

Kaivokset ja vesi – esimerkkinä Hannukaisen hanke

VELI-PEKKA SALONEN, KIRSTI
KORKKA-NIEMI, JULIEN MOREAU JA
ANNE RAUTIO

Kaivostoiminta on uusiutumattomien luonnonvarojen hyödyntämistä, jossa toimitaan paitsi kivien ja malmien, myös hyvin painotetusti vesien parissa. Kaivosten vaikutuspiirissä on monenlaisia vesiä. On kuivanapito-vesiä, prosessivesiä, jätevesiä sekä erityyppisiä suotovesiä, minkä lisäksi kaivosalue itsessään on osa meteorisen kierron valuma-alueita pinta- ja pohjavesiosasysteemeineen. Kaivosalueelle siis sataa vettä, siellä virtaa ja sieltä haihtuu vesiä ja sinne myös imeytyy ja varastoituu pohjavesiä. Talvivaaran kaivoksen ympäristöongelmat ovat osoittaneet, miten tärkeää on, että kaivos tuntee kaikki vetensä ja hallitsee vesitaseensa (Kauppi *et al.* 2013). On myös opittu, että Suomessa ei ole mahdollista toteuttaa vesitaseensa suhteen tasapainoista kaivosta, vaan tase on aina ylijäämäinen: 40–60 % positiivinen.

Valumavedet muodostavat tavallisesti suurimman osan kaikista kaivoksen toiminta-alueen vesistä. Kaivosten ympäristövaikutusten minimoinnissa onkin tärkeää pitää puhtaiden valumavesien määrä mahdollisimman suurena, koska niitä on helpompi hallita kuin kontaminoituneita vesiä. Tämän vuoksi valumavedet on pidettävä mahdollisuuksien mukaan erillään kaikista kaivostoimista.

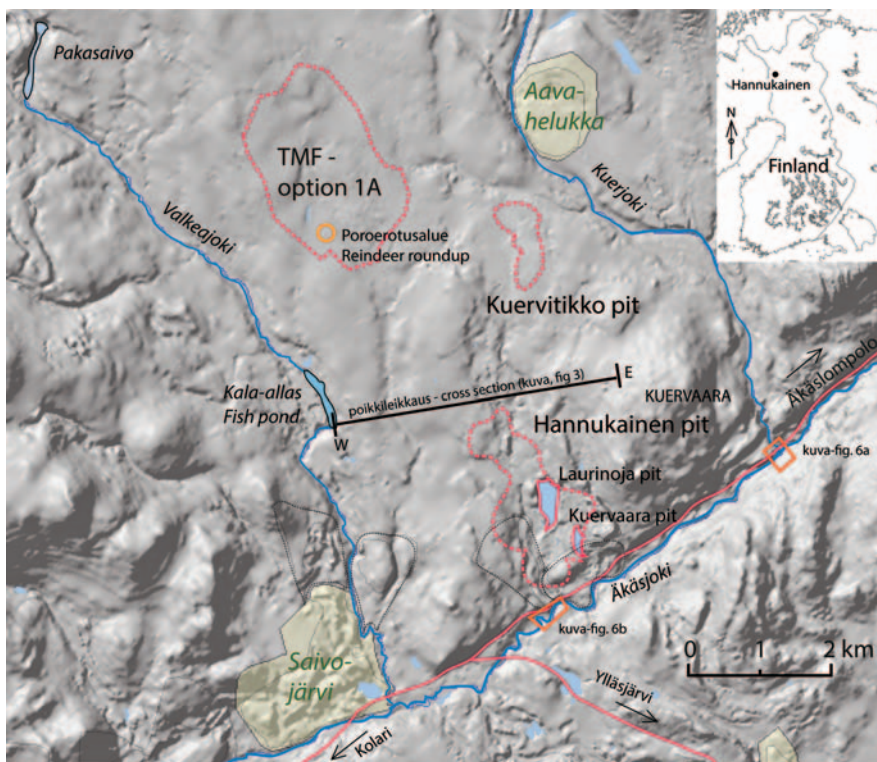
Eräs valumavesien komponentti, pohjavedet, jää kaivosympäristössä tavallisesti vähäiselle huomiolle. Kaivostoiminta vaikuttaa merkittävästi pohjavesiin, koska kaivostilojen kuivanapitopumppaus laskee alueellista pohjaveden pintaa ja vaikuttaa sen virtaussuuntaan: vedet virtaavat kaivokseen, jossa ne muuttuvat käsittelyä tai tarkkailua vaativiksi kaivos-vesiksi. Kaivostoiminnan pohjavesivaikutus saattaa kuitenkin ulottua paljon laajemmalle kuin ajatellaankaan, sillä maanalaisten pohjavesivarastojen geometria ja hydrauliset yhteydet ovat useimmiten varsin puutteellisesti tunnettuja. Niiden tuntemus saattaa rajoittua vain yleisluonteiseen pohjavesialuekartoitukseen (Britshgi ja Gustafsson 1995) tai yksittäisiin pohjavesiputkista tehtyihin havaintoihin. Pohjavesiin kohdistuva kaivoksen jätevesivaikutus on kuitenkin erityisen vahingollinen, koska sen vaikutukset ulottuvat mahdollisesti kauaskin, useimmiten ennalta arvaamattomalla tavalla, eikä syntynyttä vahinkoa ole enää välttämättä mahdollista korjata (Heikkinen *et al.* 2002).

Mahdollisiin ongelmiin on osattava varautua. Kaivosten vaikutuspiirissä olevien pohjavesiesiintymien sekä pohjaveden varastoitumisen, purkautumisen ja pintavesi-pohjavesivuorovaikutuksen tunteminen on aivan yhtä tärkeä osa kaivoksen toiminnan suunnittelua kuin on malmivarojen inventointi tai kaivosteknisten ratkaisujen selvitys. Tällainen tutkimus on tehtävä etukäteen. Pohjavesitutkimusten liittämistä kaivoksen toteutuksen suun-

nitteluun ei juuri ole esimerkkejä, vaikka opaita ja suosituksia onkin viime vuosina kii-
tettävällä tavalla valmistunut (esim. Kauppila
et al. 2011) ja alalla toimivat konsultit hallit-
sevat asiansa. Hannukaisen kaivoshanke tar-
joaa tässä mielessä tärkeän esimerkin, sillä sii-
nä pohjavesisysteemien tutkimus on ollut
mukana malmin hyödyntämisen keskeisiä toi-
mintoja suunniteltaessa. Tässä esityksessä tar-
kastellaan sitä, miten riippumaton akateemi-
nen tutkimus voi tuoda lisäarvoa ympäristön-
sä suhteen hyväksyttävän kaivostoiminnan
toteutukseen.

Hannukaisen kaivoshanke

Hannukaisen kaivoshankkeen (www.hannukaisenkaivos.fi) tarkoituksena on hyödyntää
Kolari–Pajala -hiertovyöhykkeeseen liittyviä
rauta-kupari-kulta (IOCG) -malmioita (Nii-
ranen *et al.* 2007) kahdesta suuresta avolou-
hoksesta (Hannukainen ja Kuervitikko), jot-
ka sijaitsevat samalla alueella kuin vuosina
1978–1990 toimineet Kuervaaran ja Laurin-
ojan louhokset (kuva 1). Hannukaisen suun-
nitellun avolouhoksen pituus tulee olemaan



Kuva 1. Hannukaisen kaivosalueen sijainti ja sen tuntumassa olevia ympäristöarvoja. Olemassa olevat vanhat louhokset on merkitty yhtenäisellä punaisella viivalla ja suunnitellut louhokset sekä 1A vaihtoehdon mukainen rikastushiekka-alue (TMF) punaisella katkoviivalla. EU-direktiivissä mainitut pohjavesimuodostumat on rajattu vihreiksi alueiksi, ja luokan III pohjavesiesiintymät on merkitty ohuella katkoviivalla. Pohjakartta © Maanmittaushallitus.

Figure 1. Location of the Hannukainen project area with some environmentally valuable sites indicated. The abandoned mine pits are outlined with a solid, and the planned open pits and the tailings area (option 1A) with a dashed red line. Classified aquifers are marked in green (those mentioned in the EU directive) or with a thin dashed line (other aquifers). Basemap © National Land Survey.

noin 2,5 km, leveys noin 1,8 km ja syvyys noin 250–350 m. Kuervitikon louhoksen vastaavat mitat ovat: pituus 1,2 km, leveys 0,7 km ja syvyys 110 m (kuva 1).

Kaivoksen tulevaksi kokonaistuotannoksi on arvioitu 100–115 Mt malmia vuosittaisella 6–7 Mt:n tuotannolla. Kaivostoiminnan tuloksena syntyy magnetiitti- ja kupari-kultarikasteiden ohella sivukiviä noin 400 Mt ja pääasiassa vähärikkistä rikastushiekkaa noin 64 Mt. Sulfideihin liittyvän kulta-kuparimalmin rikaste on mahdollisesti happoa tuottavaa. Sivukivien sijoitus vaatii noin 700 ha:n ja rikastushiekan noin 450–830 ha:n pinta-alan (YVA-selostus 2013).

Kaivoshankkeesta on valmistunut YVA-selostus ja siitä on myös laadittu lopullinen kannattavuusselvitys. Kaivostoimintaan tähtääviä tutkimuksia ja selvityksiä on tehty vuodesta 2006 lähtien, ja tässä kuvattuja pohjavesitutkimuksia tehtiin vuosina 2011 ja 2012. Kaivostoiminnan on suunniteltu alkavan vuonna 2016.

Kaivos sijoittuu kvartaärigeologisesti Suomen oloissa poikkeavalle alueelle, jossa on yleisesti paksuja maapeitteitä (Maijanen *et al.* 2008). Alue on heikon glasiaalieroosion luonnehtimaa jäänjakajavyöhykettä, jossa jäätikkö oli viimeisen jääkauden aikana pääosin kylmäpohjainen ja suli nopeasti paikalleen (Johansson *et al.* 2005). Keski-Lapissa on monin paikoin säilyneenä aikaisemmista jäätikkövaiheista todistavia moreenikerroksia ja jäästä vapaiden aikojen joki- ja järviskerrostumia. Hannukaisen lähellä sijaitseva Rautuvaaran avoleikkaus on tästä tunnettu esimerkki (Hirvas 1991).

Hannukaisen kaivossuunnitelma koskettaa herkkää ympäristöä, johon liittyy merkittäviä luonto-, poronhoito- ja matkailuarvoja. Ylläksen matkailukeskus on vain seitsemän kilometrin etäisyydellä suunnitellusta kaivosalueesta, ja lähitunturit sekä Äkäsjoen varsi

ovat arvokkaita vapaa-ajan toimintojen alueita. Vielä lähempänä sijaitsee Lapin ehkä tunnetuin saivojärvi, Lapin helvetiksikin kutsuttu Pakasaivo (Johansson 2003), joka suojehtuine metsäympäristöineen ja pahtoineen on ainutlaatuinen saamelaiskulttuurin muistomerkki. Aivan suunnitellun kaivosalueen vaikutuspiirissä sijaitsee Lamunmaan poroerotusalue kämppineen (kuva 1). Ehkä merkittävien luontoarvo liittyy kuitenkin kaivosalueen tuntumassa sijaitseviin Äkäsjoen, Kuer- ja Valkeajokiin. Ne ovat lohien sekä erittäin uhanalaisen meritaimenen kutujokia, joissa vaelluspoikasten ohella viihtyy vahva tammukkakanta (Vähä *et al.* 2011).

POVET-rekisterin mukaan alueella on muutama ryhmiin II ja III luokiteltu pohjavesiesiintymä, joista kaksi, Saivojärvi ja Aavahelukka, ovat EU:n vesipuitelidirektiivin mukaisia pohjavesimuodostumia. Niiden rajaukset ilmenevät kuvassa 1, johon on koottu tietoja myös muista luonto- ja kulttuuriarvoista.

Tehdyt tutkimukset

Maaperän kerrostumishistorian ja sen hydraulisten ominaisuuksien määrittämiseksi alueella tehtiin havaintoja Laurinjoen ja Kuervaaaran vanhoista avoleikkauksista sekä muista avoimista rintauksista. Valmiiden leikkausten alueellisen edustavuuden parantamiseksi avattiin kahdeksan tutkimuskaivantoa ja toteutettiin yli 100 kilometrin matkalla maatumauksista matalataajuisilla (50 ja 100 MHz) antenneilta. Lisäksi maaperän paksuustietoja kerättiin sadoista malmin inventointia varten tehdyistä kairauksista. Hannukaisen alueelle oli aikaisemmin asennettu yli 30 pohjavesiputkea, joihin liittyi vaihteleva määrä maaperätietoa (Nurminen 2013). Hannukaisen alueen hiekoista tehtiin yhteensä seitsemän OSL-määrittäystä kerrostumien iän selvittämiseksi.

Maaperätutkimusten yhteydessä tehtiin maastossa imeytystestejä kuudessa kohteessa

imeytysrenkaita käyttäen eri kerrosten vedenjohtavuusominaisuuksien mittaamiseksi. Lisäksi laskettiin Hazenin menetelmää käyttäen maaperän vedenjohtavuus kaikista sedimenttiyksiköistä, joista oli määritetty raekokojakauma (26 näytettä).

Pohjavesiputkista, samoin kuin jokien pohjasedimentin läpi sen alla olevaan akvifeeriin asennetuista minipiezometriputkista, tehtiin pohjavedenpinnan tason mittauksia ja havaintoja pohjaveden painetason suhteesta vesistön vesipintaan. Pohjavesiputkista, joki-vedestä, lähteistä, avolouhosten lammista ja minipiezometreistä otettiin vesinäytteitä, joista analysoitiin mm. veden stabiilien isotooppien suhteet ($\delta^{18}\text{O}$ ja $\delta^2\text{H}$) pintavesi-pohjavesiyhteyden hahmottamiseksi.

Pintavesi-pohjavesiyhteyttä tutkittiin koko suunnittelualueella käyttäen pohja- ja pintaveden lämpötilaeroihin perustuvia termisiä menetelmiä. Pohjaveden lämpötila on tutkimusalueella ympäri vuoden n. $+3 \dots +4^\circ\text{C}$, kun taas jokiveden lämpötila voi kesäkuukausina olla jopa 15 astetta tätä korkeampi. Pinta- ja pohjaveden lämpötiloja mitattiin YSI 600 XLM -kenttämittarilla ja joen pohjan lämpötiloja sedimenttilämpömittarilla.

Pohjaveden purkautumisesta tutkimus-aluetta ympäröiviin jokiin saatiin alueellisesti kattava havaintoaineisto helikopterista tehdyllä lämpökamerakuvauksella. Heinäkuussa 2012 kuvattiin infrapunakameralla n. 70 km:n matkalla alueen vesistöjä ja tutkimusaluetta lentonopeudella 50–70 km/h lentokorkeuden ollessa 50–100 metriä maanpinnan yläpuolella. Lennoilla käytettiin Helsingin yliopiston Geotieteiden ja maantieteen laitoksen kuvauslaitteistoa, joka koostuu lämpökamerasta (ThermaCAM P60, 320×240 pikseliä, avauskulma 24 astetta, sensorin spektrialue $7,5\text{--}13\ \mu\text{m}$) ja siihen liitetystä digitaalisesta videokamerasta (HDR-CX700). Lämpökameran still-kuvat (10 kuvaa / s) tallentuivat suoraan

tietokoneelle ja videokuva yhdessä GPS-reitin kanssa videokameran muistikortille.

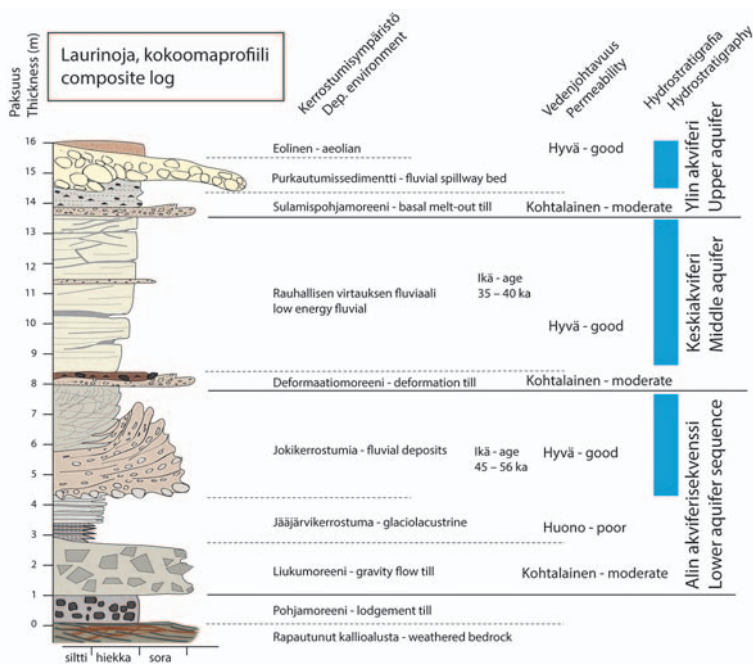
Tulokset ja niiden tulkintaa

Maaperän kerrosrakenne ja hydrostratigrafia

Sedimenttien paksuusvaihtelu oli 0–102 metriä, mediaanipaksuuden ollessa maatutkalinjoilla noin 18 metriä. Maaperän paksuus Laurinjoen leikkauksella, 16 metriä, on lähellä alueen keskiarvoa, ja seinämässä voitiin erottaa neljän eri jäätiköitymisvaiheen kerrostamia moreeneja sekä niiden välisiä hiekka- ja sora-kerrostumia (kuva 2). Kaiken kaikkiaan hyvin vettä johtavat sorat ja hiekat olivat seinämissä enemmistönä, vastaten n. 70 prosentista kaikkien tutkittujen leikkausten yhteisestä sedimenttipaksuudesta.

Hannukaisen leikkauksista tehdyn sedimenttitutkimuksen tieteelliset tulokset on julkaistu tarkemmin toisaalla (Salonen *et al.* 2014), mutta yhteenvetona voidaan tässä todeta, että alueella tunnistettiin neljä eri moreeniyksikköä, joiden välissä on joki- ja järvi-kerrostumia (kuva 2). Alin hiekkamoreeni sisältää runsaasti perin pohjin rapautuneita malmikiviä. Tämä moreeniyksikkö on aivan leikkauksen pohjalla, välittömästi kallion päällä. Sen päällä on huuhtoutunut, suurilohkareinen moreeni, jota peittävät jään patoamaan järveen kerrostuneet lustosavet ja -siltit. Jääjärvisedimenttien päälle on kasautunut jokisora ja -hiekkaa, joille OSL-ajoituksella saatiin keski-Veikselin interstadiaalia vastaava 45 000–56 000 vuoden ikä.

Leikkauksen keskiosassa on hyvin ohut moreeniyksikkö, joka on paikoin näkyvissä vain hiertopintana sekä selkeinä, pohjoisesta etelään suuntautuneen työnnon synnyttäminä hierto- ja poimurakenteina alla olevissa hiekoissa. Sen päällä ovat paksut silttien ja keskikarkeiden hiekkojen kerrostumat, jotka on



Kuva 2. Maaperän kerrosjärjestys ja hydrauliset ominaisuudet Hannukaisen alueella Laurinojan avolouhoksen seinämistä tehtyjen havaintojen mukaan. Keski-Veikselistä holoseeniin ulottuva kerrosseuranto voidaan jakaa kolmeen hydrostratigrafiseen yksikköön: alin, keskimäinen ja ylin akviferi, joita erottavat toisistaan heikosti vettä johtavat akvitardit tai akvikludit.

Figure 2. The lithostratigraphy and hydraulic properties of the Hannukainen area based on observations from Laurinoja open pit sections. The glacial strata can be divided into three hydrostratigraphical units: the lower, middle and upper aquifer, separated by aquitards with low permeability.

tulkittu deltan distaalikerrostumiksi ja joiden ikä on OSL-määritysten mukaan 35 000–40 000 vuotta. Ylimpänä kerrossarjassa on nuorimman jäätikkövaiheen kasvuun ja sulamiseen liittyviä moreeni- ja sorakerrostumia. Maaperää peittää yleisesti tuulen kerrostama hiekka, jonka paksuus vaihtelee puolesta metristä kahteen metriin. Maanpinnalla havaitaan, etenkin Laurinojan leikkaukselta pohjoiseen Laulukarhakan–Aavahelukan tienoilla, pohjaltaan usein soistunut uomaverkosto, johon liittyy paikoin myös särkkämäisiä sorakerrostumia. Uomat ja uomakerrostumat liittyvät deglasiaation edetessä tapahtuneeseen Muonion jäätjärven vaiheittaiseen purkautumiseen kohti Äkäslompolon jäätjärveä ja lopulta Ancylusjärveen (Johansson *et al.* 2005).

Maaperähavaintojen mukaan suunnitellulla kaivosalueella on vaikuttanut ainakin kolme erillistä jäätiköitymisvaihetta viime jääkauden keskivaiheilla ja sen jälkeen. Niiden yhteydessä jäätikkö on vuoroin edennyt kasaten moreeneja ja vuoroin sulanut, jolloin alueelle on kerrostunut jäätjärvisavia, jokihiekkoja ja -soraa, deltakerrostumia tai eolisia hiekkoja. Laurinojan alueen lajittuneet kerrostumat ovat siis valtaosin keski-Veikseliin liittyviä (kuva 2). Tätä vanhempia kerrostumia, puhumattakaan orgaanisista sedimenteistä, ei tutkimuksissa tavattu. Kallioperä, missä sitä koekaivannoissa päästiin näkemään, oli pinnaltaan voimakkaasti rapautunutta.

Hyvin tai kohtalaisesti vettä johtavat sorat ja hiekat ($K = 10^{-2}$ – 10^{-5} ms⁻¹) ovat maape-

rän vallitseva kerrostuma. Moreeniyksiköt ($K = 10^{-4} - 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$) edustavat huonommin johtavia akvitardeja, ja glasiaalisavi ($K = 10^{-7} \text{ ms}^{-1}$) oli ainoa vettä pidättävä akvikludikerrostuma.

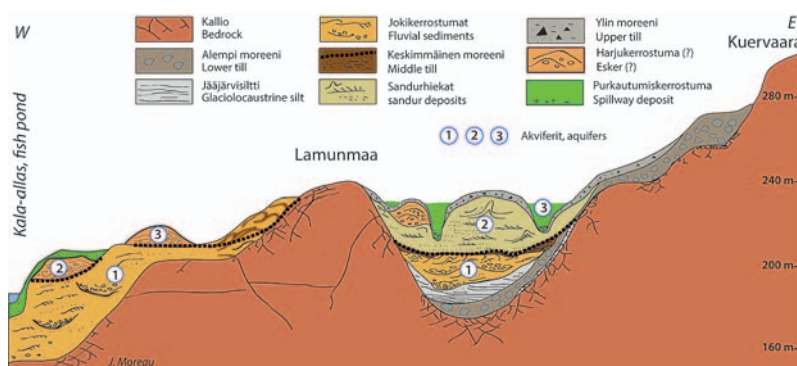
Maatutkaprofileissa edellä esitetty kerrosjärjestys ilmeni kolmena kerrostumasekvenssinä, joita sovellettiin alueellisen kolmiulotteisen maaperämallin lähtöaineistoksi. Alimpana kussakin kerrostumasekvenssissä on vettä huonosti johtava kalliopinta, moreeni tai savi, ja sen päällä on vettä johtavia tai varastoivia hiekkakerrostumia (kuva 3). Alimpaan sekvenssiin kuuluvat sora- ja hiekkakerrokset muodostavat merkittävimmän pohjavesivaraston. Keskimmäinen sekvenssi on deformatuunut ja siihen samoin kuin ylimpään seuran-

toon liittyy erillisiä orsivesiesiintymiä.

Aineistosta laadittiin kalliopintamalli ja maaperän paksuusmalli. Hannukaisen alueen pohjavesien kokonaismääräksi arvioitiin n. 100 miljoonaa m^3 , josta osapuilleen kaksi kolmasosaa on hyvin vettä johtavissa hiekka- ja soraesiintymissä 15–25 metrin syvyydellä maan pinnasta.

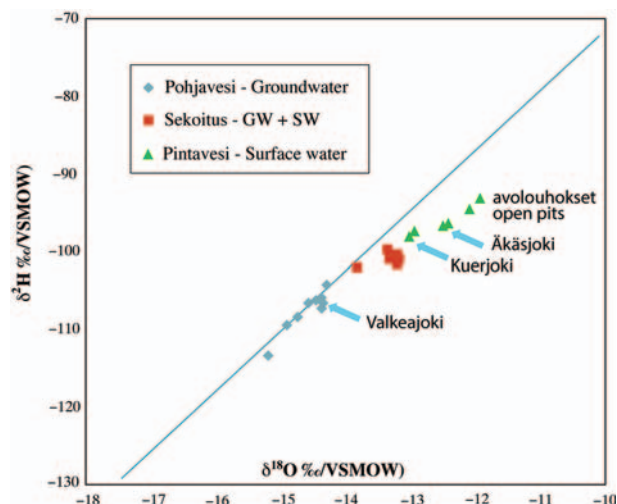
Pohjavesien ja pintavesien yhteydet

Pohjaveden $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW) vaihtelee Kolarin alueella välillä -15...-14 (kuva 4). Pintaveden arvot ovat vähemmän negatiivisia johtuen haihdunnasta. Laurinojan ja Kuervaaran avolouhosten vedet ovat eniten haihtuneita ja poikkeavat selvimmin paikallisesta meteorises-



Kuva 3. Poikkileikkaus kala-altaalta Kuervaaraal-le (sijainti kuvassa 1) ja maatutkaprofiileilta tunnistetut hydrostratigrafiset yksiköt.

Figure 3. A cross-section from the fish pond to Kuervaara high (location in Fig. 1) with hydrostratigraphical units identified by GPR study.



Kuva 4. Hannukaisten tutkimusalueen vesien hapen ja vedyn isotooppikoostumuk-sia suhteessa tässä sinisellä kuvattuun globaalisten vesien suoraan (GMWL), $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ (Craig 1961).

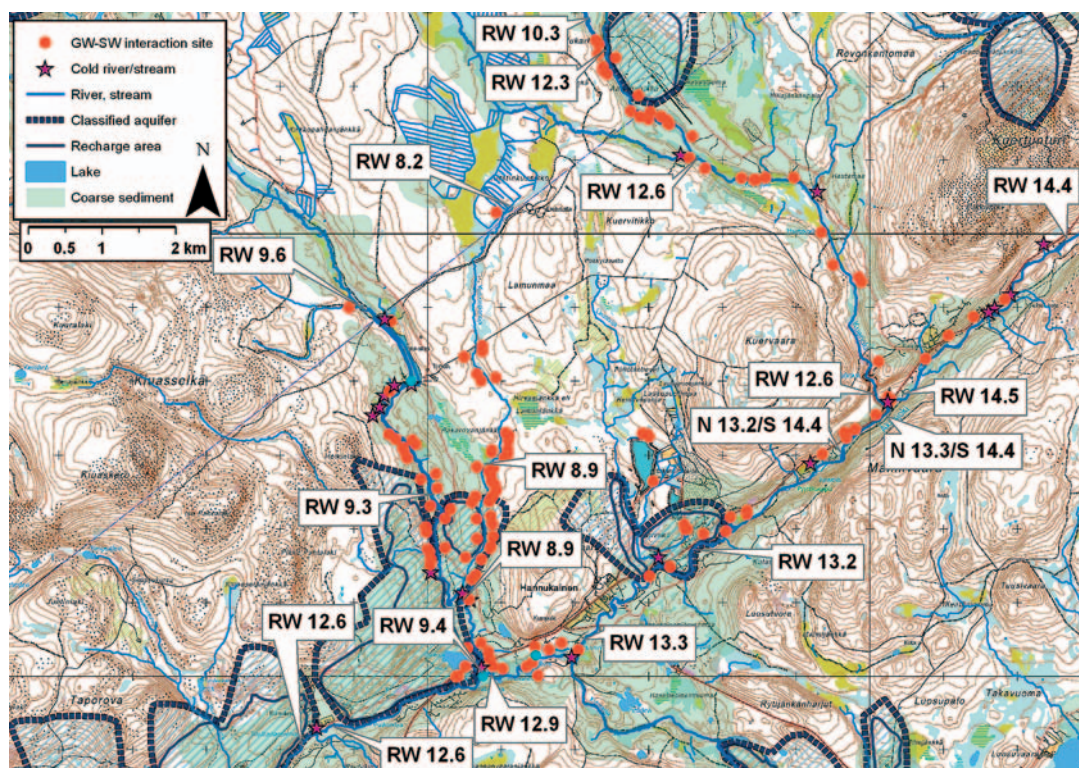
Figure 4. The stable isotope composition of waters in Hannukainen area related to global meteoric water line marked here in blue (GMWL), $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ (Craig 1961).

ta suorasta, jolle pohjavesinäytteet isotooppi-suhteidensa perusteella sijoittuvat. Äkäsjoen vesi on jokivesistä haihtuneinta ja Kuerjoen vesi joko sitä vähemmän haihtunutta tai siinä olevan pohjavesikomponentin osuus on suurempi. Valkeajoen vesi on isotooppikoostumukseltaan pohjaveden kaltaista. Jokivesien isotooppisuhteet poikkesivat toisistaan paljon, ja ne antoivat perusteen olettaa, että kaikkiin jokiin purkaa tutkimusalueella pohjavettä, joskin eri määrä suhteessa virtaamaan. Tätä tulkitaa tukivat myös minipiezometreistä havaitut, jokiveden pintaa yleemmäksi nousevat pohjaveden painetasot.

Pohjaveden purkautuminen jokiin, lähteisiin ja tihkupinnoille voitiin vahvistaa terminen menetelmin. Esimerkiksi Äkäsjossa jokise-

dimentin lämpötila oli noin 4 °C kohdissa, joissa pohjavettä purkautuu vesistöön joen pohjalta, kun taas kohdissa, joissa pohjavettä ei purkaudu sedimentin lämpötila oli yli 15 °C. Jokiveden lämpötila oli tuolloin 18 °C.

Lämpökamera havaitsee kohteen ylimmästä 0,1 mm pintakerroksesta lähtevän lämpösäteilyn voimakkuuden, joka lämpökamerasa muutetaan lämpötilatiedoksi. Lämpökamerakuvauksilla voidaan siksi havaita vain pinnalle asti ulottuvat lämpöanomaliat, eikä menetelmällä saada tietoa vesistön pohjalla purkautuvasta pohjavedestä, ellei pohjaveden vaikutus näy myös ylimmissä vesikerroksissa (Torgersen *et al.* 2001). Hannukaisen kuvauksissa havaitut lukuisat kylmät kohteet (kuva 5) olivat suora osoitus kylmän pohjaveden purkau-



Kuva 5. Lämpökamerakuvauksissa havaitut pohjaveden purkautumispaidat (punaiset pisteet ja tähdet). Karttaan on merkitty myös lämpökamerakuvista saatuja jokiuoman keskilämpötiloja.

Figure 5. The groundwater discharge locations mapped by aerial infrared survey (red dots and stars). A few mean river temperature values have also been indicated.

tumisesta maan pinnalle lähteinä ja tihkupintoina, tai suoraan vesistöön. Jokiuomien keskilämpötiloista voidaan havaita Valkeajoen olevan kylmin ($< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) ja Kuerjoenkin ($10\text{--}12\text{ }^{\circ}\text{C}$) olevan selvästi Äkäsjokea ($14\text{--}16\text{ }^{\circ}\text{C}$) kylmempi. Äkäsjoen veden lämpötila laskee tutkimusalueen matkalla noin $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ johtuen osittain siihen yhtyvistä kylmemmistä sivujoista (kuva 6a), mutta osittain myös jokeen tai

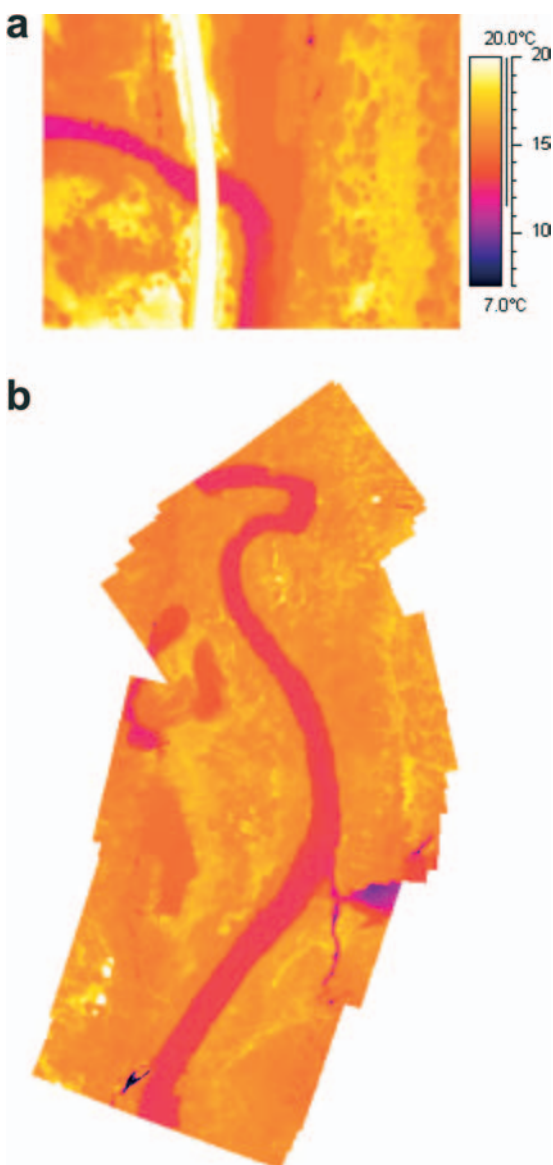
jokipenkkaan suoraan purkautuvasta pohjavedestä (kuva 6b).

Tulosten tulkintaa ja johtopäätöksiä

Tutkimuksissa ilmeni kaksi pohjaveden esiintymisen kannalta merkittävää asiaa. Ensinnäkin pohjavesi esiintyy useassa eri tasossa, ja alueellinen pohjavedenpinta saattaa olla paikoin melko syvällä, $20\text{--}30$ metriä maanpinnasta. Syvällä olevan pohjaveden pinnasta ei ole juurikaan suoria havaintoja, sillä suurin osa alueelle asennetuista pohjavesiputkista on tavoittanut vain keskimmäisen tai ylimmän orsivesipinnan (Nurminen 2013). Tämä vaikeuttaa pohjaveden virtaussuuntien määrittystä. Toiseksi kalliokynnykset rajaavat alueen selkeisiin osa-alaiksi, jotka säätelevät alueellista pohjaveden virtauskuva.

Kuva 6. (a) Lämpökamerakuvassa näkyy vasemmalta pohjoisesta virtaavan Kuerjoen liittyminen lämpimämpään Äkäsjokeen (ks. kuva 1). Kuvan keskellä näkyy kesäpäivänä lämmennyt Äkäslompoloon johtava tie. Kuvan yläosassa on Äkäsjoen ranta-alueella kylmiä lähteitä sekä molemmin puolin jokea ojia tai painanteita, joissa kylmä pohjavesi purkautuu maan pinnalle. (b) Äkäsjoen meanderointia Hannukaisen kaivosalueen eteläpuolella (kuva 1). Noin $13\text{-asteiseen } (^{\circ}\text{C})$ jokiveteen yhtyy molemmilta puolilta kylmiä, kuvassa tummansinisellä näkyviä lähdepurkauksia.

Figure 6. (a) A thermal image showing a site where the cold water of river Kuerjoki joins the warmer waters of river Äkäsjoki (see Fig. 1 for geographic context). The road pavement heated in the sun is in the center of the picture. Visible on the top are a few springs discharging colder water towards the Äkäsjoki, and cold seepage ditches are visible on the both sides of the river. (b) River Äkäsjoki meandering south of the Hannukainen mining area (Fig. 1). The cold seepage, indicated by its blue colour, characterizes riparian zones on both sides of the river.



Kun kaikki tiedot maaperän kerrosjärjestyksestä ja laadusta, hydrogeologisista havainnoista sekä maatulvakuutausten tulkinnoista yhdistettiin malliin kalliopinnan asemasta, voitiin pohjavesien varastot ja yhteydet pintavesiin hahmottaa kuvassa 7 ilmenevällä tavalla. Siitä näkyy, että pohjavedet jakautuvat kolmeen osa-altaaseen, jotka nimettiin seuraavasti: Laurinojan peitteinen akviferi (LBV), koillinen allas (NEB) ja läntinen ruhjelaakso (WD). Erityisesti Laurinojan peitteisen altaan alueella orsivedet ovat yleisiä ja alueen soiden sijainti selittyy monessa tapauksessa orsivesillä.

Pohjavesien ja jokivesien stabiilien isotooppien suhteet sekä vesien lämpötilaeroihin perustuvat mittaukset ja lämpökamerakuvaukset osoittavat hydraulisen yhteyden alueen pohjavesisysteemin ja aluetta ympäröivien jokivesien välillä. Koillisesta pohjavesialtaasta pohjavesiä purkautuu Kuerjokeen, läntisestä altaasta Valkeajokeen ja Laurinojan laaksosta etelään, Äkäsjokeen. Alueen pintavedet virtaavat Äkäsjokeen joko suoraan tai Kuerjoen, Valkeajoen ja alueella olevien purojen ja ojien kautta. Lämpökameralla kartoitetut pohjavesien yhtymäkohdat pintavesiin antoivat lisäinformaatiota, jota voitiin hyödyntää rekonstruoitaessa pohjaveden virtauskuviota tutkimusalueelle (kuva 7).

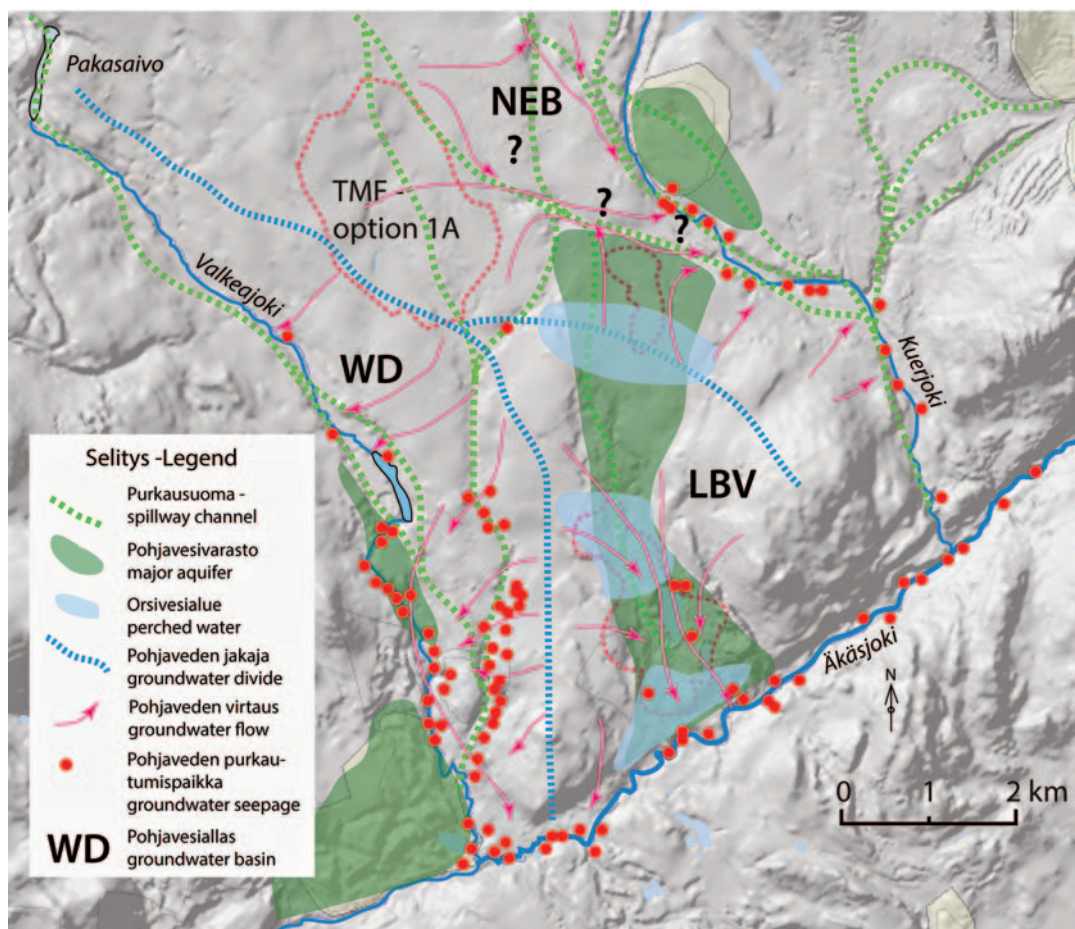
Kun havainnot ja tulkinnot maanalaisten vesien varastoista, virtauksista ja yhteyksistä suhteutetaan suunniteltuihin kaivostoimintoihin, havaitaan, että Lamunmaan pohjoispuoliselle alueelle suunniteltu rikastushiekan varastointialue sijoittuu alueelle, jossa esiintyy orsivettä. Varsinainen alueellinen pohjavesivirtaus suuntautuu pääosin kohti Kuerjokea, mutta osin myös Valkeajoen suuntaan (kuva 7). Suunniteltu toiminta muodostaisi ilmeisen uhan näiden ainutlaatuisten taimenten kutujokien tulevalle vedenlaadulle. Eräs kaivostoiminnassa huomioitava tekijä näet on,

että mikään pohjatiivistä ei ole täysin pitävä.

Tutkimuksen tulokset on otettu huomioon kaivostoimintojen sijoitussuunnitelmissa siten, että päivitetyissä suunnitelmissa rikastushiekka-alueen ensisijainen sijoituspaikka on Hannukaisen suunnitelma-alueen sijaan Rautuvaaran entinen rikastushiekka-alue Niesajoen laaksossa (ks. kansikuva), jossa hydrogeologiset olosuhteet ovat suotuisat. Lisäksi Hannukaisen kaivostoimintojen aluetta on kavennettu ja tiivistetty siten, että kielteiset pohjavesivaikutukset Kuerjokeen ja Valkeajokeen voidaan minimoida (Hannukaisen YVA 2013).

Hannukaisen hanke on hyvä esimerkki siitä, miten pohjavesigeologista perustutkimusta voidaan hyödyntää kaivoshankkeiden suunnittelussa. Ongelmallaisella perustutkimuksella on oma paikkansa erityisesti suurissa, mahdollisesti laajasti ympäristöönsä vaikuttavissa hankkeissa, jollaisia kaivokset usein ovat. Malmi on anomalia maankuoren geologisessa kehityksessä. Jokainen kaivosympäristö yhtä lailla yksilöllinen jäätikkökerrostumiensa ja pohjaveden esiintymisen ja ominaisuuksien suhteen. Jotta ympäristövaikutukset voidaan hallita, on pohjavesistä ja niiden vesistöyhteyksistä tiedettävä enemmän kuin vaikkapa tavanomaisissa vedenhankintatutkimuksissa. Pohjavesien suojaamiseksi ei myöskään riitä tukeutuminen olemassa oleviin maaperä- tai pohjavesialuekartoituksiin, jotka on laadittu aivan toisia tarkoituksia varten.

On tärkeää, että tutkimus on mukana jo mahdollisimman varhaisessa vaiheessa, kun kaivostoimintaa aletaan suunnitella. Tällä ei tarkoiteta konsulttien asiantuntemuksen kiistämistä tai alan toimijoiden osaamisen vähätelyä. Voidaan kuitenkin ajatella, että jos kaivoksen toiminta halutaan saada yhteiskunnan ja ympäristön kannalta hyväksytyksi, tulee hankkeen voida kohdata myös akateemisen tutkimuksen mahdollisesti muassaan tuomat



Kuva 7. Ympäristögeologinen yhteenvetokartta Hannukaisen alueelta. Suunnitellut kaivostoiminnot on suhteutettu pohjaveden esiintymisen ja virtauksen keskeisiin piirteisiin.

Figure 7. A synthesis map over the Hannukainen mining development. The planned mining activities have been related to observed key features of groundwater reservoirs and flow patterns. Basemap © National Land Survey.

uudet ja hankalatkin kysymykset. Tavoitteena on oltava tulevan kaivoksen toimintaympäristön kokonaisvaltainen ymmärtäminen; että tiedetään enemmän ja eri asioita kuin mitä osataan edes vaatia.

Kiitokset

Kiitämme Jukka Jokelaa ja Joanna Kuntonen-van't Rietä (Northland Mines Oy) arvokkaasta yhteistyöstä ja Tiina Nurmista raekokoanalyysien tekemisestä, Harri Matikaista avusta läm-

pökuvauksissa ja K.H. Renlundin säätiötä tutkimuksen saamasta taloudellisesta tuesta.

Kirjallisuus

- Britschgi, R. ja Gustafsson, J. (toim.). 1996. Suomen luokitellut pohjavesialueet. Suomen ympäristö 55, Luonto ja luonnonvarat, 387 s.
- Craig, H. 1961 Isotopic variations in meteoric water. Science 133, 1702–1703.
- Heikkinen, P.M., Korkka-Niemi, K., Lahti, M. ja Salonen, V-P. 2002. Groundwater and surface water contamination in the area of the Hitura Ni-mine,

- western Finland. *Environmental Geology* 42:313–329.
- Hirvas, H. 1991. Pleistocene stratigraphy of Finnish Lapland. Geological Survey of Finland, Bulletin 354. 123 s. + 2 liit.
- Johansson, P. 2003. Eskers and bedrock gorges (tunnel valleys) in the Pakasaivo area, western Finnish Lapland. *Bulletin of the Geological Society of Finland* 75:5–15.
- Johansson, P. (toim.), Kujansuu, R. (toim.), Eriksson, B., Grönlund, T., Kejonen, A., Maunu, M., Mäkinen, K., Saarnisto, M., Virtanen, K. ja Väisänen, U. 2005. Pohjois-Suomen maaperä: maaperäkarttojen 1:400 000 selitys. Summary: Quaternary deposits of northern Finland – explanation to the maps of Quaternary deposits 1:400 000. Espoo, Geologian tutkimuskeskus, 236 s.
- Kauppi, S., Mannio, J., Hellsten, S., Nystén, T., Jouttijärvi, T., Huttunen, M., Ekholm, P., Tuominen, S., Porvari, P., Karjalainen, A., Sara-Aho, T., Saukkoriipi J. ja Maunula, M. 2013. Arvio Talvivaaran kaivoksen kipsisakka-altaan vuodon haitoista ja riskeistä vesiympäristölle. Suomen ympäristökeskusten raportteja 11/2013, 90 s.
- Kauppi, P., Räisänen, M.L. ja Myllyoja, S. 2011. Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö 29/2011.
- Niiranen, T., Poutiainen, M. ja Mänttari, I. 2007. Geology, geochemistry, fluid inclusion characteristics, and U–Pb age studies on iron oxide–Cu–Au deposits in the Kolari region, northern Finland. *Ore Geology Reviews* 30:75–105.
- Nurminen, T. 2013. Waters and groundwater reservoirs at the Hannukainen mine development site in Kolari, Northern Finland. *Julkaisematon pro gradu -tutkielma*, Helsingin yliopisto, Geotieteiden ja maantieteen laitos, Geologian osasto.
- Salonen, V.-P., Moreau, J., Hyttinen, O. ja Eskola, K.O. 2014. Mid-Weichselian interstadial in Kolari, western Finnish Lapland. *Boreas*. doi:10.1111/bor.12060.
- Torgersen, C.E., Faux, R.N., McIntosh, B.A., Poage, N.J. ja Norton, D.J. 2001. Airbornethermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. *Remote Sensing of Environment* 76:386–398.
- Vähä, V., Romakkaniemi, A., Ankkuriemi, M., Pulkkinen, K., Lilja, J. ja Keinänen, M. 2011. Lohi- ja meritaimenkantojen seuranta Torniojoen vesistössä vuonna 2010. Riista- ja kalatalous, tutkimuksia ja selvityksiä 3/2010. Helsinki, Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos.
- YVA-selostus. 2013. Northland Mines Oy, Hannukai-

sen kaivoshanke, ympäristövaikutusten arviointiselostus 9.8.2013. 681 s. http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Asiointi_ja_luvat/Ymparistovaikutusten_arviointi/YVAhankkeet/Hannukaisen_rautakaivos-hanke_Kolari/Hannukaisen_rautakaivoshanke_ymparistova%2824263%29

Summary

Mines and water – an example from the Hannukainen project

Environmental issues play an increasingly important role in planning large-scale mining activities. Potential impacts are often related to groundwater systems, which may be inadequately understood and assessed. This is especially true in Lapland where subsurface and surface water reserves and their hydraulic connections have rarely been studied. The Hannukainen iron–copper–gold mining development site is surrounded by three rivers, identified as critical spawning grounds for sea trout, an endangered species. Therefore it is essential to assess the potential environmental impacts of the planned mining to associated groundwater and surface water bodies.

We described the aquifers and aquitards, measured or calculated hydraulic conductivity of hydrostratigraphic units and observed hydraulic heads and groundwater flow directions as well as characterized chemical and isotopic signatures of waters. The specific objective was to evaluate the groundwater–river water interactions. Based on the sedimentological and hydrogeological studies as well as ground penetrating radar survey, the Hannukainen site hosts a complicated aquifer system with notable connections to natural river systems. The Quaternary sediments are exceptionally thick, representing a dynamic development during the Mid Weichselian. The glacial strata can be divided into three hydrostratigraphical units: the lower, middle and upper aquifer,

separated by aquitards with low permeability. Aquifers are related to fluvial and deltaic sands and gravels. Aquitards relate to tills and/or fines hosting intricate perched water bodies. According to water and riverbed sediment temperature observations and stable isotopic composition of waters, the hydraulic head measurements and low altitude aerial infrared (AIR) survey, rivers Kuerjoki and Valkeajoki are dominantly fed by groundwater.

The hydrogeological analysis presented here was found to be useful in siting mining facilities such as tailings. At Hannukainen, the mining company decided to operate within a more restricted area and to move the tailings management facility away from the most sensitive area, to avoid undesirable environmental impacts.

VELI-PEKKA SALONEN
KIRSTI KORKKA-NIEMI
ANNE RAUTIO

Geotieteiden ja maantieteen laitos
PL 68 (Gustaf Hällströmin katu 2b)
00014 Helsingin yliopisto
veli-pekka.salonen@helsinki.fi
kirsti.korkka-niemi@helsinki.fi
anne.rautio@helsinki.fi

JULIEN MOREAU
Department of Geosciences and Natural
Resource Management, Section of Geology
IGG, Øster Voldgade 10
1350 København K
Denmark
julien.moreau@ign.ku.dk



Geologian tutkimuskeskus hakee geotieteiden opiskelijoita

KESÄTÖIHIN

Tarkemmat tehtäväkuvaukset ja hakutiedot: www.gtk.fi/gtk/tyopaikat



www.gtk.fi

Geologian tutkimuskeskus (GTK) on työ- ja elinkeinoministeriön alainen asiantuntijaorganisaatio, joka palvelevana geologian osaamiskeskuksena on geologisten luonnonvarojen, niiden tilinpidon ja kestävän käytön eurooppalainen huippuosaaja. Tutkimusohjelmamme luovat uutta teknologiaa, sovelluksia ja innovaatioita yhteiskunnan kestäväälle kehitykselle. Toimintamme on valtakunnallista ja kansainvälisesti aktiivista. GTK:ssa on henkilöstöä n. 610. Katso myös www.gtk.fi