattuna.

Myös alun perin hapontuottokyvyn mittaamiseen tarkoitettua NAG-testiä voidaan hyödyntää haitta-aineiden liikkuvuuden arvioimiseksi analysoimalla testiliuoksen sisältämät alkuainepitoisuudet. Testiliuoksessa runsaina

esiintyvät haitta-aineet ovat usein koholla myös vastaavissa suotovesissä (Karlsson ym. 2021a). Menetelmä soveltuu kuitenkin huonosti NMD-tapausten ennustamiseen, sillä testiliuoksen sisältämät haitta-aineet saostuvat herkästi liuoksen pH:n noustessa. Alhaiset liuospitoisuudet eivät näissä tapauksissa välttämättä anna todellista kuvaa suotovedessä koholla olevista pitoisuuksista.

Kaivannaisjätteiden sisältämien haitta-aineiden liikkuvuuden arvioinnissa näkee usein käytettävän myös standardiin SFS-EN 12457-3 perustuvaa kaksivaiheista ravistelutestiä, jonka tuloksia verrataan kaatopaikka-asetuksessa (Vna 331/2013) määritettyihin raja-arvoihin pysyvälle, tavanomaiselle ja vaaralliselle jätteelle. Kuten asetuksen tekstissä todetaan, ei kaatopaikka-asetusta kuitenkaan tulisi soveltaa kaivannaisjätteille. Ravistelutesti on käytännössä heikko lyhytkestoinen vesiuutto, jonka perusteella ei ole mahdollista arvioida kiviaineksen ympäristöominaisuuksia pidemmällä aikavälillä. Haitta-ainepitoisuudet tuoreelle kiviainekselle tehdyssä ravistelutestissä ovatkin usein alle määrittämissä rajojen, vaikka vastaavien suotovesien laatu olisikin heikko (Karlsson ym. 2018b).

Menetelmien kehitystarpeita

Erityisesti Suomen olosuhteissa tärkeiden silikaattimineraalien kykyä neutraloida happamuutta tulisi tutkia tarkemmin. Nykyisin eri silikaattien reaktiivisuuksista on tarjolla ristiriitaista tietoa, joten NP-luvun luotettava laskeminen on joissakin tapauksissa hankalaa. Tärkeä tutkimuskohde olisi myös silikaattien kyky vastata Suomessa yleisen magneettikiisun suhteellisen nopeasti tuottamaan happamuuteen.

Kaivannaisjätteiden ympäristöominaisuuksien arvioinnissa keskitytään usein pelkästään rikkipitoisuuteen ja kuningasvesiuuttoisten pitoisuuksien vertaamiseen puhdistustarpeen arviointiin liittyvän ns. PIMA-asetuksen raja-arvoihin. Pysyvän kaivannaisjätteen rikin ra-

ja-arvona pidetään 0,1 prosenttia (tai 1 prosenttia, jos AP/NP-arvo on suurempi kuin 3, ks. Vna 190/2013). On kuitenkin tunnettuja tapauksia, joissa näennäisesti hyvälaatuinen kiviaines on tuottanut haitallista suotovettä. Esimerkiksi Diavikin timanttikaivoksella Kanadassa rakennettiin graniittisesta sivukivestä testikasa, jonka kiviaines sisälsi keskimäärin 0,05 % rikkiä ja alle PIMA-asetuksen kynnyksarvon (50 mg/kg) nikkeliä (27 mg/kg). Seurantajakson aikana suotoveden pH laski yllättäen alle arvon 4,5 ja nikkeli-pitoisuus kävi korkeimmillaan arvossa 20 mg/l (Bailey ym. 2015). Rikin ja PIMA-asetuksessa määritettyjen haitta-aineiden raja-arvojen käyttämistä kaivannaisjätteille tulisikin arvioida tarkemmin (Karlsson ym. 2021c).

FT TEEMU KARLSSON

(teemu.karlsson@gtk.fi)
Kiertotalouden ratkaisut,
Geologian tutkimuskeskus

Kirjoittaja työskentelee geologina Geologian tutkimuskeskuksessa, keskittyen erityisesti kaivosalueiden ympäristötutkimuksiin. Tällä hetkellä tutkimusten pääteemoina ovat kaivannaisjätteiden karakterisointi, kaivosten sulkeminen, ympäristöriskien arviointi, kiertotalous ja sekundääristen raaka-aineiden talteenotto sivuvirroista. Teksti perustuu kirjoittajan väitöskirjaan ”Geochemical and Mineralogical Characterization of Waste Rocks for Preliminary Mine Drainage Quality Prediction”, joka on ladattavissa osoitteesta <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1636866/FULLTEXT02.pdf>.

Summary

Extractive waste originated low-quality drainages and their management is one of the biggest environmental challenges for the mining industry. The environmental characteristics of extractive waste and the quality of the future drainage should be determined before the actual mining activities commence. Accurate prediction of drainage

quality is difficult due to large masses and several factors affecting the weathering processes. However, some short-term laboratory tests can be utilized for preliminary testing. In assessing whether the mine waste material is acid producing, mineralogical analyses can be used to enhance the prediction provided by the common geochemical tests. The acid and neutralization potentials of the rock material can also be calculated based solely on modal mineralogy. In assessing the mobility of harmful elements, the sulfide specific extraction methods e.g., based on aqua regia or H₂O₂-ammonium citrate, are useful as harmful elements are usually bound to sulfide phases.

Lähdeluettelo

- Bailey, B. L., Blowes, D. W., Smith, L. & Segó, D. C., 2015. The Diavik Waste Rock Project: Geochemical and microbiological characterization of low sulfide content large-scale waste rock test piles. *Applied Geochemistry* 65, 54–72. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.10.010>.
- Blowes, D. W. & Jambor, J. L., 1990. The pore-water geochemistry and the mineralogy of the vadose zone of sulfide tailings, Waite Amulet, Quebec, Canada. *Applied Geochemistry* 5, 327–346. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(90\)90008-S](https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90008-S)
- Karlsson, T., Alakangas, L., Kauppila, P. & Räisänen, M. L., 2021a. A test of two methods for waste rock drainage quality prediction: Aqua regia extraction and single-addition net-acid generation test leachate analysis. *Mine Water and the Environment* 40, 736–751. <https://doi.org/10.1007/s10230-021-00784-0>
- Karlsson, T., Kauppila, P. M., Lehtonen, M., Alakangas, L. & Kauppila, T., 2022. Sulfur analyses and mineralogical data in the preliminary mine waste characterization. *Environmental Monitoring and Assessment*, hyväksytty 2.5.2022.
- Karlsson, T., Kauppila, P. M. & Lehtonen, M., 2018b. Prediction of the long-term behaviour of extractive wastes based on environmental characterisation: correspondence of laboratory prediction tests with field data. *Bulletin of the Geological Survey of Finland* 408, 11–26. <https://doi.org/10.30440/bt408.1>
- Karlsson, T., Muniruzzaman, M., Kauppila, P. M.,

- Alakangas, L. & Lehtonen, M., 2021c. The importance of adequate waste rock characterization: A case study of unsuccessful drainage quality prediction. International Mine Water Association Conference, 12–16. 7.2021, konferenssiabstrakti.
- Karlsson, T., Räisänen, M. L., Lehtonen, M. & Alakangas, L., 2018a. Comparison of static and mineralogical ARD prediction methods in the Nordic environment. *Environmental Monitoring and Assessment* 190, 719.
<https://doi.org/10.1007/s10661-018-7096-2>
- Karlsson, T., Räisänen, M. L., Myöhänen, T., Alakangas, L., Lehtonen, M. & Kauppila, P. M., 2021b. Hydrogen peroxide ammonium citrate extraction: Mineral decomposition and preliminary waste rock characterization. *Minerals* 11, 706.
<https://doi.org/10.3390/min11070706>
- Lapakko, K., 2002. Metal mine rock and waste characterization tools: An overview. MMSD Briefing, Working Paper 67, 30 s.
- Muniruzzaman, M., Karlsson, T., Ahmadi, N., Kauppila, P. M., Kauppila, T. & Rolle, M., 2021. Weathering of unsaturated waste rocks from Kevitsa and Hitura mines: Pilot-scale lysimeter experiments and reactive transport modelling. *Applied Geochemistry* 130, 104984.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104984>
- Parbhakar-Fox, A. & Lottermoser, B. G., 2015. A critical review of acid rock drainage prediction methods and practices. *Minerals Engineering* 82, 107–124.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.015>
- Singer, P. C. & Stumm, W., 1970. Acid mine drainage-rate determining step. *Science* 167, 1121–1123.
<https://doi.org/10.1126/science.167.3921.1121>
- Smart, R., Skinner, W. M., Levay, G., Gerson, A. R., Thomas, J. E., Sobieraj, H., Schumann, R., Weisener, C. G., Weber, P. A., Miller, S. D. & Stewart, W. A., 2002. ARD Test Handbook: Project P387A, A Prediction and Kinetic Control of Acid Mine Drainage. AMIRA international Ltd, Melbourne, 42 s.
- Vna 214/2007. Valtioneuvoston asetus maaperän piilautuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista 214/2007. Annettu 1.3.2007. Finlex, Suomen sähköinen säädöskokoelma.
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2007/20070214>
- Vna 190/2013. Valtioneuvoston asetus kaivannaisjätteistä 190/2013. Annettu 14.3.2013. Finlex, Suomen sähköinen säädöskokoelma.
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130190>
- Vna 331/2013. Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013. Annettu 2.5.2013. Finlex, Suomen sähköinen säädöskokoelma.
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130331>

Geokemian analytiikkaa kiertotalouden tukena

JOHANNA TEPSELL

Tarve erilaisten primääri- ja sekundäärimateriaalien karakterisoinnille kasvaa jatkuvasti. Lisääntynyt raaka-aineiden tarve ja kiertotalousratkaisut vaativat tuekseen yhä moninaisempia, tarkoitukseen soveltuvia karakterisointimenetelmiä. Primäärimateriaalien – kuten geologisten raaka-aineiden – karakterisoinnissa käytettävät tutkimusmenetelmät ja tekniikat ovat vakiintuneita ja tutkimustulosten laatu voidaan rutiininomaisesti varmistaa ominaisuuksiltaan tunnettuja näytteitä eli standardeja hyödyntäen. Kiertotalouden mukanaan tuomien vaihtoehtoisten materiaalien ja tuotteiden karakterisointiin ei kuitenkaan ole vielä ehtinyt muodostua vakiintuneita metodeja eikä laadunvalvontaan vaadittavia standardeja

ole tarjolla. Materiaalin ominaisuuksien kokonaisvaltainen tunteminen on kuitenkin tärkeää mietittäessä uusia käyttötarkoituksia esimerkiksi aiemmin jätteenä pidetyille sivuvirroille taikka sekundäärimateriaaleille. Katava raaka-aineiden tuntemus parantaa näiden mahdollisimman tehokasta talteenottoa, hyödyntämistä ja kierrätystä sekä edistää kestävä kehitystä. On siis varmistettava, että näissä tutkimuksissa käytettävät menetit ja tuotettavat data ovat toistettavia ja luotettavia.

Geokemialliset analyysit luovat vankan perustan materiaalien ominaisuuksien tuntemiselle edistään raaka-aineiden potentiaalinen arviointia ja turvallista käyttöä. Se ei kuitenkaan yksinään riitä karakterisoimaan uusia materiaa-