



Rikastushiekan ja peittomoreenin mineraloginen ja
geokemiallinen karakterisointi Rautuvaaran
rikastushiekka-altaan keskiosassa

Pro gradu -tutkielma
Mitro Juutinen
Oulu Mining School
Teknillinen Tiedekunta
Oulun Yliopisto
2020

Abstract

Tailing sand is gangue minerals containing mining waste which is formed during ore enrichment. This, usually sulfide minerals containing waste material is deposited as slurry in tailings pond. Sulfide minerals tend to oxidize under the conditions of earth's surface. Oxidation of sulfides may lead to release of a metalliferous and acidic mine waters. Therefore, tailings are characterized. The purpose of the characterization procedure among other things is to investigate waste's mineralogy and geochemistry.

In this master's thesis the mineralogical and geochemical characterization of the tailing sands and till (cover material) of the Rautuvaara tailings pond will be done. The purpose of the study was to investigate the mineralogical and geochemical composition of the diverse tailing sands deposited in Rautuvaara, located in Western Lapland, Finland. The characterization included also grain size studies and mapping of the secondary alteration of the tailings. The study has been done as part of the ERDF funded Biopeitto Project.

The studies revealed that the sample horizon of four different layers contain of two mineralogically and geochemically different tailing sands. Three uppermost layers most likely represent the Saattopora gold ore and the fourth layer represents the Pahtavuoma ore. Elementary analysis revealed that some heavy metal concentrations such as arsenic concentrations in the tailings are considerably high and leaving the tailings pond uncovered could be hazardous for environment in the long run. The secondary mineral studies showed that the first and the second layer are the most altered layers. This alteration appears as the secondary rims of Fe-oxyhydroxides, iron sulfates and Fe-oxyhydroxysulfates at the edges of primary mineral grains.

Keywords: *Tailing sands of Rautuvaara, characterization, mineralogy, geochemistry*



Tiivistelmä

Rikastushiekka on malminrikastuksen yhteydessä syntyvää, jätteenä pidettävää sivukiviainesta, joka läjitetään vesilietteenä loppusijoituspaikkaan, tyypillisesti rikastushiekka-altaaseen. Metallikaivostoiminnan aikana syntyneet rikastushiekat sisältävät usein merkittäviäkin määriä rikkiä sisältäviä sulfidimineraaleja, jotka hapettuessaan voivat tuottaa happamia valumia sekä päästää haitallisia metalleja ympäristöönsä. Muun muassa näistä ympäristögeologista syistä rikastushiekoille suoritetaan karakterisointimenettelyjä. Näiden menettelyjen tarkoituksena on esimerkiksi selvittää rikastushiekojen koostumusta rikastushiekka-altaiden jälkihoitotoimenpiteitä suunnitellessa.

Tässä pro gradu -tutkielmassa suoritettiin mineraloginen ja geokemiallinen karakterisointi Rautuvaaran rikastushiekka-altaan rikastushiekalle sekä altaan jälkihoidollisena peittomateriaalina käytettävälle moreenille. Karakterisointi tehtiin osana EAKR-rahoitteista Biopeitto-projektia ja karakterisoinnin tarkoituksena oli tutkia projektin tutkimusalueen rikastushiekan ja peittomoreenin mineralogista ja geokemiallista koostumusta peilaten niitä alkuperäisiin rikastushiekkaa synnyttäneisiin malmeihin, sekä tutkia rikastushiekojen ja moreenin raekokojakaumaa.

Tutkimuksissa saatiin selville, että ulkonäöltään neljän erilaisen rikastushiekkakerroksen näytteenottohorisontti koostuu kahdesta, mineralogiselta, geokemialliselta ja raekokokoomukseltaan täysin erilaisesta rikastushiekasta. Kolme ensimmäistä kerrosta edustavat todennäköisesti suurelta osin Saattoporan malminrikastuksessa syntyneitä rikastushiekkaa ja pohjimmainen kerros edustaa Pahtavuoman malmia. Alkuaineanalyysit paljastivat, että tiettyjen ympäristölle haitallisten aineiden, kuten arseenin pitoisuudet ovat korkeat ja peittämättöminä nämä saattavat pitkällä aikavälillä lähteä liikkeelle pidemmälle ympäristöön. Lisäksi sekundäärimineraalien kartoituksessa selvisi, että kaksi ylintä kerrosta ovat eniten muuttuneita. Muuttuneisuus ilmenee primääristen mineraalirakeiden reunoilla näkyvinä sekundäärisinä reunuksina. Reunukset olivat koostumukseltaan pääsääntöisesti Fe-oksihydroksideja, rautasulfaatteja sekä Fe-hydroksisulfaatteja.

Avainsanat: Rautuvaaran rikastushiekka, karakterisointi, mineralogia, geokemia

Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



Sisällysluettelo

1. Johdanto	1
2. Kaivostoiminnan elinkaari ja rikastushiekan läjittäminen.....	3
2.1 Metallimalmikaivoksen elinkaari ja tärkeimpiä käsitteitä	3
2.2 Rikastushiekka ja sen läjittäminen	5
3. Rikastushiekan ympäristöseikat	8
3.1 Rikastushiekka-altaiden ympäristövaikutukset.....	8
3.2 Sulfidien hapettuminen	9
3.2.1 Pyriitti	9
3.2.2 Muut sulfidimineraalit.....	12
3.3 Kaivosten hapan valunta ja sen vaikutus ympäristöön	13
3.4 Mineraalien neutralointireaktiot.....	15
3.5 Sekundäärimineraalit	17
3.6 Oksidimineraalien ympäristövaikutukset.....	18
4. Rikastushiekan karakterisointi ja siinä käytettävät tutkimusmenetelmät.....	19
4.1 Karakterisointimenettely.....	19
4.2 Rikastushiekan karakterisoinnissa käytettävät tutkimusmenetelmät	21
4.2.1 Mineralogiset määrittämenetelmät	21
4.2.2 Kemialliset määrittämenetelmät	22
4.2.3 Geotekniset määrittäykset	24
5. Rautuvaaran historia, tutkimusalue sekä näytteiden esikäsittely ja tutkimusmenetelmät	25
5.1 Rautuvaaran kaivos- ja rikastustoiminnan historia	25
5.2 Rautuvaaran rikastushiekka-allas ja sitä ympäröivän alueen maaperä.....	26
5.3 Rikastushiekkaa synnyttäneiden malmien ja rikastusprosessien kuvaus.....	28
5.4 Näytteiden esikäsittely ja tutkimusmenetelmät.....	31
6. Tulokset.....	36
6.1 Partikkelikoko	36
6.2 XRF - Geokemia.....	40
6.3 AAS - Geokemia	41
6.4 FE-SEM - Mineralogia	46
6.5 EPMA - Sekundäärimineraalit	48
7. Tulosten tulkinta	56
7.1 Partikkelikoko	56

7.2 Geokemia	56
7.3 Mineralogia	58
7.4 Virhelähteet	60
8. Yhteenveto ja johtopäätökset	61
9. Kiitokset	65
Lähdeluettelo	66
Liitteet	

1. Johdanto

Maapallon jatkuvasti kasvava väestö on yhä enemmän riippuvainen kaivosteollisuuden tuottamista raaka-aineista. Esimerkiksi erilaisten metallien, kuten alumiinin, kuparin ja raudan tuotanto on viisinkertaistunut suhteellisen lyhyessä ajassa 1900-luvun kuluessa. (Kesler, 1994; Evans, 1997)

Kaivannaisten kulutus on nykypäivänä suurempaa kuin maapallon väestönkasvu. Vaikka pieni osa maapallon väestöstä asuu niin kutsutuissa kehittyneissä maissa, kulutetaan niissä suurin osa kaivosteollisuuden tuottamista raaka-aineista. Väestömäärältään valtavien kehittyvien maiden elintason kohotessa kaivannaisraaka-aineiden kulutus tulee kasvamaan yhä enemmän ja enemmän. (Kesler, 1994)

Merkittävästi kasvaneiden mineraaliraaka-aineiden tuotannon ja kulutuksen myötä on herätty ajattelemaan myös ympäristön tilaa. Kaivosteollisuus, kuten myös monet muutkin teollisuudenalat, ovat vahvasti yhteydessä ympäristöllisiin häiriötekijöihin, kuten ilmaston lämpenemiseen ja ympäristön pilaantumiseen. Ongelma on monimutkainen, sillä nyky-yhteiskunnat ja niiden eri toiminnot ovat merkittävästi riippuvaisia kaivannaisraaka-aineista, mutta niiden tuottaminen rasittaa ympäristön eri osia. Mikäli nykyisen kaltainen elämisen muoto tahdotaan säilyttää, on kaivosteollisuuden eri osa-alueista yritettävä tehdä ympäristön kannalta kestävämpiä ja vastuullisempia. (Kesler, 1994)

Jokaisessa kaivoshankkeen elinkaareissa olevassa vaiheessa on riski ympäristön muuttumiseen ja jopa varsinaiseen pilaantumiseen. Esimerkiksi jo malmin etsintä kaivoshankkeen elinkaaren alkupäässä muuttaa ympäristöä alkuperäisestä. Kuitenkin suurimmasta riskistä ympäristön muuttumisesta vastaa kaivoshankkeen tuotanto- ja sulkemisvaihe. (Heikkinen & Noras, 2005)

Louhitun malmin lisäksi metallikaivos- ja rikastustoiminta tuottaa merkittäviä määriä maansiirtomassaa, sivukiveä sekä malminrikastuksessa syntynyttä rikastushiekkaa. Metallimalmikaivostoiminnassa malmeista saadaan irrotettua vain murto-osia varsinaista arvoainesta. Esimerkiksi kuparimalmista peräti 98 % malmista jää rikastushiekaksi rikastuksen jälkeen, jolloin tämä kyseinen aines, joka on silloisella hetkellä arvotonta, on

sijoitettava mahdollisimman turvallisesti ja taloudellisesti sille määrättyyn paikkaan. (Kelly & Spottiswood, 1982)

Rikastushiekka-altaat ja muut kaivannaisjätteiden sijoituspaikat, kuten sivukivikasat perustuvat vastikään heränneelle ympäristötietoisuudelle ja turvallisuusnäkökulmalle. Toisin kuin kaivos- ja rikastustoiminnan varhaisina aikoina, jolloin kontaminoituneita kaivannaisjätteitä sijoitettiin järviin ja jokiin, pyritään nykyisin turvaamaan maaperä sekä pinta- ja pohjavedet oikeanlaisilla sijoitusratkaisuilla ja menetelmillä. (Kelly & Spottiswood, 1982; Lottermoser, 2010)

Rikastushiekasta aiheutuva ympäristöuhka riippuu hiekassa olevista haitta-ainepitoisuuksista. Esimerkiksi metallikaivostoiminnasta syntyvät sulfidipitoiset rikastushiekat voivat tietyissä olosuhteissa aiheuttaa merkittäväkin haittaa ympäristölle. Tästä syystä on jo kaivostoiminnan suunnitteluvaiheessa tärkeää tehdä selvitykset toiminnan synnyttämien kaivannaisjätteiden, kuten rikastushiekan fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista tietyissä olosuhteissa. Niin kutsutut rikastushiekan mineralogiset, geokemialliset ja geotekniset karakterisointimenettelyt ohjaavat rikastushiekkaa ja sen käsittelyä koskevia toimia, kuten sen läjittämistä ja rikastushiekka-altaiden jälkihoitotoimenpiteitä. (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila, Räisänen & Myllyoja, 2011)

Vuonna 2017 alkanut ja vuonna 2020 päättyvä EAKR rahoitteinen Biopeitto-projekti (Biohiilen hyödyntäminen kaivannaisjätteiden peittomateriaaleissa ja viherrakentamisessa) on osa kestävän kehityksen sekä vastuullisen kaivostoiminnan ajattelua ja sen päämääränä on tutkia ja kehittää biohiilipohjaisia sulkemisratkaisuja kaivosteollisuuden tarpeisiin. Rautuvaaran entisen rautakaivoksen rikastushiekka-alue toimii projektin koe- ja tutkimusalueena.

Tässä pro gradu -tutkielmassa on selvitetty yleisellä tasolla rikastushiekkaan ja sen karakterisointiin liittyviä asioita sekä suoritettu mineraloginen ja geokemiallinen karakterisointi Rautuvaaran rikastushiekka-altaan keskiosaan läjitetylle rikastushiekalle ja rikastushiekka-altaan peittomateriaalina käytetylle moreenille. Karakterisointimenettelyssä on selvitetty rikastushiekan ja moreenin mineraloginen ja geokemiallinen koostumus. Karakterisointi tukee Biopeitto-projektin muuta tutkimusta.

2. Kaivostoiminnan elinkaari ja rikastushiekan läjittäminen

2.1 Metallimalmikaivoksen elinkaari ja tärkeimpiä käsitteitä

Rikastushiekan ja koko kaivannaisjäteasian ymmärtämistä helpottaa kaivostoiminnan elinkaaren ymmärtäminen aina malminetsinnästä malminrikastukseen ja siten jätteen syntymiseen. On myös hyvä ymmärtää kaivostoiminnassa esiintyviä tärkeimpiä käsitteitä.

Kaivostoiminta jaetaan tyypillisesti metallimalmi- ja teollisuusmineraalikaivostoimintaan, mutta myös kivennäispolttoaineiden tuotanto voidaan käsittää kaivostoimintana. Kaivostoiminta käsittää esiintymien louhinnan ja rikastamisen (Heikkinen & Noras, 2005). Myös metallurgiset prosessit voidaan laskea osaksi kaivostoimintaa (Lottermoser, 2010), mutta tässä työssä siihen ei paneuduta.

Metallimalmikaivostoiminnassa louhitaan ja rikastetaan metallimalmeja, jotka esiintyvät tyypillisesti sulfideina ja oksideina (Kauppila ym., 2011). Malmilla tarkoitetaan yksinkertaistettuna mineraaliesiintymää, josta on taloudellisesti kannattavaa erottaa metalleja (Evans, 1997).

Teollisuusmineraaleiksi luetaan mitkä tahansa kivet ja mineraalit, joista on taloudellista hyötyä lukuun ottamatta metallimalmeja, kivennäispolttoaineita ja jalokiviä. Esimerkkejä teollisuusmineraaleista ovat teollisuudessa käytettävät timantit ja lannoitteissa käytettävä apatiitti. (Evans, 1997)

Metallimalmikaivostoiminnan pitkä elinkaari koostuu kolmesta päävaiheesta: malminetsinnästä, tuotantovaiheesta ja kaivoksen sulkemisen jälkeisestä jälkihoitovaiheesta (Heikkinen & Noras, 2005). Päävaiheiden välissä on useita välivaiheita, kuten kaivoksen kannattavuustutkimukset, varsinaisen kaivoksen ja sen infrastruktuurin rakentaminen sekä varsinaisen kaivannaistuotteen myyminen ostajalle (Moon & Evans, 2006).

Malminetsinnän tavoitteena on paikantaa malmipotentialisia alueita usein jo olemassa olevia geologisia, geofysikaalisia ja geokemiallisia aineistoja hyödyntäen. Malminetsintä kohdennetaan alueellisten tutkimusten perusteella lupaaville alueille, joilla voidaan tehdä

tarkempaa tutkimusta ja kartoitusta mm. malmiesiintymän sijainnista. Tarkemmassa tutkimuksessa voidaan edelleen käyttää geologiaa, geofysikaalisia ja geokemiallisia menetelmiä, kuten näytteenottoa ja painovoimamittauksia. (Heikkinen & Noras, 2005)

Kun lupaava malmiesiintymä on paikannettu, voidaan aloittaa kohteen arvioivat tutkimukset, joiden tarkoituksena on selvittää mm. esiintymän kokoa, muotoa ja malmipitoisuutta. Tutkimukset suoritetaan tyypillisesti koekairauksilla, tutkimuskaivannoilla sekä koelouhinnalla- ja rikastuksella. Näiden tutkimusten perusteella tehdään kaivoksen kannattavuuslaskelmat ja lopulta päätös kaivostoiminnan aloittamisesta ja kaivoksen rakentamisesta. (Kesler, 1994; Heikkinen & Noras, 2005)

Kaivostoiminnan tuotantovaiheessa malmiesiintymän malmi irrotetaan kallioperästä tarkoituksena rikastaa siinä oleva arvoaines tuotantoketjun myöhemmässä vaiheessa. Louhintaa suoritetaan malmiesiintymästä riippuen joko avolouhintana tai maanalaisesta louhoksesta (Heikkinen & Noras, 2005). Louhintatyypistä riippuen muodostuu jo tässä vaiheessa vaihtelevia määriä kaivannaisjätettä sivukiven ja maansiirtomassan muodossa. Sivukivellä tarkoitetaan muuta malmikiveä ympäröivää arvotonta kiveä, joka täytyy louhia pois, jotta päästään käsiksi varsinaiseen malmiin. Maansiirtomassa taas on kallioperän päällä olevaa löyhää maa-ainesta (Lottermoser, 2010).

Maansiirtomassa ja sivukivet varastoidaan kaivosalueelle tai mahdollisuuksien mukaan niitä voidaan myös hyödyntää kaivostoiminnan aikana esimerkiksi maanrakentamisessa ja louhosten tukemisessa. Sivukiven ja maansiirtomassan hyötykäyttöä voi tosin rajoittaa niiden haitta-ainepitoisuudet ja geotekniset ominaisuudet. (Heikkinen & Noras, 2005)

Kun malmikiveä on saatu louhituksi, on se hienonnettava eli sen raekokoa on pienennettävä rikastukseen sopivaksi. Hienonnusvaihe jaetaan kahteen osaan: murskaus ja jauhatus. Malmi kuljetetaan joko murskaamolle tai vaihtoehtoisesti se voidaan murskata välittömästi maanalaisessa louhoksessa. Murskauksen jälkeen malmi päätyy rikastamolle, jossa se jauhetaan pienempään raekokoon. Jauhatus jatketaan niin pitkään, että haluttu arvoaines on eroteltavissa arvottomasta aineksestä mahdollisimman tehokkaasti. (Kelly & Spottiswood, 1982)

Kun jauhatustuote on optimaalisessa raekoossa, suoritetaan arvomineraalien rikastaminen arvottomista harmeminaaleista. Rikastettavan materiaalin erilaisista

ominaisuuksista riippuen erottelumenetelminä voidaan käyttää fysikaalisia tai kemiallisia menetelmiä, kuten painovoima-, magneetti-, sähköstaattista-, uutto- ja vaahdotuserottelua. (Kelly & Spottiswood, 1982)

Rikastuksesta saatu lopputuote, rikaste, voidaan lopuksi varastoida ja lopulta kuljettaa eteenpäin jalostettavaksi ja viimein hyödynnettäväksi. Rikastuksen jäännöstuote, rikastushiekka, varastoidaan sille tarkoitettuun rikastushiekka-altaaseen. (Heikkinen & Noras, 2005)

Kaivostoiminta päättyy malmin loppumiseen tai tuotannon kannattamattomuuteen metallimarkkinoiden takia. Tällöin kaivostoiminta ajetaan alas, kaivos suljetaan ja aloitetaan kaivosalueen jälkihoitotoimenpiteet, jotka pitävät sisällään mm. alueen maisemoinnin ja ympäristövaikutusten seurannan ja niiden estämisen. (Heikkinen & Noras, 2005)

2.2 Rikastushiekka ja sen läjittäminen

Rikastushiekka on siis malmien rikastusprosesseissa syntyvää, kaivannaisjätteeksi luokiteltavaa sivukiviainesta. Kun malmista on erilaisilla menetelmillä erotettu haluttu raaka-aine, on jäännöstuotteena syntynyt sivukivimineraaleista ja mahdollisista rikastuksessa käytetyistä kemikaaleista koostuva rikastushiekka läjitettävä sille suunniteltuun loppusijoituspaikkaan, useimmiten rikastushiekka-altaaseen. (Kauppila ym., 2011)

Rikastushiekka johdetaan vesilietteenä putkia pitkin useimmiten rikastamon edustalla olevalle padoilla ympäröidylle rikastushiekka-altaalle. Rikastushiekkalietteen painavin, kiinteä ja hienojakoinen osa painuu altaan pohjaan siten, että kaikista hienoin fraktio kerrostuu altaan keskiosiin ja karkeampi osa jää altaan reuna-alueilla. Lietteestä selkeytynyt vesi ohjataan jatkokäsittelyyn ja lopulta takaisin kaivostoiminnan vesikiertoon tai suoraan vesistöön. (Kauppila ym., 2011)

Rikastushiekan läjitysalue koostuu altaasta, allasta ympäröivistä luonnollisista ja rakennetuista patorakenteista sekä suotovesien keruuojista. Rikastushiekan läjitysalueen valinta perustuu ensisijaisesti ympäristöriskien ja kustannusten minimoimiselle.

Läjäytyspaikan valinnassa tulee ottaa huomioon erilaisista rikastusprosesseista syntyvät rikastushiekat. Esimerkiksi kullan rikastusprosesseissa syntyneelle rikastushiekan läjäytysalueelle on tiukemmat vaatimukset kuin esimerkiksi karbonaattipitoisille rikastushiekoille, johtuen kultajätteiden mahdollisista syanidiliuosjäämistä. Lisäksi läjäytysalueen valintaa ohjaavat monet muutkin huomioon otettavat asiat, kuten altaanpohjan rakenteet ja ominaisuudet sekä alueen hydrologia. Altaanpohjasta on tehtävä maanpohjatutkimukset, joihin tulee sisällyttää mm. tietoja läjäytysalueen maaperästä sekä pinta- ja pohjavesien valuma-alueajoista. (Kelly & Spottiswood, 1982; Kauppila ym., 2011)

Kauppilan ym., (2011) mukaan rikastushiekka-allas voidaan rakentaa joko luonnolliselle pohjalle tai keinotekoiselle pohjalle luonnollisen perustan päälle. Rikastushiekan kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet määrittelevät läjäytysaltaan pohjan vedenläpäisyvaatimukset: stabiileille rikastushiekoille soveltuu täysin vettäläpäisevät pohjarakenteet, mutta ongelmajätteiksi luokiteltavat rikastushiekat vaativat täysin vesitiiviitä pohjarakenteiden rakennusratkaisuja, kuten High Density Polyethen -kalvoja ja bentoniittimattoja.

Hyötykäyttömahdollisuuksiltaan rikastushiekka on köyhää, mikä johtuu sen kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista. Esimerkiksi sulfidialmian rikastuksessa syntyneen rikastushiekan sulfidipitoisuus rajoittaa sen käyttöä esimerkiksi maanrakennuksessa sen mahdollisen voimakkaan happamoittavuuden takia. Toisaalta rajoittava tekijä on myös rikastushiekkojen pieni raekoko. Tietyissä tapauksissa rikastushiekkaa voidaan käyttää kaivosten louhostäyteenä ja tukimateriaalina, jolloin rikastushiekasta on erotettava hienoin aines ja lisättävä karkeampaan fraktioon hiekkaa sitovaa lisäainetta, kuten sementtiä. Lisäksi rikastushiekan on täytettävä kemialliset ja vedenläpäisevyyskriteerit. (Lukkarinen, 1987; Kauppila ym., 2011)

Nykyään tutkitaan paljon rikastushiekan hyötykäyttömahdollisuuksia, ja uusia menetelmiä ja teknologioita on ilmaantunutkin. Esimerkkinä on pastasakeutusmenetelmä, jossa rikastushiekkalietteen vesipitoisuutta alennetaan sakeutuksella, jolloin sen virtausominaisuudet muuttuvat pienestä viskositeetista suurempaan. Menetelmällä saatu ”tahnamainen” rikastushiekka voidaan sitten hyötykäyttää louhostäyteenä tai läjittää tavanomaisesti rikastushiekka-altaaseen, jolloin

se suurentaa altaan läjityskapasiteettia. Menetelmä myös suurentaa veden määrää kaivostoiminnan vesikierrossa, joka hyödyttää etenkin kuivien ilmastojen kaivostoimijoita. (Fisseha ym., 2010)

3. Rikastushiekan ympäristöseikat

3.1 Rikastushiekka-altaiden ympäristövaikutukset

Kaivannaisjätteiden käsittelyä ja varastointia pidetään kaivosteollisuuden yhtenä merkittävimmistä ympäristönpilaantumisriskin aiheuttajista (Martin & Davies, 2000; Heikkinen & Noras, 2005). Keskeisimmät metallimalmikaivostoiminnan ympäristöriskin aiheuttajat liittyvät rikastushiekka-altaisiin ja niille läjitetyn rikastushiekan pölyämiseen sekä rikastushiekka-altaiden jätevesien päästöihin. (Heikkinen & Noras, 2005)

Hienojakoinen rikastushiekka on kuivana taipuvainen pölyämään, ja pölymäinen hiekka voi levitä kauaskin tuulen mukana alkuperäiseltä paikaltaan. Pinta-alaltaan laajat ja vähäkasvilliset rikastushiekka-altaat edesauttavat tuulieroosion työtä. Luontoon lentänyt rikastushiekkapöly voi huonossa tapauksessa pilata kaivosympäristössä alueen maaperän sekä pinta- ja pohjavesiä. Pölyämisongelmaa voidaan estää tuotantovaiheessa rikastushiekka-altaan pintaa kastelemalla tai kalkkimaitoa levittämällä. Kalkkimaito samalla myös neutraloi rikastushiekkaa. Sulkemisvaiheessa rikastushiekka-altaan vesipeitto ehkäisee pölyämistä. (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila ym., 2011)

Toinen merkittävä rikastushiekka-altaisiin liittyvä ympäristöriski on altaiden jätevedet, jotka voivat karatessaan ympäristöön juoksutuksen aikana tai suotautuessaan altaan pohjan tai patojen läpi aiheuttaa niin ikään hallaa ympäristölle sekä ihmisille. Vesipäästöjä voidaan ennaltaehkäistä huolellisella suunnittelulla ja oikeanlaisilla rakennusratkaisuilla sekä kaivostoimijoiden ja viranomaisten monitorointityöllä. (Kauppila ym., 2011)

Rikastushiekka-altaiden aiheuttamat ympäristönpilaantumisriskit perustuvat rikastushiekoissa oleviin haitallisiin alkuaineisiin sekä yhdisteisiin, jotka voivat olla metalleja, puolimetalleja, suoloja, ravinteita ja orgaanisia yhdisteitä. Rikastushiekan ympäristölle haitalliset aineet ovat tyypillisesti peräisin itse malmista, mutta jätehiekoissa esiintyy myös louhinnan ja rikastuksen yhteydessä käytettäviä kemikaaleja, kuten räjähdysaineita, rikastuskemikaaleja ja koneiden moottoriöljyjä. Malmiesiintymän geologia ja mineralogia sekä rikastusprosessien tehokkuus vaikuttaa siihen, miten ja missä pitoisuuksissa haitalliset aineet esiintyvät rikastushiekoissa. Haitallisten aineiden

pitoisuudet ja toksikologiset ominaisuudet sekä esiintymismuodot vaikuttavat taas siihen miten haitallisia ne ovat ympäristölle. (Kauppila ym., 2011)

3.2 Sulfidien hapettuminen

Metallimalmit (rauta, nikkeli, kupari, sinkki, lyijy, kulta, uraani) esiintyvät tyypillisesti sulfideina eli metallin ja rikin yhdisteinä, ja oksideina eli metallin ja hapen yhdisteinä. Näiden lisäksi metallimalmi voi esiintyä myös alkuaineena. Rikastushiekat voivat pitää sisällään laajan kirjon erilaisia mineraaleja sulfidi- ja oksidimineraaleista silikaatteihin, hydroksideihin, fosfaatteihin, halideihin ja karbonaatteihin. (Lottermoser, 2010)

Sulfidimalmien rikastuksessa syntyneet sulfidipitoiset rikastushiekat aiheuttavat kaivannaisjätteisiin liittyen merkittävimmän ympäristöriskin johtuen sulfidimineraalien taipumuksesta rapautua maanpinnan hapettavissa olosuhteissa. Sulfidimineraalit ovat vakaita pelkistävässä olosuhteissa, mutta kun ne tuodaan alttiiksi ilmaan hapelle, vedelle ja mikrobeille, niistä tulee epävakaita ja ne hapettuvat. Hapettuessaan sulfidit tuottavat sulfaatti- ja raskasmetallipitoisia happamia valumavesiä. Lisäksi sulfidien hapettumisen myötä ympäristön happamuus kasvaa, joka taas edesauttaa monien raskasmetallien liukenemistä. (Lottermoser, 2010)

Metallimalmikaivostoiminnassa tavataan kymmenittäin erilaisia sulfidimineraaleja, mutta käyn läpi muutamia tärkeimpiä ja tälle työlle relevantteja mineraaleja sekä niiden hapettumisreaktioita.

3.2.1 Pyriitti

Rautasulfidimineraaleja, kuten pyriittiä eli rikkikiisua (FeS_2), pidetään ongelmallisina niiden ominaisuudesta reagoida nopeasti hapen kanssa (Kauppila ym., 2011). Pyriitti esiintyy miltei jokaisessa geologisessa ympäristössä ja se on sulfidimineraaleista runsaslukuisin. Pyriitti liittyy tyypillisesti myös metallimalmi- ja kivihiiliesiintymiin. (Lottermoser, 2010)

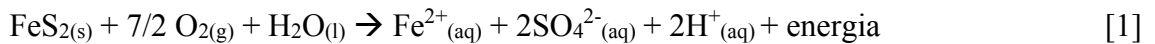
Pyriitin hapettuminen on monimutkainen ja monista eri asioista riippuvainen kemiallis-fysikaalinen ja biologinen prosessi, jossa tietyt mikrobit voivat katalysoida reaktion

nopeutta (Williams, Baldwin & Ralston, 1979). Pyriitin rapautumisnopeuteen vaikuttavat sekä sen mineraalin itsensä ominaisuudet että ulkoiset tekijät. Mineraalin ominaisuuksia ovat raekoko, huokoisuus, reaktiopinta-ala, kiderakenne sekä hivenalkuainepitoisuus. Ulkoisiksi tekijöiksi luetaan mikrobitoiminta, muiden sulfidimineraalien läsnäolo, rapautumisympäristön happi- ja hiilidioksidipitoisuus, pH-olot, lämpötila sekä ferro- ja ferrirautasuhteet. (Lottermoser, 2010)

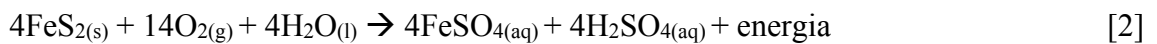
Lottermoser (2010) jakaa pyriitin hapettumismekanismit neljään osaan:

1. Hapettuminen suoraan hapen vaikutuksesta ilman mikrobitoimintaa
2. Hapettuminen suoraan hapen ja mikrobitoiminnan vaikutuksesta
3. Hapettuminen epäsuoraa hapen ja raudan vaikutuksesta ilman mikrobitoimintaa
4. Hapettuminen epäsuoraa hapen, raudan ja mikrobitoiminnan vaikutuksesta

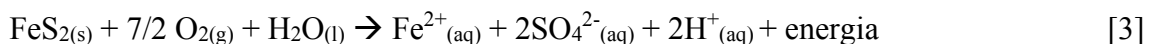
Suorat hapettumismekanismit 1 ja 2 voidaan esittää seuraavalla kaavalla:



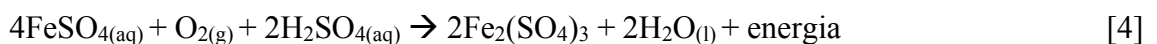
Reaktiossa 1 pyriitti reagoi hapen ja veden kanssa muodostaen ferrorautaa, sulfaattia, vetyioneja sekä energiana lämpöä. Lottermoser (2010) kuitenkin muistuttaa, että pyriitin hapettuminen tapahtuu pääosin epäsuorien hapettumismekanismien (3 ja 4) kautta. Reaktiot tapahtuvat kolmiportaisesti ja ne voidaan esittää seuraavanlaisesti:



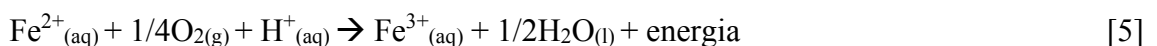
tai vaihtoehtoisesti:



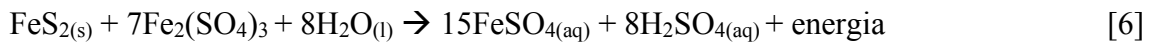
Reaktiossa 2 pyriitti reagoi hapen ja veden kanssa muodostaen ferrosulfaattia, rikkihappoa ja lämpöä, tai vaihtoehtoisesti kuten reaktiossa 3 pyriitti reagoi muodostaen ferrorautaa, sulfaattia, vetyioneja sekä lämpöä (Lottermoser, 2010). Ferroraudan hapettumisen ferriraudaksi voidaan esittää seuraavasti:



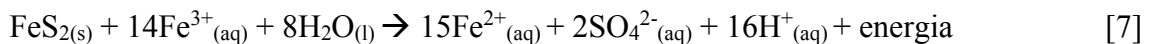
tai vaihtoehtoisesti:



Reaktiossa 4 ferrosulfaatti reagoi hapen ja rikkihapon kanssa muodostaen ferrisulfaattia, vettä ja lämpöä, tai vaihtoehtoisesti reaktion 5 tavoin ferrorauta reagoi hapen ja vetyionien kanssa muodostaen ferrirautaa, vettä ja lämpöä. Reaktio tapahtuu alhaisissa pH-olosuhteissa (Lottermoser, 2010). Pyriitin edelleen hapettumisen ferriraudan vaikutuksesta voidaan esittää seuraavasti:



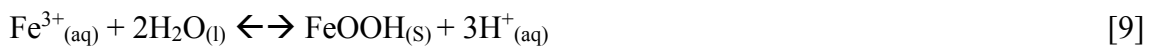
tai vaihtoehtoisesti:



Reaktiossa 6 pyriitti reagoi ferrisulfaatin ja veden kanssa muodostaen ferrosulfaattia ja rikkihappoa sekä lämpöä, tai vaihtoehtoisesti reaktion 7 tavoin pyriitti reagoi ferriraudan ja veden kanssa muodostaen ferrorautaa, sulfaattia, vetyioneja sekä lämpöä. (Lottermoser, 2010)

Kun pH-olosuhteet ovat suotuisat, muodostuu jatkuva sykli, jossa muodostunut ferrorauta (Fe^{2+}) hapettuu ferriraudaksi (Fe^{3+}), joka taas reagoi alhaisissa pH-oloissa pyriitin kanssa muodostaen taas ferrorautaa (reaktiot 2-4). Sykli jatkuu niin kauan, että pyriitti tai ferrirauta on loppuun käytetty. (Lottermoser, 2010)

Mikäli pH-olosuhteet ovat korkeammat (>4), johtuen esimerkiksi karbonaattimineraalien neutralointireaktioista, liuennut ferrirauta reagoi veden kanssa muodostaen saostuneita rautahydroksideja sekä oksihydroksideja (Toropainen, 2006; Lottermoser, 2010). Reaktiot voidaan kuvata seuraavasti:



Liuenneen ferriraudan saostuminen hydroksideiksi ja oksidokroksideiksi alentaa hapettumisympäristön pH-oloja johtuen vetyioneista. Tämä taas johtaa siihen, että ferrirauta alkaa hapettamaan pyriittiä reaktion 4 kuvaamalla tavalla. Saostuneet hydroksidit ja oksihydroksidit keräävät itseensä happamissa olosuhteissa liuenneita metalleja. (Toropainen, 2006; Lottermoser, 2010)

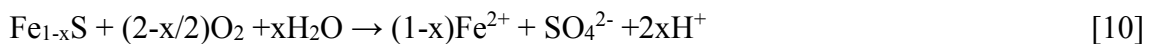
3.2.2 Muut sulfidimineraalit

Muidenkin sulfidimineraalien hapettuminen vaikuttaa heikentävästi kaivosympäristöön ja kaivosvesiin. Pyriitin hapettumisen tavoin myös muiden sulfidien hapettumisreaktioihin liittyvät suorasti tai epäsuorasti hapen, raudan ja mikrobitoiminnan läsnäolo. Poikkeus muiden kuin rautapitoisten sulfidimineraalien hapettumisreaktioissa liittyvät tyypillisesti reaktion nopeuteen: hapettumisreaktiot ovat tyypillisesti hitaampia. Tämä johtuu siitä, että raudan läsnäolo mineraalissa tai kaivosvesissä on tärkein ja kiihdyttävien ainesosa hapettumisreaktiossa. Lisäksi yksi tärkeä seikka muiden sulfidimineraalien rapautumisessa on niistä vapautuvat raskasmetallit. Esimerkiksi sinkkivälke [ZnS] voi hapettuessaan päästää ympäristöön haitallisia määriä kadmiumia ja talliumia. (Dold, 2010; Lottermoser, 2010)

Rautasulfidimineraalit, kuten pyriitti, markasiitti [FeS₂] ja magneetikiisu [Fe_{1-x}S] tuottavat kaikkein merkittävimmin happoa rapautumisympäristöönsä. Myös sellaiset sulfidimineraalit, joissa rauta on tärkeä rakenneosana mineraalia, kuten kuparikiisu [CuFeS₂], tuottavat happoa merkittävästi. (Lin, 1997)

Raudattomat ja vähärautaiset sulfidimineraalit, kuten lyijyhohde [PbS] tai kovelliini [CuS], tuottavat vähemmän happoa rapautumisympäristöönsä. Tämä johtuu vähärautaisuuden lisäksi myös näiden mineraalien kiderakenteiden stabiiliudesta sekä taipumuksesta tuottaa vähäliukoisia sekundäärimineraaleja, kuten lyijykarbonaattia (serusiitti, [PbCO₃]), jotka taas pystyvät suojaamaan alkuperäistä sulfidimineraalia hapettumiselta kapseloimalla mineraalin. (Lin, 1997)

Magneetikiisu, jota esiintyy pyriitin tavoin yleisesti useissa sulfidimalmeissa, voi esiintyä useassa eri muodossa (Dold, 2010). Sen hapettumisreaktio on samantyyppinen kuin pyriitillä:



Magneetikiisun stoikiometrialla eli sillä miten kaavassa oleva x muuttuu, on suuri vaikutus magneetikiisun hapettumisessa syntyvän hapon määrälle. Magneetikiisun kaavassa x voi vaihdella välillä 0,125 [Fe₇S₈] – 0,0 [FeS]. Mikäli magneetikiisu esiintyy kidejärjestelmältään monokliinisenä ja sen kaava on muotoa Fe₇S₈, on hapontuotto

suurimmillaan. Mikäli magneettikiisu esiintyy harvinaisena troiliittina [FeS], on hapettumisreaktio hitaampaa ja hapontuotto merkityksetöntä. (Dold, 2010; Jambor, 2003)

Kuparikiisua pidetään melko kestäväenä sulfidimineraalina hapettumiselle, mutta reaktionopeus kasvaa suhteessa ferriraudan pitoisuuden kasvuun (Dold, 2010). Kuparikiisun hapettumisreaktion voidaan kuvata seuraavasti:



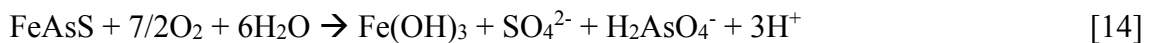
Ferriraudan hapettumisen sekä ferriraudan hydroksidiksi saostumisen myötä syntyy hapontuottoprosessi. Lisäksi reaktioissa irronneet kupari-ionit ovat raskasmetallina haitallisia ympäristölle. Reaktio voidaan kuvata näin:



Arseenikiisu [FeAsS] voi hapettua seuraavasti:



Kun arseenikiisu reagoi hapen ja veden kanssa, muodostuu ferrirautaa, sulfaattia, divetyarsenaattia sekä vetyioneita. Mikäli huomioidaan vielä ferriraudan hapettuminen ja ferrihydroksidin saostuminen, voidaan reaktio kuvata näin:



3.3 Kaivosten hapan valunta ja sen vaikutus ympäristöön

Eli kun sulfidit, ennen kaikkea rautasulfidit, hapettuvat pääasiallisesti ilmakehän hapen ja ferriraudan vaikutuksesta ja usein myös bakteerien katalysoimana, syntyy lopulta lisää ferrirautaa, rikkihappoa, metalli-ioneja sekä hydroksideja. Hapetusreaktioissa syntyneen rikkihapon ja metalli-ionien sekä kaivosympäristössä olevan veden seosta kutsutaan kaivosten happamaksi valumaksi (Acid Mine Drainage, AMD). (Johnson & Hallberg, 2005)

Aivan yksinkertainen asia ei kuitenkaan ole, vaan happaman valuman syntyminen ja sen voimakkuus riippuu tiettyjen kemiallisten, fysikaalisten, geologisten, biologisten sekä hydrologisten tekijöiden toteutumisesta. AMD:n syntymistä ja voimakkuutta

rikastushiekassa säätelevät pH-olosuhteet, lämpötila, happipitoisuus sekä kaasuna että vedessä, rikastushiekan vesikylläisyys, ferriraudan kemiallinen aktiivisuus, sulfidimineraalien reaktiopinta-ala, hapontuottoreaktioiden aktivointienergia sekä mikrobitoiminnan aktiivisuus. (Akcil & Koldas, 2006)

Fysikaalisista happaman valuman säätelijöistä tärkein lienee läjitetyn kaivannaisjätteen rakenne ja vedenläpäisevyys, jotka säätelevät sitä, kuinka hyvin happi pystyy vaikuttamaan mineraaliainekseen ja sitä, kuinka vesi pystyy virtaamaan aineksen läpi. Esimerkiksi rikastushiekan pienemmän raekoon vuoksi rapautuminen ja näin ollen hapontuotto on huomattavasti suurempaa kuin esimerkiksi kaivoslouhoksen seinämän. Lisäksi rikastushiekan, joka läjitetään erilaisten rikastusprosessien jälkeen, mineraalirakeiden pinnat voivat olla paljon rikkonaisempia kuin terveiden mineraalien, ja näin ollen olla alttiimpia rapautumiselle. (Akcil & Koldas, 2006; Kauppila ym., 2011)

Kaivosjätealueen hydrologiset komponentit, kuten sadanta sekä pohja- ja pintavesien virtaukset ovat myös tärkeitä AMD:n syntymistä, voimakkuutta ja valuman käyttäytymistä sääteleviä tekijöitä. Happirikkaan veden täytyy joko virraten tai satamalla päästä kontaktiin sulfidipitoisen aineksen kanssa. Hydrologia kontrolloi myös sitä, miten sulfidien hapetusreaktioissa syntyneelle hapolle käy. Riippuen siitä onko rapautumisympäristössä virtavaa vettä, happo joko virtaa muualle tai jää paikalleen odottamaan huuhtoutumista. Huuhtoutuessaan veden mukana happo voi happamoittaa muita osia ympäristöstään tai kohdatessaan neutraloivia mineraaleja voi hapan valunta neutraloitua. (Seal & Hammarstrom, 2003; Akcil & Koldas, 2006; Nordstrom, 2011)

Kaivosten happamilla valumilla on lukuisia haitallisia vaikutuksia ympäristöön, johtuen lähinnä niiden kemiallisista ominaisuuksista. Gray (1997) luokittelee ympäristövaikutukset kemiallisiin, fysikaalisiin, biologisiin sekä ekologisiin. Happaman valuman joutuessa ympäristöön, se voi alentaa maaperän sekä pinta- ja pohjavesien pH:ta sekä nostaa näiden metallipitoisuuksia. Hapan valunta voi myös aiheuttaa värimuunnoksia ympäristössä ja metallien sedimentteihin sitoutumista. Biologiset vaikutukset koskevat elollista luontoa ja ne ovat yhteydessä kemiallisiin vaikutuksiin. Kun AMD alentaa ympäristön pH:ta niin tiettyjen organismien happoemästäsapaino horjuu, joka aiheuttaa tietyissä eläinlajeissa aineenvaihduntaongelmia ja lisääntymishäiriöitä, ja lopulta näiden eläinlajien tuhoutumista. Ekologiset vaikutukset

koskevat eliöiden elinympäristöjen muutoksia ja ne liittyvät edellä mainittuihin seikkoihin.

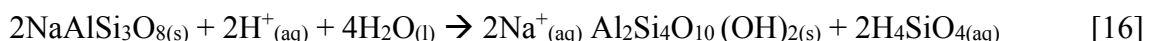
Kaivoksen happaman valuman vaikuttaessa voimakkaasti ympäristön eri osa-alueisiin, se vääjäämättä vaikuttaa myös ihmisten elämään. Hapan valunta heikentää mm. pohja- ja pintavesien laatua haitaten näin niiden talous- ja virkistyskäyttöä (Kauppila ym., 2011).

Happaman valuman syntyyn ja voimakkuuteen vaikuttaa kuitenkin vielä yksi seikka. Mikäli kaivannaisjäte, kuten rikastushiekka, sisältää riittävästi neutraloivia mineraaleja, voivat näiden mineraalien neutraloitumisreaktiot puskuroida syntyvää hapontuottoa ja jopa estää haitallisen happaman valuman synnyn. (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila ym., 2011)

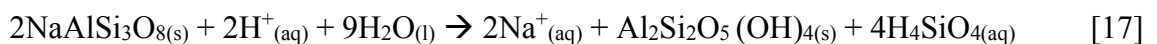
3.4 Mineraalien neutralointireaktiot

Neutraloivien mineraalien kyky puskuroida sulfidijätteistä muodostuvaa happoa perustuu siihen, että neutraloivat mineraalit reagoidessaan kuluttavat sulfidimineraalien hapetusreaktioissa sekä rauta- ja alumiinihydroksidien saostumisessa vapautuneita vetyioneja. Rikastushiekoissa olevat neutraloivat mineraalit kuuluvat tyypillisesti silikaattien, karbonaattien sekä hydroksidien mineraaliryhmiin. (Lottermoser, 2010)

Silikaattimineraalit ovat maankuoren määrällisesti merkittävin mineraaliryhmä ja nämä muodostavat suurimman haponneutralointikapasiteetin rikastushiekoissa. Silikaattien kemiallinen rapautuminen ja täten vetyionien kuluttaminen tapahtuu joko yhtenevästi tai epäyhtenevästi. Silikaattien yhteneväisessä rapautumisessa silikaattimineraali liukenee kokonaan muodostaen pelkästään liukoisia ainesosia. Epäyhteneväisessä rapautumisreaktiossa silikaattimineraali muuttaa muotoaan toiseksi mineraaliksi (Lottermoser, 2010). Nämä kaksi silikaattimineraalien rapautumistyyppiä voidaan kuvata seuraavasti:



tai:



(Pa = pääalkuaine = Ca, Na, K, Mg, Mg tai Fe)

Yhteneväisessä rapautumisessa (reaktio 15) silikaattimineraali liukenee reagoidessaan vetyionin ja veden kanssa muodostaen liuenneita kationeja, piihappoa sekä hydroksideja. Epäyhteneväisestä rapautumisesta (reaktioissa 16) voidaan käyttää esimerkkinä silikaattimineraali albiittia $[\text{NaAlSi}_3\text{O}_8]$, joka reagoi vedyn ja veden kanssa, jolloin muodostuu kationeja, piihappoa sekä uutteen määrästä riippuen sekundäärimineraalina joko montmorilloniittia $[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_{2(s)}]$ tai kaoliniittia $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_{4(s)}]$. (Lottermoser, 2010)

Toinen tärkeä happoa neutraloiva mineraaliryhmä on karbonaatit, johon luettavia mineraaleja ovat mm. kalsiitti $[\text{CaCO}_3]$, dolomiitti $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ ankeriitti $[\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})(\text{CO}_3)_2]$ ja magnesiitti $[\text{MgCO}_3]$. Näistä kalsiitti on merkittävin johtuen sen runsaudesta kaikissa geologisissa ympäristöissä sekä sen reaktionopeudesta. Kalsiitin neutralointimekanismi perustuu sen liukenemiseen ja kompleksinmuodostukseen vetyionien kanssa. Kalsiitin neutralointireaktion hapon kulutus riippuu rapautumisliuoksen pH-tasosta: emäksisissä tai heikosti happamissa oloissa kalsiitti reagoi vedyn kanssa muodostaen kalsiumioneja sekä vetykarbonaattia. Vahvasti happamissa oloissa samassa reaktioissa syntyy vetykarbonaatin sijasta hiilihappoa. (Blowes ym., 2003; Lottermoser, 2010)

Kalsiitin liukenemisestä johtuva neutralointi pitää rikastushiekkojen huokosveden neutraalina niin kauan, kun kalsiittimineraalia on rikastushiekoissa riittävästi tarjolla ja pohjaveden virtaus pysyy maltillisen hitaana. Mikäli rapautumisympäristössä on rautasulfidien hapettumisesta johtuen ferrorautaa, se voi reagoida kalsiitin liukenemisessä syntyneen vetykarbonaatin kanssa muodostaen sekundääristä sideriittiä $[\text{FeCO}_3]$. (Blowes ym., 2003; Lottermoser, 2010)

Kalsiitin loppumisen jälkeen, rikastushiekkojen neutralointia ylläpitää jokin toinen karbonaattimineraali. Jos muita karbonaattimineraaleja ei rikastushiekoissa ole tarjolla, hapon puskurointitehtävä siirtyy sideriitille, jonka neutralointi riippuu hapetus-pelkistysolosuhteista. Pelkistävässä ympäristössä ja näin ollen suljetussa systeemissä sideriitti liukenee reagoidessaan vetyionien kanssa muodostaen ferrorautaa ja vetykarbonaattia. Mikäli rapautumisympäristössä on riittävästi happea mukana, sideriitin liukenemisellä ei ole neutraloivaa vaikutusta. Tämä johtuu siitä, että ferroraudan saostuminen tuottaa yhtä

paljon vetyioneja kuin vetykarbonaatin tuottaminen kuluttaa. (Blowes ym., 2003; Lottermoser, 2010)

Neutraloivien mineraalien liukeneminen ja näin ollen haponpuskurointi on riippuvainen rapautumisympäristön pH-olosuhteista. Yksittäiset mineraalit liukenevat erilaisissa pH-oloissa ja yksinkertaistettuna asia voidaan tiivistää näin: kalsiitti 6,5 - 7,5; sideriitti 4,8 - 6,3; alumiinihydroksidi 4,0 - 4,3; rautahydroksidi 2,5 < 3,5. (Blowes ym., 2003)

3.5 Sekundäärimineraalit

Sekundäärimineraalit, kuten aiemmin mainitut sideriitti ja kaoliniitti, syntyvät primäärimineraalien rapautumistuotteena. Rikastushiekan sulfidimineraalien hapetusreaktioissa sekä neutraloivien mineraalien neutralointireaktioissa vapautuu rapautumisympäristöön metallien, sulfaattien ja muiden yhdisteiden lisäksi paljon ioneja. Nämä lienneet kationit ja anionit tekevät rikastushiekassa olevasta huokosvedestä voimakkaan suolaista. Tietyt huokosvedessä olevista ioneista absorboituvat joihinkin mineraaleihin, ja osa ioneista voi siirtyä pinta- ja pohjavesiin. Tietyt ionit voivat taas saturaatiopisteen saavutettuaan saostua sekundäärimineraaleina rikastushiekkaan. (Blowes ym., 2003; Lottermoser, 2010)

Sekundäärimineraalit akkumuloituvat primääristen mineraalien raepinnoille tai ne täyttävät rikastushiekan huokostilan. Sekundääriset mineraalit voidaan jakaa eri ryhmiin, joita ovat: sekundääriset oksidit, hydroksidit, liukoiset sulfaatit, kohtalaisen ja heikosti liukoiset sulfaatit, karbonaatit ja sekundääriset sulfidit. Rikastushiekassa olevien sekundäärimineraalien määrään ja koostumukseen vaikuttaa mm. alkuperäisen rikastushiekan mineraloginen koostumus ja rakenne sekä hapettumisen kesto ja nopeus. (Blowes ym., 2003)

Rikastushiekkojen sekundäärimineraaleilla on tärkeä rooli rikastushiekoista irronneiden epäpuhtauksien ja myrkyllisten yhdisteiden puskuroidisessa. Liukenemattomat sekundäärimineraalit voivat tehokkaasti hidastaa rapautumisliuoksessa olevia haitallisia yhdisteitä sitomalla niitä itseensä. (Nordström ja Alpers 1999)

3.6 Oksidimineraalien ympäristövaikutukset

Oksidimalmit, kuten esimerkiksi Outokummun Kemin kaivoksen kromimalmi, ovat kemiallisesti ympäristölle vaarattomampia kuin sulfidit, sillä oksidimineraalit ovat maan pinnan olosuhteissa kestävämpiä rapautumiselle sekä kemiallisesti pysyvämpiä (Kauppila ym., 2011). Kaivostoiminnassa oksidimineraalipitoiset rikastushiekat aiheuttavat ympäristövaikutuksia lähinnä pölyämällä (Heikkinen & Noras, 2005). Kauppila ym. (2011) kuitenkin huomauttavat, että oksidimalmiesiintymät voivat sisältää myös sulfidimineraaleja, jolloin tuulen lennättämä pöly voi aiheuttaa samoja ongelmia kuin itse sulfidimalmi.

Poikkeuksen tekee kuitenkin uraanioksidimalmit, kuten uraniniitti [UO₂]. Uraanin rikastuksesta jäännöstuotteena syntynyt rikastushiekka voi vapauttaa hapettuessaan ympäristölle ja terveydelle haitallista raskasmetallia, uraania. Lisäksi uraanioksidimineraalin rikastuksesta syntyneen rikastushiekan loppusijoituksessa on huomioitava rikastushiekan sisältämät radioaktiiviset aineet, kuten uraani ja torium sekä näiden hajoamisesta syntyneiden hajoamistuotteiden puoliintuessa vapautuva säteily. Myös radiumin puoliintuessa muodostuva terveydelle haitallinen radonkaasu on otettava huomioon loppusijoituksessa. (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila ym., 2011)

4. Rikastushiekan karakterisointi ja siinä käytettävät tutkimusmenetelmät

4.1 Karakterisointimenettely

Rikastushiekan karakterisoinnilla tarkoitetaan tutkimuksia, joiden tarkoituksena on selvittää rikastushiekan kemiallisia, fysikaalisia ja geoteknisiä ominaisuuksia lyhyellä, keskipitkällä sekä pitkällä aikavälillä. Näiden tutkimusten perusteella ohjataan rikastushiekan sijoittamista, läjitysmenetelmiä ja mahdollista hyötykäyttöä sekä suunnitellaan rikastushiekka-altaan jälkihoitoon liittyviä asioita, kuten peittoratkaisuja ja muita haittojen ehkäisymenetelmiä. (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila ym., 2011)

Tavallisimmin rikastusjätteiden karakterisointi tähtää happaman valuman, metallien liukenemisen sekä muiden ympäristövaikutusten arvioimiseen ja ennustamiseen. Tällöin karakterisointimenettely pitää sisällään rikastushiekan mineralogiset ja geokemialliset tutkimukset, sillä nämä ovat tärkeimmät määritykset rikastushiekan ympäristökelpoisuuden arvioinnissa. Mineralogisissa selvityksissä tutkitaan rikastushiekan mineralogista koostumusta ja geokemiallisissa tutkimuksissa selvitetään rikastushiekan sekä kaivosvesien yleistä kemiallista koostumusta ja haitallisten alkuaineiden esiintymistä. (Jamieson ym., 2015)

Rikastushiekan karakterisointimenettely alkaa alkuperäisen malmiesiintymän geologisella kuvauksella, joka sisältää tietoja alueen malmimuodostumasta, esiintymän malmimineralogiasta ja sivukiven mineraalikoostumuksesta sekä esiintymän hydrotermisestä muuttumisesta. Lisäksi kuvaukseen on liitettävä tietoja malmin louhinta- ja rikastusprosesseista. (Kauppila ym., 2011)

Esiintymän geologinen kuvaus määrittää jatkotutkimustoimenpiteet sekä tutkimusmenetelmät, sillä kuvauksen perusteella voidaan arvioida rikastushiekan hapontuotto- ja neutralointikykyä sekä haitallisten alkuaineiden esiintymistä (Kauppila ym., 2011). Geologisen kuvauksen teossa voidaan käyttää apuna niin kutsuttuja geoympäristömalleja, jotka kokoavat mm. kullekin malmiesiintymälle tyypillisiä kivilajiseurueita ja malmimineraaleja (Seal & Hammarstrom, 2003).

Karakterisointi jatkuu näytteenotolla sekä näytteiden esikäsittelyllä, joiden jälkeen voidaan suorittaa rikastushiekan mineralogisen ja kemiallisen koostumuksen määrittely. Rikastushiekan karakterisoinnin mineralogisissa tutkimuksissa painopiste on sulfidimineraalikoostumuksen selvittämisessä sekä neutraloivien mineraalien kartoittamisessa. Tulosten perusteella rikastushiekka luokitellaan rautasulfidipitoisiksi jätteiksi, muiksi sulfidipitoisiksi jätteiksi ja ei-sulfidipitoisiksi jätteiksi (Kauppila ym., 2011). Jätteiden mahdollisesti aiheuttamien ympäristö- ja terveysriskien arvioinnissa käytetään apuna valtioneuvoston asettaman pilaantuneiden maiden asetusta (PIMA-asetus), joka pitää sisällään maaperän haitta-aineiden pitoisuuksien kynnykset ja ohjeistoja. (Reinikainen, 2007)

Mikäli rikastushiekka ei sisällä sulfidista rikkiä tai sen kokonaispitoisuus on alle 0,1 %, ja jätteen haitta-aineiden happoliukoisuuspitoisuudet pysyvät valtioneuvoston asettaman kynnyksarvon sekä paikallisen ympäristön maaperän taustapitoisuuden alapuolella, voidaan rikastushiekka luokitella pysyväksi jätteeksi. Jos pysyväksi luokiteltu jäte ei sisällä rapautumisherkkiä ja haitallisia alkuaineita sisältäviä suolamineraaleja tai mahdollisesti haitallisia rikastuskemikaaleja, sille ei tarvitse suorittaa hapontuottomäärityksiä tai muita lisäanalyysyjä. (Kauppila ym., 2011)

Rikastushiekoille, jotka sisältävät kokonaispitoisuudeltaan sulfidista rikkiä yli 0,1 %, suoritetaan hapontuottokyvyn määrittely. Näistä rikastushiekoista kuvataan myös neutraloivat mineraalit ja niiden määrät. Hapontuottokyvyn määrittelyn jälkeen rikastushiekka luokitellaan pysyviin jätteisiin tai ei-pysyviin jätteisiin riippuen neutralointi (NP)- ja hapontuottopotentiaalien (AP) suhteesta. Ei-pysyville jätteille on suoritettava lisäksi haitta-aineiden liukoisuuskokeita sekä AMD:n muodostumismahdollisuutta selvittäviä määrittelyjä. (Kauppila ym., 2011)

Karakterisointiin kuuluu lisäksi rikastushiekan fysikaalisten ja geoteknisten ominaisuuksien määrittelyjä, jotka tähtäävät lähinnä rikastushiekan hyötykäytön selvittämiseen. Rikastushiekan ominaisuudet sekä jäteluokka yhdessä jätteesijoituspaikan ominaisuuksien kanssa määrittävät ja ohjaavat jätteenkäsittelytoimia kaivoksen koko elinkaaren ajan aina tuotannon aloittamisesta sen jälkihoitoon asti. (Kauppila ym., 2011)

Seuraavissa alaluvuissa käyn läpi mineralogiset, kemialliset ja geotekniset rikastushiekan karakterisoinnissa käytettävät määrittämenetelmät. Lisäksi käyn läpi tiivistetysti tälle työlle tärkeimpiä analyysimenetelmiä.

4.2 Rikastushiekan karakterisoinnissa käytettävät tutkimusmenetelmät

4.2.1 Mineralogiset määrittämenetelmät

Rikastushiekan karakterisointimenettelyyn kuuluvien mineralogisten määrittästen tavoitteena on selvittää rikastushiekan mineralogista koostumusta sekä hapontuottajamineraalien ja neutraloivien mineraalien suhteellisia osuuksia. Näiden lisäksi voidaan tutkia rikastushiekassa olevien mineraalien kokoa, muotoa, rapautumisastetta ja rapautumistuotteita, kuten sekundäärimineraaleja. (Lottermoser, 2010; Kauppila ym., 2011)

Mineralogisia määrittäksiä voidaan tehdä joko niin kutsuttuna bulkkianalyysinä tai yksittäisten mineraalirakeiden analyysinä. Bulkkianalyysissä voidaan tutkia esimerkiksi mineraalien suhteellisia osuuksia rikastushiekanäytteessä, kun taas yksittäiset mineraalirakeiden tutkimuksessa ollaan kiinnostuneita esim. sekundäärimineraalien muodostumisesta yksittäisten mineraalirakeiden pinnalle. (Jamieson, 2015)

Mineraalien tunnistamisessa voidaan käyttää perinteisiä polarisaatio- ja valomikroskooppeja, elektronimikroskooppia (SEM), röntgendiffraktioanalyysiaattoria (XRD) tai röntgenmikroanalyysiaattoria (EPMA). Mineraalien suhteellisia osuuksia eli rikastushiekan modaalineralogiaa tutkitaan tyypillisesti XRD-analyysillä, ohutkieistä pistelaskumenetelmällä tai kuva-analyysillä valo- tai elektronimikroskoopilla. (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila ym., 2011; Jamieson, 2015)

Röntgendiffraktiomenetelmä (XRD) on mineraalien tunnistuksessa käytettävä menetelmä, jossa yksittäisiä mineraalirakeita tai jauhemaisia näytteitä säteilytetään röntgensäteillä. Röntgensäteet diffraktoituvat eli taipuvat näytteen kiteistä erilaisilla sirontakulmilla riippuen esimerkiksi kidehilojen välimatkasta. XRD-analyysiaattorin detektorilla eli ilmaisimella havainnoi näytteestä sironneet röntgensäteet. Havainnoidut sirontakuviot ovat kullekin mineraalille karakteristisia eli ominaisia ja saatuja

sirontakuvioita verrataan tietokantoihin mineraalien tunnistuksessa. (Gillott, 1968; Raudsepp & Pani, 2003)

FE-SEM eli kenttäemissiopyyhkäisyelektronimikroskooppi on mikroskooppi, joka aineiden ja materiaalien tutkimuksessa, tavanomaisesta mikroskoopista poiketen, käyttää valon sijasta elektroneja. Laite pommittaa näytettä elektroneilla, jolloin näytteen jokaisesta mineraalirakeesta, johon elektronisuihku on osunut, emittoituu sekundäärisiä elektroneja. Emittoituvat sekundääriset elektronit säteilevät erilaisilla nopeuksilla ja kulmilla riippuen rakeen pinnasta. Laitteen detektori havainnoi nämä emittoituneet sekundääriset elektronit ja muodostaa signaalin, jonka laite muuntaa monitorille visuaaliseksi kuvaksi. FE-SEM tuottaa erittäin tarkkaa topografista informaatiota tutkitusta materiaalista sekä muodostaa äärimmäisen tarkkoja kuvia pienistä objekteista. Tavalliseen pyyhkäisyelektronimikroskooppiin SEM:iin verrattuna FE-SEM tuottaa selkeämpiä ja häiriöttömämpiä kuvia. (Goldstein ym., 2003)

Mineraalien tunnistuksessa FE-SEM voidaan varustaa esimerkiksi **EDS**:lla (energy dispersive X-ray spectrometry), jolloin voidaan samanaikaisesti tutkia näytteen alkuainekoostumusta ja rakennetta. Tämä perustuu siihen, että kun näytettä pommitetaan elektroneilla ja elektroneiden osuessa näytteen atomeihin, syntyy röntgenfluoresenssisäteilyä. EDS tunnistaa alkuaineet niiden tuottaman karakteristisen säteilyn energian perusteella. FE-SEM-EDS:n tuottamien kuvien ja alkuainekoostumusten perusteella tehdään mineralogisia tutkimuksia, kuten mineraalien tunnistamista. (Goldstein ym., 2003)

4.2.2 Kemialliset määrittämenetelmät

Rikastushiekan karakterisointimenettelyn kemiallisten määrittämen tavoitteena on tutkia rikastushiekan yleistä kemiallista koostumusta sekä siinä esiintyviä haitta-aineita. Kemiallisiin määrittämeniin kuuluu myös rikastushiekan hapontuoton ja sen puskurointikapasiteetin selvittäminen. (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila ym., 2011)

Rikastushiekan kemiallinen kokonaispitoisuus määrittämen tavallisesti röntgenfluoresenssimenetelmällä tai erilaisilla uutto- ja sulatemenetelmillä. Kemiallisen kokonaispitoisuuden määrittämen perusteella voidaan myös määrittämen rikastushiekan

laskennallinen ja suuntaa antava mineralogia. (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila ym., 2011)

Röntgenfluoresenssispektroskopia (XRF) perustuu näytteen säteilyttämiseen röntgensäteilyllä ja siten näytteestä emittoituvan kullekin alkuaineelle karakteristisen sekundaarisen röntgensäteilyn tutkimiseen ja siten erilaisten alkuaineiden ja niiden määrien tunnistamiseen. Analyysimenetelmänä XRF on nopea ja tarkka kokonaisalkuainekoostumuksen analysoimisessa. (Fitton, 1997)

Osittaisuuttomenetelmillä, kuten kuningasvesiuutolla, saadaan rikastushiekan happoliukoisten alkuaineiden pitoisuudet. Osittaisuuttomenetelmissä selvitetään mineraalien kiteisiin ja niiden pinnoille sitoutuneiden haitallisten aineiden pitoisuuksia, jolloin voidaan tutkia näiden liukenemistä muuttuvissa rapautumisympäristön olosuhteissa. Metallipitoisuudet määritetään happouutteesta esimerkiksi AAS- tai ICP-AES/MS-tekniikalla. (Heikkinen & Noras, 2005)

Atomiabsorptiospektroskopia (AAS) on alkuaineanalyysimenetelmä, jossa nestemäisen näytteen alkuaineet hajotetaan atomeiksi tyypillisesti kuumentamalla niitä. Tutkittavan alkuaineen atomit saatetaan viritystilaan kohdistamalla niihin näkyvää valoa. Tämän kyseisen alkuaineen atomit absorboivat näille karakterististä valoa atomin siirtyessä viritystilaan. Näytteeseen kohdistetun valon määrää verrataan näytteen läpäisseeseen valon määrään. Näin voidaan todeta absorboidun valon ja täten tutkitun alkuaineen määrä näytteessä. (Rowland, 1997)

AAS:llä voidaan mitata esimerkiksi selektiivisellä sekvenssiuuttomenetelmällä saatuja uutoksia. Ko. uuttomenetelmä perustuu siihen, että kun tietyt metallit esiintyvät tietyissä fraktioissa (esim. sitoutuneina rauta- ja mangaanioksidiin), voidaan niitä irrottaa uuttamalla eri reagensseilla. Sekvenssiuutossa tiettyjä metalleja lähdetään uuttamaan näytteestä portaittain tietyillä reagensseilla siten, että helposti liukenevat uutetaan ensimmäiseksi ja vaikeasti liukenevat viimeiseksi. Menetelmällä voidaan simuloida oikeaa rapautumisympäristöä ja sen happamuusoloja. (Tessier, 1979)

Sulfidisen rikastushiekan hapontuottoa ja neutralointikykyä arvioidaan niin kutsutuilla happoemäslaskuilla (ABA). Rikastushiekan haponmuodostuspotentiaali (AP) voidaan laskea joko rikin kokonaispitoisuudesta tai sulfidisen rikin määrästä, ja

neutraloimispotentiaali (NP) joko laboratoriomäärityksillä tai laskennallisesti aineksen karbonaattisen hiilen tai neutraloivien mineraalien, kuten karbonaattimineraalien, mukaan (Heikkinen & Noras, 2005; Kauppila ym., 2011). Saatuja haponmuodostus- ja neutraloitumisarvoja vertaillaan, jolloin voidaan arvioida happamien valumavesien muodostumista tai niiden muodostamattomuutta. (Heikkinen & Noras, 2005)

Rikastusjätteelle, joka on niin sanottujen staattisten testien perusteella luokiteltu happoa tuottavaksi, voidaan suorittaa tarkempia kineettisiä testejä, joiden perusteella voidaan arvioida jäteaineen tuottamaa hapanta valumaa, sen laatua ja voimakkuutta. Kineettiset testit, kuten kosteuskammiotesti, kolonnitesti ja lysimetrikoe, pyrkivät simuloimaan mahdollisimman tarkasti rikastushiekan luonnollista rapautumisympäristöä. Kineettiset testit kestävät kuukausista jopa vuosiin. (Lapakko, 2002; Heikkinen & Noras, 2005)

4.2.3 Geotekniset määritykset

Rikastushiekan karakterisoinnin geoteknisillä tutkimuksilla selvitetään rikastushiekan sellaisia ominaisuuksia, joilla on esisijaisesti merkitystä jätealueen turvallisessa rakentamisessa, hallinnassa ja jälkihoidon suunnittelussa. Toiseksi tutkimuksilla voidaan selvittää aineksen hyötykäyttömahdollisuuksia (Kauppila ym., 2011). Rikastushiekan hyötykäyttömahdollisuuksia käsiteltiin luvussa 2.2.

Geoteknisissä tutkimuksissa selvitetään mm. rikastushiekan mineraalirakeiden fyysisiä piirteitä, kuten esimerkiksi partikkelikokojakaumaa ja rakeiden laatua. Mineraalirakeiden koko liittyy myös vahvasti mineralogisiin sekä geokemiallisiin tutkimuksiin. Lisäksi voidaan tutkia esimerkiksi aineksen vesipitoisuutta, plastisuutta ja leikkauslujuutta. (Kauppila ym., 2011)

Raekokojakaumaa voidaan selvittää joko seulomalla tai partikkelikokoanalyysointilla. Näytteille, jotka sisältävät karkeaa materiaalia, tulee suorittaa seulonta. Hienoille aineksille, kuten rikastushiekoille, voidaan partikkelikokojakauma selvittää partikkelikokoanalyysointilla.

Partikkelikokoanalyysointori perustuu laserdiffraktioon, missä lasersäde läpäisee näytteessä olevan mineraalirakeen, ja riippuen rakeen koosta, säde siroaa erilaisilla

kulmilla. Sirontakulma on sitä suurempi mitä pienempi mineraalirae on. (Eshel ym., 2004)



Kuva 1. Rautuvaaran rikastushiekka-allas kesäkuun puolivälissä vuonna 2018. Alueelle on kasattu Rautuvaaran hiekkamoreenia altaan peittämistä varten. Kuvassa vasemmalla, valkoisen peräkärryn luona sijaitsee projektin tutkimusalue. (Juutinen, 2018)

5. Rautuvaaran historia, tutkimusalue sekä näytteiden esikäsittely ja tutkimusmenetelmät

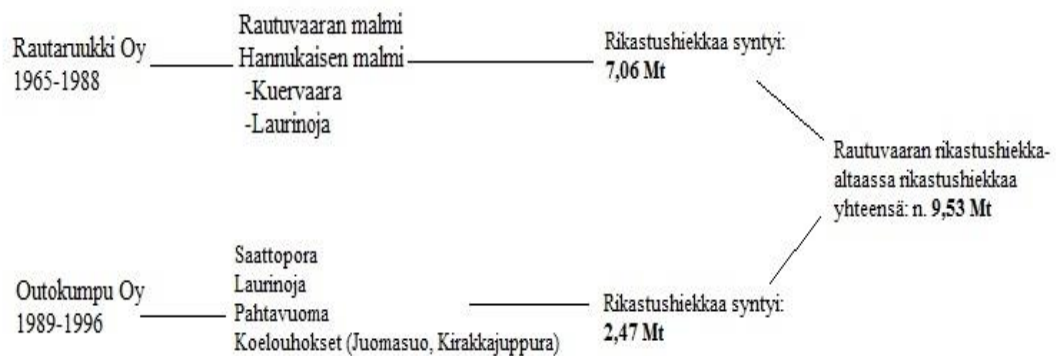
5.1 Rautuvaaran kaivos- ja rikastustoiminnan historia

Länsi-Lapissa, Kolarin kunnassa sijaitsevan Rautuvaaran rautakaivostoiminta alkoi vuonna 1965 ja päättyi vuonna 1988. Tuona aikana Rautuvaarassa tuotettiin rauta- ja kultapitoista kuparirikastetta Rautaruukki Oy:n toimesta. Rikastettava malmi louhittiin Rautuvaaran kahdesta avolouhoksesta ja yhdestä maanalaisesta kaivoksesta. Lisäksi malmia tuotiin Rautuvaaraan rikastettavaksi myös Hannukaisen alueelta Kuervaaran sekä Laurinojan avolouhoksista vuosien 1978 ja 1988 välisenä aikana. Hannukaisen kaivosalue sijaitsee noin 10 kilometriä Rautuvaarasta pohjoiseen. (Räisänen ym., 2015)

Rautaruukin harjoittaman kaivos- ja rikastustoiminnan päätyttyä vuonna 1988, yhtiö vuokrasi rikastamon Outokumpu Oy:lle, joka jatkoi rikastustoimintaa vuoteen 1996 asti. Näiden vuosien välillä Outokumpu rikasti Kolarin Laurinojan sekä Kittilän Saattoporan

ja Pahtavuoman kupari-kultamalmeja. Lisäksi Outokumpu rikasti pienempien koelouhintakaivosten, Juomasuon ja Kirakkajuppuran malmikiviä. (Räisänen ym., 2015)

Rautaruukki Oy:n kaivostoiminnan aikana, malminrikastuksessa Rautuvaaran ja Hannukaisen malmeista syntyi yhteensä 7,06 miljoonaa tonnia (Mt) rikastushiekkaa. Outokumpu Oy:n rikastustoiminnasta syntyi rikastushiekkaa yhteensä 2,47 Mt. Räisänen ym., (2015) mukaan Rautuvaaran rikastushiekka-alueelle on läjitetty kaiken kaikkiaan noin 9,53 Mt rikastushiekkaa (kuva 2). Karakterisointimenettelyssä tulee ottaa huomioon, että rikastushiekka-altaan pintaosa edustaa pääosin Outokumpu Oy:n toiminnan tuloksena syntyneitä hiekkaa, jonka lähtökivi on muu kuin Rautuvaaran malmi.



Kuva 2. Rautuvaaran rikastushiekka-altaan rikastushiekan määrä ja sen alkuperäiset lähteet (Räisänen ym., 2015)

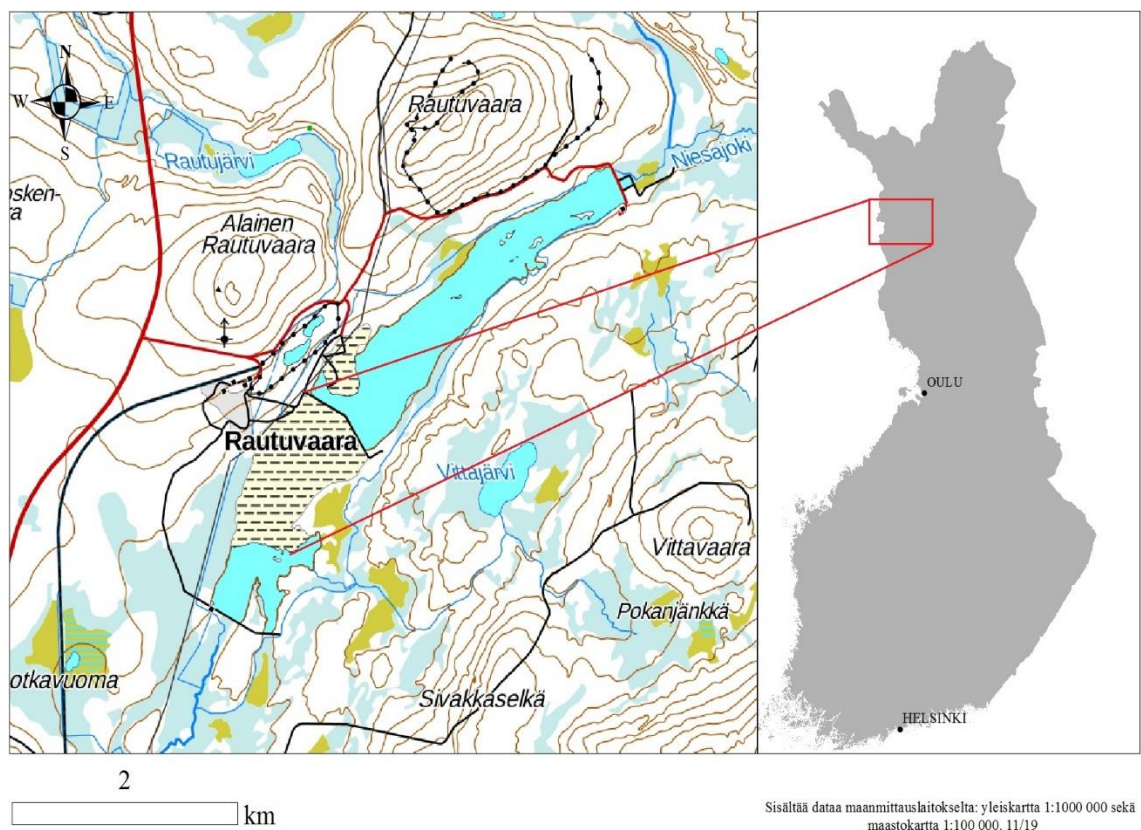
5.2 Rautuvaaran rikastushiekka-allas ja sitä ympäröivän alueen maaperä

Rautuvaaran rikastushiekka on läjitetty koillisesta kaakkoon virtaavan Niesajoen entiseen uomaan ja jokilaaksoon. Niesajoki laitettiin virtaamaan Äkäsjokeen Kylmäojan kautta, ja Niesajoen entinen uoma padottiin. Yläpadolla ja välipadolla rajattu pohjoinen allas toimi kaivostoiminnan aikaisena puhtaan veden varastona, ja välipadon ja alapadon rajaama allas toimi rikastushiekan läjitysalueena ja selkeytysaltaana. Rautuvaaran rikastushiekka-alue on miltei 2 kilometriä pitkä ja noin 500 metriä leveä. Noin 135 hehtaarin kokoisesta rikastushiekan läjitysalueesta noin 30 hehtaaria on veden peitossa. (Räisänen ym., 2015)

Rautuvaaran kaivosalueen ja sen ympäristön maaperä on pääosin hiekkamoreenia. Alava Niesajokilaakso, johon rikastushiekka-alue on sijoitettu, koostuu turpeesta ja soistuneista moreenialueista. Jokilaaksosta löytyy myös sora- ja hiekkakerrostumia. Alueen maapeitteiden paksuudet ovat keskimäärin 20 metriä (Räisänen ym., 2015).

Rautuvaara sijaitsee keskellä jäänjakajavyöhykettä. Sitä luonnehtii useat jäätiköitymisvaiheet sekä viisi erillistä ja toisistaan poikkeavaa moreenikerrostumaa. Kerrostumat ovat pääosin hiekkamoreenia ja niiden välissä on ohuehkoja siltti- ja sorakerrostumia. Moreenikerrostumista saatiin kattavaa tietoa Rautaruukin poistaessa irtomaata malmiesiintymän päältä vuonna 1974. (Hirvas, 1991)

Rautuvaaran kaivosalueen läheisyydestä löytyy muutamia pohjavesialueita, kuten 2. luokan pohjavesialueeksi luokiteltavan Niesajoen pohjavesialueen. 1. luokan pohjavesialueita ei löydy Rautuvaaran kaivosalueelta eikä sen läheisyydestä. (Räisänen ym., 2015)



Kuva 3. Rautuvaaran rikastushiekka-allas Kolarissa, Länsi-Lapissa. (Maanmittauslaitos, 2019)

5.3 Rikastushiekkaa synnyttäneiden malmien ja rikastusprosessien kuvaus

Rautuvaarassa rikastettiin vuosikymmenten ajan useista eri kaivoksista louhittua malmia ja malmin rikastusprosesseista syntynyt rikastushiekka läjitettiin samaan rikastushiekka-altaaseen. Tästä syystä on syytä kuvailla Kolarin rautamalmiesiintymien lisäksi myös Kittilän Saattoporan ja Pahtavuoman malmiesiintymiä sekä Kuusamon Juomasuon ja Keminmaan Kirakkajuppuran koelouhosten malmiesiintymiä. Mainittava on myös edellä mainittujen esiintymien malmien rikastusprosessit karakterisointimenettelyn mukaisesti.

Kolarin malmialueen geologiset piirteet tunnetaan varsin hyvin johtuen kenttätutkimuksista, joita alueella tehtiin useiden eri yhtiöiden toimesta. Kolarin kallioperää luonnehtii monivaiheinen deformaatio ja alueellinen metamorfoosi, jotka ilmenevät koillis-lounassuuntaisista antifirmi- ja synformirakenteista sekä ylityönnöistä. Alueen kallioperän stratigrafisen sarjan alimmaisimpana on kvartsiittia, jonka päällä on amfiboliittia, grafiitti- ja kiisupitoista liusketta, kvartsi-maasälpäliusketta ja karbonaattikiviä sekä diopsidikarsikiveä. (Papunen ym., 1986; Räisänen ym., 2015)

Rautuvaaran muodostuman linssimäiset magnetiittiesiintymät liittyvät karsikiveen, ja ne ovat syntyneet metasomatoosin kautta fluideista eli kuumista liuoksista saostumalla. Rautuvaaran ja Hannukaisen malmiesiintymät ovat IOCG-malmeja eli rautaoksidikupari-kultamalmeja, joiden päämineraalina on magnetiitti. Magnetiitti on tärkeä rautamineraali. Lisäksi malmissa esiintyy sulfidimineraaleja, kuten rikki-, kupari- ja magneettikiisua sekä kultaa. Karsikiven pääsilikaattimineraalit ovat diopsidi, sarvivälke ja skapoliitti. (Papunen ym., 1986; Räisänen ym., 2015)

Kittilän Saattoporan ja Pahtavuoman malmiesiintymät sijaitsevat noin 40 kilometrin päässä Kittilän keskustasta luoteeseen. Pahtavuoman ja Saattoporan monimetalliset malmiesiintymät sijaitsevat Kittilän vihreäkivialueen eteläosassa ja alueen kallioperälle ovat tyypillisiä voimakkaasti deformatuneet vulkaanissedimenttiset kivet. (Papunen ym., 1986)

Saattoporan kulta-kuparimalmiesiintymä liittyy Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeen länsiosan albiittirikkaaseen vyöhykkeeseen. Sen katsotaan syntyneen vuoripoimutuksen

aikana eli sen katsotaan olevan orogeeninen juonimalmi. Malmin isäntäkiviä ovat albiittiliuske, grafiittinen fylliitti, kvartsijuonet ja intermediäärinen vulkaniitti. Yleisimmät sulfidimineraalit esiintymässä ovat magneettikiisu ja kuparikiisu, mutta myös muita sulfideja, kuten pyriittiä, gersdorffiittia ja tellurideja löytyy. (Korkalo ym., 1988; Korvuo, 1997)

Saattoporan malmia rikastettiin Rautuvaarassa vuodesta 1989 vuoteen 1995. Rikastusmenetelminä käytettiin painovoimarikastusta sekä vaahdotusta. (Anttonen, 1988)

Pahtavuoman useat kupari- ja sinkkimalmiot katsotaan syntyneen VMS-tyyppisesti (engl. Volcanic Massive Sulphide) eli kuumien liuosten saostumisen kautta hydrotermisissä olosuhteissa. Malmien isäntäkiviä ovat karsikivi, mustaliuske, metagrauvakka sekä albiittiliuske, jonka katsotaan syntyneen fylliitin muuttumisen tuloksena. Pahtavuoman kuparimalmien päämineraalit ovat kupari- ja magneettikiisu. Lisäksi arseenikiisua ja sinkkivälkettä esiintyy vaihtelevia määriä. Sinkkimalmien päämineraalit ovat magneettikiisu, sinkkivälke ja ilmeniitti sekä pieninä määrinä esiintyvät arseenikiisu, kuparikiisu, lyijyhohde ja rikkikiisu. Lisäksi Pahtavuomassa on epigeneettisiä uraanimalmioita, joiden päämineraalit ovat uraniniitti ja magneettikiisu. (Papunen ym., 1986)

Pahtavuoman malmia alettiin rikastaa Rautuvaarassa vuonna 1993 ja tätä malmia rikastettiin yhdessä Saattoporan malmin kanssa. Rikastuksesta syntynyt rikastushiekka läjitettiin rikastushiekka-altaaseen tehtyyn kaivantoon yhdessä Juomasuon malmin kanssa. (Anttonen, 1993)

Juomasuon kulta-koboltti-malmiesiintymä sijaitsee Kuusamossa, noin 40 kilometriä kaupungista pohjoiseen. Juomasuon esiintymä on osa niin kutsuttua Käylä-Kontinaho-antikliinivyöhykettä, joka taas kuuluu Kuusamon liuskealueeseen. Esiintymä sijaitsee tämän vyöhykkeen koillisosassa. (Vanhanen, 1992)

Juomasuon malmiesiintymän isäntäkiviä ovat serisiittikvartsiitti, ultramafiset vulkaaniset kivet, mafiset juonikivet sekä mafiset vulkaaniset kivet. Malmivyöhyke voidaan jakaa kahteen osaan: kobolttimalmiin ja kulta-kobolttimalmiin. Kobolttimalmityyppejä esiintyy läpikotaisin kvartsi-kloriittikivissä ja kulta-kobolttimalmityyppejä esiintyy pääosin

kvartsi-serisiitti-kloriittikivissä. Esiintymän runsaslukuisimmat sulfidimineraalit ovat magneetikiisu ja pyriitti. Koboltti esiintyy suurimmaksi osaksi kobolttihohdeena. Koboltti esiintyy myös kobolttipentlandiittina. (Vanhanen, 2001)

Juomasuon malmia rikastettiin Rautuvaarassa vuonna 1992. Malmista suurin osa rikastettiin vaahdottamalla ja pieni osa painovoimaan perustuvalla tärypöytärikastuksella. Rikastuksesta syntynyt rikastushiekka läjitettiin Rautuvaaran rikastushiekka-altaaseen tehtyyn kaivantoon. (Anttonen, 1993)

Kirakkajupuran platina-palladium-esiintymä sijaitsee Tornio-Näräkänvaara intruusiovyöhykkeeseen kuuluvan Penikoiden pohjoisosassa, noin 40 kilometriä Kemien keskustasta koilliseen. Esiintymän isäntäkiviä ovat metapyrokseeniitti ja metagabro sekä syvemmällä oleva metaperidotiitti. (Lahtinen, 1987)

Taulukko 1. Yhteenvedo Rautuvaaran rikastushiekka-altaaseen Outokumpu Oy:n aikana läjitettyjen rikastushiekkojen malmityypeistä, läjitysvuosista sekä mineraaleista. (GTK, raportit)

<i>Esiintymä</i>	<i>Saattopora</i>	<i>Laurinoja</i>	<i>Pahtavuoma</i>	<i>Juomasuo</i>
<i>Malmityyppi</i>	<i>Orogeeninen</i>	<i>IOCG</i>	<i>VMS</i>	<i>Orogeeninen</i>
<i>Läjitysvuosi/ vuodet</i>	<i>1989-1995</i>	<i>1989-1990</i>	<i>1992-(1993)</i>	<i>1993</i>
<i>Läjitysmäärä (tonnia)</i>	<i>2 050 816</i>	<i>137 209</i>	<i>263 194</i>	<i>16 653</i>
<i>Mineraalit</i>	Gersdorffiitti Grafiitti Kulta Kuparikiisu Mag.kiisu Nikkeliini Pentlandiitti Pyriitti Rutiili Telluriidit Tucekite Uraniitti Vismuttihohde <i>Albiitti</i> <i>Ankeriitti</i> <i>Dolomiitti</i> <i>Kvartsi</i> <i>Turmaliini</i>	Kulta Kuparikiisu Mag.kiisu Magneetiitti Molybdeenihohde Pyriitti Telluridit <i>Albiitti</i> <i>Andradiitti</i> <i>Biotiitti</i> <i>Diopsidi</i> <i>Epidootti</i> <i>Kalsiitti</i> <i>Kvartsi</i> <i>Mikrokliini</i> <i>Sarvivälke</i> <i>Skapoliitti</i> <i>Titaniitti</i>	Arg.pentlandiitti Arseenikiisu Gersdorffiitti Grafiitti Ilmeniitti Kob.pentlandiitti Kobolttihohde Kulta Kuparikiisu Lyijyhohde Kulta Kuparikiisu Lyijyhohde Mackinawite Mag.kiisu Magneetiitti Markasiitti Molybdeenihohde Nikkeliini Pyriitti Sinkkivälke Tucekite	Ilmeniitti Kob.pentlandiitti Kobolttihohde Kulta Kuparikiisu Linnaeite Lyijyhohde Mag.kiisu Magneetiitti Molybdeenihohde Pentlandiitti Pyriitti REE Rutiili Telluridit Telluurivismuttihohde Uraniitti <i>Albiitti</i> <i>Amfiboli</i>

<i>Uraniitti</i>	<i>Biotiitti</i>
<i>Ankeriitti</i>	<i>Dolomiitti</i>
<i>Kalsiitti</i>	<i>Flogopiitti</i>
<i>Kvarsti</i>	<i>Kloriitti</i>
	<i>Kvartsi</i>
	<i>Scheeliitti</i>
	<i>Serisiitti</i>
	<i>Talkki</i>
	<i>Titaniitti</i>

5.4 Näytteiden esikäsittely ja tutkimusmenetelmät

Rikastushiekka- ja moreeninäytteet otettiin kesäkuun puolessavälissä vuonna 2018 Rautuvaaran rikastushiekka-altaasta Biopeitto-projektin tutkimusalueelta. Näytesarja koostuu neljästä rikastushiekkakerroksesta otetusta rikastushiekkänäytteestä sekä rikastushiekka-altaan peittomateriaalina käytetystä hiekkamoreenista. Rikastushiekkakerrokset erosivat väreiltään toisistaan: vaalean harmaa pintakerros (1.RHK), oranssinruskea 2. kerros (2.RHK), sinisen harmaa 3. kerros (3.RHK) ja alin musta 4. kerros (4.RHK). Osa kerroksista, varsinkin 2. ja 3. kerros, oli varsin epämääräisiä ja vaihtelevia (kuva 4). Näytteenottohorisontti tutkimuskaivannossa oli noin 1,2 metriä. Näytteenotto tapahtui muovilapiolla kontaminaation välttämiseksi. Moreeninäyte otettiin tutkimusalueen vieressä olevasta kasasta, johon peittoainesta oli käärrätty lähialueelta rikastushiekka-altaan peittämisen aloittamista varten.



Kuva 4. Näytteenottohorisontti. Oranssi 2. kerros ja sinisen harmaa 3. kerros tässä kohtaa allasta epämääräisiä toisiinsa nähden. (Juutinen, 2018)

Näytteet kuivattiin Oulun yliopiston Oulu Mining Schoolin (OMS) tiloissa. Näytteet levitettiin uunipelleille voipaperin päälle, ja kuivattiin uuneissa 40-45 asteen lämpötilassa. Kuivauksessa rikastushiekkänäytteet alkoivat paakkuuntua johtuen rikastushiekan pienestä raekoosta. Paakkuja murennettiin varovasti kuivauksen aikana. Paakkuuntuminen näkyi tutkimuksen aikana näytteissä suurempina rakeina eli agglomeraatteina. Näytteiden käsittelyssä käytettiin muovisia kauhoja ja lusikoita. Kuivatuista näytteistä otettiin talteen bulkkinäytteet.

Kuivatuksen jälkeen näytteet kahtioitiin pyörivällä osituslaitteella (kuva 5) kahteen osaan mineralogiseen ja kemialliseen tutkimukseen. Ositus tehtiin näytteiden tasalaatuisuuden varmistamiseksi. Kemiallista tutkimusta varten näytesarjan kahtioitu toinen puoli seulottiin eri fraktioihin muoviseuloilla. Rikastushiekkänäytteille fraktiokoot olivat: >1, 0.5, 0.250, 0.125 ja 0.063 ja <0.063mm. Moreenille fraktiokoot olivat: >2, 0.5, 0.25, 0.125, 0,063 ja <0.063mm.



Kuva 5. 3. rikastushiekkakerroksesta otetun näytteen kahtiointia. (Juutinen, 2018)

tehtiin preparaattit FE-SEM-mineraalitutkimukseen. Ko. pintahienappeja valmistettiin 20 kappaletta: 10 MJ nappia ja 10 LST nappia. 20:stä napista puolet ovat pienemmällä raekoolla ja puolet isommalla (taulukko 2). Suuremman raekoon nappeja tutkittiin 300 kertaisella suurennoksella, pienemmän raekoon nappeja 600 kertaisella.

Samoja näytenappeja tutkittiin myös röntgenmikroanalysaattorilla. Sekä FE-SEM- että EPMA-analyysit suoritettiin Oulun yliopistolla sijaitsevassa Materiaalianalyysikeskuksessa (MAKE). Bulkkinäytteille suoritettiin myös XRD-analyysit, joista saadut tulokset olivat apuna mineraaliluokituksessa, mutta niitä ei sen suuremmin huomioida tässä työssä. XRD-analyysien tulokset ovat liitteenä.

Toinen puoli näytesarjasta, jolla suoritettiin mineralogiset analyysit, esirikastettiin Knelson-rikastuslaitteella Kemian ammattikorkeakoululla. Esirikastuksen tarkoituksena oli saada raskaat mineraalit erilleen kevyemmistä mineraaleista. Rikastettujen raskaiden mineraalien lisäksi talteen otettiin kevytaines ja vesinäytteitä. Raskaat mineraalit kuivatettiin Oulun yliopistolla. Raskasmineraaleille suoritettiin raskasnesteseparointi raskaan ja keskiraskaan osan erottamiseksi toisistaan. Ensimmäinen separointi suoritettiin metyleenijodidilla (MJ). Jäljelle jäänyt aine separoitiin LST-raskasnesteellä (litiumheteropolytungstaatti).

Raskasnesteseparoinneista jääneistä raskas- ja keskiraskasmineraaleista

Taulukko 2. Näytelistä FE-SEM-analyysiin menneistä pintahienapeista.

1.RHK MJ 0,5 - 0,063	4.RHK MJ 0,5 - 0,063
1.RHK MJ 0,063	4.RHK MJ 0,063
1.RHK LST 0,5 - 0,063	4.RHK LST 0,5 - 0,063
1.RHK LST 0,063	4.RHK LST 0,063
2.RHK MJ 0,5 - 0,063	Moreeni MJ 0,5 - 0,125
2.RHK MJ 0,063	Moreeni MJ 0,125 - <0,063
2.RHK LST 0,5 - 0,063	Moreeni LST 0,5 - 0,125
2.RHK LST 0,063	Moreeni LST 0,125 - <0,063
3.RHK MJ 0,5 - 0,063	
3.RHK MJ 0,063	
3.RHK LST 0,5 - 0,063	
3.RHK LST 0,063	

Toiselle ositetulle puolelle näytteistä suoritettiin kemiallisia tutkimuksia. Näytteiden kokonaisalkuainepitoisuuksien tutkimiseen käytettiin kannettavaa XRF-analysaattoria ja tulokset varmistettiin MAKE:n WD-XRF-analysaattorilla. Kannettavalla XRF-analysaattorilla analysoitiin sekä bulkinäytteet että muoviseuloilla seulotut kolme eri kokofraktiota: 0.25-0.125, 0.125-0.063 ja <0.063mm. Analysointi bulkinäytteille tehtiin kolmella eri ohjelmalla: mining-, soil- ja REE-ohjelmilla. Eri fraktiot analysoitiin mining-ohjelmalla. Jokainen näyte mitattiin XRF:llä kolme kertaa ja saaduista tuloksista muodostettiin keskiarvo.

XRF-tulosten perusteella tutkittiin tarkemmin tiettyjä alkuainepitoisuuksia sekä tiettyjen metallien esiintymistä tietyissä fraktioissa atomiabsorptiospektrometrillä sekvenssiuutto menetelmällä. Uutteina käytettiin hydroksyyliammoniumkloridia [NH₃OHCl] ja kuningasvettä [HNO₃ + 3HCl]. Kokonaisliuotusta ei voitu toteuttaa OMS:lla, koska tutkimuksessa käytetyt vetokaapit eivät soveltuneet ko. menetelmälle. Tarkempien alkuainepitoisuustutkimusten kohteeksi valittiin XRF-tulosten perusteella arseeni (As), kupari (Cu), rauta (Fe), mangaani (Mn) ja nikkeli (Ni). AAS-analyysi suoritettiin kolmelle eri kokofraktioluokalle ja bulkinäytteille.

Rikastushiekkänäytteille sekä moreenin hienoainekselle suoritettiin partikkelikokoanalyysi OMS:n tiloissa Cilas 1190-partikkelikokoanalysaattorilla. Analyysi rikastushiekoille tehtiin vertailun vuoksi kolmella eri näytteiden esikäsittelymenetelmällä: täysin kuivana ilman agglomeraatteja, mutamaisena lietteenä agglomeraatit hajotettuina sekä nestemäisenä lietteenä agglomeraatit

dispergointiaineessa. Analyysejä varten bulkinäytteet jaettiin kolmeen osaan kaukalomaisella kouruosittajalla. Näytteistä, joille tehtiin kuiva-analyysi, poistettiin seulomalla agglomeraatit. Mutamaista menetelmää varten näytteisiin lisättiin hieman vettä, jolloin näytettä voitiin sekoittaa siten, että agglomeraatit hajoaa. Kolmatta menetelmää varten näytteisiin lisättiin dispergointiaineena natriumpyrofosfaattia agglomeraattien hajottamiseksi, ja sen annettiin vaikuttaa näyttemateriaaleihin yön yli.

Kuivassa ja mutamaisessa muodossa ollutta näytettä laitettiin partikkelikokoanalysointilaatikon muovilusikan kahvaosan kärjellä, ja nestemäistä näytettä laitettiin pipetillä. Kuivat ja mutamaiset näytteet antoivat analyysissä toistettavia tuloksia. Tässä työssä on esitelty mutamaisen menetelmän tulokset. Analyysimittauksia tehtiin kullekin näytteelle kaksi ja niistä muodostettiin keskiarvo.

Moreenin hienoaineksen partikkelikokoanalyysi suoritettiin siten, että moreenista seulottiin yli 0,5 mm aines pois ja sekoitettiin hienoaines veteen. Näytteelle tehtiin neljä mittausta ja näiden tuloksista muodostettiin keskiarvo.

6. Tulokset

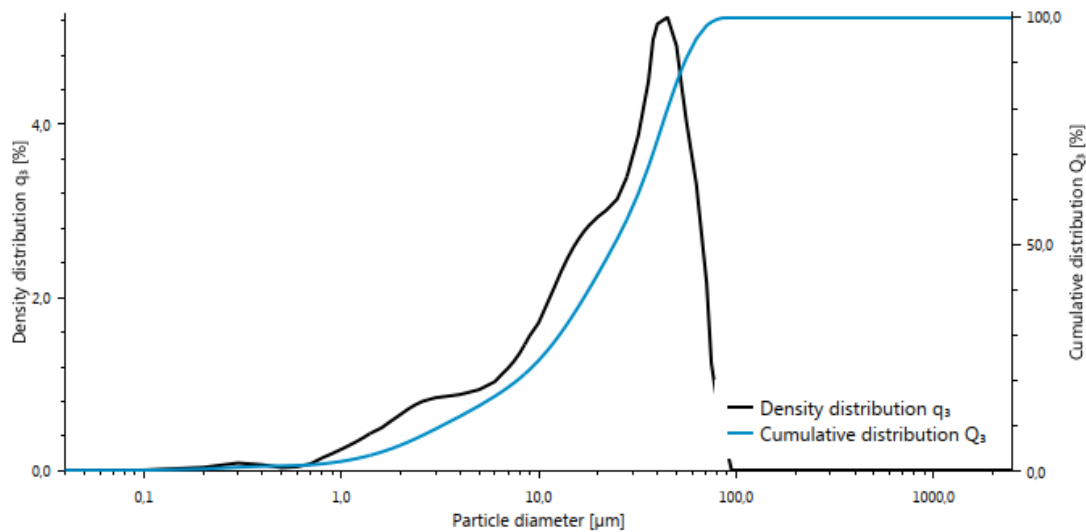
6.1 Partikkelikoko

Taulukko 3. Partikkelikokoanalyysin tulokset kahden mittauksen keskiarvona.

Partikkelikoko, μm				
	1. RHK	2. RHK	3. RHK	4. RHK
D80 %	45	98	43	33
D50 %	24	58	20	14
D20 %	8	18	7	5

1. rikastushiekkakerroksen eli pintakerroksen D80% raekoko on 45 mikronia (μm) eli 0,045 millimetriä. Mittauksen partikkelikojakauman kuvaajan käyrä on yksihuippuinen ja ohuehko (kuva 6).

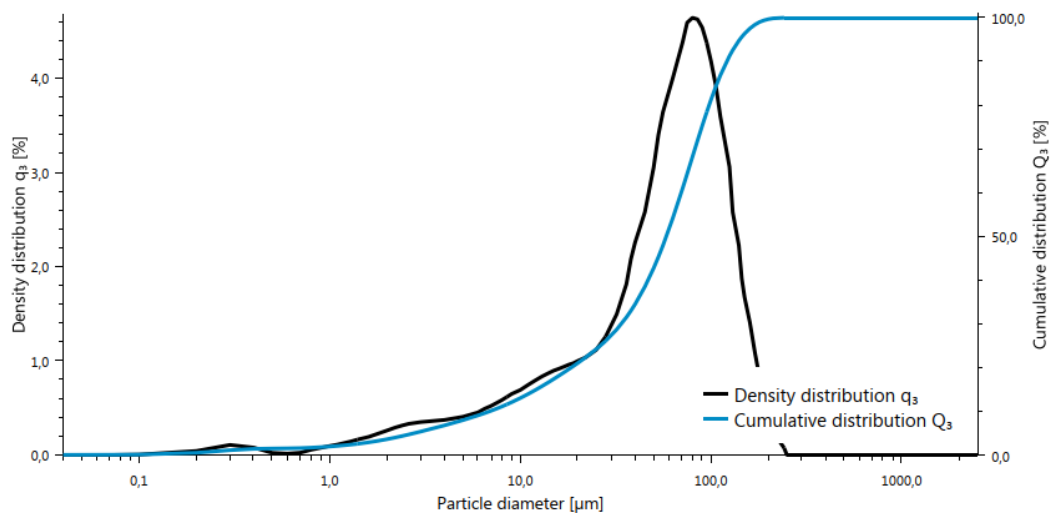
Distribution by volume



Kuva 6. 1. rikastushiekkakerroksen partikkelikojakauma.

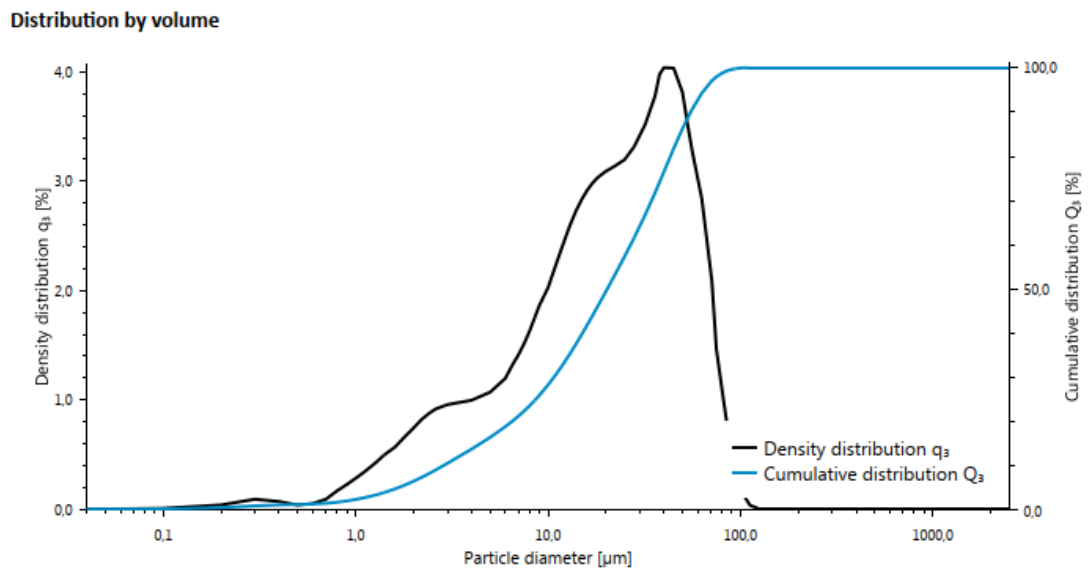
2. rikastushiekkakerroksen eli oranssin välikerroksen D80% raekoko on 98 μm eli 0,098 mm. Partikkelijakauman käyrä on niin ikään yksihiippuinen ja ohut, mutta aavistuksen jyrkempi (kuva 7).

Distribution by volume



Kuva 7. 2. rikastushiekkakerroksen partikkelikojakauma.

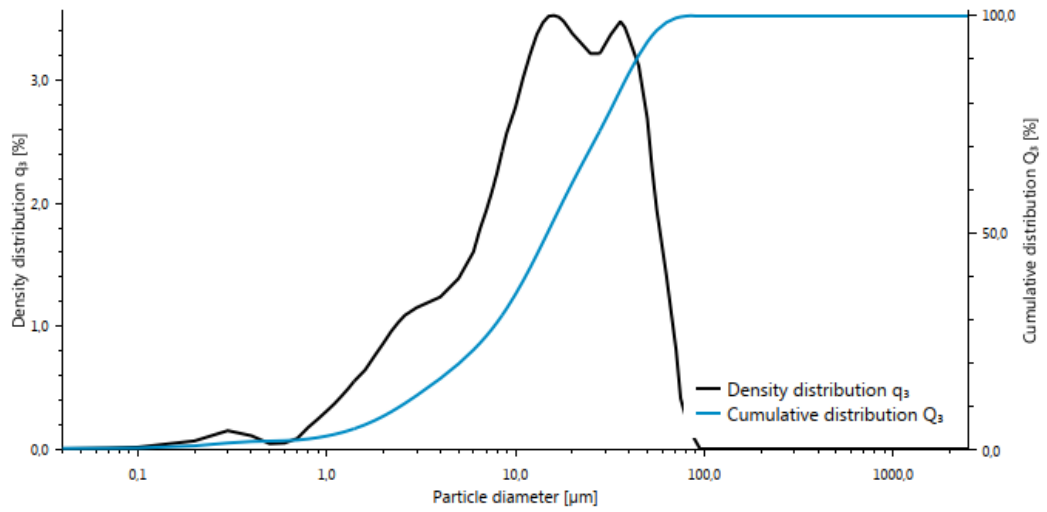
3. rikastushiekkakerroksen eli sinisen harmaan välikerroksen D80% raekoko on 43 μm eli 0,043 mm, ja sen partikkelikokojakauman käyrä muistuttaa pintakerroksen käyrää, mutta on aavistuksen loivempi (kuva 8).



Kuva 8. 3. rikastushiekkakerroksen partikkelikokojakauma.

4. rikastushiekkakerroksen eli pohjakerroksen D80% raekoko on 33 μm eli 0,033 mm ja sen partikkelikokojakauman käyrä on muista poiketen kaksihuippuinen ja leveämpi (kuva 9).

Distribution by volume

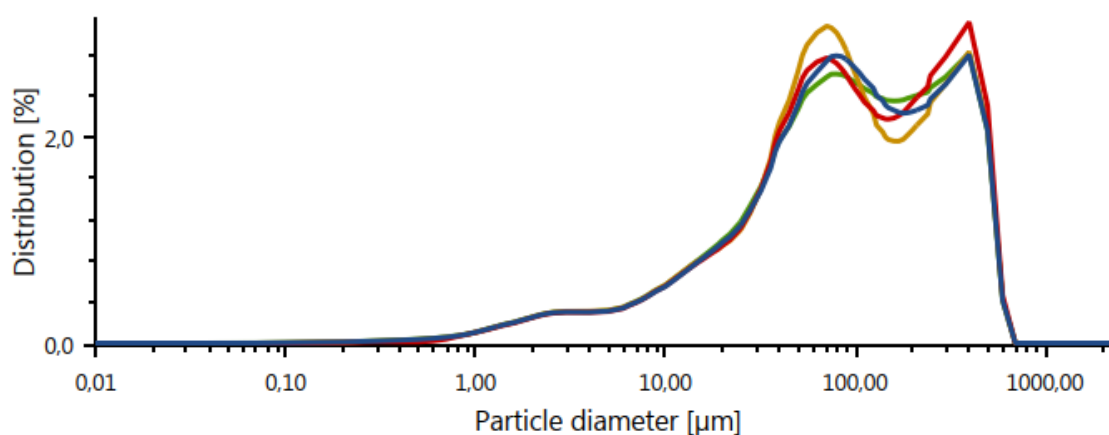


Kuva 9. 4. rikastushiikkakerroksen partikkelikojakauma.

Taulukko 4. Peittomoreenin hienoaineksen partikkelikoko.

Partikkelikoko, μm	Moreenin hienoaines
Keskikoko	152
D90 %	358
D50 %	87
D10 %	11

Moreenin hienoaineksen keskimääräinen raekoko 152 μm ja sen partikkelikojakauman käyrä on kaksihuippuinen.



Kuva 10. Peittomoreenin hienoaineksen partikkelikokojakauma neljällä mittauksella.

6.2 XRF - Geokemia

XRF-analyysit suoritettiin sekä käsikäyttöisellä p-XRF -analysaattorilla että laboratorioanalysaattorilla. Tässä työssä esitellään laboratorio-XRF-analyysin tulokset, sillä kannettavan XRF-analysaattorin tulokset eivät juuri poikenneet varmistetuista laboratorio-XRF:n tuloksista. Toisekseen laboratorio-XRF:n tulokset ovat matriisikorjattuja, joten ne ovat luotettavimpia.

Seuraavaksi on esitetty XRF-analyysin merkittävimmät ja tutkimukselle tärkeimmät tulokset. Kaikki tulokset löytyvät liitteistä. Osa tuloksista on ilmoitettu prosentteina, osa taas miljoonasosina eli ppm:nä.

Taulukko 5. XRF-analyysin tulokset rikastushiekkakerrosten ja peittomoreenin bulkinäytteistä.

Näyte	Na ₂ O (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	S (%)	Cl (PPM)	K ₂ O (%)	CaO (%)	TiO ₂ (%)
Peittomoreeni	3,99	1,34	14,19	69,99	0	0	2,96	2,38	0,49
1. RHK	4,29	5,69	10,74	43,64	2,16	0	0,48	7,93	0,79
2. RHK	4,95	3,63	10,96	45,88	2,83	0	0,55	6,21	0,68
3. RHK	4,61	6,68	11,22	43,8	2,92	0	0,76	8,15	1
4. RHK	1,29	4,64	12,43	53,26	1,5	1196	2,69	5,73	1,23

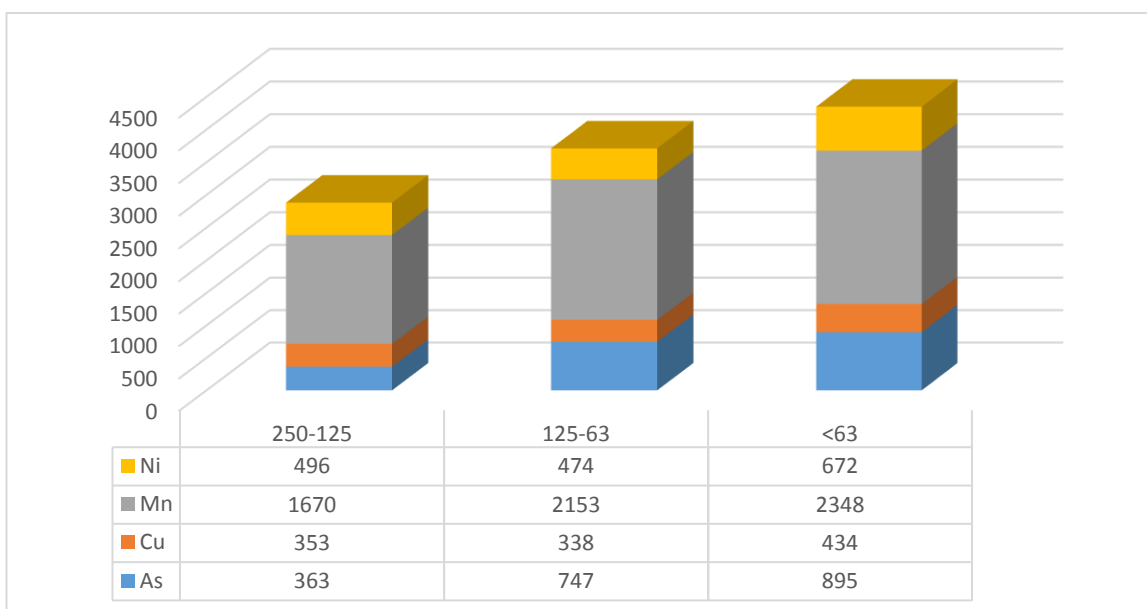
Näyte	MnO (%)	FeO (%)	Ni (PPM)	Cu (PPM)	Zn (PPM)	As (PPM)	Rb (PPM)	Sr (PPM)	Zr (PPM)
Peittomoreeni	0,05	3,49	30	0	9	0	79	343	245
1. RHK	0,14	8,99	589	311	18	546	12	38	79

2. RHK	0,1	10,15	544	261	0	149	14	22	78
3. RHK	0,15	10,04	352	231	54	107	20	34	74
4. RHK	0,37	12,92	242	3405	1317	1330	68	80	116

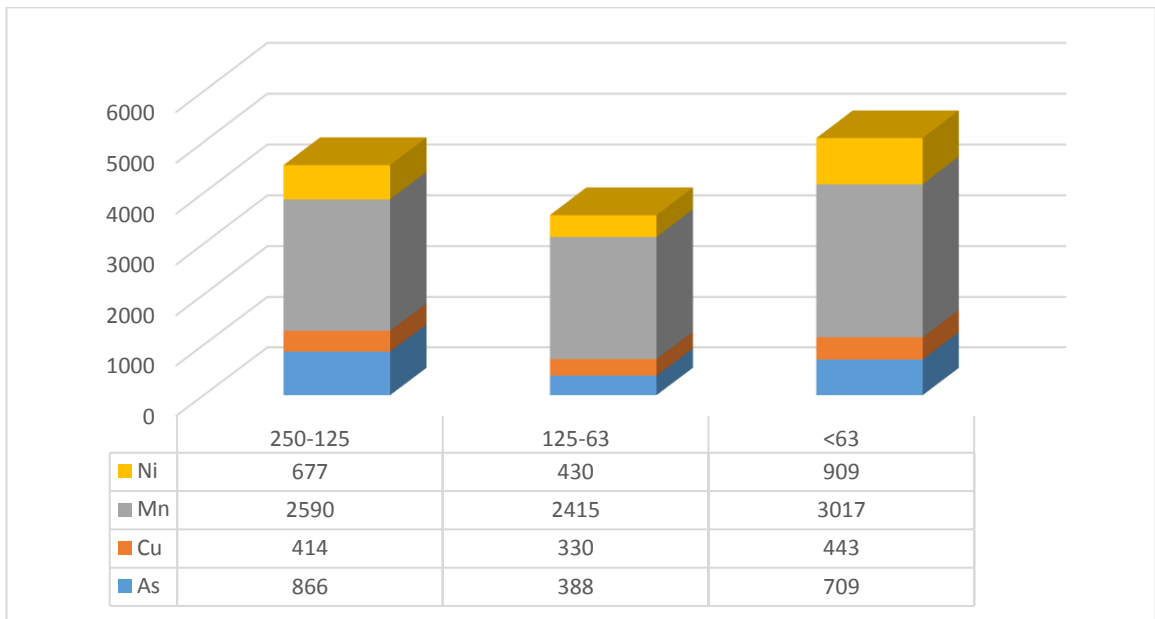
Näyte	Y (PPM)	Ba (PPM)	La (PPM)	Ce (PPM)	Pb (PPM)	Bi (PPM)	U (PPM)
Peittomoreeni	15	846	25	41	10	0	2
1. RHK	27	90	43	144	10	9	18
2. RHK	24	83	45	81	8	5	14
3. RHK	32	142	36	64	9	4	7
4. RHK	26	2285	26	201	107	27	5

6.3 AAS - Geokemia

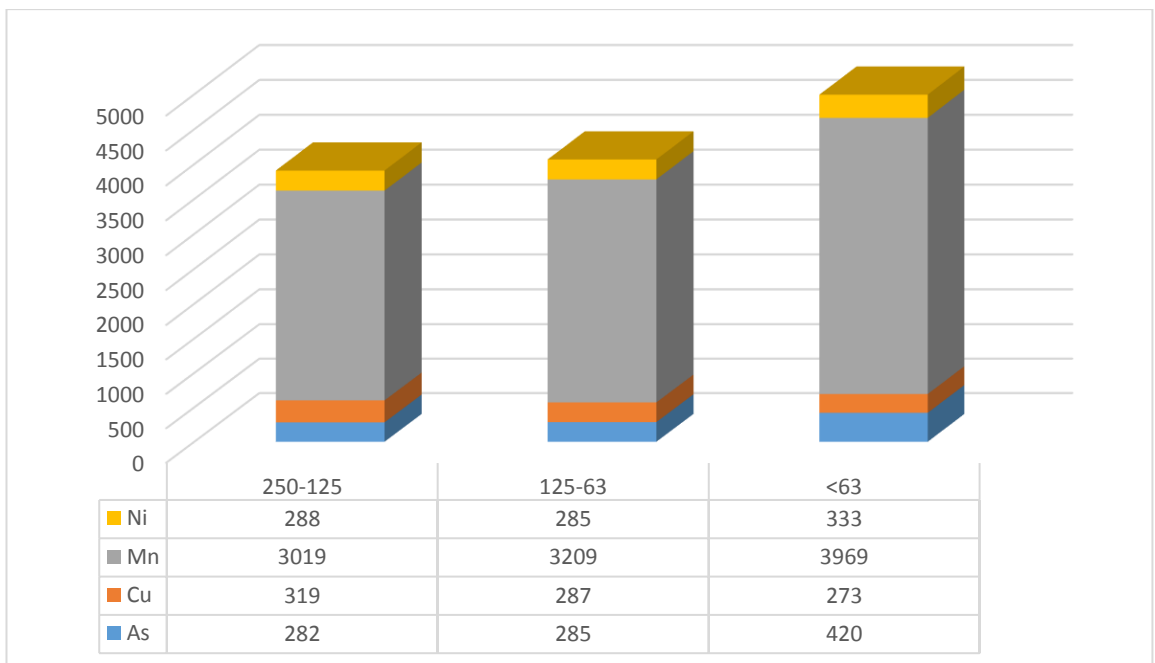
AAS-analyysien kohteiksi valittiin XRF-tulosten perusteella arseeni, kupari, mangaani, nikkeli sekä rauta, ja analyysit suoritettiin kolmelle eri kokofraktiolle: 250-125, 125-64 ja <63 µm. AAS-analyyseissä uutteina käytettiin hydroksyyliammoniumkloridia sekä kuningasvettä. Seuraavaksi on esitetty kunkin näytteen AAS-tulokset, joissa on yhdistettynä sekä hydroksyyliammoniumkloridi- että kuningasvesiliuotukset.



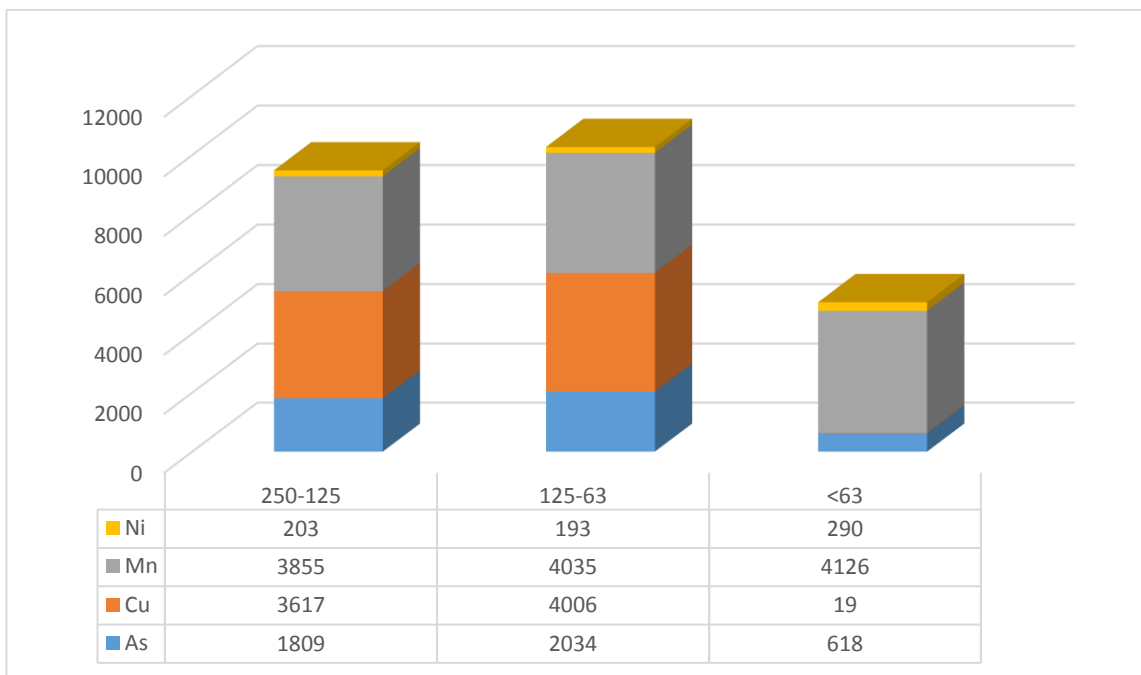
Kuva 11. Ensimmäisen rikastushiekkakerroksen Ni-Mn-Cu-As-pitoisuudet (ppm) fraktioittain.



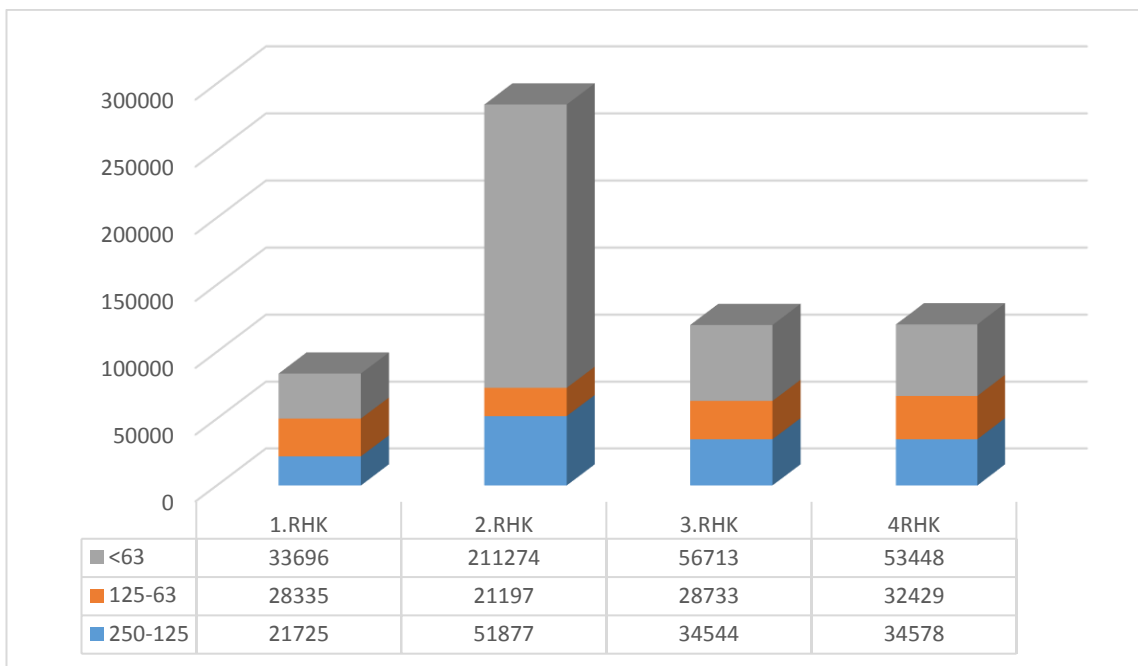
Kuva 12. Toisen rikastushiikkakerroksen Ni-Mn-Cu-As-pitoisuudet (ppm) fraktioittain.



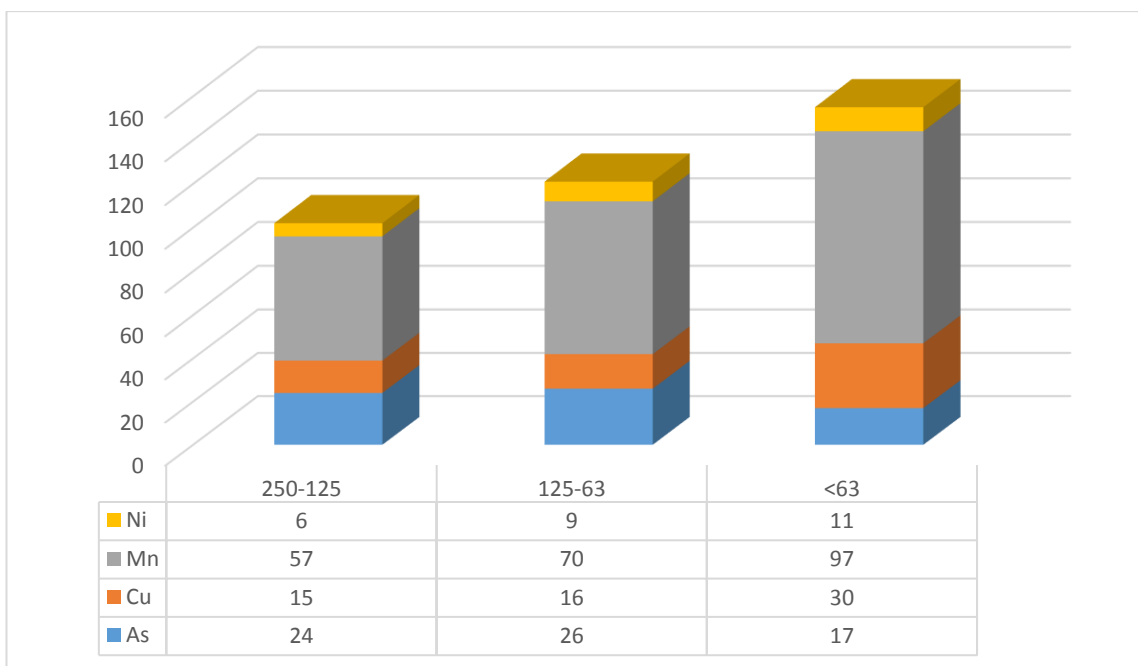
Kuva 13. Kolmannen rikastushiikkakerroksen Ni-Mn-Cu-As-pitoisuudet (ppm) fraktioittain.



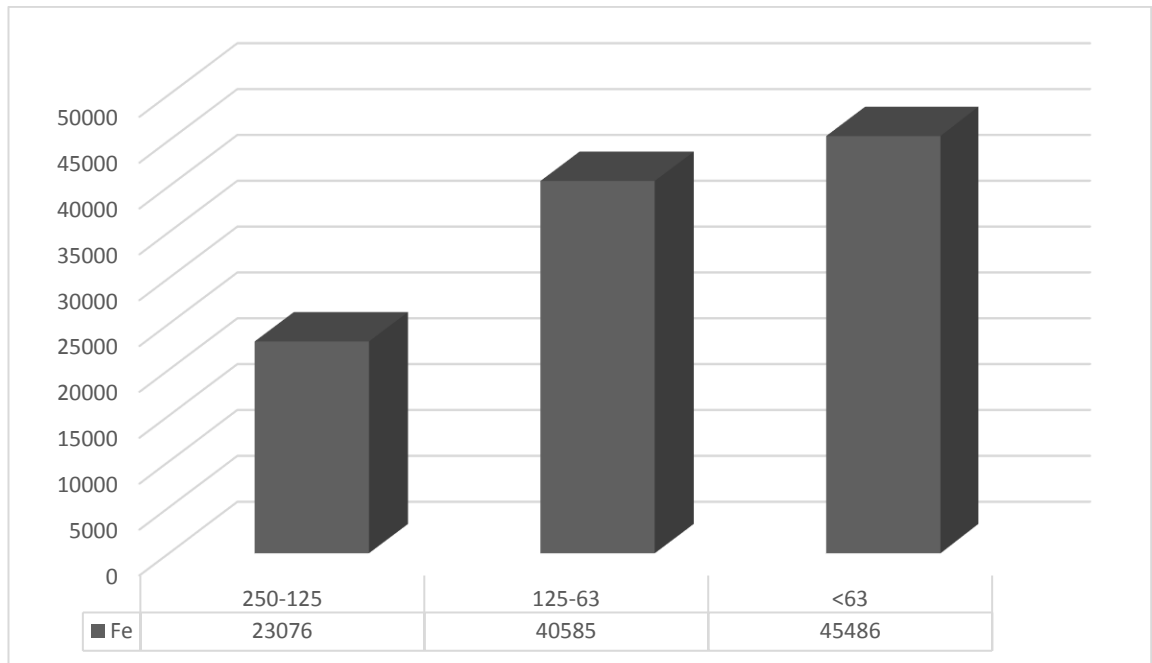
Kuva 14. Neljännän rikastushiikkakerroksen Ni-Mn-Cu-As-pitoisuudet (ppm) fraktioittain.



Kuva 15. Kunkin rikastushiekkakerroksen rautapitoisuudet (ppm) fraktioittain.



Kuva 16. Peittomoreenin Ni-Mn-Cu-As-pitoisuudet (ppm) fraktioittain.



Kuva 17. Peittomoreenin rautapitoisuudet (ppm) fraktioittain.

Taulukko 6. Rikastushiekkänäytteiden AAS-tulokset uuttoreagenssien tulokset yhteenlaskettuna.

Näytteen koodi	As	Cu	Fe	Mn	Ni
RHK 1 0.250-0.125					
0,04M NH ₂ OH*HCl	166	4	8348	205	150
Kuningasvesi	197	349	13377	1465	346
yht.	363	353	21725	1670	496
RHK 1 0.125-0.063					
0,04M NH ₂ OH*HCl	202	2	17936	799	274
Kuningasvesi	545	336	10399	1354	200
yht	747	338	28335	2153	474
RHK1 <0,063					
0,04M NH ₂ OH*HCl	163	1	19894	782	428
Kuningasvesi	732	433	13802	1566	244
yht.	895	434	33696	2348	672
RHK2 0.250-0.125					
0,04M NH ₂ OH*HCl	132	9	16104	651	283
Kuningasvesi	734	405	35773	1939	394
yht	866	414	51877	2590	677
RHK 2 0.125-0,063					
0,04M NH ₂ OH*HCl	206	1	9380	394	108
Kuningasvesi	182	329	11817	2021	322
yht.	388	330	21197	2415	430
RHK 2 <0,063					
0,04M NH ₂ OH*HCl	89	2	118001	692	192
Kuningasvesi	620	441	93273	2325	717
yht.	709	443	211274	3017	909
RHK 3 0.250-0.125					

0,04M NH ₂ OH*HCl	95	1	26691	777	122
Kuningasvesi	187	318	7853	2242	166
yht.	282	319	34544	3019	288
RHK3 0.125-0,063					
0,04M NH ₂ OH*HCl	152	1	21207	799	95
Kuningasvesi	133	286	7526	2410	190
yht.	285	287	28733	3209	285
RHK 3 <0,063					
0,04M NH ₂ OH*HCl	157	1	23417	855	10
Kuningasvesi	263	272	33296	3114	323
yht.	420	273	56713	3969	333
RHK 4 0.250-0.125					
0,04M NH ₂ OH*HCl	238	8	13484	788	80
Kuningasvesi	1571	3609	21094	3067	123
yht.	1809	3617	34578	3855	203
RHK 4 0.125-0,063					
0,04M NH ₂ OH*HCl	356	2	12917	806	60
Kuningasvesi	1678	4004	19512	3229	133
yht.	2034	4006	32429	4035	193
RHK 4 <0,063					
0,04M NH ₂ OH*HCl	309	8	10583	870	70
Kuningasvesi	309	11	42865	3256	220
yht.	618	19	53448	4126	290

6.4 FE-SEM - Mineralogia

Raskas- ja keskiraskasmineraaleista tehdyille 20 napille tehtiin analyysiskannaukset FE-SEM:lla ja tavoitteena oli skannata n. 5000 mineraaliraketta kustakin näytteestä. Luokittelemattomaan osaan jäi pääosin huonoja analyysisiä (kaksi tai useampia eri rakeita samassa mittauksessa) tai monifaasisia rakeita. Luokittelematon osa sisältää myös mahdolliset sekundäärimineraalit, joiden alkuainepitoisuudet eivät vastaa primäärimineraaleille annettuja alkuainekriteerejä.

Mineraaliluokitukset tehtiin INCA-ohjelmalla lähdekirjallisuutta apuna käyttäen. Lähdekirjallisuutena toimi lähinnä GTK:n raportit, joista voitiin selvittää alkuperäisten malmilähteiden malmi- ja harmemineraalit ja näin verrata FE-SEM-tuloksiin. Tulokset on esitetty prosenttiosuuksina, ellei toisin ole ilmoitettu. Rikastushiekköjen raskasmineraali- ja keskiraskasmineraaliosuudet on ilmoitettu erillisissä taulukoissa, peittomoreanin mineralogia on esitetty raskaat ja keskiraskaat mineraalit yhdistettyinä.

Taulukko 7. Rikastushiekkakerrosten raskasmineraalit fraktioluokittain prosenttiosuuksina.

Näyte	1. RHK		2. RHK		3. RHK		4. RHK	
	0,5-0,063	<0,063	0,5-0,063	<0,063	0,5-0,063	<0,063	0,5-0,063	<0,063
Yhteensä kpl/%	8760/100%	4816/100%	5016/100%	5040/100%	5077/100%	5290/100%	5205/100%	5121/100%
Luokittelematon kpl/%	284/3,2%	173/3,6%	671/13,4%	311/6,2%	227/4,5%	55/1,0%	100/1,9%	79/1,5%
Muut silikaatit	41.7	40.7	20.0	22.2	18.8	62.6	70.4	73.7
Fe-Dolomiitti	49.0	25.7	16.6	10.5	28.7	26.9	8.6	3.5
Kalsiitti	0.6	0.7	0.1	0.2	0.6	1.9	0.4	3.7
Muut rautaoksidit	2.3	5.0	11.1	17.1	2.4	0.6	1.7	0.2
Rutiili	0.3	1.1	4.6	1.8	2.1	0.9	0.4	0.1
Ilmeniitti		0.1	0.7	0.4	0.4	0.1	0.5	0.9
Uraniniitti			1 kpl.		1 kpl.			1 kpl.
Apatiitti	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2		0.1
Monatsiitti	0.1	0.2	0.8	0.9	0.2	0.1	2 kpl.	1 kpl.
Ksenotiimi	2 kpl.	1 kpl.		0.1	1 kpl.			
Pyriitti	1.7	10.0	31.1	38.2	5.1	0.7	3.0	1.3
Magneetikiisu	0.8	11.9	0.8	1.9	36.8	4.8	7.8	6.4
Kuparikiisu	0.1		0.4		0.1	0.1	1.7	3.0
Arseenikiisu		0.2		0.2		0.1	0.8	4.0
Sinkkivälke							2.5	0.9
Lyijyhohde								2 kpl.
Kobolttihohde		0.4	0.1	0.3		0.1		0.1
<i>Baryytti</i>					0.1		0.1	0.2
<i>Kulta</i>						1 kpl.	1 kpl.	
<i>Argentopentlandiitti</i>							1 kpl.	

Taulukko 8. Rikastushiekkakerrosten keskiraskasmineraalit fraktioluokittain prosenttiosuuksina.

Näyte	1. RHK		2. RHK		3. RHK		4. RHK	
	0,5-0,063	<0,063	0,5-0,063	<0,063	0,5-0,063	<0,063	0,5-0,063	<0,063
Yhteensä kpl/%	5072/100%	5069/100%	5069/100%	5405/100%	5454/100%	5668/100%	5112/100%	5509/100%
Luokittelematon kpl/%	167/3.3%	259/5.1%	205/4.0%	330/6.1%	55/1.0%	136/2.4%	145/2.8%	188/3.4
Muut silikaatit	15.7	40.3	43.6	30.9	27.2	19.4	83.6	23.5
Fe-Dolomiitti	62.7	21.3	40.4	25.4	67.3	21.5	9.4	0.7
Kalsiitti	0.2	0.5	0.2	0.3	0.6	0.4	1.5	0.2
Muut rautaoksidit	2.8	2.6	8.6	22.7	0.4	1.5	0.4	4.5
Rutiili	2.6	1.6	0.2	0.8	0.2	2.0		0.1

Ilmeniitti	0.3	0.2		0.1	0.1	0.6	0.3	1.1
Uraniniitti						1 kpl.		
Apatiitti	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	0.9	0.1	
Monatsiitti	0.4	0.7		0.4	0.1	0.4	1 kpl.	0.1
Ksenotiimi	2 kpl.	0.1		1 kpl.				
Pyriitti	6.3	17.4	2.4	11.8	0.3	2.7	0.4	8.0
Magneetikaisu	5.0	9.1	0.2	1.0	2.6	47.6	1.0	49.5
Kuparikiisu	0.5					0.1	0.4	2.5
Arsenikiisu		0.3				0.3	0.1	5.4
Sinkkivälke						0.1	0.1	0.7
Kobolttihohde		0.6		0.1		0.3		0.3
<i>Baryytti</i>								<i>2 kpl.</i>
<i>Argentopentlandiitti</i>								<i>1 kpl</i>

Taulukko 9. Peittomoreenin raskaat- ja keskiraskaat mineraalit fraktioluokittain prosenttiosuuksina.

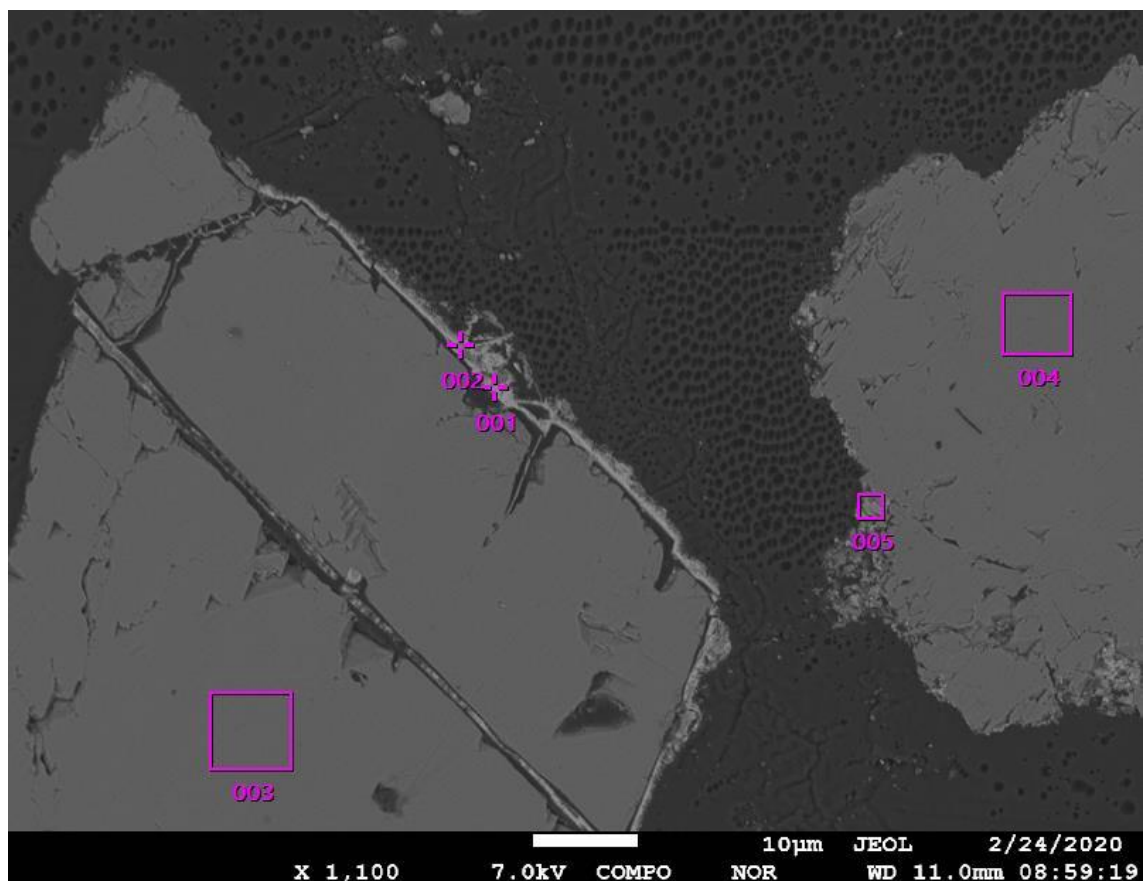
Näyte	Peittomoreeni	
	0,250-0,125	0,125-<0,063
Fraktio (mm.)	0,250-0,125	0,125-<0,063
Yhteensä kpl/%	5872/100%	11118/100%
Luokittelematon kpl/%	461/7,9%	465/4,2%
Muut silikaatit	46,3	47,5
Zirkoni	2,5	4,2
Fe-dolomiitti	8,7	9,1
Kalsiitti	0,1	0,6
Muut rautaoksidit	18,6	18,6
Rutiili	0,7	1
Ilmeniitti	15	14,2
Apatiitti	0,1	0,3
Monatsiitti	0,2	0,2
Pyriitti		0,1

6.5 EPMA - Sekundäärimineraalit

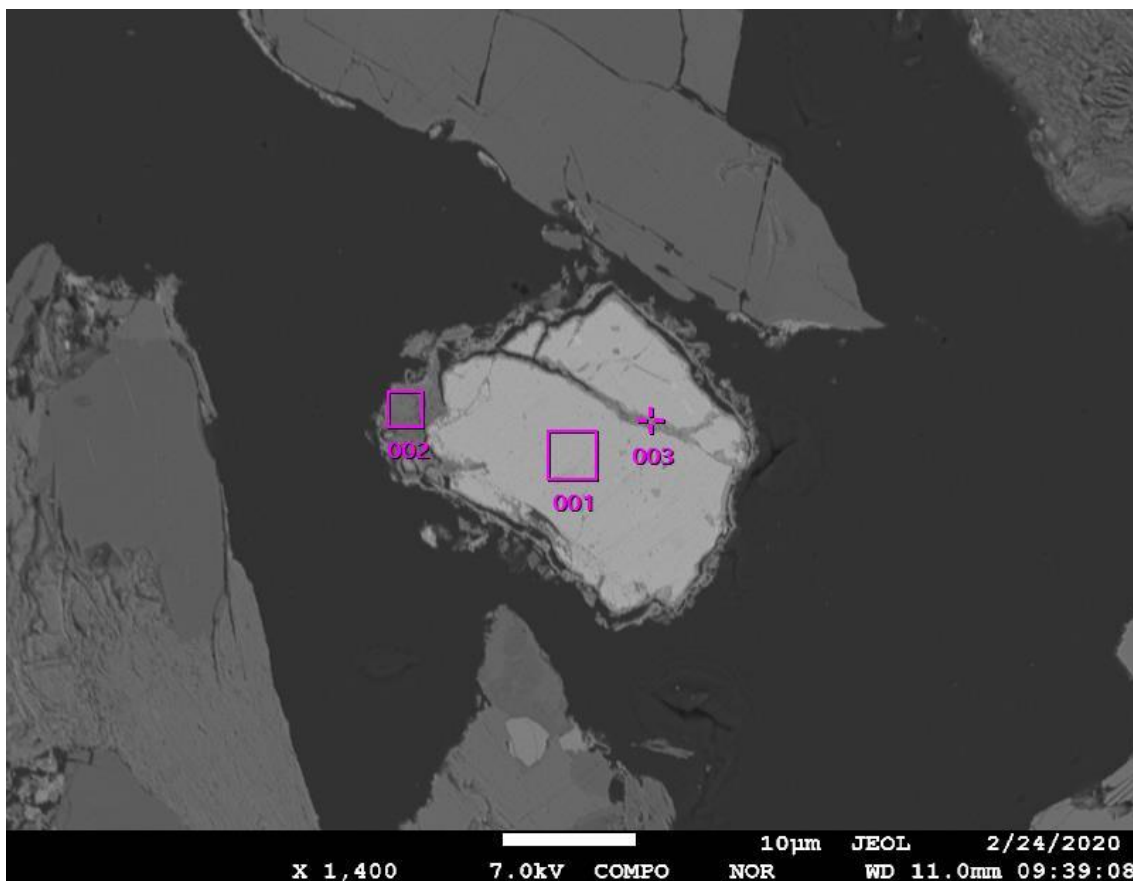
Rikastushiekkakerrosten muuttumista ja sekundäärimineraaleja kartoitettiin Oulun yliopistolla sijaitsevan MAKE:n röntgenmikroanalysaattorilla. Tutkimusta suoritettiin EDS:lla pisteanalyysinä ja tarkoituksena oli löytää viitteitä rikastushiekköjen muuttumisesta. EPMA-analyysissä hyödynnettiin nk. backscatter-kuvaa, joka tarkoittaa

käytännössä sitä, että kuvassa raskaammat mineraalit, kuten sulfidit erottuvat kevyistä mineraaleista siten, että raskaammat ovat kirkkaampia ja vaaleampia ja kevyemmät tummempia.

1. rikastushiekkakerroksen mineraalirakeista löytyy orastavaa muuttumista (kuva 18). Muuttuminen näyttäytyy lähinnä satunnaisten rakeiden reunoilla esiintyvänä sekundäärisinä reunuksina. EDS-alkuaineanalyysin perusteella reunukset ovat koostumukseltaan Fe-oksihydroksidia, mitä luultavimmin ferrihydridiä $[\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})]$ eli ruostetta. Alkuaineanalyysien perusteella on myös mahdollista, että pieniä määriä arseenia on absorboituneena joihinkin Fe-oksihydroksidireunuksiin. Tämän kaltaisia reunuksia löytyi tutkimuksen aikana 1. rikastushiekkakerroksesta dolomiitti-, albiitti-, biotiitti-, rautasulfidi- ja kvartsirakeiden reunoilta. Kerroksessa esiintyi harvakseltaan myös rautasulfaattia tai Fe-oksihydroksisulfaattia.

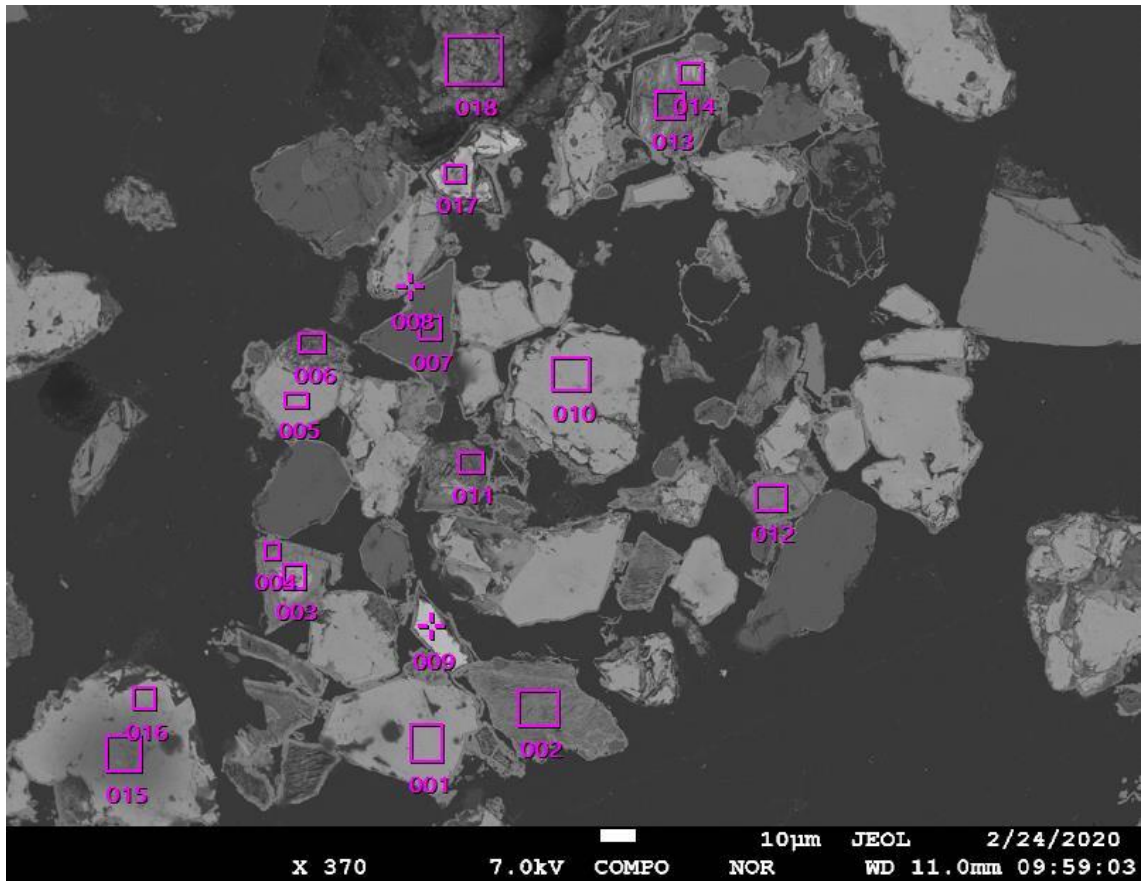


Kuva 18. 1. rikastushiekkakerroksessa esiintyvää dolomiittiraketta (nro.003) ympäröi vaalea, ohuehko Fe-oksihydroksidireunus. Oikealla olevassa dolomiittirakeessa (nro. 004) ei ole näkyvissä vastaavaa reunusta, joskin sen reunat näyttävät rosoisemmilta ja rapautuneemmilta.

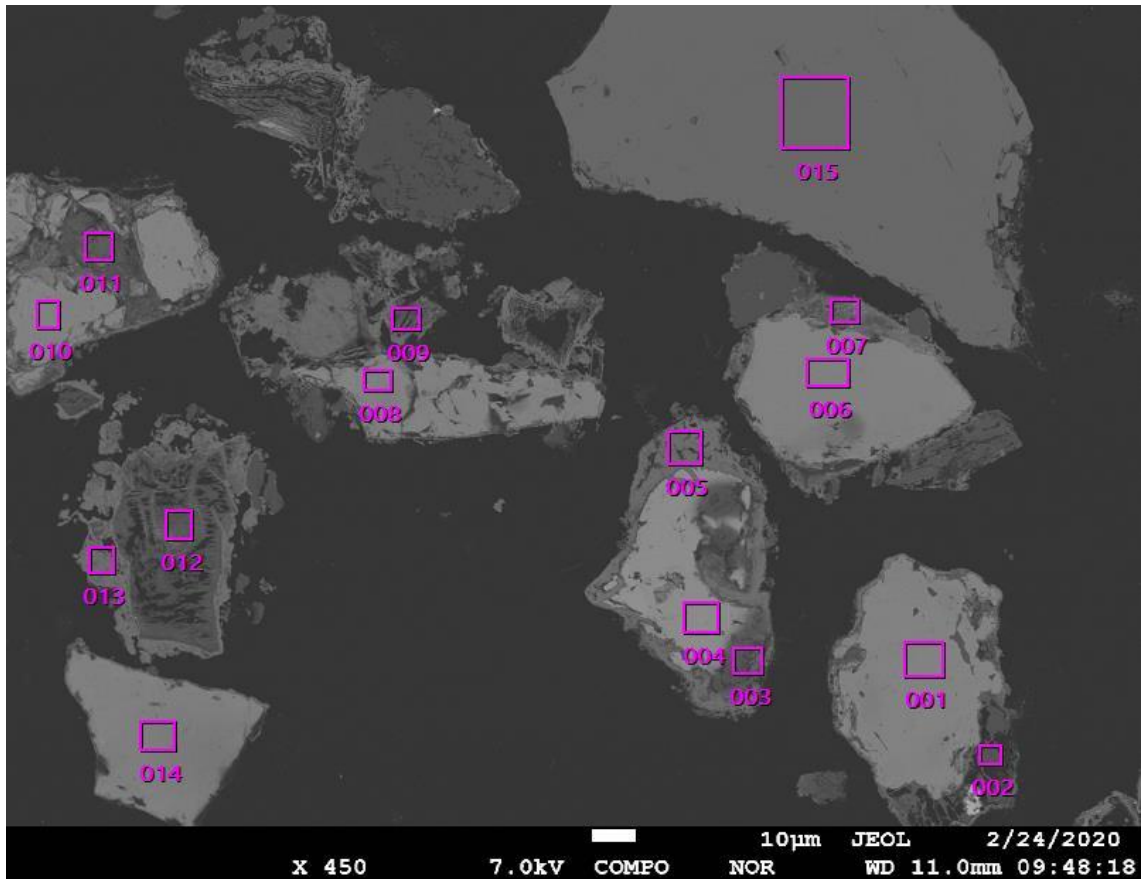


Kuva 19. Fe-oksihydroksidireunus (nro. 002) 1. rikastushiekkakerroksessa esiintyvän rautasulfidin (nro. 001) ympärillä. Rakeen sisäiseen rakoön on muodostunut rautasulfaattia tai rautahydroksisulfaattia (nro. 003).

Kuvassa 20 on selvästi nähtävissä 2. rikastushiekkakerroksen pitkälle edennyt rakeiden muuttuminen verrattuna ensimmäiseen kerrokseen ja, iso osa muuttuneista rakeista on lähes sekarakeen näköisiä ja osassa rakeita muuttuminen on läpikotaista. Muutos ilmenee samankaltaisesti kuin ensimmäisessä kerroksessa, mutta Fe-oksihydroksidireunusten esiintyminen on huomattavasti yleisempää ja selvempää tässä kerroksessa. Myös rautasulfaattireunukset sulfidimineraalien reunoilla ovat yleisiä.

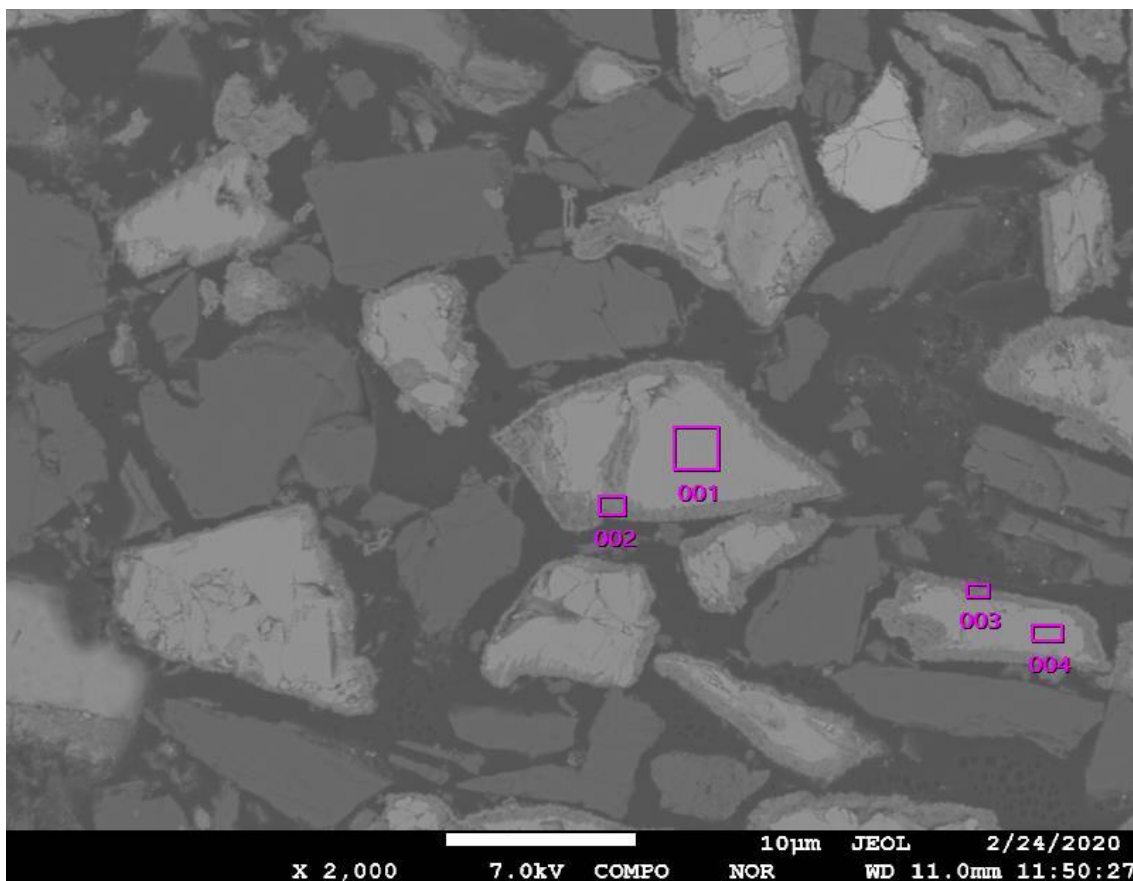


Kuva 20. 2. rikastushiekkakerroksen mineraalirakeita. Kuvasta huomaa muuttumisen laajuuden: lähes kaikkia kuvan mineraalirakeita reunustaa joko Fe-oksihydroksidi- tai rautasulfaattireunus.



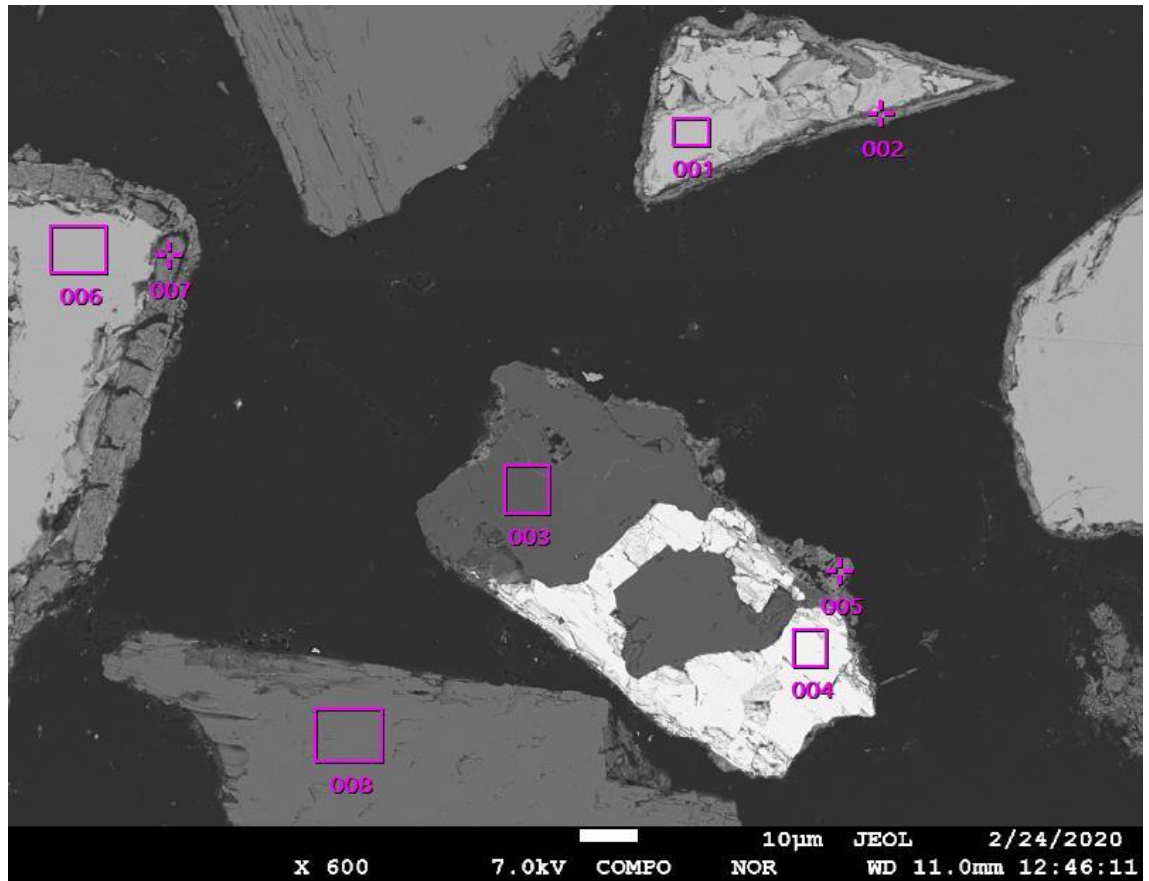
Kuva 21. Osassa 2. rikastushiikkakerroksessa esiintyvissä rautasulfidirakeissa (vaaleat rakeet) on huomattavia sekundäärisiä reunuksia.

Kuten kuvasta 15 voidaan nähdä, 3. rikastushiikkakerroksen mineraalirakeiden muuttuminen oli jo huomattavasti vähäisempää. Muuttuneita rakeita löytyi lähinnä näytteessä oletetuista agglomeraateista. Muuttumisen muoto oli samankaltaista kuin aikaisemmissa kerroksissa.

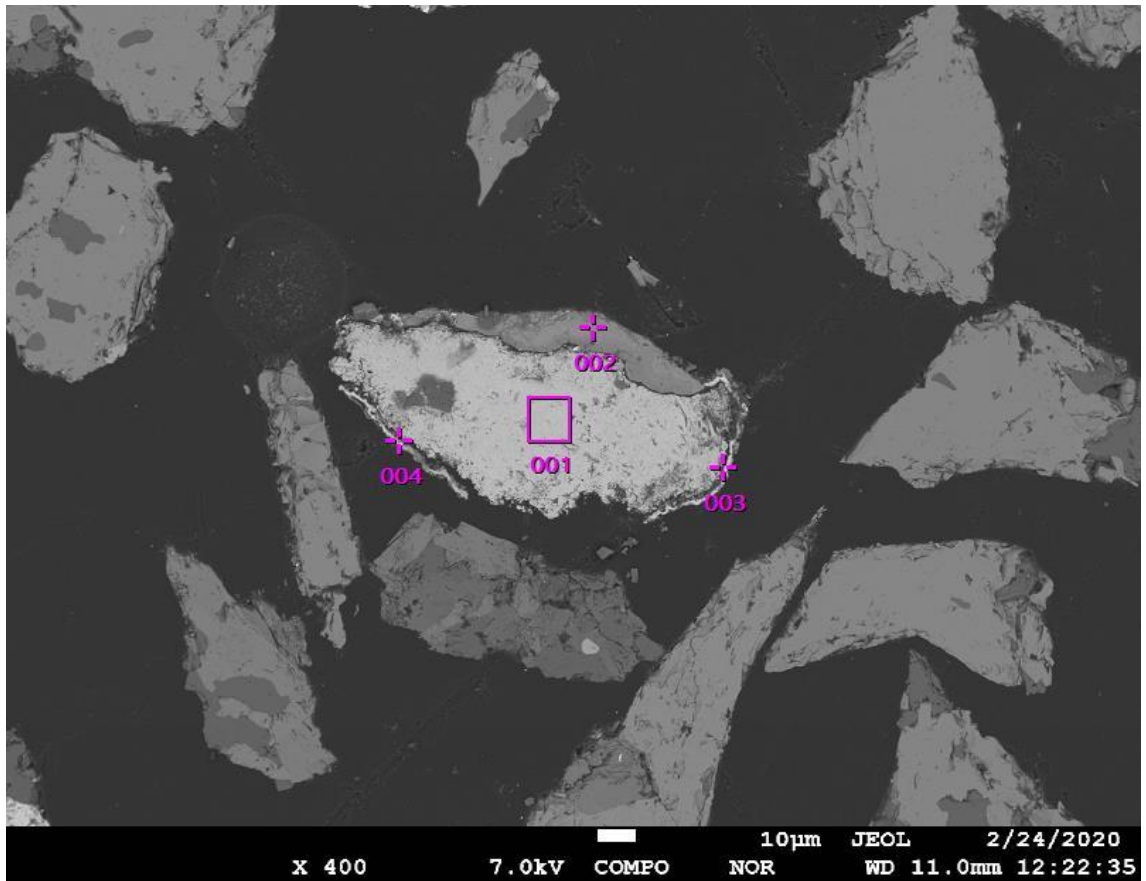


Kuva 22. 3. rikastushiekkakerroksessa esiintyvässä agglomeraatissa olevia rautasulfidirakeita ja niitä reunustavia rautasulfaattireunuksia.

4. rikastushiekkakerros niin ikään oli huomattavan muuttumaton. Muuttuneita rakeita esiintyi satunnaisesti ja niitä täytyi näytteestä etsiä. Kuten muissakin kerroksissa, muuttuminen näyttäytyi samankaltaisesti tässäkin kerroksessa (kuva 23).



Kuva 23. Satunnaisia muuttuneita rautasulfidirakeita 4. rikastushiekkakerroksessa (nro. 001 ja 006) ja niitä ympäröiviä sekundäärisiä reunuksia. Oikealla olevaa rautasulfidia ympäröi Fe-oksihydroksidi ja vasemmalla olevaa raetta rautasulfaatti. Keskellä olevassa monatsiitin (valkoinen) ja albiitin (tumma) jakamassa sekarakeessa esiintyy orastavaa Fe-oksihydroksireunuksen syntymistä.



Kuva 24. 4. rikastushiikkakerroksessa esiintyvä oliveniitti (nro. 001) eli kupariarsenaatti [$\text{Cu}_2(\text{AsO}_4)(\text{OH})$], jonka alaosaa ja oikeaa yläkulmaa osittain reunustaa kuparisulfaatti.

7. Tulosten tulkinta

7.1 Partikkelikoko

Partikkelikokoanalyysin tuloksista selviää, että kaikki rikastushiekat ovat raekooltaan verraten hienojakoista materiaalia (taulukko 3) ja keskenään melko samaa kokoluokkaa lukuun ottamatta 2. rikastushiekkakerrosta, jonka raekoko on suurempi kuin muiden. 2. rikastushiekkakerroksen suurempi raekoko viittaa siihen, että kyseisessä kerroksessa on tapahtunut muita kerroksia runsaammin muuttumista, joka on vaikuttanut rakeiden kokoon.

Partikkelikokoanalysoijan piirtämien kuvaajien perusteella voidaan sanoa, että kolme ensimmäistä rikastushiekkakerrosta ovat partikkelikokojakaumaltaan suhteellisen samanlaisia, vaikka 2. rikastushiekkakerros onkin kooltaan hieman karkeampaa. Näiden kolmen kerroksen kuvaajien käyrät ovat jyrkkänousuisia ja yksihuippuisia. Kapea partikkelikokojakauma viittaa siihen, että lähes kaikki kerroksen partikkelit ovat keskenään suunnilleen samankokoisia. Näistä kolmesta kerroksesta poiketen pohjimmaisesta 4. kerroksen kuvaajan käyrä on leveämpi ja kaksihuippuinen, joka taas viittaa tämän kerroksen rikastushiekan vaihtelevampaan raekokojakaumaan.

Moreenin hienoaineksen keskimääräinen partikkelikoko on 152 µm eli geoteknisen maalajiluokituksen mukaan se edustaa hienoa hiekkaa. Partikkelikokojakauman käyrä on paitsi kaksihuippuinen myös leveä, joka viittaa siihen, että moreenin hienoaines on raekooltaan heterogeenistä.

7.2 Geokemia

XRF-analyysin kokonaisalkuainepitoisuudet kuvastavat suurimmaksi osaksi rikastushiekkokerrosten sekä peittomoreenin mineralogian. Natriumpitoisuudet [Na] kolmessa ensimmäisessä rikastushiekkakerroksessa ovat samankaltaiset, mutta pitoisuus tippuu merkittävästi 4. kerroksessa. Päinvastoin piipitoisuus [Si] 4. kerroksessa on suurempi kuin kolmessa ylimmässä kerroksessa. Nämä kaksi alkuainepitoisuutta korreloivat rikastushiekoissa olevien mineraalien albiitin ja kvartsin [SiO₂] pitoisuuksien kanssa.

Albiittia esiintyy kolmessa ensimmäisessä kerroksessa enemmän, 4. kerroksessa dominoivin silikaattimineraali on kvartsi.

Magnesium [Mg]- ja kalsiumpitoisuudet [Ca] vastaavat toisiaan kussakin rikastushiekkakerroksessa ja nämä ovat selitettävissä näiden rikastushiekkojen runsaslukuisimman karbonaattimineraalin, rautapitoisen dolomiitin esiintymisenä. Dolomiittia löytyy alkuperäisistä malmeista itsestään, mutta sitä voi olla myös kalkkimaidossa, jota on saatettu levittää Rautuvaaran rikastushiekka-altaan rikastushiekkojen päälle jälkihoidollisessa tarkoituksessa.

Neljännän kerroksen muita kerroksia suurempi kaliumpitoisuus [K] viitanee kiillemineraalien, kuten biotiitin suurempaan esiintymiseen. Tämä selittänee myös peittomoreanin kaliumpitoisuuksia.

Rikki- ja rautapitoisuus [S] on alhaisempi 4. kerroksessa kuin ylemmissä kerroksissa ja tämä viittaa ylempien kerroksien suurempiin pyriitin ja magneettikiisun pitoisuuksiin. Kun taas katsotaan 4. kerroksen huomattavasti korkeampia kupari-, sinkki [Zn]- ja arseenipitoisuuksia, voidaan todeta, että sulfidimineraalit monipuolistuvat tässä kerroksessa. Toisaalta pintakerroksen keskimmäisiä kerroksia suurempi arseenipitoisuus kertonee arseenin pintaan rikastumisesta jatkuvan kuivumisen ja haihtumisen tuloksena. Myös lyijy [Pb] on eniten 4. kerroksessa, mutta sen esiintyminen on melko vähäistä.

Tiettyjen ympäristölle haitallisten aineiden pitoisuudet ylittävät selkeästi PIMA-asetuksen teollisuus- ja varastoalueille asetetut ylemmät ohjearvot (Ympäristöministeriö, 2007), joiden perusteella voidaan arvioida maaperän pilaantuneisuutta. Näitä ohjearvojen ylittäneitä haitallisia aineita ovat arseeni, kupari, nikkeli ja sinkki.

Pohjimmaisesta 4. kerroksen huomattavasti korkeammat bariumpitoisuudet [Ba] voinee ainakin osittain selittää baryytin eli bariumsulfaatin [BaSO₄] esiintymisenä. Tämän kerroksen suurehkoja klooripitoisuuksia ei voitu selittää mineraaleilla.

AAS-analyysin tulokset täsmentävät nikkelin, mangaanin, raudan, kuparin ja arseenin pitoisuuksia sekä esiintymistä rikastushiekoissa ja peittomoreanissa. Tuloksia tarkastelemalla huomataan, että mangaanipitoisuudet nousevat ja nikkelipitoisuudet laskevat alempiin kerroksiin mentäessä, kuten jo XRF-tulokset esittivät. Tuloksia

tarkastelemalla huomataan myös se, että nikkeli ja mangaani esiintyvät suurempina pitoisuuksina alle 63 µm eli pienimmän fraktioluokan rakeissa.

Kuparin ja arseenin pitoisuuksissa ei esiinny vastaavanlaista yhteyttä tiettyyn kokofraktioon. Sen sijaan huomataan, kuten XRF-tuloksissakin, että kyseisiä alkuaineita esiintyy merkittävässä määrin 4. kerroksessa.

Rautapitoisuudet ovat melko yhteneväiset 1., 3. ja 4. rikastushiekkakerroksessa. Näiden sijaan 2. rikastushiekkakerroksessa rautapitoisuus pienimmässä fraktioluokassa ampaisee ylös hyvin merkittävästi. Tätä voinee selittää jo aiemmin pohdiskeltu mahdollisuus kyseisen kerroksen muuttumisesta. Rauta on voinut saostua tähän kerrokseen.

Jos tarkastellaan uutossa käytettyjä reagensseja saatuihin tuloksiin, niin voidaan todeta, että hydroksyyliammoniumkloridi irrottaa näytteistä rautaa samoja määriä kuin kuningasvesi. Kupari ei näytä liukenevan hydroksyyliammoniumkloridiin.

Ni-Mn-Cu-As-pitoisuudet peittomoreenissa ovat marginaaliset. Peittomoreenissa on kuitenkin kohtalaisen korkeat raudan pitoisuudet. Tämän selittää se, että kyseinen moreeni on kaivettu Rautuvaaran alueelta, jota luonnehtivat monet rautaesiintymät.

7.3 Mineralogia

FE-SEM-analyyseistä saatuja mineralogisia tuloksia tarkastellessa huomataan, että ne vastaavat melko hyvin geokemiallisia tuloksia. Mineraaliluokitukseen saatiin viisi eri mineraaliluokkaa: silikaatit, karbonaatit, oksidit, fosfaatit ja sulfidit.

Luokituksen muihin silikaatteihin kuuluu jo aiemmin mainitut albiitti, kvartsi, kiilteet sekä jonkin verran amfiboliryhmän ja kloriittiryhmän mineraaleja. Näiden mineraalien nimeämiset perustuvat paitsi FE-SEM:n ja lähdekirjallisuuden vertailulle, mutta myös XRD-analyysin tuloksille (liite 2.). Näitä mineraaleja esiintyy eniten 4. rikastushiekkakerroksessa. Kuten aiemmin mainittu, 4. rikastushiekkakerroksen vallitsevin mineraali on kvartsi ja kolmen ylimmän kerroksen albiitti.

Ylemmät kolme kerrosta ovat karbonaattirikkaampia ja rautapitoinen dolomiitti yhdessä muiden silikaattien kanssa ovat näiden kerrosten dominoivimpia mineraaleja. Dolomiittia

esiintyy merkittävästi vähemmän 4. rikastushiekkakerroksessa. Kalsiittia esiintyy näytteissä vähän, mutta runsaimmin sitä esiintyy 4. rikastushiekkakerroksessa.

Oksidimineraaleihin luokitettiin muut rautaoksidit, rutiili [TiO₂], ilmeniitti ja uraniniitti. Muihin rautaoksidiin kuuluu pääasiassa magnetiittia sekä hematiittia [Fe₂O₃]. Muut rautaoksidit jakautuvat melko tasaisesti eri rikastushiekkakerroksissa.

Rutiilia eli titaanioksidia ja ilmeniittiä eli rautatitaanioksidia esiintyy rikastushiekoissa vaihtelevasti. Rikastushiekkänäytteistä löytyy muutamia uraanioksidirakeita, mutta ne ovat jakautuneet tasaisesti eri näytteisiin, joten niiden perusteella ei voida päätellä rikastushiekkojen alkuperäisiä malmilähteitä.

Fosfaattimineraaleja näytteissä esiintyy melko vähän. Apatiitti [Ca₅(PO₄)₃(OH,F,Cl)] jakautuu tasaisesti näytteiden kesken, joskin sen pitoisuus tekee pienen nousun 3. kerroksessa keskiraskaassa mineraaliosassa. Harvinaisia maametalleja sisältäviä REE-mineraaleja (engl. Rare Earth Elements) monatsiittia [(Ce,La,Nd,Th)PO₄] ja ksenotiimiä [YPO₄] esiintyy tasaisesti kolmessa ensimmäisessä kerroksessa, mutta ei juurikaan 4. kerroksessa.

Runsaslukuisimpia sulfidimineraaleja pyriittiä ja magneettikiisua esiintyy raskasmineraaliosassa pääsääntöisesti kolmessa ylimmässä kerroksessa. Sulfidimineraalit monipuolistuvat 4. kerroksessa. Tässä kerroksessa esiintyy kuparikiisua, sinkkivälkettä ja arseenikiisua, joita esiintyy harvakseltaan muissa kerroksissa. Lisäksi 4. kerroksesta löytyy joitain lyijyhohderakeita. Kobolttihohde jakautuu melko tasaisesti joka kerrokselle.

Lisäksi 3. ja 4. kerroksessa esiintyy jonkin verran bariumsulfaattia, joitain kultarakeita sekä argentopentlandiittirakeita [Ag(Fe,Ni)₈S₈].

Röntgenmikroanalyysointilla tehty sekundäärimineraalikartoitus osoitti, että 2. rikastushiekkakerros on muuttunut huomattavasti. Myöskin 1. rikastushiekkakerroksessa on tapahtunut jonkin verran muuttumista. Näiden sijaan 3. ja 4. rikastushiekkakerrosten muuttuminen on melko marginaalista. Muuttuminen käsittää kaikissa kerroksissa Fe-oksihydroksidin ja Fe-oksihydroksisulfaatin sekä rautasulfaatin muodostumisen reunuksina rakeiden ympärille tai rakoihin osittain tai kokonaan.

Peittomoreenin mineralogiaa hallitsevat pääsääntöisesti silikaatit ja rautaoksidit sekä ilmeniitti. Myös dolomiittia esiintyy jonkin verran. Sulfideja moreeni ei juuri sisällä. Rautuvaaran rikastushiekka-altaan peittomateriaalina käytetty moreenin mineralogia kuvastaa pitkälti alueen kallioperää.

7.4 Virhelähteet

Partikkelikokoanalyysi rikastushiekoille suoritettiin kolmella näytteen esikäsittelymenetelmällä: kuivana, mutamaisena sekä nestemäisenä, agglomeraatit natriumpyrofosfaattiin hajotettuina. Näistä kolmesta menetelmästä jälkimmäisin on standardoitu menetelmä, mutta tällä menetelmällä ei saatu toistettavia tuloksia, kuten kahdella ensimmäisellä menetelmällä. Tämä johtuu siitä, että nestemäisessä muodossa olevaa näytettä ei saatu pipetoitua analysaattoriin tasaisesti siten, että jokaisessa mittauksessa olisi yhdenmukainen raekoostumus.

AAS-tuloksissa, 4. rikastushiekkakerroksen Ni-Mn-Cu-As-pitoisuuksien kohdalla huomataan, että pienimmän fraktioluokan kohdalla varsinkin kuparipitoisuus, mutta myös arseenipitoisuus tippuu silmiinpistävästi. Tässä mittauksessa on todennäköisesti käynyt jokin virhe.

Jokin virhe on käynyt myös raskasnesteseparoinnissa. Tämä ilmenee vertailtaessa mineraaliluokituksen raskasmineraaliosaa ja keskiraskasta osaa. Vertailtaessa havaitaan, että jotkin raskasmineraalit menevät keskiraskaaseen osaan. Esimerkiksi keskiraskaassa osassa 4. kerroksesta löytyy lähes puolet magneettikiisua. Toisin sanoen osa näytteistä on erottunut huonosti.

Parin näytenapin FE-SEM-analyysimittauksessa oli käynyt niin, että haluttuun raemäärään ei oltu päästy. Tämä näkyy peittomoreenin suuremman fraktioluokan rakeiden kokonaismäärässä. Verrattuna pienempään fraktioluokkaan, rakeita saatiin analysoitua lähes puolet vähemmän.

8. Yhteenveto ja johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli suorittaa mineraloginen ja geokemiallinen karakterisointi Rautuvaaran rikastushiekka-altaan keskiosan pintakerrosten rikastushiekalle sekä altaan peittomateriaalina käytettävälle moreenille. Karakterisoinnin oli määrä käsittää näytteiden partikkelikokoanalyysit, geokemiallisen koostumuksen tarkastelun sekä selvittää modaalin primäärimineralogia ja sekundääristen mineraalien esiintyminen.

Partikkelikokoanalyysin tulokset kertoivat, että 1., 3. ja 4. kerros ovat raekokojensa puolesta melko samanlaisia toisiinsa nähden ja, että 2. kerroksessa on selvästi muita kerroksia suurempi keskimääräinen raekoko. Partikkelikokojakaumat ovat kuitenkin kolmessa ensimmäisessä kerroksessa samankaltaisen jyrkät ja terävähuippuiset, kun taas 4. kerroksessa raekokojakauma on aavistuksen leveämpi. Leveä ja kaksihuippuinen käyrä voi viitata vaihtelevampaan raekokojakaumaan. 2. kerroksen suurempi raekoko indikoi sekundääristen mineraalien saostumista primäärimineraalien pinnalle, ja tämä pystyttiin myös toteamaan EPMA-analyysituloksista.

XRF-analyysistä havaittiin, että kolmen ensimmäisen kerroksen alkuainepitoisuudet ovat melko yhteneväiset, ja ne poikkeavat täysin pohjimmaisesta kerroksen pitoisuuksista. Tämä oli ensimmäinen viite siihen, että pohjimmainen kerros on eri malminrikastuksesta syntynyttä rikastushiekkaa.

XRF-analyyseistä havaittiin myös, että tiettyjen ympäristölle haitallisten aineiden (arseeni, kupari, nikkeli, sinkki) pitoisuudet ylittävät ainakin tässä osaa rikastushiekka-allasta PIMA-asetuksen asettamat ylempät ohjearvot. Arseeni on näistä aineista hankalin, koska siitä koostuvat yhdisteet ovat helposti liukenevia ja tällöin mm. arseenikiisu rapautuu herkästi. Liukoisuudesta johtuen arseeni on huomattavan mobiili aine eli se liikkuu ympäristössä helposti. Tosin sen liikettä voi hidastaa esim. sedimentteihin ja hydroksideihin sitoutuminen. Arseenia voi eri muodoissaan päästä pinta- ja pohjavesiin, jolloin se saattaa aiheuttaa pidemmällä aikavälillä haitallisia vaikutuksia luonnolle ja jopa ihmisten terveydelle. Vaikka on tutkittu, että arseenilla ei

olisi erityistä taipumusta kertyä eliöihin ja kasveihin, ovat suuret pitoisuudet osalle näistä toksisia. (Vaajasaari ym., 2004)

Suuret arseenipitoisuudet pidemmällä altistumisajalla ovat haitallisia myös ihmisterveydelle. Tällaisia vakavia seurauksia suurille arseenipitoisuuksille altistumisesta ovat mm. erilaiset keuhko- ja ihosyövät. (Hakala & Hallikainen, 2004)

Peittämättömänä pintakerroksessa oleva arseeni on alttiina virtaavalle vedelle sekä tuulelle, jolloin aiheutuu vaara sen leviämisestä pidemmälle ympäristöön. Rautuvaaran rikastushiekka-allas peitettiin moreenilla vuoden 2018 aikana ja peittäminen oli näytteenottohetkellä käynnissä.

AAS-analyysin tulokset vahvistivat XRF-analyysistä saatuja nikkelin, mangaanin, raudan, kuparin ja arseenin pitoisuuksia kussakin kerroksessa sekä moreenissa. Tulosten merkittävin havainto oli raudan pitoisuuden huomattava kasvu 2. kerroksessa. Tämä vahvistaa edelleen teoriaa raudan saostumisesta tässä kerroksessa. Yksittäisten tutkimuksessa käytettyjen uuttoreagenssien tuloksia tarkastellessa voidaan todeta, että hydroksyyliammoniumkloridi uuttaa sekundääriset rautasaostumat ja näihin sitoutuneet metallit. Kuningasvesi taas uuttaa loput hydroksyyliammoniumkloridiin liukenemattomat aineet.

Myös modaalinen primäärimineralogia antaa osviittaa siitä, että kolme ensimmäistä kerrosta ovat jokseenkin samanlaisia ja alun perin samasta malmista peräisin. Tämä näkyy ennen kaikkea 4. kerroksen muita kerroksia monipuolisemmassa sulfidimineraalikoostumuksessa. Sekundäärimineraalikartoitus osoitti, että kaksi ensimmäistä kerrosta ovat eniten muuttuneita, joskin samankaltaista muuttuneisuutta esiintyykin satunnaisesti myös kahdessa viimeisimmässä kerroksessakin. Muuttuminen näyttäytyy lähinnä hydroksidien ja oksihydroksidien sekä erilaisten rautasulfaattien saostumisessa primäärimineraalirakeiden reunoille ja rakoihin.

Kun verrataan saatuja mineralogisia sekä geokemiallisia tuloksia Rautuvaaran rikastushiekka-altaaseen läjitettyjen rikastushiekkojen mineralogiaan (taulukko 1.), voidaan vetää johtopäätös, että kolme ensimmäistä kerrosta edustaa pääosin Saattoporan malminrikastuksesta syntynyttä rikastushiekkaa ja 4. kerros edustaa Pahtavuoman malmia. Tämä voidaan nähdä esimerkiksi siitä, että kolmessa ensimmäisessä kerroksessa

dolomiitti esiintyy suurina määrinä ja 4. kerroksessa sen määrä vähenee merkittävästi. Dolomiitti on Saattoporan malmin yksi harmemineraaleista. Toinen esimerkki on Pahtavuoman malmissa esiintyvien sulfidimineraalien, kuten sinkkivälkkeen ja arseenikiisun esiintyminen 4. kerroksessa, muttei juurikaan ylemmissä kerroksissa. On mahdollista, että kolmessa ensimmäisessä kerroksessa on Saattoporan rikastushiekan lisäksi myös Juomasuon malmin rikastushiekkaa. Tällöin kerroksissa esiintyvät REE-mineraalit olisivat selitettävissä.

2. rikastushiekkakerroksen sekundäärimineraaleja indikoivien piirteiden, kuten suuremman keskimääräisen raekoon ja suuren rautapitoisuuden lisäksi tässä kerroksessa oli havaittavissa myös fysikaalinen ja tekstuurillinen muuttumispiirre eli niin sanottu *hardpan*-kerros. Lottermoserin (2010) mukaan ko. kovakuoriset ja väriltään ruskeankellertävät kerrokset voivat muodostua hapettuvaan kerrokseen. Huokosveden reagoiessa karbonaattimineraalien kanssa veden pH nousee karbonaattien liuetaessa, ja liuennut ferrorauta hapettuu ferriraudaksi ja saostuu oksihydroksidina rikastushiekan huokostiloihin ja primäärimineraalien pinnoille. (Al ym., 2000)

Lottermoser (2010) mainitsee, että *hardpan*-kerrokset toimivat jälkihoidollisesti katsottuna mainioiden puskureina. Fysikaalisesti ne heikentävät tuulen ja veden eroosiotyötä, mikäli *hardpan*-kerros on rikastushiekka-altaan pintaosassa. Ne voivat tietyissä tapauksissa myös estää happirikkaan veden ja ilmakehän hapen pääsyn sulfidiseen rikastushiekkaan. Lisäksi *hardpan*-kerrokset sitovat raskasmetalleja, joka on Rautuvaaran tapauksessa hyvä asia mm. arseenin korkeita pitoisuuksia silmällä pitäen.

Verrattuna Rautuvaaran rikastushiekka-altaan rikastushiekan paksuutta (riippuen sijainnista, noin 5-7 metriä (Räisänen ym., 2015)) tässä työssä tutkitun rikastushiekkahorisontin paksuuteen, voidaan todeta, että vielä olisi tutkittavaa rikastushiekka-altaan alaosissa. Jatkotutkimuksena olisi hyvä ottaa koko kerrosmatkalta häiriintymätön näyte, jotta altaan koko kerrosrakenne saataisiin selvitettyä. Lisäksi kokonaisvaltaisen kuvan saamiseksi voitaisiin toteuttaa systemaattinen näytteenotto koko rikastushiekka-altaan alalta esim. häiriintymättömiä näytteitä kairaamalla.

Näiden lisäksi rikastushiekkokerrosten muuttumiset, kuten saostumisen myötä syntyneet sekundäärimineraalit voitaisiin selvittää mineraalitarkkuudella. Tämä vaatisi mm. sen,

että esimerkiksi vesipitoisten sekundäärimineraalien kidevesien pitoisuuksia voitaisiin mitata.

9. Kiitokset

Tutkimus on saanut rahoitusta Euroopan aluekehitysrahastosta.

Suuri kiitos kaikille, jotka ovat suorasti tai epäsuorasti auttaneet tässä työssä ja olleet mukana saattamassa tätä tutkielmaa loppuun.

Haluan kiittää ohjaajiani professori Pertti Saralaa ja laboratorioinsinööri Markku Seitsaarta ohjauksesta ja neuvoista tässä pro gradu -tutkielmassa sekä aiemmin kandidaatin tutkielmassa.

Haluan kiittää Oulu Mining Schoolista laboratoriomestari Riitta Kontiota AAS-analyyseistä, raskasnesteseparoinneista sekä opastamisesta muissa käytännön asioissa OMS:ssa. Kiitos kemisti Miika Peltoniemelle ja Markku Seitsaarelle partikkelikokoanalyyseissä avustamisesta. Miikalle myös kiitos kemiaan liittyvistä opastuksista ja pohdinnoista. Kiitos hieteknikko Sari Forssille tutkimuksessa käytetyistä preparaateista.

Kiitos Materiaalianalyysikeskuksen käyttöinsinöörille Pasi Juntuselle FE-SEM-analyysien operoimisesta sekä käyttöinsinööri ja geologi Marko Moilaselle avustamisesta mineraaliluokituksissa sekä EPMA-analyysien operoinneista. Kiitokset myös MAKE:n henkilökunnalle XRF- ja XRD-analyyseistä.

Kiitos Kemin ammattikorkeakoulun Knelson-separaattorioperaattoreille.

Lopuksi kiitos perheelleni ja muille läheisilleni tuesta ja kannustuksesta tässä työssä sekä muissa opinnoissani.

Lähdeluettelo

Akcil, A. & Kouldas, S., 2006. Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of cleaner production* 14, 1139-1145.

Al, T.A., Martin, C.J. & Blowes, D.W., 2000. Carbonate-mineral/water interactions in sulfide-rich mine tailings. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 64. Elsevier, USA. 3933-3948.

Anttonen, R., 1988. Saattoporan kultatutkimukset 1986–1988. Outokumpu Mining Oy. Julkaisematon raportti 001/2741/RSA/88. 19 s.

Anttonen, R., 1993. Kuusamon Juomasuon kultaesiintymän koelouhinta. Outokumpu Mining Oy. 2 s.

Blowes, D.W., Ptacek, C. J. & Jurjovec, J., 2003. Mill Tailings: hydrogeology And Geochemistry. Environmental aspects of mine wastes. Mineralogical Association of Canada, Canada, 95-116.

Dold, B., 2010. Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management. Waste Management. Intech, Croatia. 173-198.

Eshel, G., Singer M.J., Levy G.J. & Mingelgrin U., 2004. Critical Evaluation of the Use of Laser Diffraction for Particle-Size distribution Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 68. Soil Science Society of America. 736-743.

Evans, A.M., 1997. An introduction to economic geology and its environmental impact. Wiley, University of Leicester, 376 s.

Fisseha B., Bryan R. & Simms P.H., 2010. Evaporation, Unsaturated Flow, and Salt Accumulation in Multilayer Deposits of “Paste” Gold Tailings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 136, 1703-1712.

Fitton, G., 1997. X-ray fluorescence spectrometry. *Modern Analytical Geochemistry – An introduction to Quantitative Chemical Analysis for Earth, Environmental and Material Scientists.* Routledge, USA. 329 s.

Gillott, J.E., 1968. Clay in Engineering Geology. Elsevier Publishing Company. Netherlands, 296 s.

Goldstein, J., Newbury D.E., Joy D.C., Lyman C.E., Echlin P., Lifshin E., Sawyer L. & Michael J.R., 2003. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis. Springer, USA. 689 s.

Gray, N.F., 1997. Environmental impact and remediation of acid mine drainage: a management problem. *Environmental Geology* 30. 62–71.

- Hakala E. & Hallikainen A., 2004.** Suomalaisten arseenialtistuminen, arseenin vaikutukset ja terveysriskit. Arseeni Suomen luonnossa. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. 153-166.
- Heikkinen, P.M. & Noras, P., 2005.** Kaivoksen sulkemisen käsikirja. Kaivostoiminnan ympäristötekniikka, Espoo, 165.
- Hirvas, H., 1991.** Pleistocene stratigraphy of Finnish Lapland. Geological Survey of Finland, Bulletin 354. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. 123 s.
- Jambor, J.L., 2003.** Mine-Waste Mineralogy and Mineralogical Perspectives of Acid-Base Accounting. Environmental Aspects of Mine Wastes. Mineralogical Association of Canada, Canada. 117-145.
- Jamieson, H.E., Walker S.R. & Parsons M.B., 2015.** Mineralogical characterization of mine waste. Applied Geochemistry 57. 85-105.
- Johnson, D.B. & Hallberg, K.B., 2005.** Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the Total Environment 338. Elsevier, United Kingdom. 3-14.
- Kauppila, P., Räisänen, M.L. & Myllyoja, S., 2011.** Metallikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö 29, Helsinki, 213 s.
- Kelly, E.G & Spottiswood, D.J, 1982.** Introduction to mineral processing. John Wiley & Sons, Canada, 491 s.
- Kesler, S.E., 1994.** Mineral Resources, Economics and the Environment. Macmillan. 391 s.
- Korkalo, T., Lappalainen, S., Vaajoensuu, K. & Heikkinen, R., 1988.** Kittilän Saattoporan kultaesiintymän kannattavuustarkastelu. Outokumpu Mining Oy. 35 s.
- Korvuo, E., 1997.** The Saattopora gold ore and the Pahtavuoma Cu-Zn-U occurrences in the Kittilä region, Northern Finland. Geologian tutkimuskeskus, opas – Geological Survey of Finland, Guide 43, 21-25.
- Lahtinen, J., 1987.** Kirakkajuppuran Pt-Pd esiintymän koelouhinta; arvio jäljellä olevan malmin määrästä ja laadusta. Lapin Malmi. Raportti 035/2544 05/JJL/87. 27 s.
- Lapakko, K., 2002.** Metal Mine Rock and Waste Characterization Tools: An Overview. International Institute for Environment and Development, World Business Council for Sustainable Development. Minnesota Department of Natural Resources, US, 30 s.
- Lin, Z., 1997.** Mineralogical and chemical characterization of wastes from the sulfuric acid industry in Falun, Sweden. Environmental Geology 30. Springer-Verlag. 152-162.
- Lottermoser, B.G., 2010.** Mine Wastes - Characterization, Treatment and Environmental Impacts. Springer, New York, 400 s.
- Lukkarinen, T., 1987.** Mineraalitekniikka Osa 2: mineraalien rikastus. Insinööritieto Oy, Helsinki, 442 s.

- Martin, T.E. & Davies, M.P., 2000.** Trends in the stewardship of tailings dams. AGRA earth & environmental limited, Burnaby, Canada. 15 s.
- Moon C.J. & Evans A.M., 2006.** Ore, Mineral Economics, and Mineral Exploration. Introduction to Mineral Exploration. Blackwell Publishing, Australia. 481 s.
- Nordstrom, D.K., 2011.** Hydrogeochemical processes governing the origin, transport and fate of major and trace elements from mine wastes and mineralized rock to surface waters. Applied Geochemistry 26, 1777-1791.
- Nordström, D.K. & Alpers, C.N., 1999.** Geochemistry of Acid Mine Waters. The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits. Society for Economic Geologists. 133-160.
- Papunen, H., Haapala, I. & Rouhunkoski, P., 1986.** Suomen malmigeologia. Suomen Geologia Seura r.y., Mänttä, 317 s.
- Raudsepp, M. & Pani, E., 2003.** Application of Rietveld Analysis to Environmental Mineralogy. Environmental aspects of mine wastes. Mineralogical Association of Canada, Canada, 165-180.
- Reinikainen, J., 2007.** Maaperän kynnys- ja ohjearvojen määrittämisperusteet. Suomen ympäristökeskus, Helsinki, 164 s.
- Rowland, A.P., 1997.** Atomic absorption spectrometry and other solution methods. Modern Analytical Geochemistry – An introduction to Quantitative Chemical Analysis for Earth, Environmental and Material Scientists. Routledge, USA. 329 s.
- Räisänen, M.L., Väisänen, U., Lanne, E., Turunen, P. & Väänänen, J., 2015.** Rautuvaaran suljetun kaivoksen rikastushiekan jätealueen kemiallinen nykytila, vaikutukset pinta- ja pohjavesiin vuosina 2005-2006 sekä suositukset jälkihoidolle. Geologian tutkimuskeskuksen arkistoraportti 64, 44 s.
- Seal, R.R. & Hammarstrom, J.M., 2003.** Geoenvironmental models of mineral deposits: examples from massive sulfide and gold deposits. Environmental aspects of mine wastes. Mineralogical Association of Canada, Canada, 11-50.
- Tessier, A., Campbell, P.G.C. & Bisson, M., 1979.** Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals. Analytical Chemistry 51. American Chemical Society, Canada. 844-850.
- Toropainen, V., 2006.** Yhteenveto sulfidimalmikaivostoiminnasta Suomessa ja toiminnassa muodostuvista sivutuotteista sekä niiden ympäristövaikutuksista. Geologian tutkimuskeskuksen arkistoraportti 2, 52 s.
- Vaajasaari K., Schultz E. & Sorvari J., 2004.** Arseni pilaantuneissa maissa, ympäristöriskien arviointi ja arseenin ekotoksikologia. Arseni Suomen luonnossa, ympäristövaikutukset ja riskit. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. 135-152.
- Vanhanen, E., 1992.** Kuusamon Juomasuon kulta-kobolttisiintymien lähiympäristön kultamalmitutkimukset vuosina 1986 – 1991. Raportti, Geologian tutkimuskeskus. 51 s.

Vanhanen, E., 2001. Geology, mineralogy and geochemistry of the Fe-CoAu-(U) deposits in the Paleoproterozoic Kuusamo Schist Belt, northeastern Finland. Geological Survey of Finland Bulletin 399. Geological Survey of Finland, Espoo. 229 s.

Williams, R.E. & Baldwin, J. & Ralston, D.R., 1979. Coping with mine drainage regulations. Mine drainage: proceedings of the First International Mine Drainage Symposium. M. Freeman Publications, San Francisco, 184-218.

Ympäristöministeriö, 2007. Maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arviointi. Ympäristöhallinnon ohjeita 2. 210 s.

Liitteet

Liite 1. XRF-tulokset

Näyte	F (%)	Na2O (%)	MgO (%)	Al2O3 (%)	SiO2 (%)	P2O5 (%)	S (%)	Cl (PPM)	K2O (%)	CaO (%)
1. RHK-KER	0,05	4,29	5,69	10,74	43,64	0,1	2,16	0	0,48	7,93
2. RHK-KER	0,06	4,95	3,63	10,96	45,88	0,02	2,83	0	0,55	6,21
3. RHK-KER	0	4,61	6,68	11,22	43,8	0,09	2,92	0	0,76	8,15
4. RHK-KER	0,05	1,29	4,64	12,43	53,26	0,1	1,5	1196	2,69	5,73
MOREENI BULK	0	3,99	1,34	14,19	69,99	0,1	0	0	2,96	2,38
	Sc (PPM)	TiO2 (%)	V (PPM)	Cr2O3 (%)	MnO (%)	FeO (%)	Ni (PPM)	Cu (PPM)	Zn (PPM)	Ga (PPM)
	26	0,79	228	0,02	0,14	8,99	589	311	18	18
	20	0,68	156	0,02	0,1	10,15	544	261	0	17
	32	1	272	0,04	0,15	10,04	352	231	54	18
	30	1,23	270	0,05	0,37	12,92	242	3405	1317	18
	11	0,49	66	0,01	0,05	3,49	30	0	9	17
	Ge (PPM)	As (PPM)	Rb (PPM)	Sr (PPM)	Y (PPM)	Zr (PPM)	Nb (PPM)	Mo (PPM)	Sn (PPM)	Sb (PPM)
	6	546	12	38	27	79	0	4	7	31
	6	149	14	22	24	78	0	3	7	31
	4	107	20	34	32	74	0	3	7	31
	5	1330	68	80	26	116	2	5	7	31
	12	0	79	343	15	245	0	2	11	31
	Cs (PPM)	Ba (PPM)	La (PPM)	Ce (PPM)	Pr (PPM)	Nd (PPM)	Gd (PPM)	Hf (PPM)	Ta (PPM)	Pb (PPM)
	0	90	43	144	6	37	0	2	0	10
	0	83	45	81	5	26	0	2	0	8
	6	142	36	64	7	25	0	3	0	9
	9	2285	26	201	5	45	0	4	3	107
	0	846	25	41	5	27	0	5	0	10
	Bi (PPM)	Th (PPM)	U (PPM)	Sum (%)	CO2 Matrix (%)					
	9	2	18	100	14,774					
	5	2	14	100	13,818					
	4	2	7	100	10,389					
	27	2	5	100	2,667					
	0	4	2	100	1,022					

Liite 2. XRD-tulokset

1. Rikastushiekkakerroksen bulkkimineralogia tulkitsemattoman XRD-analyysin mukaan.

1.RHK-KER	Mineraali	Määrä (%)
-	Kvartsi	17.3
-	Albiitti	42
-	Dolomiitti	25
-	Flogopiitti	1.8
-	Klinokloori	2.7
-	Anortiitti	9
-	Magneetikkiisu	2.3

2. Rikastushiekkakerroksen bulkkimineralogia tulkitsemattoman XRD-analyysin mukaan.

2.RHK-KER	Mineraali	Määrä (%)
-	Kvartsi	18.2
-	Albiitti	54.2
-	Dolomiitti	15.6
-	Flogopiitti	5.1
-	Klinokloori	5.1
-	Anortiitti	0
-	Magneetikkiisu	1.3

3. Rikastushiekkakerroksen bulkkimineralogia tulkitsemattoman XRD-analyysin mukaan.

3.RHK-KER	Mineraali	Määrä (%)
-	Kvartsi	13.10
-	Albiitti	47.7
-	Dolomiitti	28.7
-	Flogopiitti	2.60
-	Klinokloori	2.11
-	Anortiitti	0.1
-	Magneetikkiisu	5.68

4. Rikastushiekkakerroksen bulkkimineralogia tulkitsemattoman XRD-analyysin mukaan.

4.RHK-KER	Mineraali	Määrä (%)
-	Kvartsi	40.2
-	Biotiitti	20.1
-	Albiitti	23.2
-	Aktinoliitti	16.5

Moreenin bulkkimineralogia tulkitsemattoman XRD-analyysin mukaan.

MOREENI	Mineraali	Määrä (%)
-	Kvartsi	35.2
-	Biotiitti	0.0
-	Albiitti	54.8
-	Aktinoliitti	10.0