

Olli-Pekka Majava & Saku Rönkä

HIENOAINEKSEN VAIKUTUS PYRIITIN SAANTIIN

Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Toukokuu 2020



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2020	Tekijä/tekijät Olli-Pekka Majava & Saku Rönkä
Koulutus Kemiantekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi Hienoaineksen vaikutus pyriitin saantiin		
Työn ohjaaja Laura Rahikka		Sivumäärä 35+2
Työelämäohjaaja Maria Koffert		
<p>Tämän opinnäytetyön tilasi Pyhäsalmi Mine Oy, jonka maanalainen toiminta loppuu vuoden 2021 aikana ja jatkuu varastoidun pyriitin tuotantona vuoteen 2026 asti. Tilaaja halusi tutkimustuloksen, miten hienoaines vaikuttaa pyriitin saantiin vaahdotuksessa. Tämän teoksen alussa esitetään teoriaosuutena vaahdotuksen teoriaa ja vaahdotuksessa tarvittavia olosuhteita sekä reagensseja. Teoksessa esitellään myös Pyhäsalmen pyriitinvaahdotusta ja varastoitua pyriittiä. Lähdekirjallisuutena teoksessa on posesiteollisuuden kirjallisuutta sekä Pyhäsalmi Mine Oy:n ja kemisti Maria Koffertin tekemiä sisäisiä materiaaleja ja tutkimuksia liittyen varastoidun pyriitin alkavaan tuotantoon.</p> <p>Kokeellisessa osuudessa tehtiin kymmenen kappaletta koevaahdotuksia, joissa käytettiin koevaahdotusvälineitä. Koevaahdotusten tulokset analysoitiin Pyhäsalmi Mine Oy:n laboratoriossa. Käytetyt reagenssit olivat samoja kuin tulevassa pyriitin tuotannossa. Koevaahdotuksissa tutkittiin, miten hienoaines vaikuttaa pyriitin saantiin. Viidessä ensimmäisessä koevaahdotuksessa määritettiin pienten partikkelien laskeutumisnopeus, jonka jälkeen hienoainesta poistettiin lapon avulla. Viidessä seuraavassa vaahdotuskokeessa hienoaineksen vaikutusta tutkittiin lisäämällä sitä vaahdotettavaan materiaaliin, joka ei itsessään sisältänyt paljoa hienoainesta. Vaahdotuskokeista analysoitiin saadun rikasteen ja muodostuneen jätteen rikkipitoisuus.</p> <p>Viidessä ensimmäisessä kokeessa hienoainesta ei saatu poistettua luotettavasti, joten niistä saatuja tuloksia ei voida pitää luotettavina. Seuraavien kokeiden tuloksen perusteella hienoaineksen vaikutus saantiin oli selkeä. Saantikäyrä laski aina kun hienoainesta lisättiin enemmän vaahdotettavaan materiaaliin. Vaahdotettaessa materiaalia, jossa oli yli 20,5 % hienoainesta, saanti romahti melkein 10 % verrattuna vaahdotukseen, jossa hienoainesta oli 9.1 %. Lisäksi rikasteen määrää pieneni, joka kerta kun hienoainesta oli enemmän mukana. Rikasteen rikkipitoisuus tippui alle 50 %, kun hienoainesta oli yli 17.3 %. Jäljelle jääneen jätteen määrä ja sen sisältämä rikkipitoisuus lisääntyi aina kun hienoainesta lisättiin.</p>		

Asiasanat Hienoaines, Koevaahdotus, Pyhäsalmi Mine Oy, Pyriitti, Pyriitinvaahdotus, Saanti, Vaahdotus

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2020	Author Olli-Pekka Majava & Saku Rönkä
Degree programme Kemiantekniikka		
Name of thesis EFFECT OF FINE MATTER ON RECOVERY OF PYRITE		
Instructor Laura Rahikka	Pages 35+2	
Supervisor Maria Koffert		
<p>This thesis was commissioned by Pyhäsalmi Mine Oy, whose underground operations will end during 2021 and will continue as the production of stored pyrite until 2026. The client wanted a study on how the fines affect the recovery of pyrite in flotation. At the beginning of this work, the theory of flotation and the conditions required for flotation, as well as reagents, are presented in the theoretical part. The work also presents Pyhäsalmi pyrite flotation and stored pyrite. The source literature in the work is the literature of the process industry as well as internal materials and research by Pyhäsalmi Mine Oy and chemist Maria Koffert related to the incipient production of stored pyrite.</p> <p>In the experimental part, ten experimental flotations were conducted using experimental flotation equipment. The results of the experimental flotation were analyzed in Pyhäsalmi Mine Oy's laboratory. The reagents used were the same as in the future production of pyrite. The experimental flotation investigated how fines affect pyrite intake. In the first five experimental flotations, the settling rate of the small particles was determined, after which the fines were removed with a syphon. In the next five flotation experiments, the effect of fines was investigated by adding it to a material which itself did not contain much fines. The sulfur content of the obtained concentrate and the generated waste was analyzed from the flotation experiments.</p> <p>The obtained results of the first five experiments were not considered reliable, since it was not possible to remove the fines reliably. Based on the results of the following experiments, the effect of fines on intake was clear. The intake curve decreased whenever more fines were added to the material. When flotating material with more than 20.5% fines, the recovery collapsed by almost 10% compared to flotation with 9.1% fines. In addition, the amount of concentrate dropped each time more fines were present. The sulfur content of the concentrate dropped below 50%, while the fines were above 17.3%. The amount of residual waste and the sulfur content it contained increased each time fines were added.</p>		

<p>Key words Fines, Flotation, Test flotation, Pyhäsalmi Mine Oy, Pyrite, Pyrite flotation, Recovery</p>

KÄSITTEET JA LYHENTEET

°c	Celsiusaste
cm	Senttimetri
Faasi	Olomuoto
g	Gramma
Hydrofobinen	Vettä hylkivä
kg/l	Kilogrammaa per litra
Lappo	Imujuoksin
ml	Millilitra
pH	Happamuuden arvo
S	Rikki
SR1	Rikkirikaste 1
SR2	Rikkirikaste 2
Valmennin	Säiliö, jossa kemikaalit valmennetaan lietteeseen

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO.....	1
2 VAAHDOTUS.....	2
3 VAAHDOTUSKEMIKAALIT	5
3.1 Kokoojareagenssit	6
3.2 Vaahdotekemikaali.....	9
3.3 Säännöstelijäkemikaalit.....	10
3.3.1 Aktivaattorit	10
3.3.2 Painajat	11
3.4 pH:n vaikutus	11
4 HIENOAINES VAAHDOTUKSESSA	13
5 PYRIITTI.....	15
6 PYRIITINVAHDOTUS.....	16
7 TUTKITTAVA MATERIAALI JA SEN HYÖDYNTÄMINEN	17
8 TUTKIMUKSEN MENETELMÄT JA AINEISTOT.....	19
9 VAAHDOTUSKOKEET HIENOAINESTA POISTAEN	21
9.1 Vaahdotuskoe 1	21
9.2 Vaahdotuskoe 2	21
9.3 Vaahdotuskoe 3	22
9.4 Vaahdotuskoe 4	22
9.5 Vaahdotuskoe 5	23
10 TULOKSET HIENOAINESTA POISTAEN	24
11 VAAHDOTUSKOKEET HIENOAINESTA LISÄTEN	25
11.1 Vaahdotuskoe 6	25
11.2 Vaahdotuskoe 7	25
11.3 Vaahdotuskoe 8	26
11.4 Vaahdotuskoe 9	26
11.5 Vaahdotuskoe 10	27
12 TULOKSET HIENOAINESTA LISÄTEN.....	29
13 TULOSTEN YHTEENVETO.....	32
14 JATKOTOIMENPIDE EHDOTUKSET.....	33
LÄHTEET	35

LITTEET

1 JOHDANTO

Pyhäsalmi Mine Oy on tuottanut vuodesta 1962 kupari-, sinkki ja pyriittirikastetta, mutta sen malmi ehtyy vuoden 2021 aikana, jolloin maanalainen toiminta loppuu. Pyriittituotannossa on välillä ollut katkoksia, jolloin sitä ei ole tuotettu rikastamalla, vaan se on varastoitu Pyhäsalmi mine Oy:n rikastushiekka-alueelle. Varastoitu pyriittipitoinen rikastushiekka on tarkoitus prosessoida ja tehdä siitä myyntikelpoista pyriittirikastetta maanalaisen toiminnan loputtua. Varastointiossa, johon pyriitti on varastoitu, sisältää myös normaalisti siitä poistettavan hienoaineksen, jolloin pyriittivarastoa hyödynnettäessä voi hienoaines aiheuttaa ongelmia vaahdotuksessa.

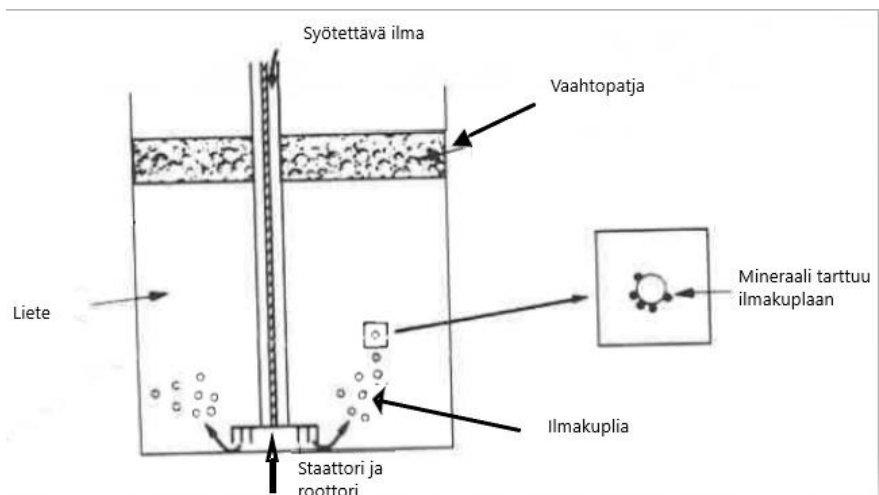
Tämän opinnäytetyön aiheena on tutkia, miten hienoaines vaikuttaa pyriitin saantiin vaahdotuksessa ja miten paljon sitä saa olla mukana, että pyriitinvaahdotus onnistuu asetettujen tavoitteiden mukaisesti. Työn kokeellinen osuus suoritettiin Pyhäsalmi Mine Oy:n rikastamon laboratoriossa ja välineinä käytettiin yleisesti koevaahdotuksissa olevia laitteistoja. Tutkittavana materiaalina käytettiin vuonna 2021 alkavan pyriittituotannon varastoitua materiaalia. Tutkimuksessa suoritettiin yhteensä 10 koevaahdotusta, joista viidessä ensimmäisessä vaahdotettiin paljon hienoainesta sisältävä materiaali, josta poistettiin kaikkein hienoimmat partikkelit. Hienoaineksen poisto luotettavasti osoittautui kuitenkin käytössä olleilla laitteistoilla mahdottomaksi, joten koevaahdotussuunnitelmaa muutettiin. Uuden koevaahdotussuunnitelman mukaan hienoainesta lisättiin seuraavissa viidessä koevaahdotuksessa aina lisää ja tutkittiin, missä vaiheessa vaahdotuksen saanti heikentyy merkittävästi. Vaahdotetusta materiaalista analysoitiin rikasteen ja jätteen rikkipitoisuus ja laskettiin vaahdotuksen saanti.

2 VAAHDOTUS

Vaahdotus perustuu kolmen siinä vaikuttavan faasin (kiinteä–neste–kaasu) fysikaaliseen ja kemialliseen vuorovaikutukseen. Vaahdotus on malmin rikastusmenetelmä, jossa haluttu arvomineraali erotetaan muista mineraaleista. Vaahdotus tapahtuu vaahdotuskennossa, jossa lietteeseen puhalletaan ilmaa ja haluttu mineraali tarttuu ilmakuplaan ja kulkeutuu sen mukana lietteen pintaan vaahtopatjaksi. Vaahtopatja poistuu kennon reunan yli rikasteränniin. Vaahdotuksen avulla on myös mahdollista vaahdottaa niin sanottu harmemineraali pois, jolloin arvomineraali jää lietteeseen. Vaahdotuksen onnistumisen edellytys on riittävä jauhatustaso, koska jos partikkelit jäävät liian suuriksi ne eivät jaksa nousta ilmakuplan avulla vaahtopatjaan asti. (Wills & Napier-Munn 2006; Pihkala 2011)

Mineraalin kulkeutuminen vaahdotuskennon pintaan vaahdotusprosessissa voi tapahtua kolmen eri mekanismin kautta. Pääasiallisin mekanismi on partikkelin selektiivinen tarttuminen ilmakuplaan. Tämä on vaahdotusprosessin kannalta tärkein vaihe, ja se perustuu mineraalin hydrofobisuuteen. Hydrofobisuuden ansiosta mineraali nousee ilmakuplan mukana pintaan. Useimmat mineraalit eivät ole luonnostaan hydrofobisia, mutta se ominaisuus voidaan aiheuttaa kemiallisesti kokoojakemikaalien avulla. Kaksi muuta mahdollista mekanismia on partikkelin kulkeutuminen virtausten mukana tai selektiivisesti ilmakuplaan tarttuneiden partikkeleiden välissä. Harmemineraalien nousu rikasteeseen tapahtuu yleensä kahden viimeksi mainitun mekanismin avulla. (Wills & Napier-Munn 2006.)

Yksinkertaisesti kuvassa 1 näkyvän vaahdotuskennon sisällä tapahtuvan vaahdotuksen toimintaperiaatteen voi selittää seuraavasti: vaahdotuskennoon puhallettava ilma sekoittuu roottorin ja staattorin ansiosta lietteeseen. Kennoon puhallettava ilma saa aikaan lietteen turbulentsisuuden, joka pitää mineraalit liikkeellä ja näin ollen mahdollistaa partikkeleiden ja ilmakuplien yhteentörmäykset, jolloin partikkelin kiinnittyminen ilmakuplaan on mahdollista. Lietteiden pinnalle muodostunut vaahdotus poistuu kennon reunan yli. Vaahdotus tapahtuu yleisesti sarjaan kytketyissä kennoriveissä, joissa ensimmäisenä on valmennus ja esivaahdotus, sitten ripevaahdotus ja viimeisessä vaiheessa prosessin tuloksen kannalta tarvittava määrä kertauskentöjä. Kertauskentöillä on tarkoitus lopullisen pitoisuuden parantamiseksi vaahdottaa esi- ja ripevaahdotuksen rikasteet. (Wills & Napier-Munn 2006.)

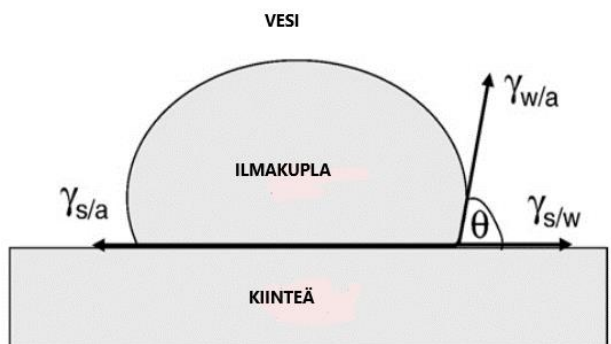


KUVA 1. Vaahdotuskennon toimintaperiaate. (Mukaillen Wills & Napier-Munn 2006.)

Koska mineraalin tarttuminen ilmakuplaan on vaahdotuksen tärkein mekanismi, on syytä tarkastella sitä hieman tarkemmin. Mineraalipartikkelin kiinnittyminen ilmakuplaan on mahdollista vain, jos partikkeli on hydrofobinen. Kuvassa 2 esitetyn kontaktikulman avulla voidaan tarkastella mineraalin hydrofobisuutta ja ilmakuplaan kiinnittymistä. Kontaktikulmaa kuvaa kaava 1.

$$\gamma_{s/a} = \gamma_{s/w} + \gamma_{w/a} \cos\theta \quad (1),$$

jossa $\gamma_{s/a}$ on kiinteän pinnan ja ilmakuplan välinen pintaenergia, $\gamma_{s/w}$ on kiinteän pinnan ja veden välinen pintaenergia, $\gamma_{w/a}$ on veden ja ilmakuplan välinen pintaenergia ja θ kuvaa kiinteän pinnan ja ilmakuplan välistä kulmaa.



KUVA 2. Kontaktikulma (Mukaillen Wills & Napier-Munn 2006.)

Voima, jota tarvitaan mineraalipartikkelin ja ilmakuplan välisen rajapinnan hajoamiseen, kutsutaan adheesiovoimaksi ja se vastaa työtä, joka tarvitaan poistamaan kiinteän aineen ja ilman välinen rajapinta ja tuottamaan uusia ilma- vesi- rajapintoja ja kiinteä- vesi -rajapintoja. Adheesiovoimaa kuvaa kaava 2.

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a} + \gamma_{s/w} - \gamma_{s/a} \quad (2)$$

jossa $W_{s/a}$ on tarvittava adheesiovoima, $\gamma_{w/a}$ on veden ja ilmakuplan välinen pintaenergia, $\gamma_{s/w}$ on kiinteän pinnan ja veden välinen pintaenergia. Yhdistämällä kontaktikulman kaava 1 ja adheesiovoiman kaava 2 saadaan kaava 3, josta nähdään: mitä suurempi kontaktikulma on, sitä suurempi on adheesiovoima mineraalipartikkelin ja ilmakuplan välillä. Mitä suurempi adheesiovoima partikkelin ja ilmakuplan välillä vallitsee, sitä kestävämmäksi systeemi tulee häiriöille. (Wills & Napier-Munn 2006; Hukki 1964.)

$$W_{s/a} = \gamma_{w/a}(1 - \cos\theta) \quad (3)$$

Useimmat mineraaleista eivät ole luonnostaan hydrofobisia, joten vaahdotuksen onnistumiseksi lietteeseen lisätään kokoojareagenssia, jolloin kokooja adsorboituu mineraalin pintaan tehden mineraalista hydrofobisen ja mahdollistaa näin ollen ilmakuplaan kiinnittymisen. Muita vaahdotuskemikaaleja kokoojakemikaalin lisäksi ovat vaahdote- ja säännöstelijäkemikaalit (aktivoijat tai painajat). Lisäksi vaahdotuksessa on tärkeä tuntea pH:n vaikutus vaahdotettavan mineraalin osalta. (Wills & Napier-Munn 2006.)

3 VAAHDOTUSKEMIKAALIT

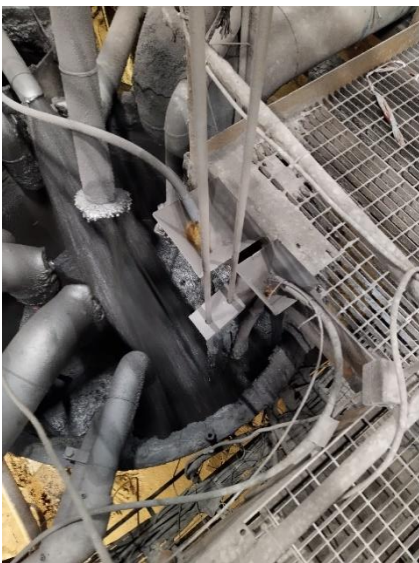
Vaahdotuskemikaaleja kutsutaan vaahdotusreagensseiksi, ja niiden tarkoituksena on saada aikaan vaahdotukselle suotuisat olosuhteet vaikuttamalla lietteeseen ja vaahdotettavan mineraalin pintaan, joka tekee mineraalin kiinnittymisen ilmakuplaan mahdolliseksi. Vaahdotuskemikaalit jaetaan kolmeen pääryhmään: kokoojareagensseihin, säännöstelyreagensseihin ja vaahdotereagensseihin. Kaikilla reagensseilla vaikutetaan eri osa-alueisiin vaahdotuksessa. Kokoojareagenssin avulla mineraali saadaan hydrofobiseksi vaikuttamalla sen pintaan. Vaahdotereagenssin avulla saadaan haluttu vaahdonmuodostuminen ja säännöstelyreagenssien avulla kokoojareagenssien vaikutus saadaan rajattua halutun mineraalin pintaan. Vaahdotuksessa käytettävien kemikaalien tehoa parannetaan riittävällä valmennusvaiheella ennen ensimmäistä vaahdotusvaihetta. Valmentaminen tapahtuu yleensä erillisessä valmentimessa tai syötämällä kemikaalit suoraan vaahdotuskennoon tai pumppukaivoon lietevirtaan. Kuvassa 3 on Pyhäsalmen kaivoksen sinkkivaahdotuksen kemikaalien syöttöön tehty jakaja, josta kemikaalit johdetaan valmentimeen. Kuvassa 4 vaahdotekemikaalit syötetään suoraan vaahdotuskennoon ja kuvassa 5 näkyy kemikaalin syöttö pumppukaivoon. (Hukki 1964.)



KUVA 3. Kemikaalin jakaja.



KUVA 4. Kemikaalin syöttö vaahdotuskennoon.

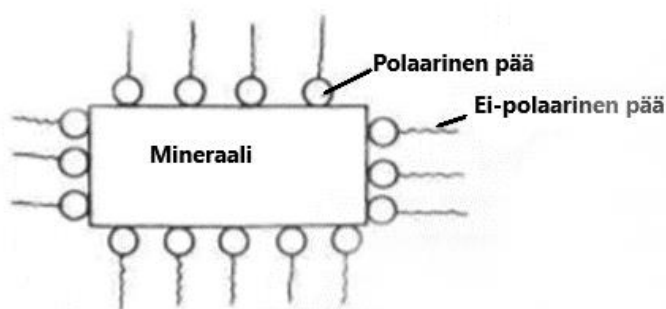


KUVA 5. Kemikaalien syöttö pumppukaivoon.

3.1 Kokoojareagenssit

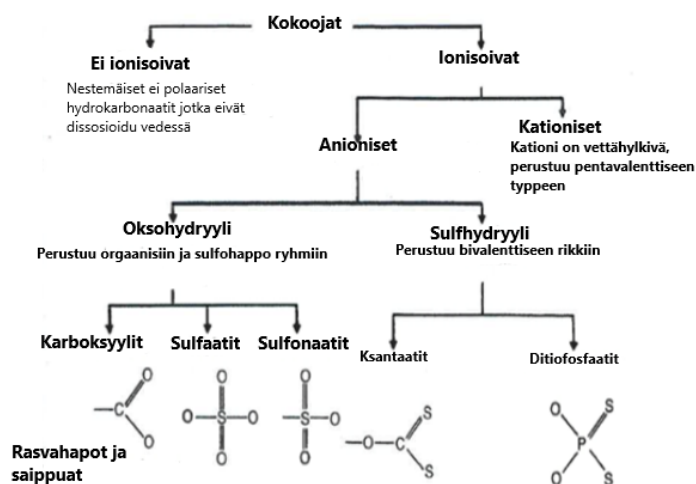
Harvat mineraalit ovat luonnostaan hydrofobisia, joten hydrofobisuus tehdään kokoojakemikaalin avulla. Kokoojakemikaalit ovat joukko pinta-aktiivisia orgaanisia yhdisteitä, jotka tekevät vaahdotettavan mineraalin pinnan hydrofobiseksi adsorboimalla ioneja tai molekyylejä mineraalin pintaan, jolloin

mineraalin on mahdollista kokoojakemikaalin peittämänä tarttua ilmakehään siihen törmätessään. Kokoojakemikaali tarttuu vaahdotettavan mineraalin pintaan polaarilla päällä ja ei-polaarinen pää tarttuu ilmakehään. Kokoojakemikaalit voivat olla ionisoivia yhdisteitä, jotka hajoavat vedessä ioneiksi tai ionittomia yhdisteitä, jotka ovat käytännössä liukenemattomia ja tekevät mineraalin hydrofobiseksi päällystämällä vaahdotettavan mineraalin pinnan ohuella kalvolla. Ionisoivat kokoojakemikaalit ovat yleisimmin käytössä vaahdotuksessa. Kuvassa 6 kokoojakemikaalin ionisoima mineraalin pinta (Wills & Napier-Munn 2006; Klassen & Mokrousov 1963)



KUVA 6. Kokoojakemikaali mineraalin pinnalla (Mukaiillen Wills & Napier-Munn 2006.)

Ionisoivat kokoojakemikaalit muodostuvat joukosta monimutkaisia molekyyliä, jotka ovat rakenteeltaan epäsymmetrisiä ja heteropolaarisia. Toisin sanoen molekyyli sisältää ei-polaarisen hiilivetyryhmän ja polaarisen ryhmän, joka voi olla yksi monista eri tyypeistä. Ei-polaarisella ryhmällä on selkeät hydrofobiset ominaisuudet, kun taas polaarinen ryhmä reagoi veden kanssa. Ionisoivat kokoojat luokitellaan hydrofobisen vaikutuksen tuottavan anionin tai kationin mukaan. Kuvassa 7 on kokoojakemikaalin luokittelutaulukko, josta nähdään kokoojakemikaalien jako seuraaviin ryhmiin: ei-ionisoivat, ionisoivat kationiset ja ionisoivat anioniset kokoojat. Anioniset kokoojat on vielä jaettu ksantaatteihin, ditiofosfaatteihin ja rasvahappoihin. (Wills & Napier-Munn 2006; Klassen & Mokrousov 1963.)

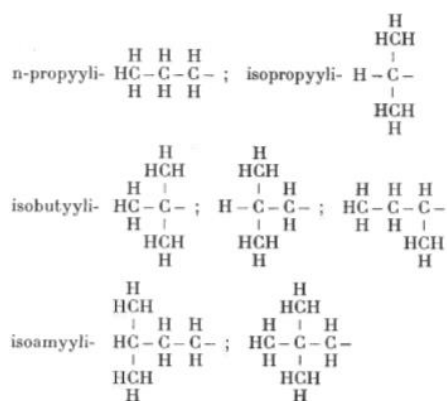


KUVA 7. Kokoojakemikaalien luokittelutaulukko. (Mukaillen Wills & Napier-Munn 2006.)

Koska ksantaatit ovat sulfidimineraalien vaahdotuksen kannalta yleisin ja tärkein kokoojakemikaali ja käytössä myös meidän opinnäytetyömme koevaahdotuksissa, on syytä perehtyä ksantaatin ominaisuuksiin hieman tarkemmin. Kaava 4 on ksantaatin yleiskaava.



jossa R on hiilivetyryhmä ja Me alkalimetalli. Onko ksantaatti primäärinen, sekundäärinen vai esimerkiksi tertiäärinen määräytyy sen mukaan, moneenko hiiliatomiin hiilivetyradikaali on kiinnittynyt. Kuvasessa 8 on esimerkkejä ksantaatin hiilivetyryhmän eri muodoista. (Hukki 1964.)



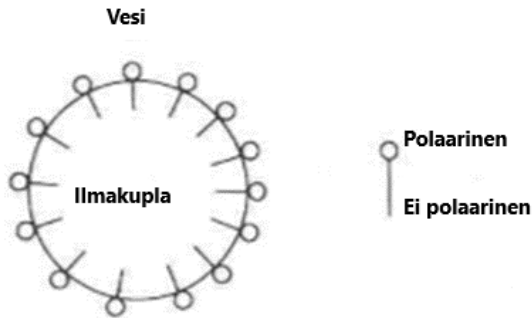
KUVA 8. Ksantaatin hiiliketjuja (Mukaillen Hukki 1964.)

Ksantaatit ovat sellaisenaan tehokkaita kokoojia sulfidimineraaleille, ja lisäksi ksantaateilla on paljon ominaisuuksia, jotka tekevät niistä erinomaisen kokoojan. Yhdisteen S-atomien lukumäärän lisääntyessä yhdisteen kyky ionisoitua mineraalin pintaan lisääntyy. Hiilivetyketjun hiiliatomien lisääntyessä kasvaa mineraalipinnalta mitattu kontaktikulma, joka lisää mineraalin hydrofobisuutta. Monet sivukivimineraalit ja silikaatit eivät helposti vaahdotu ksantaatteja käyttäen, jolloin vaahdotus on selektiivisempi. (Hukki 1964.)

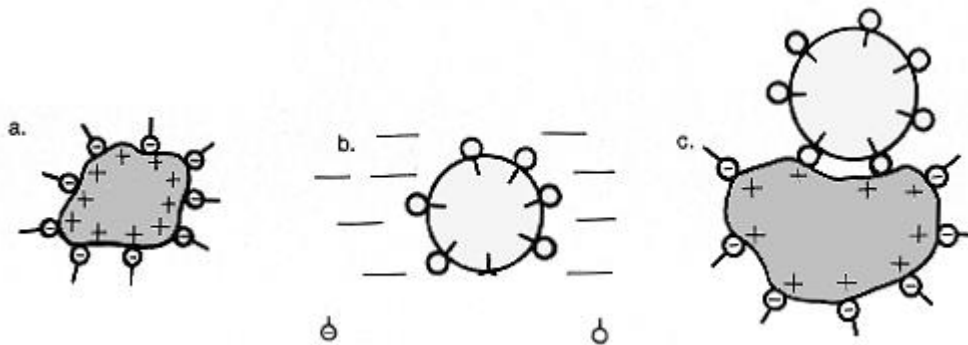
3.2 Vaahdotekemikaali

Vaahdotekemikaalit ovat yleisimmin heteropolaarisia pinta-aktiivisia ja orgaanisia yhdisteitä. Vaahdotekemikaalin avulla on tarkoituksena nimensä mukaan saada aikaan vaahtoa, tai tarkemmin sanottuna sen avulla saavutetaan riittävän kestäviä kuplia lietteeseen, jolloin kuplien noustessa pintaan muodostuu vaahtopatja. Vaahdotusprosessin kannalta oikein valitulla vaahdotteella parannetaan vaahdotuksen kinetiikkaa ja luodaan kestävä vaahtopatja, jolloin selektiivinen vaahdotus on mahdollista. (Wills & Napier-Munn 2006.)

Vaahdotekemikaaleilla ja kokoojakemikaaleilla on paljon samankaltaisuuksia rakenteissaan, koska vaahdotekemikaalikin sisältää polaarisen hydrofiilisen ryhmän ja ei-polaarisen hydrofobisen ryhmän. Vaahdotteet eivät kuitenkaan yleensä kovin hyvin adsorboidu mineraalin pintaan, vaan ne adsorboituvat neste- ja kaasufaasin rajapinnalle. Vaahdotekemikaalien polaarisenä osana on yleisimmin OH-ryhmä. Vaahdotemolekyylin polaarinen pää suuntautuu nestefaasiin päin ja ei-polaarinen (yleensä hiilivetyypää) kaasufaasiin päin. Tästä syystä kokoojakemikaalin peittämä mineraali tarttuu ilmakuplaan, eivätkä ilmakuplat polaarisen ulkopinnan johdosta tarttu toisiinsa muodostaen suurempia ilmakuplia. Vaahdotekemikaalit myös pienentävät veden pintajännitystä, jolloin vaahdosta tulee vaahdotuskennon pinnalla kestävämpi. Kuvassa 9 on esitetty vaahdotemolekyylin tarttuminen ilmakuplaan, ja kuvasta 10 voi nähdä kuinka kokoojamolekyylin peittämä mineraali tarttuu vaahdotemolekyylin peittämään ilmakuplaan. (Wills & Napier-Munn 2006; Klassen & Mokrousov 1963; Hukki 1964)



KUVA 9. Vaahdotemolekyylien peittämä ilmakupla. (Mukaiillen Wills & Napier-Munn 2006.)



KUVA 10. Vaahdotustapahtuma. (Mukaiillen Pekkala 2018.)

3.3 Säännöstelijäkemikaalit

Yleensä vaahdottaminen ei onnistu pelkästään kokoojakemikaalia ja vaahdotetta käyttämällä, koska vaahdotuskennossa on kirjava ioniympäristö ja ionit kilpailevat keskenään vapaista pinnoista. Säännösteleiviin kemikaaleihin joudutaan turvautumaan silloin kun halutaan kokoojakemikaalin tarttuvan ainoastaan halutun tai haluttujen mineraalien pinnoille. Kokoojakemikaalin toiminta voidaan saada selektiivisemmäksi vaikuttamalla säännöstelevillä kemikaaleilla ei halutun mineraalin pintaan, jolloin kookoojakemikaali vaikuttaa vain halutun mineraalin pintaan. Säännöstelijät voidaan luokitella aktivaattoreiksi, painajiksi tai pH:n säätäjiksi. (Wills & Napier-Munn 2006; Lukkarinen 1987)

3.3.1 Aktivaattorit

Aktivaattorit ovat kemikaaleja, joita käytetään sellaisten mineraalien vaahdotukseen, joita on vaikea tai lähes mahdoton vaahdottaa vain kokoojakemikaalia ja vaahdotetta käyttämällä. Yleensä aktivaattorit

ovat liukoisia suoloja, jotka ionisoituvat liuoksessa. Vaikuttava ioni reagoi mineraalipinnan kanssa, jolloin halutun mineraalin pinta saadaan suotuisaksi kokoojan tarttumiselle. (Wills & Napier-Munn 2006; Crozier 1992; Lukkarinen 1987)

Vaahdotusprosessi on pintailmiö, joka on erittäin herkkä vaahdotusveden ionipitoisuudelle, joten pH-modifioijia voidaan pitää myös aktivaattoreina, koska kaikilla mineraalien tai reagenssien yhdistelmillä on kriittinen pH, jonka yläpuolella vaahdotus onnistuu. (Wills & Napier-Munn 2006; Crozier 1992; Lukkarinen 1987)

3.3.2 Painajat

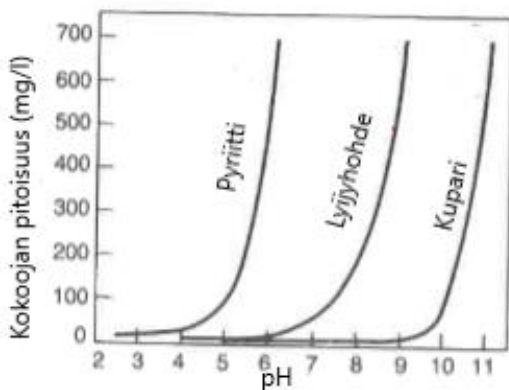
Painajia käytetään lisäämään vaahdotuksen selkeyttä muuttamalla tietyt mineraalit hydrofiiliseksi estäen siten niiden vaahdotusta. Painajia on monia tyyppisiä, ja niiden vaikutukset ovat monimutkaisia ja erilaisia, eivätkä useimmissa tapauksissa ole täysin ymmärrettyjä. Tämä tekee painajasta vaikeamman hallita, kuin muun tyyppisten reagenssien käyttö, etenkin kun niiden toiminta vaikuttaa myös vaahdotuksen onnistumiseen. (Wills & Napier-Munn 2006; Crozier 1992)

Syanideja käytetään laajalti lyijy-kupari-sinkki- ja kupari-sinkki-malmien selektiivisessä vaahdotuksessa sinkkivälkkeen, pyriitin ja tiettyjen kuparisulfidien painajina. Sinkkivälkkeen poistuminen kuparirikasteista on usein tärkeä huolenaihe, koska sinkki on haitallinen elementti kuparin sulatuksessa. Malmissa olevien kuparimineraalien liukenemisesta johtuvat kupari-ionit voivat kuitenkin aiheuttaa sinkkivälkkeen tahattoman aktivoitumisen ja estää selektiivisen vaahdotuksen. Natriumsyanidi on yleisimmin käytetty painajakemikaali. (Wills & Napier-Munn 2006; Crozier 1992)

3.4 pH:n vaikutus

Lietteen emäksisyydellä on erittäin tärkeä, vaikkakin hyvin monimutkainen rooli vaahdotuksessa ja käytännössä selektiivisyys monimutkaisissa erotuksissa riippuu herkästä tasapainosta reagenssipitoisuuksien ja pH:n välillä. Vaahdotus suoritetaan mahdollisuuksien mukaan emäksisissä olosuhteissa, koska suurin osa kokoojista, ksantaatit mukaan lukien, ovat stabiileja näissä olosuhteissa ja kennojen, putkistojen jne. korroosio-ongelmat minimoituvat. Kalkkia käytetään hyvin laajasti lietteen emäksisyyden sää-

telemiseen, ja sitä käytetään kalkkimaidon muodossa, kalsiumhydroksidipartikkeleiden suspensiona vesiliuoksessa. Kalkki tai sooda lisätään lietteeseen usein ennen vaahdotusta raskasmetalli-ionien saostamiseksi liuoksesta. Tässä mielessä emäs toimii painajana, koska nämä raskasmetalli-ionit voivat aktiivoida sinkkivälkettä ja pyriittiä ja estää niiden selektiivisen vaahdotuksen lyijy- tai kuparimineraaleista. Kun ksantaatteja käytetään kokoojana, riittävä emäs painaa melkein mitä tahansa sulfidimineraaleja, ja jokaiselle ksantaattipitoisuudelle vaahdotuksessa on olemassa pH-arvo, jonka alapuolella tietty mineraali vaahdottuu ja yläpuolella vaahdottumista ei tapahdu. Tämä kriittinen pH-arvo riippuu mineraalin luonteesta, käytetystä kokoojasta ja sen pitoisuudesta sekä lämpötilasta. Kalkki voi toimia myös voimakkaasti painajana pyriitille ja arsenopyriitille, kun käytetään ksantaattia kokoojana. Sekä hydroksyyliettiä kalsiumionit osallistuvat pyriitin painavaan vaikutukseen. pH:n säätelyllä säädelään myös aktivoijien ja painajien toimintaa säätelemällä niiden ionipitoisuutta lietteessä. Kuvassa 11 on pyriitin, lyijyhohteen ja kuparin vaahdottamiseen vaadittavan kriittisen pH:n ja ksantaattipitoisuuden välinen suhde. (Wills 1997; Göktepe 2001)

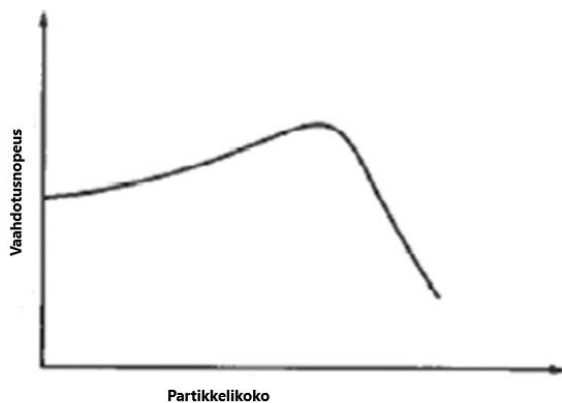


KUVA 11. Kriittisen pH-alueen ja kokoojakemikaalin pitoisuuden välinen suhde. (Mukaiillen Wills 1997)

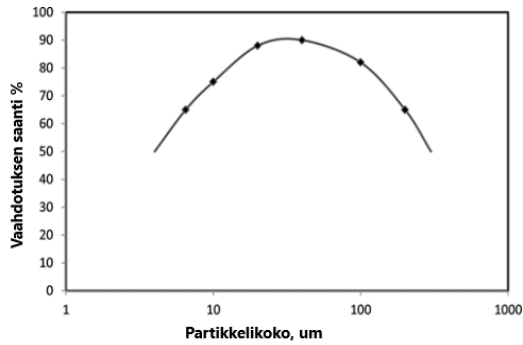
4 HIENOAINES VAAHDOTUKSESSA

Hienoaineksella tarkoitetaan vaahdotettavan nesteen sisältämiä kolloideja ja liejua. Kolloidien koko rajataan välille 0,1–0,001 μm . Karkeimmat vaahdotuksessa esiintyvät rakeet ovat 0,3 mm:n kokoisia suuruusluokaltaan, mutta olosuhteista riippuen joukossa on myös aivan hienoa, kolloidien kokoluokkaa olevaa ainesta. Vaahdotuksen yhteydessä liejulla tarkoitetaan mineraaliainesta, joka on erittäin hienojakoista ja suureksi osaksi kolloidien raekokoluokkaa. Sekä kolloidit että lieju häiritsevät vaahdotusta samalla tavalla. Ne huonontavat vaahdotustulosta tai voivat jopa estää halutun mineraalin vaahdotumisen niissä olosuhteissa, joissa sen tulisi vaahdotua. Kaikissa vaahdotushienouuteen jauhetuissa malmilietteissä esiintyy hienoainesta. (Hukki 1964.)

Vaikka hienoaines on yksittäisenä partikkelina pieni, kun sitä esiintyy lietteessä paljon, se alkaa häiritsemään vaahdotusta. Hienoaineksella on suuri ominaispinta-ala ja sen vuoksi se on erittäin aktiivista, jonka vuoksi vaahdotus reagenssien kulutus kasvaa. Hienoaines vaahdotuksessa voi heikentää merkittävästi vaahdotuksen lopputulosta. Hienoaines vaikuttaa alentavasti vaahdotusnopeuteen (KUVA 12) ja vaahdotuksen saantiin (KUVA13). (Klassen & Mokrousov 1963; Wills & Napier-Munn 2006.)



KUVA 12. Partikkelikoon vaikutus vaahdotusnopeuteen. (Mukaiillen Wills 1997)



KUVA 13. Partikkelikoon vaikutus vaahdotuksen saantiin. (Mukaiillen Saramak & Mlynarczykowska & Krawczykowska 2014.)

Hienoaineksen vaahdotuksen tuloksen heikentäminen perustuu sen aktiivisuuteen ja sen muodostaman liejupeitteen muodostumisen vaahdotettavan mineraalin pinnalle ja ne estävät tai hidastavat vaahdotettavan mineraalipinnan ja ilmakuplan kiinnittymistä toisiinsa. Vaahdotusnopeus hidastuu, kun hienoainesta on häiritsevissä määrin, koska sen määrä samalla lisääntyy painoyksikköä kohti ja kuplan ja mineraalin välinen kontakti heikkenee. Hienoaineksen aktiivisuus saa myös aikaan sen, että ilmakuplan kyky nostaa karkeampia optimaalisia partikkelikokoja heikkenee, jolloin tulee saantitappiota. Reagensien kulutuksen kasvaessa myös vaahdotuksen kustannukset kasvavat. Hienoaines voi myös laskea rikasteen pitoisuutta ja vaikuttaa alentavasti suodatuksessa tapahtuvaan vedenpoistoon. (Klassen & Mokrousov 1963; Wills 2006)

Hienoaineksen määrä pyritään yleensä minimoimaan jauhatuksen avulla ja poistamalla hienoimmat partikkelit ennen vaahdotusta esimerkiksi hydrosyklonoinnin avulla. Hienoaines voidaan myös pyrkiä vaahdottamaan pois, jolloin sen aiheuttamat häiriöt eivät enää vaikuta vaahdotuspiirin muissa vaiheissa. Hienoaineksen vaahdotuksessa kuplakokoa täytyy pienentää, jotta pienten partikkelien ja ilmakuplien törmäykset ja niiden kiinnittyminen toisiinsa tehostuvat. Mikäli hienoainesta ei poisteta, pitää rikasteen saantitappiot hyväksyä. (Miettinen, Ralston & Fornasiero 2009.)

5 PYRIITTI

Pyriitti eli rikkikiisu (FeS_2) on maankuoren tavallisin sulfidimineraali, jota esiintyy arvokkaampien metallimineraalien yhteydessä. Pyriittiesiintymiä louhitaan niiden sisältämien arvometallipitoisuuksien takia. Tavallisesti pyriitti on pieninä kuutioina tai oktaedreinä tai massamaisena muiden sulfidien yhteydessä massiivisissa sulfidimalmeissa ja hydrotermisissä sulfidijuonissa. Pyriitti on messinginkeltaista ja metallinhohtavaa. Yksittäinen pyriittimolekyylä muodostuu yhdestä rauta-atomista ja kahdesta rikkiatomista. Pyriitti on reaktiivinen mineraali, joka muodostaa veden ja hapen kanssa ympäristölle haitallista hapanta kaivosvettä. (Karhunen 1994; Evangelou 1995.)

Pyriittirikastetta käytetään rikkihapon valmistukseen, mistä puolet käytetään lannoitteiden valmistamiseen ja loput metalli- ja kemianteollisuudessa. Pyriitin sisältämä rauta voidaan käyttää raaka-aineena raudan, sementin tai rakennustarvikkeiden valmistuksessa. Pyriitin teoreettinen rikkipitoisuus on 53.3 % ja rautapitoisuus 46.5 %. Pyhäsalmen pyriitin rikkipitoisuus on keskimäärin 52 %. (Huuskonen & Karjalainen & Pekkala 2008.)

6 PYRIITINVAHDOTUS

Pyhäsalmen kaivoksen rikastamolta pyriittirikastetta toimitetaan sekä kotimaahan että ulkomaille yleensä rikkihapon valmistuksen raaka-aineiksi. Markkinoiden rajallisuuden vuoksi pyriittiä on vaahdotettu usein vain osan vuotta. Kun pyriitinvaahdotus on ollut ohitettuna, pyriittipitoinen rikastushiekka on johdettu omalle pyriittipitoiselle altaalle, josta se voidaan tarpeen vaatiessa ottaa myöhemmin mukaan pyriitinvaahdotukseen. (Huuskonen ym. 2008.)

Pyhäsalmen rikastamon pyriitinvaahdotusprosessiin kuuluvat valmennus, esivaahdotus, ripevaahdotus, kertausvaahdotus ja jakovaahdotus. Sinkkivaahdotuksen jäte syklonoidaan ja syklonien alite pumpataan kahteen valmentimeen. Valmentimiin lisätään rikkihappoa, jolla lietteen pH saadaan laskettua n. 12:sta n. 5:een. Lisäksi valmentimiin syötetään kokoojakemikaalia, ksantaattia. Valmennuksen jälkeen liete syötetään kahteen esivaahdotuskennoon. Sinkin jätesyklonien ylite pumpataan sakeuttimeen. Sakeuttimessa selkeytynyt ylitevesi pumpataan takaisin prosessin alkuun myllyille. Tällä vedenkierrätyksellä vähennetään tuoreveden ja kemikaalien tarvetta. Osa sakeuttimen alitteesta pumpataan pyriitinvaahdotuksen valmentimiin. Esivaahdotuksen rikaste pumpataan neljään kertausvaahdotuskennoon ja esivaahdotuksen jäte syötetään kahteen ripevaahdotuskennoon. Riperikaste pumpataan myös kertausvaahdotukseen ja ripekennojen jäte pumpataan rikastehiekka-altaille. Kertausvaahdotuksen rikaste ohjataan jakovaahdotuskennoihin, joissa pyriittirikaste jaetaan kahdeksi erilaatuiseksi rikasteeksi SR1 ja SR2. Jakovaahdotuskennojen rikaste, SR1 on hieman parempilaatuista ja se suodatetaan hieman kuivemmaksi ulkomaan markkinoita varten. SR2 on jakovaahdotuskennojen jäte, joka suodatetaan keraamisilla suodatimilla kotimaan markkinoille. Kertausvaahdotuksen jäte pumpataan jätteeseen. Osa eri vaahdotusvaiheiden jätteistä pumpataan kovettuvan kaivostäytteen materiaaliksi. (Huuskonen ym. 2008.)

7 TUTKITTAVA MATERIAALI JA SEN HYÖDYNTÄMINEN

Tutkittava materiaali on peräisin Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-alueen pyriitin varastointiosasta. Varastotoitu pyriitti on peräisin Pyhäsalmen kaivoksen rikastamon prosessista, jolloin pyriitin tuotannossa on ollut katkoksia. Pyhäsalmen kaivoksen ympäristöluvan mukaan kyseinen varastoitu pyriitti joudutaan käsittelemään ja hyödyntämään ennen varsinaista rikastushiekka-alueen jälkikäsitteilyä ja maisemointia. Pyriitin käsittely on tarkoitus aloittaa maanalaisen tuotannon loputtua. Tuoreimman tiedon mukaan käsittely alkaa kesällä 2021 ja jatkuu vuoteen 2027. (Pyhäsalmen kaivos 2019; Tuikka 2020.)

Tutkittava materiaali on rikastushiekka-alueen B-altaan eteläosassa. B-allas jaettiin kahtia talvella 2013–2014 jolloin pohjoisosasta tuli lopullisen rikastehiekan varastoallas. Lopullisia rikastehiekan varastoaltaita on yhteensä kolme kappaletta A-, D- ja B-altaan pohjoisosassa. Näistä altaista A on jo maisemoitu. Lopullisen rikastehiekan altaissa ei ole hyödynnettäviä mineraalipitoisuuksia. Kuvassa 14 on ilmakehu Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-altaista. B-altaan eteläosassa pyriittiä on karkean arvion mukaan 2 Mt. Tästä määrästä noin 80 % sisältää pääasiassa pyriittiä ja muita sulfidimineraaleja. (Koffert 2017; Koffert 2020.)



KUVA 14. Kaivoksen rikastushiekka-alue (mukaillen Koffert 2017)

B-altaan pyriitin varastointiosan hyödyntäminen on tarkoitus aloittaa kesällä 2020. Tavoitteena on tuottaa noin 300 000 tonnia pyriittiä. Kaikki tuotettava rikaste myydään Yaralle Siilinjärvelle. Rikasteen rikkipitoisuustavoite on vähintään 50.3 % ja vaahdotuksen saannin tavoite 89 %, jotta kokonaissaanti olisi noin 80 %. Rikastehiekka-alueen pyriitin varastointiosan hienoainemäärä vaihtelee suuresti altaan eri osissa ja sen hyödyntäminen on suunniteltu siten, että paljon hienoainesta sisältävää materiaalia sekoitetaan parempaan materiaaliin, jotta hienoainesta ei tule itse vaahdotusprosessiin häiritsevissä määrin. Paremman materiaalin ja paljon hienoainesta sisältävän materiaalin sekoittamisella on tarkoitus saada tehokkaasti hyödynnettyä myös se materiaali, jossa on paljon hienoainesta ja säästää vaahdotuksen kemikaalikustannuksissa sekä mahdollistaa hyvä rikasteen suodatustulos. (Tuikka 2020)

8 TUTKIMUKSEN MENETELMÄT JA AINEISTOT

Tutkimuksen tavoitteena on tutkia hienoaineksen määrän vaikutusta Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-alueen varastointiosan pyriitin saantiin vaahdotuksessa. Tavoitteena on tutkia kuinka paljon hienoainesta saa olla vaahdotettavassa pyriitissä mukana, jotta vaahdotuksen saanti olisi tavoitellun 89 % mukainen. Tutkimuksen tavoitteena on myös saada tulos kuinka paljon hienoainesta saa olla mukana ennen kuin se rupeaa häiritsemään vaahdotuksen tuloksia.

Kokeellinen osuus suoritettiin Pyhäsalmen kaivoksen laboratorion koevaahdotushuoneessa. Koevälineinä käytettiin kuvassa 15 näkyvää koevaahdotuskennoa, laitteistoa ja kemikaaleja. Vaahdotuskemikaaleina käytettiin samoja kemikaaleja kuin Pyhäsalmen kaivoksen pyriitin vaahdotuksessa tällä hetkellä käytetään. Kokoojana oli natriumisobutylyliksantaatti ja vaahdotteena Dowfroth 250. pH:n säätöön käytettiin tarvittaessa väkevää rikkihappoa.



KUVA 15. Vaahdotuskokeissa käytetyt välineistöt ja kemikaalit.

Vaahdotuskokeissa vaahdotettava materiaali lietettiin veteen ja se hierrevalmennettiin koevaahdotuskennossa. Hierrevalmennuksessa materiaalin mahdolliset kovettumat hienonnetaan vaahdotettavaan muotoon. Hierrevalmennuksen avulla oli myös tarkoitus puhdistaa vaahdotettavien mineraalien pintoja. Hierrevalmennuksen jälkeen, ensimmäisessä kokeellisessa osuudessa hienoainesta poistettiin kuvassa 16 näkyvän lapon avulla. Koevaahdotuskennoon merkattiin asteikko, jonka avulla lappo saatiin laskettua haluttuun syvyyteen. Hienoaineksen laskeutumisnopeus määritettiin Stokesin yhtälöllä, kaava 4.

$$v = \frac{gd^2(P_p - P_m)}{18\mu} \quad (4)$$

jossa g on putoamiskiihtyvyyys, d on partikkelin halkaisija, P_p on hiukkasen tiheys, P_m on väliaineen tiheys ja μ on väliaineen viskositeetti.



KUVA 16. Hienoaineksen poistoon rakennettu lappo ja mitta-asteikko.

Hienoaineksen poiston jälkeen vaahdotuskemikaalit lisättiin ja vaahdotettavaa materiaalia valmistettiin, jonka jälkeen vaahdotus aloitettiin. Vaahdotuskokeista otettiin talteen poistettu hienoaines, rikaste ja jäte. Talteen otetut materiaalit suodatettiin ja kuivattiin Pyhäsalmen kaivoksen laboratoriossa. Analyysit tehtiin laboratoriossa.

Tutkittava materiaali valikoitu työnantajan toiveesta b-altaalta paikasta, jota on jo yritetty vaahdottaa, ja siinä on 40 % alle 20 μm partikkelikokoa. Materiaalia kokeiltiin vaahdottaa sen soveltuvuuden varmistamiseksi, ja siinä huomattiin, että hienoainesta on niin paljon, että vaahdottaminen ei ilman pienten partikkelikokojen poistoa onnistu hyvin. Tarkoituksena oli poistaa ensin 15 μm pienempiä partikkeleja ja tehdä vaahdotuskokeet. Tämän jälkeen suunnitelmana oli poistaa alle 20 μm :n ja sitä pienempiä koluokkia.

9 VAAHDOTUSKOKEET HIENOAINESTA POISTAEN

Ensimmäiseksi suoritettiin vaahdotuskoe, jossa hienoainesta ei poistettu lainkaan. Tämän jälkeen tehtiin yhteensä neljä vaahdotuskoetta, joissa yritettiin poistaa edellistä vaahdotuskoetta enemmän hienoainesta.

9.1 Vaahdotuskoe 1

Ensimmäisessä koevaahdotuksessa materiaalia oli 650 g ja se lietettiin 650 g:aan vettä. Hienoainesta tässä kokeessa ei poistettu, vaan lietteelle tehtiin 10 minuutin hierrevalmennus, jonka jälkeen lisättiin kemikaalit. pH:ta tarkkailtiin koko kokeen valmennuksen ajan. Valmennuksen alussa pH oli 4.6 ja valmennuksen jälkeen pH oli 5.38. Valmennuksen jälkeen lisättiin ksantaattia 11.4 ml ja vaahdotetta 0.26 ml. Tämän jälkeen lietettä valmennettiin vielä 5 minuuttia, jonka jälkeen vaahdotus aloitettiin. Tämän valmennuksen aikana pH saavutti arvon 5.64. Tällaisenaan vaahdotettuna materiaali vaahdottui hitaasti ja oli todella liejupeitteisen näköinen. Hetken aikaa vaahdottuaan, vaahto muuttui paremman näköiseksi. Rikaste ja jäte suodatettiin ja analysoitiin rikastamon laboratoriossa. Rikaste suodattui todella hitaasti. Rikastetta tuli yhteensä 419 g ja S-pitoisuus oli 45.7 %. Jätettä tuli 206.5 g ja sen S-pitoisuus oli 19.5 %. Saanniksi muodostui 83.4 %

9.2 Vaahdotuskoe 2

Toisessa vaahdotuskokeessa tarkoitus oli poistaa alle 20 µm kokoluokkia. 1.5 cm:n matkalle määritettiin laskeutumisaika alle 20 µm kokoluokalle vallitsevissa olosuhteissa. Vaahdotettavaa materiaalia oli 650 grammaa ja se lietettiin 650 grammaan vettä. Materiaalia hierrevalmennettiin 10 minuuttia, jonka jälkeen laskeutumisnopeus määritettiin, lietteen lämpötilan ollessa 26 °C. Oletettua hienoainesta poistettiin 1.5 cm matkalta vaahdotuskennosta ja vettä lisättiin saman verran tilalle. Tämän jälkeen hienoaineksen poisto ja veden lisäys toistettiin. Poistettu hienoaines suodatettiin ja punnittiin.

Hienoaineksen poiston jälkeen pH mitattiin ja vaahdotusreagenssit lisättiin. Ksantaattia lisättiin 11.4 ml ja vaahdotetta 0.26 ml. Lietettä valmennettiin 5 minuuttia, jonka jälkeen vaahdotus aloitettiin. pH oli

ennen vaahdotusta 5.85. Materiaali vaahdottui nopeammin, kuin ensimmäisessä kokeessa, mutta vaahtoaminen ei tapahtunut vieläkkään nopeasti. Vaahdotuksen jälkeen rikaste ja jäte suodatettiin, punnittiin ja analysoitiin laboratoriossa.

Hienoainesta poistettiin 97.7 g, ja rikastetta saatiin 348.7 g ja sen S-pitoisuus oli 47.7 %. Jätettä jäi 176.7 g, ja sen S-pitoisuus oli 16.7 %. Vaahdotuksen saannoksi laskettiin 85.2 %. Sekä rikaste, että saanto parani ensimmäiseen kokeeseen verrattuna.

9.3 Vaahdotuskoe 3

Edelliseen kokeen ja tulosten parantumisen perusteella hienoainesta päätettiin poistaa kaksi kertaa 3 cm matkan. Materiaalia oli 650 g ja se lietettiin 650 g vettä. Materiaalia hierrevalmennettiin 10 minuuttia ja lämpötilan ollessa valmennuksen jälkeen 27 °C, alle 20 µm partikkelikoon laskeutumisenopeus määritettiin 3 cm matkalla ja hienoainesta imettiin pois. Kennoon lisättiin vettä saman verran tilalle ja liete sekoitettiin. Lämpötila nousi 3 °C, joten laskeutumisenopeus määritettiin uudestaan ja hienoainesta poistettiin 3 cm matkalta, jonka jälkeen lisättiin vettä tilalle. Ksantaattia laitettiin 11.4 ml ja vaahdotetta 0.26 ml ja lietettä valmennettiin 5 minuuttia. pH nousi valmennuksen aikana yli tavoitteen. pH:n asettuessa arvoon 6.7, rikkihappoa lisättiin 0.25 ml, jolla saavutettiin pH-arvo 5.5 ja vaahdotus aloitettiin. Vaahtoaminen tapahtui huomattavasti nopeammin kuin aikaisemmin ja vaahto oli paremman näköistä. Poistettu hienoaines, rikaste sekä jäte suodatettiin, punnittiin ja analysoitiin laboratoriossa.

Rikastetta tuli 208.8 g ja sen S-pitoisuus oli 49.5 %. Jätteen paino oli 121.2 g, ja S-pitoisuus 18 %. Hienoainesta poistui yllättävän paljon 294,2 g. Poistetun hienoaineksen määrän vuoksi lietetiheys tippui vaahdotuksen kannalta liian alas 1.25 kg/l, jonka vuoksi saanto todennäköisesti jäi heikoksi 81.5 %. Rikasteen S-pitoisuus oli kuitenkin aikaisempia kokeita ja materiaalin lähtöpitoisuuteen verrattuna hyvä. Rikaste myös suodattui hyvin ja vesi poistui nopeasti.

9.4 Vaahdotuskoe 4

Edellisen vaahdotuskokeen hienoaineksen poistosta johtuneen lietetiheyden romahtamisen vuoksi kiintoaineksen määrää päätettiin lisätä, ja näin ollen lietetiheyttä nostettiin ennen hienoaineksen poistoa. Hienoainesta päätettiin poistaa samalta matkalta, kuin vaahdotuskoe 2 poistettiin. Materiaalia punnittiin 800 grammaa ja se lietettiin 500 grammaan vettä. Lietettä hierrevalmennettiin 10 minuuttia ja lämpötila

oli 30 °C, jonka perusteella alle 20 µm koon laskeutumisenopeus 1.5 cm matkalla määritettiin. Hienoaines poistettiin ja vettä lisättiin tilalle ja lietteen sekoituksen jälkeen hienoaineksen poisto ja veden lisäys toistettiin. Ksantaattia lisättiin 11.4 ml ja vaahdotetta 0.26 ml. Lietettä valmennettiin 5 minuuttia ja sen jälkeen pH oli 5.98. Rikkihappoa lisättiin 0.35 ml ja pH saatiin arvoon 5.68. Tämän jälkeen vaahdotus aloitettiin. Materiaali vaahdottui hyvin. Rikaste, jäte ja poistettu hienoaines suodatettiin, punnittiin ja analysoitiin laboratoriossa.

Edellisenä päivänä rikkoontuneen imukoneen takia hienoaineksen poistoon rakennettu lappo jouduttiin rakentamaan uudestaan. Lappo tehtiin vesihanaan liitettävästä imulaitteesta. Uuden lapon imuteho oli aikeisempaa kovempi, joten sen avulla imetyn hienoaineksen tarkka poistoraja ei ollut enää niin terävä ja liian suuria partikkeleita poistui lapon mukana. Hienoainesta poistui 268,4 grammaa. Rikastetta saatiin 365.4 grammaa ja rikasteen S-pitoisuus oli 47 %. Jätettä muodostui 133.9 grammaa ja sen S-pitoisuus oli 10.3 %. Saannoksi tuli 92.8 %, joka oli tähän mennessä paras saavutettu saanto.

9.5 Vaahdotuskoe 5

Koska edellisessä kokeessa hienoainesta poistaessa lietettä poistui paljon, hienoainesta päätettiin poistaa yhden kerran 1.5 cm matkalta. Lietetiheyttä päätettiin myös nostaa, koska kokeessa oli tarkoitus tavoitella aikaisemman vaahdotuskokeen kaltaista saantia. Vaahdotettava materiaali oli 845 grammaa ja se lietettiin 455 grammaa vettä. Materiaalia lietettiin 10 minuuttia, jonka jälkeen mitattiin lämpötilä ja määritettiin alle 20 µm kokoluokan laskeutumisenopeus. Hienoainesta poistettiin 1.5 cm matkalta ja vettä lisättiin saman verran tilalle. Ksantaattia laitettiin 11.4 ml ja vaahdotetta 0.26 ml. Lietettä valmennettiin 5 minuuttia ja pH mitattiin, joka oli 5.7. Rikkihappoa lisättiin hieman, jolloin saavutettiin tavoite pH-alue. Vaahdotus aloitettiin ja havaittiin, että materiaali vaahdottui nopeasti ja rikastetta muodostui hyvin. Rikaste ja jäte suodatettiin ja analysoitiin laboratoriossa.

Rikastetta tuli 454.3 grammaa ja jätettä 202.4 grammaa. Laboratorio analysoi rikasteelle S-pitoisuudeksi 46.4 % ja jätteen S-pitoisuus oli 16.2 %. Saannoksi muodostui 87 %.

10 TULOKSET HIENOAINESTA POISTAEN

Tulokset hienoainesta lapolla imien eivät olleet tasalaatuisia, mutta jokseenkin suuntaa antavia. Tasalaatuisen hienoaineksen poiston uupuminen selittyy todennäköisesti sillä, että partikkelit eivät olleet pallomaisessa muodossa vaan ne saattoivat olla myös esimerkiksi lehtimäisessä muodossa, jolloin stokesin kaavalla määritetty laskeutumisnopeus ei päde. Myös lapon kova imuteho oli todennäköisesti liian kova ja suurempia partikkeleita poistui hienoaineksen mukana.

Hienoainesta saatiin kuitenkin poistettua ja ensimmäiseen vaahdotukseen verrattaessa nähtiin, että vaahdotuksen saanti paranee, kun hienoainesta poistetaan. Vaahdotuskokeissa ei saavutettu sellaista rikasteen rikki-pitoisuutta tai vaahdotuksen saantia, joita Pyhäsalmen kaivos tavoittelee B-altaan materiaalia vaahdottaessa.

Tutkimusta päätettiin lähestyä toisesta suunnasta ja hienoaineksen vaikutusta pyrittiin saantiin päätettiin tutkia lisäämällä hienoainesta vaiheittain vaahdotettavaan materiaaliin.

11 VAAHDOTUSKOKEET HIENOAINESTA LISÄTEN

Tutkittava materiaali vaihtui toiseen B-altaasta haettuun pyyritti pitoiseen materiaaliin. Tässä materiaalissa hienoainesta oli valmiiksi 25 % alle 38 µm kokoluokkaa ja alle 20 µm koluokkaa oli 9.1 %. Hienoaineksen vaikutusta päätettiin tutkita siten, että hienoainesta lisättiin vaahdotettavaan materiaaliin prosentuaalisesti enemmän lisää, kunnes hienoaines alkaa selvästi haittaamaan vaahdotusta. Lisättävänä hienoaineksena käytettiin aikaisemmissa vaahdotuskokeissa käytettyä materiaalia. Tästä materiaalista seulottiin alle 38 µm kokoluokkaa lisättäväksi hienoainekseksi. Vaahdotuskokeissa käytettiin samoja kemikaaleja kuin aikaisemmissakin kokeissa. Myös kemikaaliannostus pidettiin samana. Tutkittava materiaali päätettiin vaahdottaa joka kokeessa pH-alueella 5.4, jotta saatu tulos olisi helposti toistettavissa.

11.1 Vaahdotuskoe 6

Ensimmäisessä uuden suunnitelman mukaisessa vaahdotuskokeessa, hienoainesta ei lisätty joukkoon, vaan ensimmäisenä materiaalia vaahdotettiin siten, että siinä oli valmiina sen sisältämä 25 % alle 38 µm kokoluokkaa josta 9.1 % oli laskennallisesti alle 20 µm kokoluokkaa. Materiaalia punnittiin 650 grammaa ja materiaali lietettiin 650 grammaan vettä. Materiaalia hierrevalmennettiin 10 minuuttia. Hierrevalmennuksen jälkeen lisättiin 11.4 ml ksantaattia ja 0.26 ml vaahdotetta. Materiaalia valmennettiin kemikaalien lisäyksen jälkeen 5 minuuttia ja pH:ta mitattiin jatkuvasti. pH asettui alueelle 5.8, jonka jälkeen lisättiin hieman rikkihappoa ja pH saavutti tavoite alueen 5.4, jonka jälkeen vaahdotus aloitettiin. Materiaali vaahdottui huomattavasti paremmin mitä aikaisemmissa kokeissa. Vaahdotuksen jälkeen rikaste ja jäljelle jäänyt jäte suodatettiin ja analyysit tehtiin laboratorion toimesta. Rikaste suodattui todella hyvin.

Rikastetta saatiin vaahdotuksessa 485 grammaa ja jätettä jäi 154 grammaa. Rikasteen S-pitoisuus oli 50.7 % ja jätteen 12.9 %. Vaahdotuksen saannoksi muodostui 94.7 %.

11.2 Vaahdotuskoe 7

Tässä vaahdotuskokeessa materiaalia vaahdotettiin siten, että 650 grammasta alle 38 µm kokoluokkaa oli joukossa 40 % josta alle 20 µm kokoluokkaa oli laskennallisesti 14 %. Materiaalia punnittiin 552.5 grammaa ja joukkoon lisättiin seulomaamme hienoainesta 97.5 grammaa. Eli materiaalia oli yhteensä

650 grammaa. Materiaali lietettiin 650 grammaan vettä, jonka jälkeen materiaalia hierrevalmennettiin 10 minuuttia. Hierrevalmennuksen jälkeen lisättiin 11.4 ml ksantaattia ja 0.26 ml vaahdotetta. Materiaalia valmennettiin kemikaalien kanssa 5 minuuttia. pH nousi valmennuksen aikana 5.7, joten rikkihappoa lisättiin, kunnes pH saatiin tavoite alueelle 5.4. pH säädön jälkeen vaahdotus aloitettiin. Materiaali vaahdottui edelleen hyvin. Rikaste ja jäte suodatettiin, jonka jälkeen ne analysoitiin laboratoriossa.

Rikastetta saatiin 476 grammaa ja sen S-pitoisuus oli 50.1 %. Jätettä jäi 158 grammaa ja sen S-pitoisuus oli 12.8 %. Vaahdotuksen saannoksi muodostui 94.3 %.

11.3 Vaahdotuskoe 8

Tässä vaahdotuskokeessa vaahdotettiin materiaalia siten, että punnittavasta 650 grammasta alle 38 µm kokoluokkaa oli lietteessä 50 % josta alle 20 µm kokoluokkaa oli laskennallisesti 17.3 %. Materiaalia punnittiin 487.5 grammaa ja siihen lisättiin 162.5 grammaa seulottua hienoainesta. Materiaali lietettiin 650 grammaan vettä ja hierrevalmennettiin 10 minuuttia. Hierrevalmennuksen jälkeen lisättiin ksantaattia 11.4 ml ja vaahdotetta 0.26 ml. Materiaalia valmennettiin kemikaalien kanssa 5 minuuttia pH:ta samalla tarkkaillen. pH nousi valmennuksessa arvoon 5.8 ja rikkihappo lisäyksen jälkeen, pH saatiin tavoite alueelle 5.4. Aloitimme vaahdotuksen, jonka jälkeen saatu rikaste ja jäljelle jäänyt jäte suodatettiin ja toimitettiin laboratorioon analyyseja varten.

Rikastetta saatiin 477 grammaa ja jätettä jäi jäljelle 161 grammaa. Rikasteen S-pitoisuus oli 50.1 % ja jätteen S-pitoisuudeksi tuli 14.3 %. Vaahdotuksen saannoksi muodostui 92.9 %.

11.4 Vaahdotuskoe 9

Tässä vaahdotuskokeessa materiaalia vaahdotettiin siten, että siinä oli 60 % alle 38 µm kokoluokkaa mukana, josta 20.5 % oli alle 20 µm kokoluokkaa. Materiaali punnittiin 422.5 grammaa ja siihen lisättiin seulottua hienoainesta 227.5 grammaa. Materiaali lietettiin 650 grammaan vettä ja hierrevalmennettiin 10 minuuttia. 11.4 ml ksantaattia ja 0.26 ml vaahdotetta lisättiin hierrevalmennuksen jälkeen. Kemikaalien annostelun jälkeen materiaalia valmennettiin 5 minuuttia. Valmennuksen aikana pH nousi 5.75, jo-

ten pH 5.4 tavoitealueen saavuttamiseksi lisättiin hieman rikkihappoa. pH:n ollessa tavoitealueella vaahdotus aloitettiin. Vaahdotuksessa saatu rikaste ja jäljelle jäänyt jäte suodatettiin ja toimitettiin laboratorioon analysoitavaksi.

Tässä koevaahdotuksessa rikastetta saatiin 464 grammaa ja sen S-pitoisuus oli 49.7 %. Jätettä jäi jäljelle 174 grammaa ja sen S-pitoisuus oli 16.2 %. Vaahdotuksen saannoksi muodostui 91.0 %.

11.5 Vaahdotuskoe 10

Tässä vaahdotuskokeessa materiaalia vaahdotettiin siten, että materiaalissa oli 70 % alle 38 μm kokoluokkaa, josta laskennallisesti alle 20 μm kokoluokkaa oli 23.8 %. Vaahdotettavaa materiaalia punnittiin 357.5 grammaa ja siihen lisättiin seulottua hienoainesta 292.5 grammaa. Materiaali lietettiin 650 grammaan vettä, jonka jälkeen materiaalia hierrevalmennettiin 10 minuuttia. Hierrevalmennuksen jälkeen lietteeseen annosteltiin 11.4 ml ksantaattia ja 0.26 ml vaahdotetta, jonka jälkeen lietettä valmennettiin 5 minuuttia. pH nousi valmennuksen aikana tasolle 5.7, joten rikkihappoa lisättiin ja pH saatiin tavoitealueelle 5.4. Materiaali vaahdotettiin ja siitä saatu rikaste ja jäljelle jäänyt jäte suodatettiin, jonka jälkeen ne analysoitiin laboratoriossa.

Rikastetta saatiin tässä vaahdotuksessa 423 grammaa ja S-pitoisuuden ollessa 49.7 %. Jätettä jäi 220 grammaa ja S-pitoisuus jätteessä oli 20.8 %. Vaahdotuksen saanto oli 85.4 %, joten selvä saannon lasku verrattuna aikaisempiin tuloksiin oli havaittavissa, eikä kokeiden jatkamiselle ollut tarvetta. Kuvissa 15–17 koevaahdotuskuvia suoritetuista tutkimuksista.



KUVA 15. Vaahdon muodostumista



KUVA 16. Vaahtoaminen



KUVA 17. Vaahdon kaapimista kippoon.

12 TULOKSET HIENOAINESTA LISÄTEN

Hienoainesta lisäämällä materiaaliin, joka ei itsessään sisältänyt paljon hienoainesta saatiin selvä tulos siitä, miten liallinen hienoaines vaikuttaa pyriitin saantiin. Materiaalin, johon hienoainesta alettiin lisäämään, rikkipitoisuus oli 43.9 % ja viimeisessä kokeessa lietteen rikkipitoisuus oli 41.3 %. Vaahdotuksen kannalta rikkipitoisuudessa ei tapahtunut merkittävää muutosta. Taulukossa 1 on esitettyä vaahdotuskokeiden 6–10 tulokset.

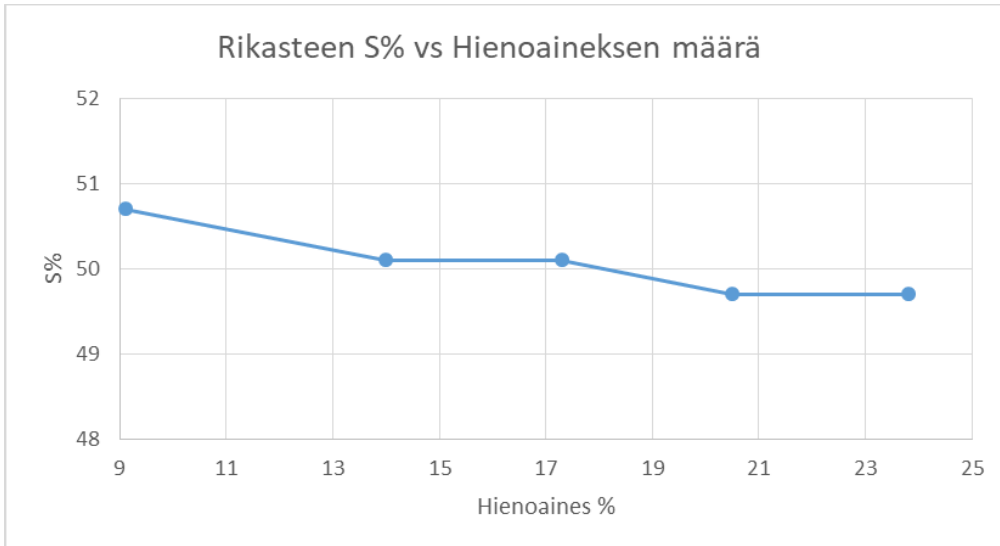
TAULUKKO 1. Tulokset hienoainesta lisäten.

koe	6	7	8	9	10
Lähtö S%	43.9	43	42.5	41.9	41.3
materiaali /g	650	650	650	650	650
rikaste/g	485	476	477	464	423
jäte/g	154	158	161	174	220
- 20µm/%	9.1	14	17.3	20.5	23.8
Rikasteen S%	50.7	50.1	50.1	49.7	49.7
Jätteen S%	12.9	12.8	14.3	16.2	20.8
vaahdotuksen saanti%	94.7	94.3	92.9	91.0	85.4

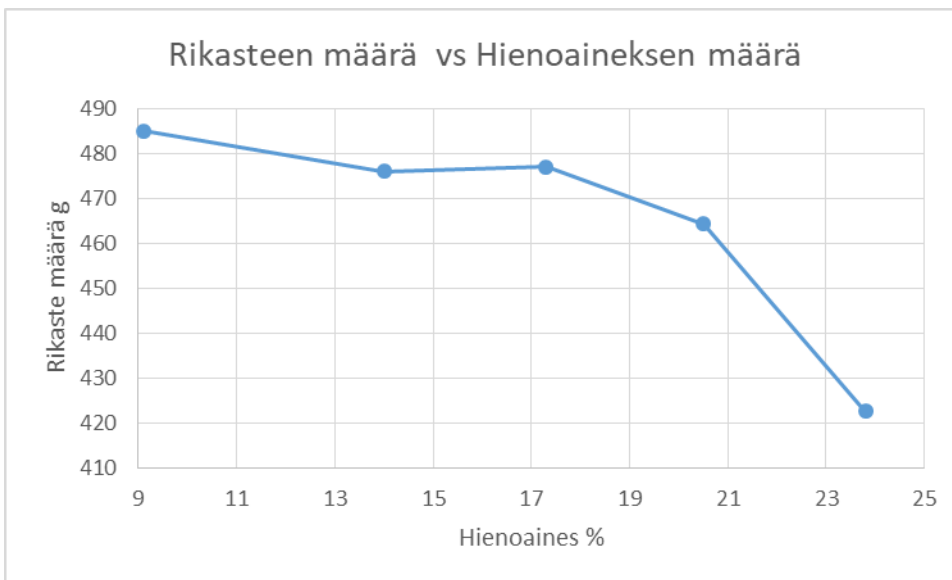
Ensimmäisissä vaahdotuksissa, joissa vaahdotettava materiaali sisälsi alle 20 µm partikkelikokoa alle 10 %, ei ollut havaittavissa silmämääräisesti ongelmia vaahdottamisen suhteen ja vaahdottuminen tapahtui nopeasti. Tämän verran hienoainesta sisältävästä materiaalista vaahdotettu rikaste suodattui myös hyvin. Yli 20 % hienoainesta sisältävässä materiaalin vaahdotuksessa oli havaittavissa selvästi liejupeite vaahdotatjassa, eikä materiaali vaahdonnut enää niin hyvin kuin vaahdotuksissa, joissa hienoainesta oli vähemmän. Rikasteen suodattuminen oli myös hitaampaa, kun materiaali sisälsi yli 17 % hienoainesta. Yli 20 % hienoainesta sisältävässä materiaalin vaahdotuksessa oli jo selvästi hankaluuksia juoksevan vaahdotatjan muodostumisessa ja rikasteen saamiseksi liejupeite piti kaapia käsin.

Vaahdotuskokeissa saadun rikasteen rikkipitoisuudet on esitetty kuvaajassa 1. Kuvaajasta voi havaita, kuinka rikasteen rikkipitoisuus tippui, kun hienoainesta lisättiin. Rikasteen rikkipitoisuus pysyi kuitenkin yli 50 % kun hienoainesta oli noin 9–17 %. Hienoaineksen määrän ollessa 17.3–23.8 % ei rikasteen rikkipitoisuudessa ollut eroa. Vaahdotuksissa, joissa hienoainesta oli yli 20 %, rikasteen rikkipitoisuus tippui alle 50 %. Rikkipitoisuudella on suuri merkitys saantiin. Vaahdotuskokeissa saadun rikasteen määrää verrattaessa hienoaineksen määrään voidaan nähdä selvästi, kuinka hienoaineksen määrän kasvu

vähentää vaahdotuksessa saatavan rikasteen määrää. Rikastemäärä suhteessa hienoaineksen määrään on esitettyä kuvaajassa 2.



KUVAAJA 1. Rikasteen rikkipitoisuus suhteessa hienoaineksen määrään.



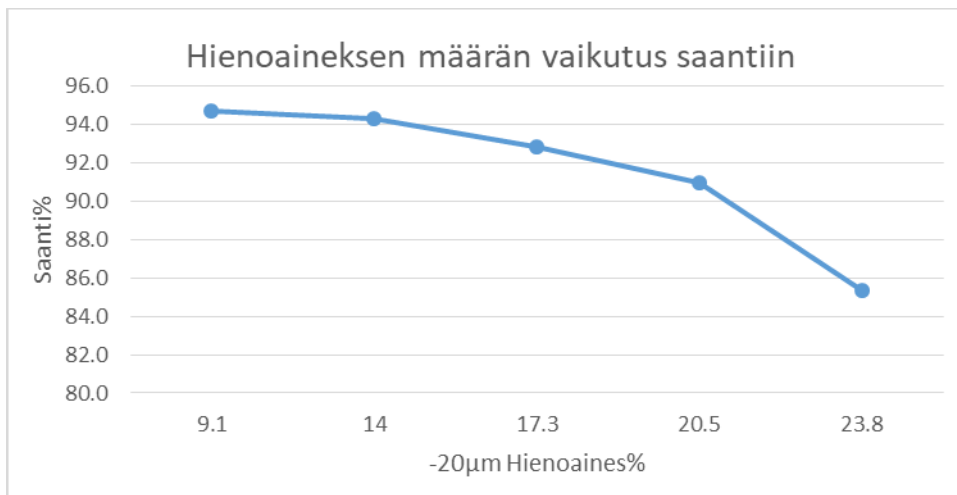
KUVAAJA 2. Saadun rikasteen määrä suhteessa hienoaineksen määrään.

Tutkimuksen kohteena ollut hienoaineksen vaikutus pyriitin saantiin oli selkeä. Vaahdotettavan materiaalin hienoaineksen määrän ollessa 20.5 % tai vähemmän saanti pysyi yli 90 %, jota voidaan pitää hyvänä vaahdotuksen saantina. Saanti huononi asteittain, kun vaahdotettava materiaali sisälsi enemmän

hienoainesta. Materiaalin hienoaineksen määrän noustessa yli 20.5 % saanti lähti laskemaan suhteellisen nopeasti. Vaahdottaessa materiaalia, kun hienoainesta oli 20.5 %, vaahdotuksen saanniksi muodostui 91 %. Hienoaineksen määrän ollessa 23.8 % saanti tippui yli 9 % verrattuna saantiin, kun materiaali sisälsi noin 9 % hienoainesta. Vaahdotuksen saanti on laskettu kaavalla 5.

$$\frac{c(f-t)}{f(c-t)} \times 100\% \quad (5)$$

jossa, c on rikasteen rikkipitoisuus, f on lähtötilanteen lietteen rikkipitoisuus ja t on jätteen rikkipitoisuus. Kuvaajasta 3 voi havaita, kuinka vaahdotuksen saanti alkaa pienetä, kun hienoaineksen määrä lisääntyy vaahdotettavassa materiaalissa.



KUVAAJA 3. Pyriitin vaahdotuksen saanti suhteessa hienoaineksen määrään.

13 TULOSTEN YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli tutkia miten hienoaines vaikuttaa pyriitin saantiin. Saatua tulosta Pyhäsalmi Mine Oy voi hyödyntää, kun pyriitin tuotanto rikastushiekka-altailta käynnistyy syksyllä 2021. Koevaahdotuksia tehtiin yhteensä 10 kappaletta, joissa tutkittiin, miten hienoaines vaikuttaa pyriitin saantiin. Ensimmäiset viisi koevaahdotusta tehtiin materiaalille, joka sisälsi 40 % alle 20 µm kokoluokan hienoainesta. Viidessä ensimmäisessä kokeessa oli tarkoitus poistaa lapon avulla hienoainesta, kun ensin oli määritetty poistettavan hienoainespartikkelien laskeutumisnopeus. Huomattiin, että lapon avulla hienoaineksen poisto ei ole luotettava tutkimusmenetelmä ja tulokset viiden ensimmäisen koevaahdotuksen välillä vaihtelivat. Toisessa koevaahdotuksessa havaittiin, että kun hienoainesta poistetaan, paranee samalla vaahdotustulos sekä visuaalisesti, että tuloksellisesti.

Kun hienoaineksen poisto ennen vaahdotusta ei käytössä olleilla välineillä onnistunut luotettavasti, päätettiin sekoittaa hienoainesta sitä vähemmän sisältävään materiaaliin. Tämä menetelmä myös tukisi sitä ajatusta, että pyriitin varastointiosan hyödyntämisessä paljon hienoainesta sisältävät osat on tarkoitus sekoittaa jossakin suhteessa parempaan materiaaliin.

Aikaisemmissa vaahdotuskokeissa käytetystä materiaalista seulottiin alle 38 µm kokoluokkaa, jota lisättiin asteittain materiaaliin, joka sisälsi vähemmän hienoainesta. Seulotusta materiaalista laskettiin sen sisältämä alle 20 µm hienoaineksen määrä. Havaittiin, että hienoaineksen määrän ollessa 20.5 % tai vähemmän, vaahdotustulos on tavoitteen mukainen. Näissä määrissä hienoaines ei vaikuttanut kovin merkittävästi lopputulokseen. Kun hienoaineksen määrä oli yli 20.5 %, saannoksi muodostui alle 89 %, joka on alle Pyhäsalmissa tulevan pyriitintuotannon vaahdotuksen saantitavoitteen.

14 JATKOTOIMENPIDE EHDOTUKSET

Koska tulos vaahdotuksen saannin heikentymisestä on selkeä, mikäli hienoainesta on vaahdotuksessa liikaa, ehdotetaan seuraavanlaisia ratkaisuja hienoaineksen heikentävien vaikutusten hallintaan. Materiaali, joka sisältää paljon hienoainesta on helppo sekoittaa parempaan materiaaliin jo B-altaalla esimerkiksi siinä vaiheessa, kun tavaraa kasataan kuivumaan. Kasausvaiheessa voitaisiin laskea, ettei hienoainesta pääse paremman materiaalin sekaan yli 20.5 %. Materiaalin sekoitus voidaan myös toteuttaa siinä vaiheessa, kun tavaraa lastataan kuorma-autoon tai vastaavaan millä varastoitu pyriitti tuodaan rikastamolle. Mikäli materiaali lietetään jauhinmyllyn avulla, hienoainesta voitaisiin lastata mukaan jopa alle 20.5 %, koska vaarana on liiallinen jauhaantuminen, jolloin hienoaineksen määrä saattaa kasvaa. Ennen varsinaista vaahdotusta hienoainesta voidaan poistaa nykyisen pyriitinvaahdotuksen laitteistolla. Vuonna 2021 alkavassa B-altaan pyriitintuotannossa voitaisiin käyttää nykyisinkin käytössä olevaa syklonipatteria, jolloin hienoainesta saataisiin varmasti poistettua ennen vaahdotusta.

Paljon hienoainesta sisältämää materiaalia ei kannata syöttää prosessiin yksistään, koska silloin vaarana on vaahdotustuloksen heikentyminen, kemikaalikustannusten nousu ja sykloinnin johdosta lietevirtausten heittäminen, koska hienoainesta poistuu paljon.

LÄHTEET

- Crozier, R.D. 1992. Flotation. Theory, reagents and ore testing. Iso-Britannia: BPC Wheatons Ltd.
- Evangelou, V.P. 1995. Pyrite Oxidation and Its Control. Boca Raton: CRC Press Inc.
- Göktepe, F. 2002. Effect of pH on pulp potential and sulphide mineral flotation. Teoksessa Turkish journal of engineering and environmental sciences. 309-318
- Hukki, R.T. 1964. Mineraalien hienonnus ja rikastus. Keuruu: Otava.
- Huuskonen, J., Karjalainen, H., Pekkala, T. 2008. Pyhäjärvi. Pyhäsalmi Mine Oy Rikastusprosessi. Ei saatavilla.
- Karhunen, P. 1994. Retkeilijän kiviopas. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy.
- Klassen, V.I., Mokrousov, V.A. 1963. An introduction to the theory of flotation. Lontoo: Butterworths.
- Koffert, M. 2017. Erikoistyö. B-altaan materiaalin kartoitus ja rikastuskokeet. Pyhäsalmi Mine Oy.
- Koffert, M. 2020. Henkilökohtainen tiedonanto. Sähköposti. 14.5.2020.
- Lukkarinen, T. 1987. Mineraalitekniikka. Osa 2, Mineraalien rikastus. Helsinki: Insinööritieto.
- Miettinen, T., Ralston, J., Fornasiero, D. 2009. The limits of fine particle flotation. 420-437. Saatavissa: doi: 10.1016/j.mineng.2009.12.006. Viitattu: 26.8.2020.
- Pekkala, T. 2018. Mekaaniset prosessit. Luentomateriaali.
- Pihkala, J. 2011. Prosessitekniikka. Prosessiteollisuuden yksikkö- ja tuotantoprosessit. Tampere: Juvenes Print.
- Pyhäsalmen kaivos, 2019. Rikastushiekka-alue. Pyhäsalmi Mine Oy.
- Saramak, D., Mlynarczykowska, A., Krawczykowska, A. 2014. Influence of a High-Pressure Comminution Technology on Concentrate Yields in Copper Ore Flotation Processes. 952-955. Saatavissa: doi: [10.2478/amm-2014-0160](https://doi.org/10.2478/amm-2014-0160). Viitattu: 26.8.2020.
- Tuikka, A. 2020. Henkilökohtainen tiedonanto. Sähköposti. 20.5.2020.
- Wills, B.A. 1997. Mineral processing technology. Kuudes painos. Oxford: Butterworth Heineman.
- Wills, B.A., Napier-Munn T (toim.). 2006. Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Seitsemäs painos. Oxford: Elsevier Ltd.

Liite 1. Koevaahdotuspöytäkirja.

Kokeiden suorittajat: Majava Olli-Pekka & Saku Rönkä

Lietetiheys 1,6 (50 m-%)

Tarkoitus: Hienoaineksen vaikutus pyriitin saantiin

Kenno 2L

2020

Näytetunnus	Reagenssit								paino		S %		Cu %	Zn %	Huomioita	
	S %	"Hierrevalmennus"	H ₂ SO ₄ (x määrä)	S/BX 1 % (g/f)	Dowfroth 1 % (g/f)	pH vaahdotuksen alkaessa	Valmennus min	Tuote	g	%	S %	%-g	Saanti	Cu %		Zn %
Testi 1: B-altaasta	36.5	15	x ml?	175	4		5	R1	411	63.2	48.2	30.5	83.5		0.075	
haettu näyte nro 5								J1	208	32.0	11.3	3.6	9.9			
								hävikk	31.0	4.8		2.4	6.6			
Koe 1	37.4	10	-	175	4	5.6	5	SR0	419	64.5	45.7	29.4	78.7	0.068	0.181	Vaahdotui hitaasti ja rikaste suodattui hitaasti
								SJ0	206.5	31.8	19.5	6.2	16.6			
								hävikk	24.5	3.8		1.8	4.7			
Koe 2	37.4	10		175	4	5.9	5	SR1	348.7	53.6	47.7	25.6	68.4	0.060	0.161	Poistettiin -20µm 1.5cm matkalta
								SJ1	176.7	27.2	16.7	4.5	12.1			vaahdotui paremmin kuin 1-koe
								hienoaine	97.7	15.0	35.8	5.4	14.4			
								hävikk	26.9	4.1		1.9	5.1			
Koe 3	37.4	10	x	175	4	5.50	5	SR2	208.8	32.1	49.5	15.9	42.5	0.052	0.127	Poistettiin -20µm 2x 3cm matkalta
								SJ2	121.2	18.6	18.0	3.4	9.0			Lietetiheys liian alhainen
								hienoaine	294.2	45.3	36.2	16.4	43.8			
								hävikk	25.8	4.0		1.8	4.7			
Koe 4	37.4	10	x	175	4	5.70	5	SR3	365.4	45.7	47.0	21.5	57.4			poistettiin -20µm 2x1.5 cm matkalta
								SJ3	133.9	16.7	10.3	1.7	4.6			
								hienoaine	268.6	33.6	37.1	12.5	33.3			
								hävikk	32.1	4.0		1.8	4.7			

Liite 2. Koevaahdotuspöytäkirja jatkoa.

Kokeiden suorittajat: Majava Olli-Pekka & Saku Rönkä

Lietetiheys 1,6 (50 m-%)

Tarkoitus: Hienoaineen vaikutus pyriitin saantiin

Kenno 2L

2020

Koe 5	37.4	10	x	175	4	5.70	5	SR4	454.3	53.8	46.4	24.9	66.7	0.145	poistettiin -20µm 1.5 cm matkalta
								SJ4	202.4	24.0	16.2	3.9	10.4		
								hienoaine	154.6	18.3	37.8	6.9	18.5		
								hävikk	33.7	4.0		1.7	4.4		
materiaali 2	43.9													0.082	
Hienoaines	38.1													0.157	+20 µm 24.7%, -20µm 33.5%, -10µm 41.8%
Koe 6	43.9	10	x	175	4	5.40	5	SR 2.0	485	74.6	50.7	37.8	86.2	0.075	-38µm 25% josta -20µm 9.1%
25% hienoainesta								SJ 2.0	154	23.7	12.9	3.1	7.0		
								hävikk	11	1.7		3.0	6.9		Rikaste suodattui todella hyvin
Koe 7	43.0		x	175	4	5.40	5	SR 2.1	476	73.2	50.1	36.7	85.3	0.101	hienoaines -20µm 14%
40% hienoainesta								SJ 2.1	158	24.3	12.8	3.1	7.2		
								hävikk	16	2.5		3.2	7.5		
Koe 8	42.5	10	x	175	4	5.40	5	SR 2.2	477	73.4	50.1	36.8	86.6	0.098	hienoaines -20µm 17.3%
50% hienoainesta								SJ 2.2	161	24.8	14.3	3.5	8.3		
								hävikk	12	1.8		2.1	5.0		
Koe 9	41.9	10	x	175	4	5.40	5	SR 2.3	464	71.4	49.7	35.5	84.8	0.093	-38µm 25% josta -20µm 20.5%
60% hienoainesta								SJ 2.3	174	26.7	16.2	4.3	10.3		
								hävikk	12	1.8		2.0	4.9		
Koe 10	41.3	10	x	175	4	5.40	5	SR 2.4	423	65.0	49.7	32.3	78.3	0.107	-38µm 25% josta -20µm 23.8%
70% hienoainesta								SJ 2.4	220	33.8	20.8	7.0	17.1		
								hävikk	7	1.1		1.9	4.7		