

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Kemiantekniikan koulutusohjelma
Prosessitekniikan pääaine
Erotustekniikan laboratorio

Maria Matveinen

**METALLIMALMIEN LOUHINNASTA SYNTYVIEN KIINTEIDEN JÄTTEIDEN
YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET**

Työn tarkastajat: Professori Antti Häkkinen
DI Riina Salmimies

Työn ohjaaja: DI Riina Salmimies

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	METALLIMALMIEN LOUHINTA MAAILMALLA	2
2.1	Louhintaprosessin aloitus	6
2.2	Malmin rikastusvaihe.....	8
2.2.1	Bayer-prosessi.....	9
2.2.2	Talvivaara	10
2.2.3	Kultakaivokset	11
2.3	Malmin jatkoprosessointi ja kaivoksen sulkeminen	12
3	KIINTEIDEN JÄTTEIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	13
3.1	Kiinteät jätteet Suomen kaivostoiminnassa	15
3.2	Muut metallimalmien louhinnasta aiheutuvat ympäristövaikutukset	19
4	KIINTEIDEN JÄTTEIDEN KÄSITTELY JA HYÖTYKÄYTTÖ	19
4.1	Bayer-prosessi.....	21
4.2	Talvivaara	22
4.3	Kultakaivokset	23
5	YHTEENVETO.....	25
6	LÄHTEET	26

1 JOHDANTO

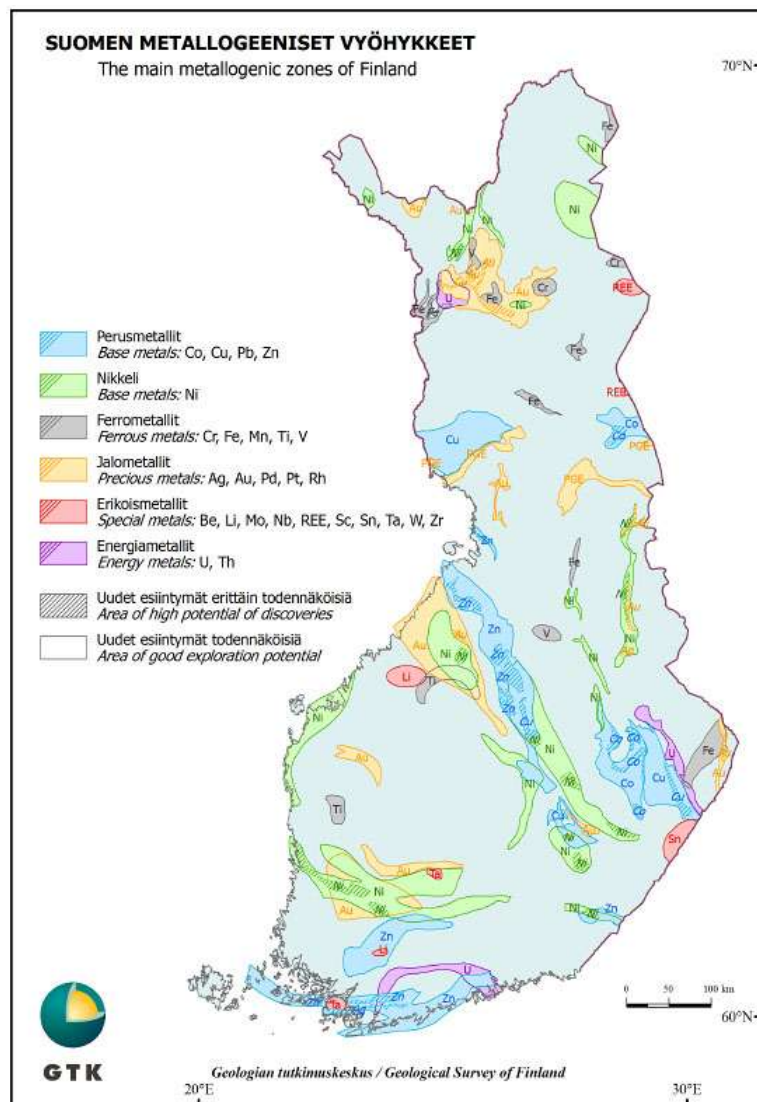
Suomessa viime aikoina tehdyt malmiesiintymälöydöt ovat osana kasvattamassa kaivosteollisuuden suosiota. Ulkomaiset yhtiöt investoivat miljardeja euroja Suomen malmikaivoksiin. Malmien kysyntä maailmalla on jatkuvassa nousussa, johtuen Aasian vähemmän kehittyneiden maiden nopeasta kehityksestä. Kasvavana huolena on vastuu ympäristöstä ja etenkin kaivostoiminnasta aiheutuneet ympäristövaikutukset.

Kaivostoiminnan ympäristövaikutuksia ovat muun muassa päästöt veteen ja ilmaan, melu ja tärinä sekä kiinteät jätteet. Kiinteitä jätteitä syntyy useassa eri prosessivaiheessa: poistomaata kaivoksen rakennusvaiheessa, sivukiveä malmin louhinnassa ja rikastushiekkaa malmin rikastusprosessissa. Mineraalien louhinnan jätemäärät lohkaisevat suuren osan maailmalla käsiteltävästä jätteestä, joten mineraalijätteiden käsittelyyn ja hyötykäyttöön tulisi kiinnittää huomiota.

Työn tarkoituksena on esitellä metallimalmien louhintaa ja louhinnasta syntyviä kiinteitä jätteitä kolmen esimerkin avulla. Työssä ei keskitytä jo paljon huomiota saaneisiin kaivosten nestemäisiin päästöihin. Kolmen esimerkin avulla työssä esitellään kaivoksen prosessivaiheissa syntyviä kiinteitä jätteitä sekä kiinteiden jätteiden käsittelyä ja hyötykäyttöä. Talvivaaran bioliuotusprosessilla esitellään uutta teknologiaa, alumiiniteollisuuden Bayer-prosessilla suuren mittakaavan prosessia sekä kultakaivoksilla pienen malmipitoisuuden omaavan esiintymän prosessointia.

2 METALLIMALMIEN LOUHINTA MAAILMALLA

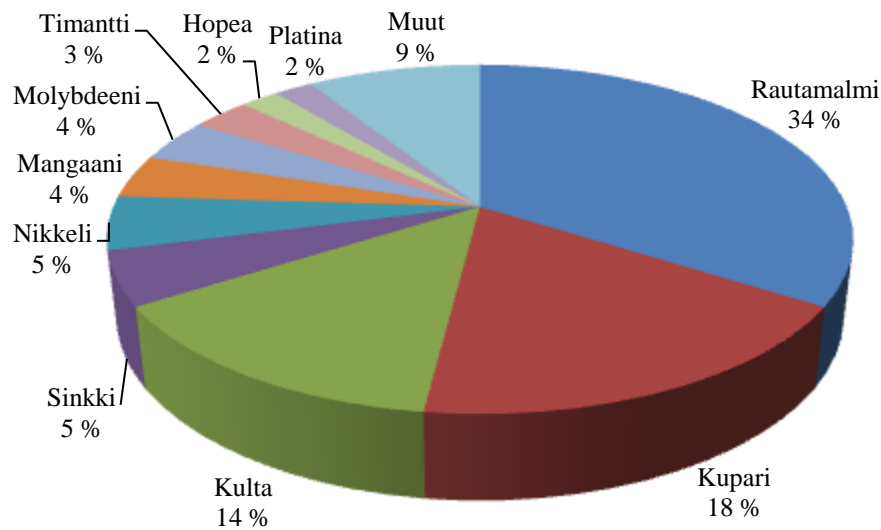
Metalleja tarvitaan päivittäin lukuisiin eri käyttötarkoituksiin. Metalleja valmistetaan malmeista rikastamalla kaivoksesta louhittu maa-aines ja jatkojalostamalla se metallurgisella tehtaalla metalliksi. Malmeja eli mineraaliesiintymiä, joiden mineraalipitoisuus on taloudellisesti riittävä louhittavaksi, on Suomen maaperässä monia. Eniten hyödynnetyt metalliset malmiesiintymät Suomessa ovat Hakapään ja Lappalaisen (2009) mukaan rauta-, kupari-, sinkki-, nikkeli-, kromi- ja kultaesiintymät. Suomessa on vielä paljon hyödyntämätöntä aluetta, jolla louhiminen olisi taloudellisesti kannattavaa. Kuvassa 1 on esitetty kaikki Suomen tämänhetkiset potentiaaliset metallimalmiesiintymät.



KUVA 1. Suomen potentiaaliset metallivyöhykkeet (Geologian tutkimuskeskus, 2010).

Edellä mainitut Suomessa eniten hyödynnetyt metalliset malmimineraalit ovat myös maailmanlaajuisesti taloudellisesti hallitsevimmat, joka on nähtävissä Kuvassa 2. Rautamalmin ei ole hinnaltaan kullan veroinen, mutta rautamalmin on suhteelliselta tuotannolliselta arvoltaan silti vaikuttavampi kuin kulta. Tämä johtuu raudan tuotantomäärästä. Taulukon I mukaan raudan

tuotantomäärä on suurin hallitsevista malmiesiintymistä maailmassa, ollen vuonna 2008 noin 2 188 miljoonaa tonnia. Tuotannolliselta arvoltaan toisena olevaa kuparia valmistetaan maailmalla 15,5 miljoonaa tonnia ja kolmantena olevaa kultaa noin 2 290 tonnia. Kultamalmia valmistetaan Brown *et al.* (2010) mukaan 92 valtiossa, kun taas rautamalmia valmistetaan noin 48 valtiossa. Maailmalta löytyvät rautamalmiesiintymät ovat suuria ja siksi valmistavia tahoja on vähemmän kuin kultamalmia valmistavia. Lisäksi rautamalmia ja kuparia tarvitaan suuria määriä esimerkiksi terästeollisuuteen ja elektroniikkateollisuuteen, josta johtuen rautamalmin ja kuparin suhteelliset tuotannolliset arvot ovat merkittäviä.



KUVA 2. Kaivosten malmiesiintymien suhteelliset tuotannolliset arvot (Ericsson, 2010).

TAULUKKO I Metallimalmien tuotantomäärä maailmassa vuonna 2008 (Brown *et al.*, 2010).

Malmiesiintymä	Kokonaistuotanto määrä v. 2008 /t	Hallitsevat maat ja Suomen osuus	Tuotantomäärä/t	Osuus kokonaistuotannosta/%
Rauta	2 188 000 000	Kiina	824 011 100	37,7
		Brasilia	368 800 000	16,9
		Australia	342 514 000	15,7
		Suomi*	2 942 946	0,3
Mangaani	41 800 000	Kiina	14 000 000	33,5
		Etelä-Afrikka	6 797 732	16,3
		Australia	4 838 000	11,6
		Gabon	3 250 000	7,8
		Brasilia	3 210 000	7,7
		Suomi	-**	-**
Kromi	23 300 000	Etelä-Afrikka	9 682 640	41,6
		Intia	3 771 000	16,2
		Kazakstan	3 551 700	15,2
		Suomi	614 000	2,6
Kupari	15 500 000	Chile	5 330 300	34,4
		USA	1 310 000	8,5
		Peru	1 267 867	8,2
		Kiina	1 022 500	6,6
		Suomi	13 300	0,1
Sinkki	11 700 000	Kiina	3 186 000	27,2
		Peru	1 602 597	13,7
		Australia	1 519 000	13,0
		Suomi	27 800	0,2
Nikkeli	1 531 000	Venäjä	277 000	18,1
		Kanada	259 588	17,0
		Australia	200 000	13,1
		Suomi	4 000	0,3
Molybdeeni	223 000	Kiina	81 000	36,3
		USA	61 400	27,5
		Suomi	-**	-**
Hopea	21 565	Peru	3 686	17,1
		Meksiko	3 236	15,0
		Kiina	2 800	13,0
		Australia	1 926	8,9
		Suomi	69,9	0,3
Kulta	2290	Kiina	285	12,4
		USA	234,6	10,2
		Australia	215	9,4
		Etelä-Afrikka	212,7	9,3
		Suomi	4,148	0,2

* Suomen raakauraudan tuotanto ja sen osuus raakauraudan kokonaistuotannosta.

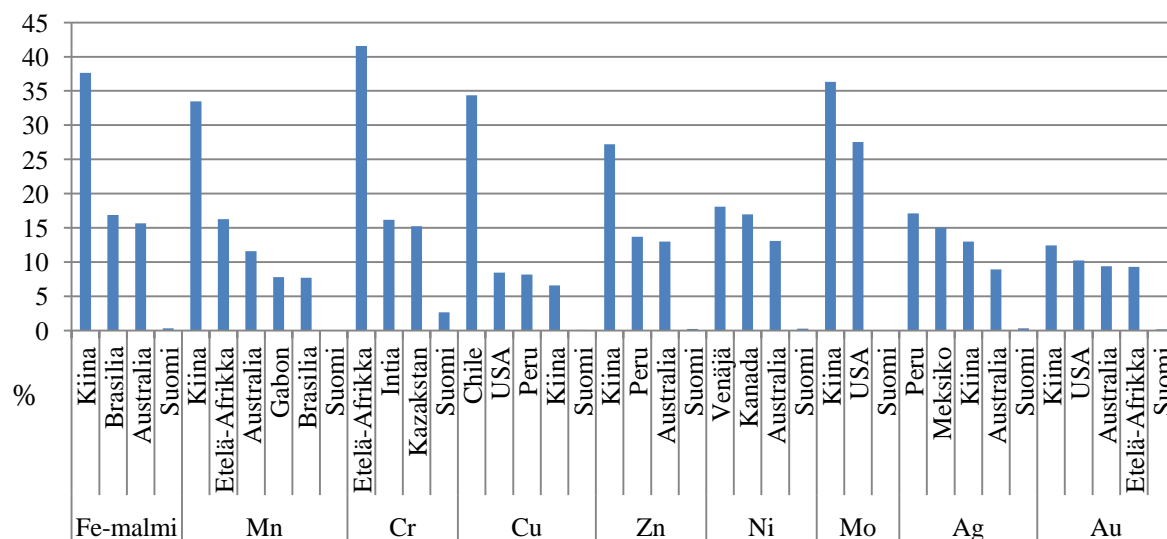
** Suomen tuotantomääriä ei ollut kirjallisuudesta löydettävissä.

Verrattaessa kokonaistuotantomääriä tuotannolliseen arvoon voidaan päätellä kullan olevan arvokkaampaa kuin esimerkiksi kuparin ja raudan. Elokuussa 2011 kulta on Kitcon (2011) tilastojen mukaan maksanut tonnia kohti lähes 52 miljoonaa yhdysvaltain dollaria, eli noin 41 000 €/kg. Kullan hinnan suuri ero muiden metallien hintoihin verrattuna on nähtävissä Taulukossa II. Vuoden 2008 talouskriisi on selkeästi nähtävissä kuparin, alumiinin, nikkelin ja sinkin hinnan alenemisessä vuoteen 2009. Hinnan nousu vuodesta 2009 nykypäivään johtuu muun muassa kasvaneesta elektroniikan kysynnästä ja tuotannosta. Hinnan nousuun vaikuttaa myös talouskriisin heikomman tuotannon aikana syntyneet uudet kaivokset ja uudet löytyneet malmiesiintymät.

TAULUKKO II Metallien markkinahintoja vuosilta 2008-2011 (IMF, 2011).

	US\$/t vuonna 2008	US\$/t vuonna 2009	US\$/t vuonna 2010	US\$/t vuonna 2011
Kupari	6 964	5 165	7 538	9 483
Alumiini	2 578	1 669	2 173	2 667
Rauta	62	80	147	179
Nikkeli	21 142	14 672	21 810	26 332
Sinkki	1 885	1 658	2 160	2 372
Kulta*	27 911 023	32 209 478	39 973 703	51 991 373
Hopea**	464 889	491 895	761 955	1 229 416

*) (Kitco, 2011) **) (CME Group, 2011)



KUVA 3. Metallimalmien louhinnan maantieteellinen jakautuminen louhintamäärän perusteella (Brown *et al.*, 2010).

Kuvasta 3 ilmenee Kiinan vaikutus kaivosteollisuudessa. Prosentuaalisesti Kiina hallitsee rautamalmin, mangaanin, sinkin, molybdeenin ja kullan malmien tuotantoa. Lisääntyvä elektroniikan kysyntä on lisännyt Kiinassa tuotettavan metallin määrää. Suomen prosentuaalinen tuotanto on hyvin pientä muuhun maailmaan verrattuna, mutta Suomen talouteen nähden sillä on

hyvin suuri merkitys. Ulkomaiset yritykset ovat Jalovaaran (2011) mukaan sijoittaneet useita miljardeja euroja Suomen kaivoksiin vuoden 2010 aikana.

2.1 Louhintaprosessin aloitus

Kaivoksen perustaminen alkaa malmiesiintymän löytämisestä. Malmiesiintymiä etsitään Hakapään ja Lappalaisen (2009) mukaan geologisin, geokemiallisin, geofysikaalisin sekä kairausmenetelmin. Geologisessa malminetsinnässä silmällä tehtyjen kalliopaljastumien avulla pyritään luomaan kuva alueen malmipotentialista sekä valmistamaan tämän avulla malminetsintämalli. Geokemiallisessa malminetsinnässä maaperästä otetaan näyte, jota käsitellään useilla eri monialkuainemenetelmillä. Kivilajien ja mineraalien magneettisuuteen, ominaispainoon sekä sähköisiin ominaisuuksiin liittyvää etsintämenetelmää kutsutaan geofysikaaliseksi menetelmäksi. Tärkein vaihe malmiesiintymän etsinnässä on kairaus, jossa näytteitä saadaan mahdollisen tulevan kaivoksen eri syvyyksiltä. Kairauksen avulla kallioperästä voidaan luoda yhdessä geologisen, geofysikaalisen ja geokemiallisen menetelmien kanssa 3D -malli. Löydettyä malmiesiintymä tehdään esiintymälle lukuisia malleja ja laskutoimituksia, jotta saadaan selville, onko esiintymän louhiminen taloudellisesti kannattavaa.

Tutkimusten jälkeen kaivoksella alkaa Hakapään ja Lappalaisen (2009) mukaan mekaaniset operaatiot sisältävä prosessivaihe. Tällöin valitaan kyseiselle maaperälle paras louhinta-, murskaus- ja jauhatusmenetelmä. Turvallisuuden ja taloudellisuuden perusteella valitaan louhintamenetelmäksi avolouhinta tai maanalainen louhinta. Joskus voidaan louhintamenetelmäksi valita kummatkin edellä mainitut, esimerkiksi jos malmiesiintymää on runsaasti maan pinnan läheisyydessä, voidaan aloittaa avolouhinnalla ja tämän jälkeen siirtyä maanalaiseen louhintaan. Syvemmälle mentäessä malmia saattaa esiintyä huomattavasti vähemmän, jolloin vaaditaan tarkempaa mallia esiintymän koosta ja sijainnista. Louhinta voidaan hyvän mallin avulla suorittaa tarkemmin, jolloin louhitun sivukiven määrä vähenee. Tämä voi tarkoittaa louhintamenetelmän vaihtoa avolouhinnasta maanalaiseen louhintaan. Sivukivimäärän vähetessä kustannuksetkin pienenevät. Louhintamenetelmän lisäksi on suunniteltava malmin pois nostaminen louhoksesta, kaivoksen tuuletus, tiedon kulku syvältä maan alta maan pinnalle sekä koneet, laitteet, vedenpoisto ja jätteen käsittely.

Rakennustyöt alkavat suunnittelun jälkeen. Ericssonin (2010) mukaan voi kestää kymmenestä viiteentoista vuoteen ennen kuin kaikki suunnittelu- ja rakennustyöt on saatu tehtyä ja kaivoksen tuotto on saatu halutulle tasolle. Mikäli louhintamenetelmäksi on valittu avolouhinta, on malmiesiintymän päältä poistettava ensin maa-ainesta, jota kutsutaan poistomaaksi. Louhoksesta päästään louhimaan kiveä tekemällä räjäytyksiä, jotka helpottavat louhimista. Louhosten

edetessä tehdään jatkuvasti tutkimuksia kaivoksen tuottavuudesta ja tarvittaessa vaihdetaan esimerkiksi louhintamenetelmää tai -laitteita. Kun kivi on saatu kaivoksella liikkeeseen, pyritään Hakapään ja Lappalaisen (2009) mukaan siihen, että kivi myös pidetään liikkeessä. Tuotantovaihe ei siis saa pysähtyä missään vaiheessa. Suomessa kaivosten tuotto on kuitenkin vielä niin vähäistä, että louhittua kiveä on välivarastoitava.

Maa-aineksen louhinnan jälkeen on vuorossa murskaus. Hakapää ja Lappalainen (2009) ovat tiivistäneet, että murskausta voidaan tehdä joko isku- tai puristusmurskaamalla. Murskausvaiheita tarvitaan yleensä useampia erilaisia, jotta haluttu partikkelikoko saavutetaan. Murskausvaiheita ovat esimurskaus, välimurskaus ja hienomurskaus sekä kuutiointi. Esimurskain, yleensä leukamurskain tai karamurskain, sijoitetaan maan alle tai avolouhoksissa louhoksen pohjalle. Esimurskaimen tehtävänä on pienentää partikkelin kokoa niin, että se voidaan kuljettaa kaivoksen sisältä maan pinnalle tai että materiaalia voidaan jatkokäsitellä. Välimurskauksessa käytetään yleensä kartiomurskainta, jonka jälkeen materiaali voidaan siirtää hienomurskaukseen. Hienomurskauksessa materiaali jauhetaan haluttuun loppukokoon ja haluttaessa kuutioidaan. Kartio- ja iskumurskaimia käytetään hienomurskauksessa niiden alhaisen käyttökustannusten sekä korkean kapasiteetin takia. Yleensä hienomurskaus ja kuutiointi tehdään samassa vaiheessa. Murskaimien lisäksi murskausvaiheessa tarvitaan myös muita laitteita. Syöttimillä haluttu kivi ohjataan murskaimelle tietyllä nopeudella. Murskauksien välissä partikkelit syötetään seulalle, joka erottelee kiintoaineen partikkelikoon perusteella fraktioihin. Seulalta malmiaines jatkaa tietään takaisin murskaukseen tai hihnakuljettimelle, joka kuljettaa kiviainesta murskaamossa paikasta toiseen. Usein kiviaineksesta halutaan vielä hienompaa kuin mitä murskauksella saadaan aikaiseksi.

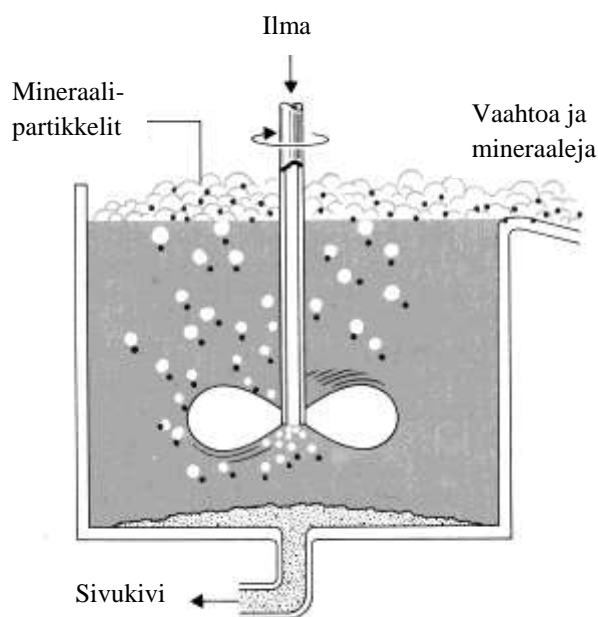
Murskauksen jälkeen vuorossa on kiviaineksen jauhatus. Murskauksilla pyritään kuitenkin Hakapään ja Lappalaisen (2009) mukaan saavuttamaan mahdollisimman pieni partikkelikoko, sillä jauhatukseen tarvittavat myllyt ovat usein enemmän energiaa kuluttavia. Pienempi partikkelikoko saavutetaan erilaisten myllyjen avulla. Myllyissä irtonaiset kappaleet, esimerkiksi kuulat, jauhavat partikkelit pienempään kokoon. Jauhautuminen voi perustua esimerkiksi iskuun, hiertoon tai puristukseen. Myllyn yhteyteen on usein sijoitettu seula tai sykloni, jolla liian karkea ja suuren partikkelikoon omaava partikkeli ohjataan takaisin syöttöön ja jauhatukseen. Esimerkiksi Pampalon kultakaivoksella (Itä-Suomen ympäristölupavirasto, 2008) murskauksen jälkeen murske varastoidaan siiloon, josta se siirretään kuljettimien avulla jauhatukseen. Pampalossa jauhinkappaleina myllyissä käytetään suurempia malmilohkareita tai rautakuulia veden toimiessa väliaineena. Jauhatuksen jälkeen hienempi kiviaines siirretään luokittimien läpi joko takaisin jauhatukseen tai ominaispainoerotukseen tai rikastukseen.

Ominaispainoerotukseen, jossa kulta erottuu, ohjataan yli 0,1 mm:n kokoiset partikkelit. Pienempi aines ohjataan kemialliseen vaahdotukseen. Rikastusmenetelmät on esitetty tarkemmin seuraavassa luvussa.

2.2 Malmin rikastusvaihe

Malmin partikkelikoon ollessa pieni, halutaan eri partikkelikoon omaavat malmit yleensä erottaa toisistaan. Tästä alkaa murskauksen jälkeinen osittain kemiallinen vaihe, jossa lukuisin eri erotusmenetelmin pyritään erottamaan arvokas malmi arvottomasta kivistä. Hienojakoisia malmimineraaleja käsiteltäessä erotus tehdään Euroopan komission (2009) mukaan märkänä, jossa vettä käytetään väliaineena. Erotus voidaan tehdä esimerkiksi laskeutusaltaassa tai hydrosyklonissa, joissa kummassakin ylitteen mukana poistuvat pienet partikkelit ja suurin osa kantavasta nesteestä, kun taas alitteeseen menevät suuret, nopeasti laskeutuvat partikkelit.

Arvokasta malmia voidaan rikastaa McMurryn ja Fayn (2001) mukaan esimerkiksi flotaation ja magneettisen erotuksen avulla. Magneettista erotusta käytetään esimerkiksi erottamaan rautamalmin magnetiitti arvottomasta kivistä. Malmien sulfidiset yhdisteet, esimerkiksi kuparin valmistukseen tarvittava kalkopyriitti (CuFeS_2), on helpointa erottaa arvottomasta kiviaineksestä flotaatiolla. Flotaatiossa, jonka periaate on esitetty Kuvassa 4, sulfidiyhdiste saatetaan kontaktiin veden, öljyn ja flokkulantin kanssa isossa säiliössä. Vesiseosta sekoitetaan johtamalla säiliön alaosaan ilmaa seokseen. Tällöin arvoton kiviaines liikkuu polaaristen vesimolekyylien tarttumisen ansiosta säiliön alaosaan, josta kiviaines poistetaan. Rikasteeseen halutut mineraalipartikkelit tarttuvat niitä ympäröivien öljymolekyylien kanssa ilmakupliin muodostaen suuren ilmavan flokin. Nämä flokit liikkuvat säiliön yläosaan, josta ne kaavitaan talteen ja jatkokäsittelyyn. Flotaation avulla vaahdotetaan esimerkiksi kuparimalmista rikkaampaa.



KUVA 4. Rikastamiseen käytetty flotaatioprosessi (Brady ja Humiston, 1980).

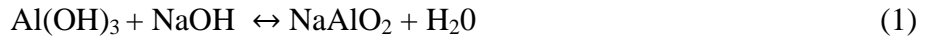
Flotaation ja magneettisen erotuksen lisäksi arvokas malmi voidaan rikastaa elektrostaattisella separoinnilla. Elektrostaattisessa separoinnissa erotus perustuu malmin polarisoituneihin sekä sähköistyneisiin partikkeleihin vaikuttavien voimien tunnistamiseen. Esimerkiksi hematiittia ja apatiittia rikastetaan elektrostaattisella separoinnilla.

McMurry ja Fay (2001) ovat koonneet, että liuotusta käytetään esimerkiksi kullan, hopean, uraanin ja kuparin erottamiseen arvottomasta kivistä. Liuotuksessa arvokkaat mineraalit erotetaan arvottomasta kivistä erottavan aineen, yleensä vesipohjaisen liuoksen, avulla. Kullan liuotuksessa käytetään syanidia, koska kulta on niukkaliukoinen moniin muihin liuottimiin. Liuotusmenetelmiä on useampia erilaisia riippuen käsiteltävästä malmikivistä. Esimerkiksi Talvivaaran kaivoksella käytetään biokasaliuotusmenetelmää, jota käsitellään luvussa 2.2.2. Muita liuotusmenetelmiä ovat säiliöliuotus ja paineliuotus. Liuotuksen tuloksena on arvokkaalla malmilla rikastettu liuos. Tämän jälkeen malmi on poistettava liuoksesta esimerkiksi saostamalla.

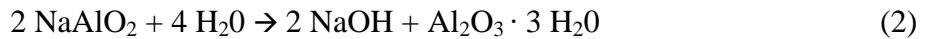
2.2.1 Bayer-prosessi

Louhittu mineraali voi sisältää sivukiven lisäksi useita epäpuhtauksia, jotka pitäisi poistaa ennen kuin metallia voidaan valmistaa. Tällainen mineraali on esimerkiksi bauksiitti, josta valmistetaan alumiinia. Bauksiitista rikastetaan alumiinin valmistukseen tarvittava arvokas malmi osana Bayer-prosessia, joka on nähtävissä Kuvassa 5. Bayer-prosessiin kuuluu Euroopan komission (2009) mukaan neljä eri prosessivaihetta: kuumennus, selkeytys, saostus ja kalsinointi, eli veden

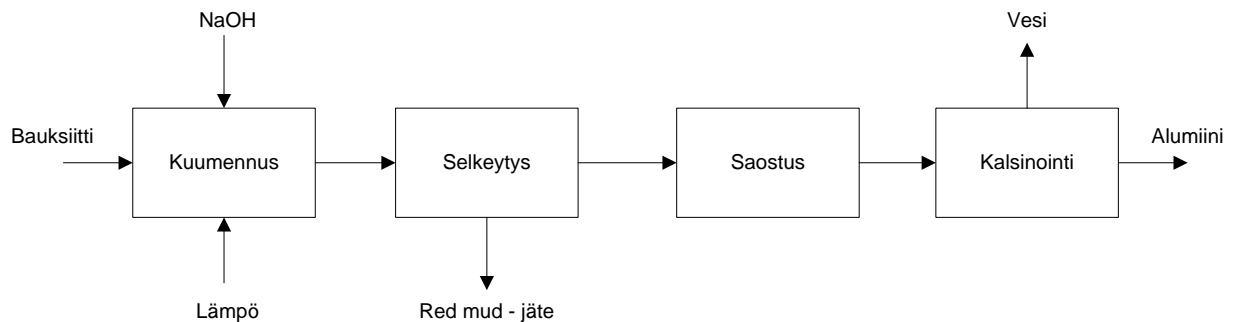
poisto. Louhittu bauksiitti sisältää epäpuhtauksina Fe_2O_3 - ja SiO_2 -yhdisteitä, jotka on poistettava alumiinioksidista, jotta alumiinia voidaan valmistaa. Tämä tehdään Tottenin ja MacKenzien (2003) mukaan käsittelemällä bauksiittia kuumalla natriumhydroksidilla. Tällöin tapahtuu Yhtälön 1 mukainen reaktio:



Natriumhydroksidilisäyksellä bauksiitista liukenevat alumiini- ja piidioksidi. Rauta(III)oksidi on niukkaliukoinen natriumhydroksidiin. Yhtälön 2 mukaisesti rauta(III)oksidi saadaan erotettua liuksesta selkeytyksen yhteydessä olevalla suodatuksella, jolloin poistuu piitä, titaania ja rautaa sisältävä sakka, *red mud*.



Tämän jälkeen liuosta jäädytetään, jolloin alumiinioksidiliuksesta tulee ylikylläinen. Ennen kalsinointia alumiinioksidi suodatetaan vedestä ja pestään. Kalsinoinnin jälkeen alumiinioksidista voidaan valmistaa alumiinia elektrolyysin avulla.

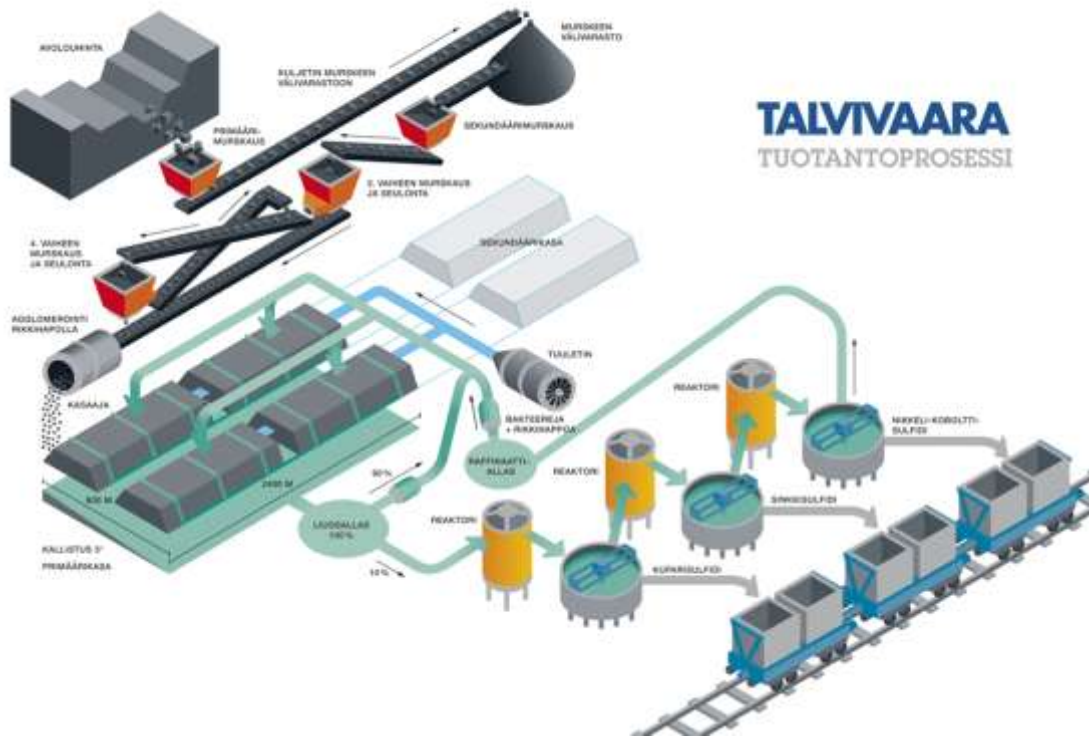


KUVA 5. Alumiinioksidin valmistus bauksiitista Bayer-prosessilla.

2.2.2 Talvivaara

Talvivaaran kaivoksella (Talvivaara, 2009) louhitaan vuosittain sivukiven määrästä riippuen 35 - 60 miljoonaa tonnia louhosta tarkoituksena saada arvokkaita malmeja: nikkeliä, sinkkiä, kobolttia ja kuparia. Kuvan 7 mukaan prosessi alkaa avolouhokselta ja suuntautuu tämän jälkeen neljän eri murskauksen jälkeen agglomerointiin. Agglomeroinnissa murskeeseen lisätään rikkihappoliuosta, jolloin pienemmät pölyhiukkaset kiinnittyvät suurempiin malmipartikkeleihin. Agglomeroinnin jälkeen malmipartikkeleista muodostetaan kasoja, jossa partikkeleita liuotetaan puolentoista vuoden ajan biokasaliuotuksella. Malmipartikkelikasat ovat agglomeroinnin ansiosta hyvin ilmaa ja vettä läpäiseviä. Biokasaliuotuksessa metallit liuotetaan malmista luonnollisten bakteerien ja rikkihappoliuoksen avulla. Liuotuksen tarkoituksena on rikastaa

seuraavaan vaiheeseen ohjattava liuos. Tämän primääriliuotuksen jälkeen kasa siirretään sekundääriliuotukseen, joka on myös malmin loppusijoituspaikka. Sekundääriliuotuksen tarkoituksena on saada loput, huonosti liuenneet metallit liuotettua malmista. Tämän jälkeen lukuisan eri saostusreaktion avulla saostetaan nikkeli, sinkki, koboltti ja kupari kasalta saatavasta liuoksesta. Metallien erotuksen jälkeen jäljelle jäävä liuos puhdistetaan ja ohjataan takaisin kasojen kasteluun.



KUVA 6. Talvivaaran tuotantoprosessi (Talvivaara, 2009).

2.2.3 Kultakaivokset

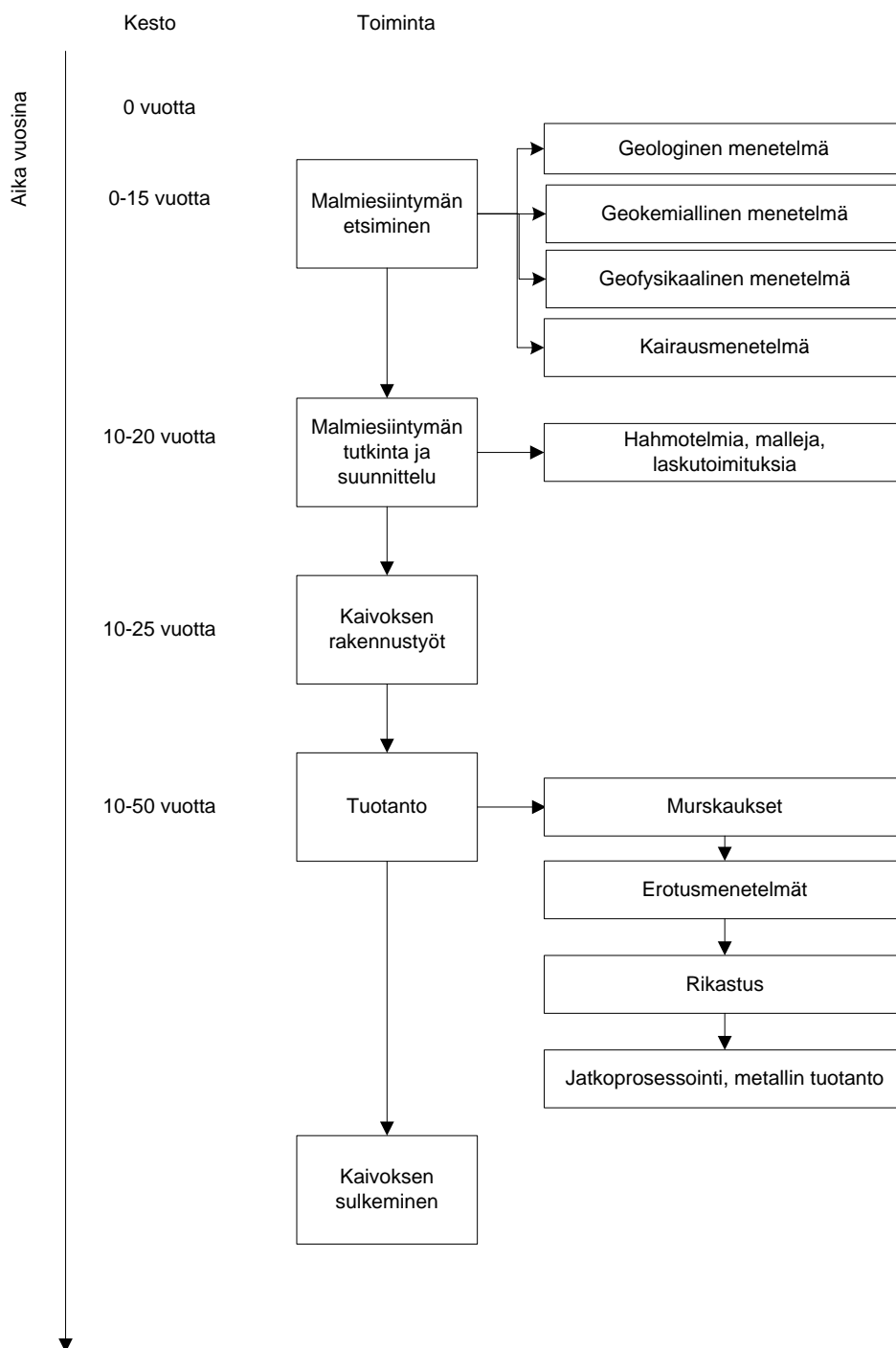
Kultaa esiintyy kultakaivoksilla erittäin vähäisissä määrissä, joten rikastusmenetelmät astuvat kullan jalostamisessa suureen rooliin. Myös kullan louhinnassa prosessi aloitetaan murskaus- ja jauhantavaiheella, jolloin partikkelikoko saadaan jatkokäsittelyä varten sopivaksi. Euroopan komission (2009) mukaan malmikivet, jotka sisältävät kullan lisäksi sulfideja, tarvitsevat murskauksen lisäksi lisäkäsittelyä ennen syanidiliuotusta. Sulfidit reagoivat kullan talteenottovaiheessa tehokkaammin syanidin kanssa, jolloin talteen saadaan kullan sijaan sulfidit. Sulfidit konsentroidaan pois kivistä esimerkiksi flotaation ja hapetuksen avulla. Kultakaivoksilla kullan rikastamiseen käytetään syanidiliuotusta, jossa pH:lla on erittäin suuri merkitys. Esimerkiksi Navarro *et al.* (2007) ovat pyrkineet keksimään syanidin tilalle muita vaihtoehtoisia menetelmiä syanidin myrkyllisyyden johdosta.

2.3 Malmin jatko-prosessointi ja kaivoksen sulkeminen

Rikastuksen jälkeen malmirikasteet ohjataan jatko-prosessointiin, jossa malmista tuotetaan metallia. Ennen jatko-prosessointia on erotusmenetelmien avulla malmirikasteesta poistettu ylimääräinen vesi. Jatko-prosessointi tehdään useimmiten rikasteesta riippuen pyrometallurgisin, hydrometallurgisin tai elektrometallurgisin prosessein. Pyrometallurgisessa prosessissa malmia käsitellään korkeassa lämpötilassa esimerkiksi masuunissa. Hydrometallurginen prosessi sisältää erinäisiä liuotus- ja saostusprosesseja, joiden avulla arvokas metalli otetaan talteen. Metallin jatko-prosessointimenetelmä, jossa käytetään sähköä hyväksi, on elektrometallurginen prosessi. Jatko-prosessoinnin tarkoituksena on valmistaa puhdasta metallia. Jatko-prosessointiin kuuluu myös metallista mahdollisesti löytyvien epäpuhtauksien poisto. Tuotantoprosessi ei kuitenkaan lopu tähän, sillä kaivos on tämän jälkeen vielä suljettava ja pyrittävä palauttamaan maisema entiselleen.

Heikkisen, Noraksen ja Salmisen (2010) mukaan kaivoksen sulkeminen on prosessi, johon kuuluu sekä kaivoksen sulkeminen että kaikki tämän jälkeen tapahtuvat luonnon ja ympäristön kuntoutus- ja tarkastusprosessit. Kasvava huoli ympäristön tilasta on aiheuttanut tiukemman lainsäädännöllisen tarkkailun kaivosten sulkemisesta ja ympäristön saattamisesta sen alkuperäiseen olomuotoonsa. Jo kaivosten suunnitteluvaiheessa tulisi ottaa huomioon kaivoksen koko elinkaari. Luonnon täydellinen palauttaminen entiseen muotoonsa on käytännössä mahdotonta, mutta tarkoin suunnitelluin menetelmin pystytään palauttamaan monimuotoinen ja mahdollisesti hyötykäyttöön sopiva ekosysteemi. Suomen kaivoslailla (L 10.6.2011/621) pyritään ohjaamaan kaivostoiminnan harjoittajaa ottamaan huomioon jo kaivoksen alkuvaiheen suunnittelussa ja rakentamisessa, että kaivos tullaan sulkemaan ja toiminta lopettamaan. Kaivoksen lopetus tulisi tehdä turvallisesti. Lisäksi kaivoslaissa todetaan, että kaivostoiminnan harjoittajan on kahden vuoden sisällä toiminnan päättymisestä saatettava kaivosalue ja kaivoksen apualue siistiin, turvalliseen sekä maisemoinniltaan hyvään kuntoon. Kaivosluvassa ja kaivosturvallisuusluvassa on lisäksi määrätty tiettyjä toimenpiteitä täytettäväksi.

Oheisessa Kuvassa 6 on esitetty kaivoksen tie prosessivaiheittain alusta loppuun elinkaariajattelun tavoin. Toimintojen kestot vaihtelevat kunkin kaivosprosessin välillä ja ovat yksilöllisiä. Kaivoksen perustaminen ja tuotanto ovat kuitenkin hyvin pitkäaikaista prosessointia, joten on hyvin tärkeää löytää malmiesiintymä, joka on taloudellisesti kannattava myös viidenkymmenen vuoden päästä.



KUVA 7. Kaivoksen toimintavaiheet perustuksesta sulkemiseen (Heikkinen, Noras ja Salminen, 2010).

3 KIINTEIDEN JÄTTEIDEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Kiinteää kaivosjätettä syntyy jo kaivoksen perustamisvaiheessa, mutta suurimmat jätemäärät syntyvät murskaus- ja jauhamisvaiheissa sekä kemiallisen prosessoinnin yhteydessä. Erikokoiset rakeet ohjataan Saarelan (1990) mukaan murskaus- ja jauhamisvaiheissa syklonoinnin avulla vedellä pumppaamalla jätealueelle. Suurempi syklonialite ohjataan yleensä takaisin kaivoksen täyttöön, eikä tätä oteta huomioon kaivosjätteiden tilastoinnissa. Sykloniylitteestä suuremmat

partikkelit ohjautuvat jätteen laskeutusaltaan reunoille ja pienemmät, paljon vettä sisältävät partikkelit altaan keskelle.

Yleensä jätepadon alkuosa rakennetaan luonnon maalajeista tiiviin maaperän ja ehjän kallioperän päälle. Mikäli tiivistä maaperää ja ehjää kallioperää ei löydy kaivoksen läheisyydestä, rakennetaan jätealtaan pohja vettä läpäisemättömästä materiaalista. Jätepatoja täytetään jatkuvasti kaivostyön edetessä joko ylävirtaan, alavirtaan tai padon keskilinjan molemmin puolin. Kaikille edellä mainituille jätepadoille on Fourien (2009) mukaan yhtenäistä paljon vettä sisältävien lietteiden kasaaminen jätealtaan pohjalle rahansäästötarkoituksissa. Jätepatoa rakennettaessa on otettava huomioon erityisesti myös mahdollinen vaikutus pohjaveteen. Jätepatoa ei saa sijoittaa muuta maaperää huomattavasti korkeammalle, sillä se lisää pohjaveden likaantumisen riskiä.

Saarelan (1990) teettämän tutkimuksen mukaan suurinta haittaa jätealueiden ympäristössä aiheuttavat suurentuneet metallipitoisuudet. Jätepatojen läheisyydestä on löydetty kohonneita metallipitoisuuksia etenkin seuraavilla metalleilla: kadmium, lyijy, elohopea, kromi, kupari, nikkeli, sinkki ja arseeni. Nämä kohonneet metallipitoisuudet jätealueiden ympäristössä ja pohjavesissä voivat johtua siitä, että sadevesi on huuhtonut jättehiekkaa laskeutusaltaiden reuna-alueella. Lisäksi kasojen pienimmät partikkelit ja jauheet ovat helposti pölyäviä, jolloin tuuli voi helposti kuljettaa niitä lähiympäristöön. Merkittävää metallipitoisuuden kohoamista aiheuttavat kuitenkin jätevesien joutuminen lähiympäristöön. Tätä aihetta on käsitelty laajemmin Ekono Oy:n Vuorimiesyhdistyksen tutkimuselosteessa A 79 (Ekono Oy, 1987).

Metallipitoisuuksien kohoamisen lisäksi kiintät jätteet voivat aiheuttaa myös happamia vuotoja. Happamia vuotoja on tutkinut muun muassa Da Pelo *et al.* (2009) tutkimuksessaan. Italian Furtein kultakaivoksen jätekasat sisältävät melko suuria määriä sulfideja, esimerkiksi pyriittiä ja enargiittia. Näillä sulfideilla on vaarana luoda veden kanssa reagoidessaan happamia vuotoja lähiympäristöön. Lisäksi sulfidit voivat päästää Saarelan mainitsemien kupari-, arseeni-, kadmium-, ja nikkelpäästöjen lisäksi myös alumiini-, ja kobolttipäästöjä, jotka kaikki ovat myrkyllisiä ja ympäristöä vahingoittavia. Sardiassa sijaitsevalla Furtein kaivoksella kiinnitettiin enemmän huomiota jätevesien tutkimiseen, huolimatta siitä, että Furtein kaivoksella harjoitetaan avolouhintaa, jolloin sivukiveä syntyy huomattavasti enemmän kuin maanalaisessa louhinnassa. Sivukivi ei usein kuitenkaan ole yhtä vaarallinen ympäristölle, kuin esimerkiksi kultakaivosten rikastushiekat.

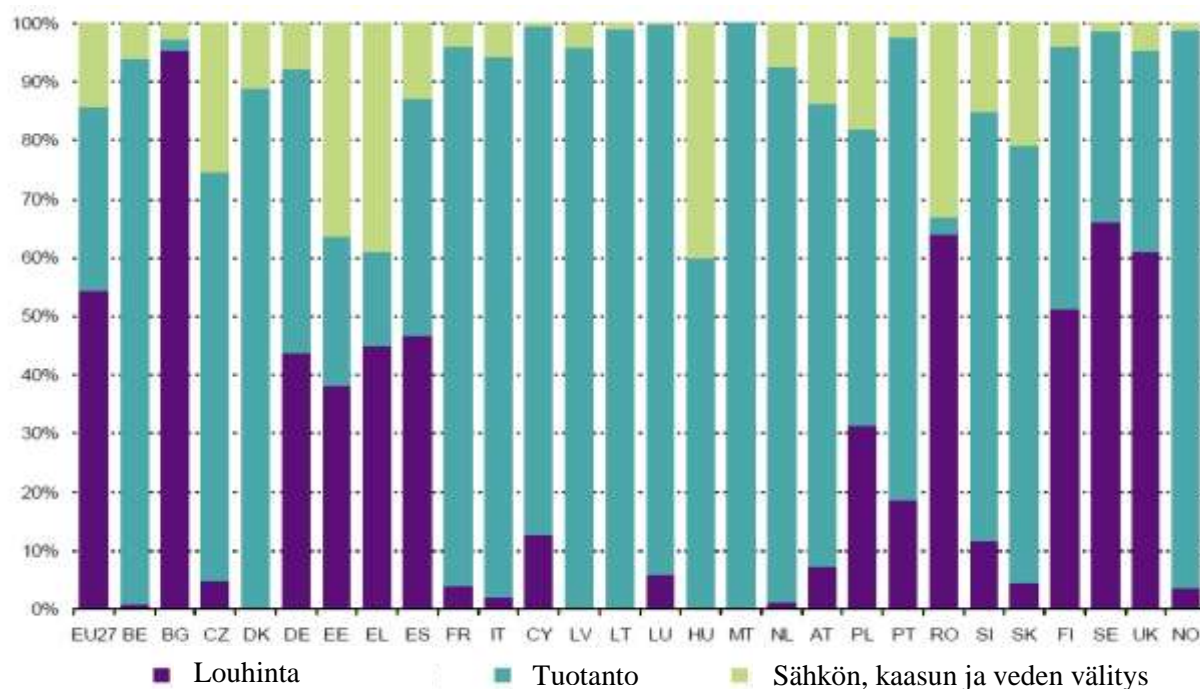
Kaivosten jätealtaat sisältävät Saarelan (1990) tutkimuksen mukaan vaihtelevia määriä rikastuskemikaalijäämiä. Jätealtaat onkin suunniteltava hyvin, jotta ne kestävät suuret määrät jäteliettä. Unkarissa vuonna 2010 alumiinitehtaan jätealtaan reunaseinä sortui ja noin 700 000 m³ *red mud* -jätettä valui alumiinitehtaan lähiympäristöön aiheuttaen vakavan ympäristövahingon ja ihmiskuolemia. Syitä aiheutuneeseen ympäristövahinkoon on etsitty, ja The New Scientist lehden (Marshall, 2010) mukaan syy olisi Euroopan Unionin lakisäädöksissä. Vaarallisten jätteiden loppusijoittamiseen on rakennettava varaseinä estämään tällaisia tilanteita. Lakisäädös ei kuitenkaan koske rikastuskemikaalijätteitä, joten kyseisellä alumiinitehtaalla ei varaseinää ollut. Onnettomuudesta opittiin, että rikastuskemikaalijäämät voivat ympäristöön päätyessään aiheuttaa vakavia vahinkoja.

3.1 Kiinteät jätteet Suomen kaivostoiminnassa

Tilastokeskuksen (2010) mukaan Suomessa käsiteltiin mineraalijätettä yhteensä 54 689 tonnia vuonna 2008. Tähän lukuun on otettu huomioon mineraalien kaivun jätemäärän lisäksi myös esimerkiksi ei-metallisten mineraalituotteiden valmistuksessa sekä rakentamisessa syntyneet mineraalijätteet. Ei-metallisia mineraalituotteita ovat esimerkiksi lasituotteet ja osa keraamisista tuotteista. Rakentamisessa syntyneisiin jätteisiin voidaan lukea erilaiset kiviainekset, esimerkiksi tiilet, betonituotteet sekä sementti. Mineraalijätteeseen ei lueta sivukiveä, jota on käytetty kaivoksen uudelleen täyttöön. Mineraalijätteen osuus on noin 74 % kaikista käsitellyistä jätteistä, puujätteen tullessa toisena ollen 12 177 tonnia käsiteltyä jätettä vuonna 2008. Aineskäyttöön käsitellyistä mineraalijätteistä ohjattiin noin 29 %, eli 15 663 tonnia ja loput sijoitettiin kaatopaikalle. Mineraalien louhinnassa ja prosessoinnissa syntyy mineraalijätteen lisäksi pieniä määriä muun muassa metallijätettä ja puujätettä. Louhinnassa mineraalijätettä syntyi 31 791 tonnia vuonna 2008, joka on 58 % kaikesta syntyneestä mineraalijätteestä.

Vuonna 2006 Euroopan unionin 27:ssä maassa Kloekin ja Blumenthalin (2009) raportissa mainituista teollisuuden jätteistä 54,4 % olivat kaivosteollisuuden jätteitä. Kuvassa 8 on esitetty EU27-maiden raportoitujen kolmen teollisuusalan jätteiden jakaantuminen. Nämä kolme teollisuusalaa ovat louhinta, teollisuustuotanto sekä sähkön ja veden tuotanto. Kuvan 8 mukaan Bulgariassa louhinnan jätteet ovat maan hallitsevimmat, kun taas esimerkiksi Latviassa ja Liettuassa louhinnan sijaan jätteet ovat peräisin teollisuustuotannosta. EU27-maiden teollisuustuotantosektoriin kuuluvat lukuisat eri materiaalien tuotannot. Suurin osa teollisuustuotannossa syntyneistä jätteistä ovat syntyneet metallien tuotannossa. Tämä selittää esimerkiksi Unkarin pienen jätemäärän louhinnassa. Unkarissa valmistetaan alumiinia Bayer-prosessilla, jossa sivuvirtana syntyy *red mud* -jätettä. Tämän jätteen oletetaan sijaitsevan

louhinnan jätteen sektorissa, mutta se luetaan teollisuustuotannon jättesektoriin. Suomen jätteiden jakautuminen kolmen kyseessä olevan teollisuusalan kesken ovat likimain EU27-maiden keskiarvoa.



AT	Itävalta	DE	Saksa	FI	Suomi	LT	Liettua	NO	Norja	SI	Slovenia
BE	Belgia	DK	Tanska	FR	Ranska	LU	Luxemburg	PL	Puola	SK	Slovakia
BG	Bulgaria	EE	Viro	HU	Unkari	LV	Latvia	PT	Portugali	UK	Iso-Britannia
CY	Kypros	EL	Kreikka	IE	Irlanti	MT	Malta	RO	Romania		
CZ	Tšekki	ES	Espanja	IT	Italia	NL	Alankomaat	SE	Ruotsi		

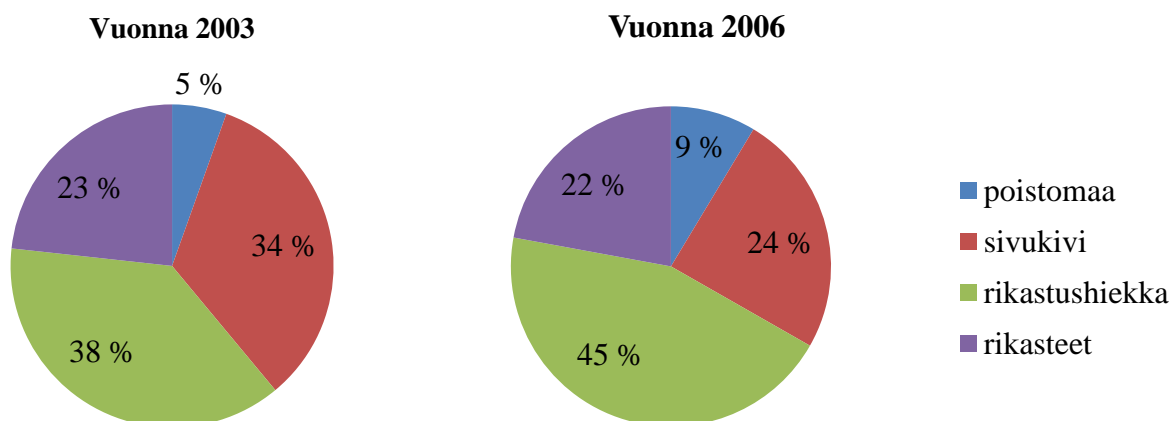
KUVA 8. EU27-maissa vuonna 2006 syntyneet jätteet lajiteltuina kolmen teollisuussektorin alalle (Kloek ja Blumenthal, 2009).

Kosomaa (1973) on jakanut Suomen mineraaliesiintymät niiden aiheuttamien ympäristövaikutusten avulla neljään eri ryhmään: teollisiin mineraaleihin, luonnonkiviin sekä sulfidisiin- ja oksidisiin metallimalmeihin. Näistä merkittävimmän ympäristövaikutuksen aiheuttaa Heikkisen, Noraksen ja Salmisen (2008) mukaan sulfidisten metallimalmien louhinta ja jatkoprosessointi. Sulfidisista mineraalijätteistä aiheutuu haittaa etenkin jätevesille. Saatettaessa sulfidiset mineraalijätteet kosketuksiin ilman ja veden kanssa, syntyy haitallisia vuotovesiä.

Suomen kaivostoiminnassa syntyvät kiinteät jätteet voidaan lajitella rikastushiekkaan, sivukiveen ja poistomaahan. Poistomaa on malmin yllä sijaitsevaa irtomaata, joka on poistettava ennen kuin malmin louhinta voidaan aloittaa. Poistomaata käytetään Härmän, Dahlin ja Mäenpään (2005) tutkimuksen mukaan kaivoksen sulkemisen jälkeen pintamaana, jotta uusi kasvillisuus saadaan tuotua takaisin. Sivukivi on malmin kanssa louhittua kiveä. Etenkin avolouhoksilla ja maanalaisen kaivoksen rakentamisen yhteydessä syntyy paljon sivukiveä. Malmin rikastuksen

yhteydessä syntynyttä kiinteää jätettä kutsutaan rikastushiekaksi. Esimerkiksi Bayer-prosessissa bauksiitista rikastetaan arvokas malmi, jolloin sivutuotteena syntyy *red mud* – rikastushiekkalietettä.

Suomessa kaivoksilla syntyvät ainevirrat ovat jakaantuneet Härmän, Dahlin ja Mäenpään (2005) mukaan siten, että rikastushiekkaa on 38 %, rikasteita 23 %, sivukiveä 34 % ja poistomaata 5 %. Kaivoksilta saatava arvokas malmirikaste on siis ollut alle viidenneksen kokonaislouhinnasta Suomessa. Suurin osa louhinnasta on sivukiveä, jonka määrä on kuitenkin vähentynyt huomattavasti vuodesta 2003 nykypäivään. Metallimalmeja louhivilla kaivoksilla luvut jakaantuvat siten, että vuonna 2003 rikastetta on saatu talteen 17 %, poistomaata on ollut 1 %, rikastushiekkaa 23 % ja sivukiveä 59 %. Sivukiven osuus metallimalmikaivoksilla on siis suurempi kuin kaikkien kaivoksien kesken laskettu keskiarvo. Jo vuodesta 2003 vuoteen 2006 on tapahtunut suuri parannus, jonka näemme myös Kuvassa 9. Sivukiven osuus ainevirtaamista kaivoksilla on pienentynyt 10 %, kun taas rikastushiekan osuus on suurentunut 7 %:lla.



KUVA 9. Ainevirtaamat Suomen kaivoksilla vuosina 2003 ja 2006 (Härmä ja Mäenpää, 2007).

Poistomaan suurentumista viidestä prosentista yhdeksään voidaan selittää sillä, että Suomen kaivosteollisuudessa on jouduttu siirtymään vähemmän rikkaisiin esiintymiin. Tällöin malmin päällä olevaa poistomaata on myös jouduttu poistamaan tavallista enemmän. Rikastushiekan määrän kasvun ja sivukiven määrän laskun selittää se, että Härmän, Dahlin ja Mäenpään (2005) teettämässä tutkimuksessa rikastushiekaksi on laskettu louhokselta rikastukseen lähtevän kiven lisäksi myös jäte- ja sivukivikasoilta rikastukseen lähtevä materiaali. Sivukivi on tutkimuksen mukaan laskettu louhoksen määrän ja rikastuksen jälkeen saadun arvokkaan malmin määrän avulla. Yleensä sivukiveksi luokittelemamme jätekasat ja sivukivikasat ovat siis rikastushiekan osuudessa, eivätkä sivukiven. Voidaan siis sanoa, että sivukivi- ja jätekasojen hyödyntäminen on kasvanut huomattavasti vuodesta 2003 vuoteen 2006. Vuonna 2003 rikasteita on saatu prosentin

verran enemmän, koska malmiesiintymät olivat rikkaampia. Siirtyminen vähemmän rikkaisiin esiintymiin on herättänyt mielenkiinnon jäte- ja sivukivikasojen hyödyntämiseen.

Suomessa toimivia kaivoksia oli työ- ja elinkeinoministeriön (2011) mukaan 51 kappaletta vuonna 2010. Näistä kymmenen olivat metallimalmeihin keskittyviä kaivoksia, muiden kaivosten keskittyessä karbonaattikiviin sekä muihin teollisuuskiviin ja -mineraaleihin. Taulukossa III ja IV on esitetty kaivosten lukumäärän ja louhintamäärän kasvu vuodesta 2003 vuoteen 2010.

TAULUKKO III Suomen kaivoksilla liikkuvan louheen, malmin ja sivukiven määrä vuonna 2003 (Härmä, Dahl ja Mäenpää, 2005).

Vuonna 2003				
Metallimalmikaivos	Tärkeimmät malmit	Yhteensä louhittu tonneissa	Malmia tai hyötykiveä tonneissa	Sivukiveä tonneissa
Hitura	Ni, Cu	734 000	649 000	85 000
Kemi	Cr	5 087 000	1 102 000	3 985 000
Orivesi	Au	187 000	153 000	34 000
Pahtavaara	Au	350 000	10 000	340 000
Pyhäsalmi	Cu, Zn, S, Ag, Au	1 747 000	1 330 000	417 000
		8 105 000	3 244 000	4 861 000

TAULUKKO IV Suomen kaivoksilla liikkuvan louheen, malmin ja sivukiven määrä vuonna 2010 (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2011).

Vuonna 2010				
Metallimalmikaivos	Tärkeimmät malmit	Yhteensä louhittu tonneissa	Malmia tai hyötykiveä tonneissa	Sivukiveä tonneissa
Suurikuusikko	Au	10 540 288	1 131 000	9 409 288
Hitura	Ni, Cu	234 629	234 629	0
Pampalo	Au	52 400	33 500	18 900
Pahtavaara	Au	660 000	465 000	195 000
Laiva	Au	110 000	0	110 000
Kemi	Cr	2 052 901	1 382 509	670 392
Jokisivu	Au	445 895	65 271	380 624
Orivesi	Au	257 082	171 003	86 079
Pyhäsalmi	Cu, Zn, S, Ag, Au	1 460 578	1 400 723	59 855
Talvivaara	Ni, Cu, Zn	29 968 133	13 307 827	16 660 306
		45 781 906	18 191 462	27 590 444

Vuonna 2003 olemassa olleet viisi kaivosta louhivat edelleen samoja malmimineraaleja, mutta louhintamäärät ovat muuttuneet. Hituran, Kemin ja Pyhäsalmen kaivoksilla louhintamäärät ovat pienentyneet huomattavasti, mutta prosentuaalisesti louhintamäärästä saatava hyödynnettävä malmi on kasvanut kaikissa kolmessa kaivoksessa. Sivukiven prosentuaalista osuutta näillä

viidellä kaivoksella on siis pystytty huomattavasti vähentämään viimeisen seitsemän vuoden aikana. Raportoinnissa ei oteta huomioon poistomaan eikä rikastushiekan osuutta kiinteästä jätteestä. Oriveden ja Pahtavaaran kaivoksilla louhinnan määrää on lisätty Pahtavaaralla lisäyksen ollessa melkein kaksinkertainen. Pahtavaaran kultakaivokselta louhitun arvokkaan malmin prosentuaalinen osuus vuodesta 2003 vuoteen 2010 on kasvanut kolmesta prosentista 70 %:iin. Pahtavaaran ja Oriveden kaivokset ovat nuoria kaivoksia ja päässeet varsinaisiin tuotantolukuihin vasta lähivuosina.

3.2 Muut metallimalmien louhinnasta aiheutuvat ympäristövaikutukset

Malmien louhinnasta aiheutuu kiinteiden päästöjen lisäksi lukuisia muita ympäristövaikutuksia. Louhinta muokkaa maaperää muokaten samalla louhinta-aluetta ympäröivää luontoa ja kasvillisuutta. Paikalliseen kasvustoon ja eläinkuntaan vaikuttaa sekä avolouhinta että maanalainen louhinta. Kaivosalue on erittäin vaikea saada täysin palautettua takaisin alkuperäiseen ulkonäköönsä.

Alueen maisemaan vaikuttaa lisäksi louhinnasta aiheutuneiden kiinteiden jätteiden, etenkin sivukiven säilytys kasoissa kaivoksen läheisyydessä, ja pienten partikkeleiden säilytys kasoissa aiheuttaa pölyämistä. Maanalainen louhinta on kuitenkin ympäristöä vähemmän muokkaavaa, koska louhinnassa syntyy vähemmän sivukiveä. Louhinta-alueelle on lisäksi useimmiten rakennettava teitä louhintalaitteistolle sekä rikasteen kuljetukseen, ja tämä muokkaa maastoa myös huomattavasti.

Kairaus- ja kaivoksen avausvaiheessa räjäytystyöt saattavat aiheuttaa haittaavaa melua sekä tärinää lähimaastossa. Kaivosalueella materiaalin kuljetus paikasta toiseen sekä erilaiset murskausprosessit voivat lisäksi aiheuttaa melua ja tärinää. Kaivoksella syntyviä jätevesiä on tutkittu paljon, mutta tämän työn tarkoituksena on keskittyä kaivoksella syntyvien kiinteiden jätteiden ympäristövaikutuksiin.

4 KIINTEIDEN JÄTTEIDEN KÄSITTELY JA HYÖTYKÄYTTÖ

Metallimalmien louhinnassa syntyneiden kiinteiden jätteiden käsittelyssä ja käsittelyn suunnittelussa tavoitteena on saada jäte pysymään stabiilina vuosikymmeniä ja estää mahdollisten harmillisten reaktioiden syntymistä jätteen ollessa yhteydessä ympäristön kanssa. Esimerkiksi sateen vaikuttamista jätekasaan ja siitä kulkeutuviin suotovesiin on tutkittava tarkkaan, jotta metalleja ei kulkeutuisi ympäristön vesiin. Jätepadon suunnitteluun on käytettävä riittävästi resursseja ja aikaa, jonka lisäksi jätepadon elinkaarta on seurattava aktiivisesti.

Malmien rikastusmenetelmien kehittyessä tehokkaampaan suuntaan, on jätteen määrä ja laatu kehittynyt. Mineraalien rikastuksen yhteydessä syntyneet jätteet ovat Hitchin, Ballantynen ja Hindlen (2009) mukaan metallipitoisuukseltaan rikkaita. Rikastusmenetelmien kehittyessä sivuvirtojen ja jätteiden metallipitoisuuksia saadaan laskettua, mutta täysin metallivapaiksi virtoja on hankala saada. Metallin hintojen ja mineraalien louhinnan kustannuksien kasvaessa, on kiinteitä jätteitä ja sivuvirtoja pyritty hyödyntämään uudelleen raaka-aineina. Hyödyntäminen raaka-aineena saattaa olla mahdotonta jätteen kohdalla, joka potentiaalisesti aiheuttaa suurta harmia ympäristölle. Tällaisia jätteitä ovat esimerkiksi raskasmetalleja ja sulfidimineraaleja sisältävät jätteet.

Kaivosteollisuuden jätteet aiheuttavat vaaraa etenkin keskityttäessä jätteen sisältämiin huuhtoutuviin myrkyllisiin aineisiin sekä millä tavalla jätteet varastoidaan. Sulfideja ja sulfidimetalleja sisältävät jätteet saastuttavat ympäristöä ja jätealueen läheistä pohjavettä. Erilaisia menetelmiä saastumisen vähentämiseen on tutkittu Marabinin *et al.* (1998) tutkimuksessa. Raskasmetallien aiheuttamaa saastumista on yritetty vähentää esimerkiksi injektoimalla polymeerisiä materiaaleja, silikaattigeellejä tai betonisekoituksia jätteeseen. Näillä tekniikoilla on pyritty sulkemaan raskasmetalli-ionit pieniksi stabiileiksi rakennelmiksi. Menetelmät ovat melko kalliita, joten vaihtoehtomenetelmänä on esitetty käytettäväksi jätteen käyttämistä lasikuitujen valmistuksessa.

Rampacekin (1982) mukaan jo noin 30 vuotta sitten jouduttiin siirtymään niin sanotuista rikkaiden esiintymien (high grade ore) hyödyntämisestä köyhien esiintymien (low grade ore) hyödyntämiseen. Korkean asteen malmiesiintymät ovat rikkaita esiintymiä, kun taas matalan asteen malmiesiintymiä tarvitaan huomattavasti enemmän saman malmirikastemäärän saamiseksi. Siirtyminen matalan asteen malmeihin on synnyttänyt lisäkiinnostusta kiinteän jätteen hyödyntämiseen, ja vaatinut tekniikan kehittymistä, jotta prosessointivedet saadaan pidettyä mahdollisimman pienissä määrissä.

Jätteiden hyötykäyttö on kasvava ala mietittäessä ympäristön tilan parantamista. Nyky-yhteiskunnassa pyritään miettimään käyttötapoja, joilla voitaisiin pienentää syntyvän jätteen määrää ja tapoja joilla voitaisiin hyötykäyttää syntyneet jätteet. Kuten luvussa 3 on esitetty, kaivosteollisuudessa syntyy erittäin suuria jätemääriä. Tällöin yhä tärkeämmäksi kaivosteollisuuden prosessivaiheeksi muodostuu malminetsintä. Rikkaita malmivarantoja löytyy jatkuvasti vähemmän, joten on jouduttu siirtymään vähemmän rikkaisiin malmiesiintymiin. Tällöin sivukiven, rikastushiekan ja poistomaan, eli kiinteiden kaivosjätteiden määrä usein myös kasvaa. Tulisi kiinnittää huomiota kuinka kiinteitä jätteitä hyötykäytetään, koska näiden jätteiden

määrän vähentäminen on käytännössä mahdotonta. Seuraavissa luvuissa on esitetty kolmen esimerkkitapauksen avulla kiinteiden jätteiden käsittelyä ja hyötykäyttöä.

4.1 Bayer-prosessi

Powerin, Gräfen ja Klauberin (2011) tutkimuksen mukaan Bayer-prosessin sivuvirtana syntyvää *red mud* -sakkaa voidaan hävittää kolmella eri menetelmällä. Ennen 1970-lukua menetelmiä oli vain kaksi: mereen lasku ja patoihin sijoitus. Mereen jätesakka johdetaan pitkiä putkistoja pitkin, jotta sakka saadaan kauas ja syvälle. Tiukentuneet jätteensijoitusmääräykset vähentävät jatkuvasti mereen sijoitettavan jätteen määrää, ohjaten jätteet ympäristöystävällisempiin patoihin. Jätepadot ovat hyvin yleisiä jätteensijoitustapoja, jotka koostetaan erinäisistä kiviaineksista. Nykyään jätteen sijoittamisen painoarvo on siirtynyt niin sanottuun kuivan jätesakan sijoittamiseen. Jätesakka ei ole kuivaa silloin, kun se sijoitetaan jätekasaan. Jätesakan annetaan kuivua padon pohjalla, kunnes seuraava kerros märkää sakkaa kaadetaan vanhan kasan päälle. Valintaan siitä, mitä näistä kolmesta menetelmästä käytetään vaikuttavat monet asiat. Paikalliset sateet ja ympäristön pinnan muodot vaikuttavat suurelta osin jätepatojen suunnitteluun. Lisäksi kaivoksen läheisyydessä olevan vapaan maan määrä vaikuttaa myös jätteenhävitysmenetelmään. Patoihin sijoittaminen vaatii huomattavasti enemmän maapinta-alaa, kuin esimerkiksi mereen sijoittaminen. Jätteen sijoittaminen kuivana vähentää tarvittavan maan pinta-alaa. Jätteenhävittämismenetelmää mietittäessä on otettava huomioon myös lainsäädännölliset vaatimukset.

Alumiinioksidia valmistettaessa Bayer-prosessissa syntyy natriumhydroksidia sekä rauta-, titaani- ja alumiinioksidia sisältävä *red mud* -sakka. *Red mud* -sakan määrä on Raghavanin, Kshatriyan ja Wawryninkin (2011) mukaan noin 50 % alkuperäisen prosessiin sisään otetun bauksiitin massasta, joten sakan hyödyntäminen olisi hyvin kannattavaa. Tutkimuksen tarkoituksena oli löytää ympäristön kannalta hyväksyttävämpi uusi prosessi oksidien talteenottoon. Prosessi koostuu neljästä eri vaiheesta: 1) sakan pasutuksesta natriumkarbonaatilla ja kalsiumoksidilla, 2) ensimmäisessä vaiheessa syntyneiden suolojen erotus, 3) hydroksidisuolan saostus ja 4) hydroksidisuolojen muuntaminen halutuiksi oksideiksi. Muuntelemalla natriumkarbonaatin ja kalkin määrää saatiin sakasta parhaimmillaan talteen jopa 76 % alumiinioksidista, noin 75 % rautaoksidista ja noin 72 % titaanioksidista. *Red mud* -sakan käsittely siis kannattaa, sillä metalliesiintymien koko on jatkuvasti pienenemässä ja jätteiden metallioksidien hyödyntämistä tulisi lisätä.

Marabinin *et al.* (1998) teettämässä tutkimuksessa keskityttiin *red mud* -sakkojen kierrätykseen ja sakan reagoimattomaksi saattamiseen sekä rikastushiekkojen käsittelyyn. Sinkkiä

valmistettaessa muodostuu muun muassa jarosiittia, götiittia ja hematiittia sisältäviä sakkoja riippuen käytetystä erotusmenetelmästä. Esimerkiksi käytettäessä tiettyä sinkin erotusmenetelmää, syntyy jarosiittia sisältävää sakkaa noin 0,4 tonnia malmitonnia kohti. Jätesakkojen käsittely on kehittynyt lähivuosina, ja nykyään esimerkiksi hematiittia sisältävät sakat voidaan ohjata terästeollisuuteen käytettäväksi sekundäärisenä raaka-aineena. Götiittia ja jarosiittia sisältävien sakkojen hyötykäyttö on vielä vähäistä, mutta osa voidaan saattaa stabiiliin muotoon ja sekoittaa esimerkiksi lasimurskeeseen, joka lämpö- ja vesikäsitelyn jälkeen voidaan sijoittaa kaatopaikalle.

Red mud -sakan jatkokäsittelyä ja arvokkaiden metallien (sinkki, kadmium, tina, lyijy, rauta) talteenottoa tutkitaan jatkuvasti. Marabinin *et al.* (1998) tutkimuksessa on esitetty vaihtoehto *red mud* -sakan talteenottamiseksi. Menetelmä alkaa jätesakassa olevan rikin poistamisella. Tämän jälkeen sinkkisulfaatti otetaan talteen ja neste kuumennetaan koksen kanssa. Tällöin saadaan magnetiitti talteen. Edellä mainitulla menetelmällä yhdestä tonnista *red mud* -sakkaa saadaan 567 kg magnetiittirikastetta, 57 kg sinkkiä sekä 85 kg rikastusjätettä. Loput massasta, 291 kg johtuu veden ja rikkitrioksidin häviämisestä. Tonnin *red mud* -jätesakka pystyttiin siis vähentämään vain noin 85 kilogramman jätemäärään. Sekoitettaessa sakka graniittihakkeen ja kierrätyslasin kanssa, voidaan materiaali käyttää lasikeramiikassa hyödyksi.

4.2 Talvivaara

Talvivaarassa louhitaan Pohjois-Suomen ympäristölupaviraston (2007) mukaan vuosittain noin 15 miljoonaa tonnia malmia. Sivukiveä malmin louhinnassa on syntynyt vuosina 2008 - 2010 yhteensä 18 miljoonaa tonnia. Sivukiven määrän on ennustettu kasvavan tulevina vuosina. Maksimilouhintamäärä uskotaan saavutettavaksi vuosina 2018 - 2026, jolloin vuosittain louhittavan sivukiven määrä olisi noin 29 miljoonaa tonnia. Talvivaaran malmiesiintymissä sivukivilajeja ovat metakarbonaattikivi, kiilleliuske, mustaliuske ja kvartsiitti.

Sivukivikasojen muodostamiseen tarvitaan tarkat suunnitelmat, sillä pohja- ja pintarakenteiden rakenne täytyy olla jätteelle oikeanlainen. Yleensä sivukivet sijoitetaan jätealueelle riippuen sivukiven koostumuksesta. Myös riippuen sivukiven metallimäärästä, voidaan vähän metallia sisältävät sivukivet sijoittaa noudattaen tavallisen jätteen kaatopaikoille sijoittamisen menettelyä. Näin ei kuitenkaan ole Pohjois-Suomen ympäristölupaviraston (2007) mukaan Talvivaaran kaivoksella. Liukoisuuskokeissa testatut jätteet sisälsivät yleisimmin nikkeliä ja sinkkiä yli asetettujen raja-arvojen. Edellämäinuituista sivukivilajeista metakarbonaattikivi ja mustaliuske muodostavat mahdollisesti happamia suotovesiä.

Talvivaaran kaivoksella sivukivien läjitystä varten on Pohjois-Suomen ympäristölupaviraston (2007) lupapäätöksen mukaan rakennettava tiiviit pohjarakenteet varastointialueille. Sivukiviläjiä on käytetty hyödyksi toisen vaiheen bioliuotusalueen pohjarakenteena. Louhintaa harjoitetaan avolouhoksena, jolloin irroitettu poistomaa sijoitetaan läjitysalueille tai hyödynnetään alueen maisemoinnissa. Poistomaata on kerätty Talvivaaran Kuusilammen ja Kolmisopen louhoksilta noin 2,5 miljoonaa m³. Läjitysalueen reunoille on rakennettu poistomaasta matalat reunapenkereet. Läjitysalueen pintamaat ja pehmeät maakerrokset poistetaan, jonka jälkeen pohjamaata muokataan niin että se viettää suotovesien keräilyallasta kohti. Pohjan päälle laitetaan HDPE-kalvo, joka tiivistää pohjan.

Kaivostoiminnassa rikastuksen yhteydessä syntyviä sulfaattipitoisia sivuvirtoja sekä niiden hyödyntämistä on tutkittu muun muassa Talvivaaran kaivoksella. Kuten luvussa 2.4 on mainittu, Talvivaaran bioliuotuksen yhteydessä metallimalmi erotetaan arvottomasta kivistä bakteerien ja rikkihappoliuoksen avulla. Tällöin metallit liukenevat happamaan liuokseen, josta ne saostetaan sulfideina. Metallien erotuksen jälkeen prosessiliuosta puhdistetaan ja neutraloidaan, jotta se voidaan palauttaa takaisin prosessiin. Neutraloinnissa käytetään kalsiumkarbonaattia, joka sulfidin kanssa reagoidessaan synnyttää sivutuotteena kipsiä noin miljoona tonnia vuodessa. Välineutralointisakka sisältää suurimpina pitoisuuksina alumiinia, kalsiumia ja rikkiä. Kaivoksella syntyy myös ominaisuuksiltaan välineutraloinnista poikkeavaa loppusakkaa. Loppusakka muodostuu, kun metallien talteenoton jälkeen prosessiliuos ohjataan pH:n nostoon, jolloin metalli saostuu. Syntynyttä jätesakkaa kutsutaan loppusakaksi. Loppusakka sijoitetaan kipsisakka-altaalle tehdasalueelle.

Kipsivirtoja Talvivaaran kaivoksella syntyy kaksi: välineutralointisakka ja loppusakka, joista vaikuttavampi syntyy juuri prosessin loppuneutraloinnissa ja sisältää useampia metalliepäpuhtauksia. Pussinen (2008) tutki kipsin hyödyntämistä sementti- ja asfalttiteollisuudessa, mahdollista hyödyntämistä rikkihapon valmistuksessa sekä kipsin hajottamista rikkivetykaasuksi ja Ca(OH)₂:ksi. Näistä kipsiä pystyttiin hyödyntämään parhaiten viimeisessä vaihtoehdossa. Talvivaaran kaivoksella syntyy melko vähän sivutuotteita. Biokasaliuotusmenetelmällä sivuvirtoja voidaan kierrättää ja täten hyödyntää suurempi osa louhitusta kiviaineksesta muihin prosesseihin verrattuna.

4.3 Kultakaivokset

Kultakaivoksilla syntyy muiden kaivosten tapaan poistomaata, sivukiveä sekä rikastushiekkaa. Näistä ympäristölle haitallisin on rikastushiekka, sillä kullan rikastamiseen käytetään syanidia. Driussin ja Janszin (2003) mukaan rikastushiekkojen syanidi on Australiassa yksi yleisimmistä

ympäristön saastuttajista. Newmont Australian omistamalla Turkissa sijaitsevalla Ovacik-kultakaivoksella rikastushiekat läjitetään suuriin patoihin, jotka on eristetty muusta ympäristöstä kahdella läpäisemättömällä kerroksella. Vaikka rikastushiekasta pyritään poistamaan ylimääräinen vesi, jotta läjitys olisi helpompaa ja turvallisempaa, sisältävät läjitettävät kuivat rikastushiekat useimmiten yhä 20 p-% vettä. Ovacikin kultakaivoksella pyritään kierrättämään syanidia sisältävää vettä prosessin sisällä, jotta ympäristön saastumista vähennettäisiin. Kiinteiden jätteiden syntyä kaivoksilla on kuitenkin vaikeaa pienentää, jolloin pyritään prosessin raaka-aineiden kiertoon.

Kultakaivoksilla syntyy kiinteitä jätteitä huomattavat määrät, johtuen kultraesiintymien useimmiten pienistä malmiesiintymistä. Alaskan neljä suurta kaivosta tuottavat DiMarchin ja Vohdenin (2011) mukaan 22 megatonnia sivukiveä ja 18 megatonnia rikastushiekkalietettä vuosittain. Kullekin neljälle kaivokselle on tehty tarkka suunnitelma kuinka jätteitä käsitellään ja minne ne sijoitetaan. Alaskan maanalaiselta Pogo-kaivokselta louhitaan kultaa 2300 tonnia päivässä, jossa yhdessä tonnissa on yhteensä 16 grammaa kultaa. Suuret sivukivimäärät on lajiteltu kahteen eri lajiin: mineralisoituneisiin ja ei-mineralisoituneisiin, riippuen jätteen arseeni- ja rikkipitoisuuksista. Mineralisoituneet sivukivet sijoitetaan kuivaan kasaan tai takaisin maan alle. Ei-mineralisoituja kiviä käytetään esimerkiksi kaivoksen teiden rakentamiseen. Louhinnan jälkeen kaivoksella syntyy rikastuslietettä flotaation yhteydessä ja syanidikäsittelyn jälkeen. Flotaation yhteydessä syntyneet jätteet kuivataan noin 15 % kosteuteen ennen kuin ne sijoitetaan kuivaan jätekasaan. Syanidikäsittelyn jälkeen syntyneisiin jätteisiin lisätään noin 40 % flotaation jätelietteestä ja 7 % sementtiä, jonka jälkeen tämä paksu liete ohjataan takaisin kaivoksen täyttöön. Pogo-kaivoksella syntyneitä kiinteitä jätteitä käytetään siis suurimmaksi osaksi kaivoksen uudelleen täyttöön sekä teiden rakennukseen ja vain noin 33 % jätteistä menee sivukivikasalle.

Pampalon kultakaivoksen ympäristölupapäätöksessä (Itä-Suomen ympäristölupapäätös, 2008) on todettu, että sivukiveä käytetään hyödyksi kaivostäytteenä ja patorakenteissa. Pampalon kaivoksen ympäristölupapäätöksessä on esitetty tarkkaan kuinka sivukivi tullaan läjittämään sekä miten rikastushiekka loppusijoitetaan. Sivukiveä ja pintamaata syntyy Pampalon kultakaivoksella vuosittain noin 100 - 160 000 tonnia ja rikastushiekkaa noin 200 000 tonnia. Lujuudeltaan hyvässä kunnossa olevat pintamaat sekä sivukivet käytetään rikastushiekka-aldaiden rakentamiseen sekä kaivostäyttöön. Heikkolaatuinen kiviaines ohjataan läjitysalueen maisemointiin.

Itä-Suomen ympäristölupapäätöksessä (2008) on lisäksi todettu, että Pampalon kultakaivoksella syntyneestä sivukivistä on tehty alkuaineanalyysi sekä liukoisuus- ja hapontuottotestit. Testien mukaan sivukivi täyttää kaatopaikalle sijoitettavan materiaalin raja-arvot, joten se ei ole ympäristölle haitallista ja se pystytään sijoittamaan pysyvän kaatopaikkajätteen ohjeiden mukaan. Myöskään rikastushiekka ei ylittänyt asetettuja liukoisuustestin arvoja, joten rikastushiekkaa ei voida pitää haitallisena ympäristölle. Rikastusprosessissa syntyy rikastushiekan lisäksi lietettä, josta hiekka erotetaan laskeutusprosessilla. Kaivoksen toiminnan loputtua rikastushiekan selkeytysallas tyhjenetään vedestä. Pampalon kaivoksella rikastusaltaan pohjalta ei poisteta maamassoja, sillä ne ovat tarpeeksi tiiviitä ja vettä läpäisemättömiä ja muodostavat täten jätealueen pohjarakenteen.

Jätekasaille ohjattavia kiinteitä jätteitä pyritään hyödyntämään myös Australian Queenslandin Ernest Henry monimetallikaivoksella (EHM). Kaivoksella louhitaan Siliézarin, Stollin ja Twomeyn (2011) mukaan raudan oksideja, kuparia ja kultaa. Vuonna 2009 Xtrata Copper-yritys investoi kaivokseen, jotta EHM:n toimintavuosia voitaisiin lisätä. Investointi suunnattiin louhinnan vaihtumiseen avolouhinnasta maanalaiseen louhintaan sekä magnetiitin rikastuslaitoksen rakentamiseen. Kaivoksen toimintaa voidaan investoinnin myötä jatkaa vuoteen 2024 asti. Kuparin ja kullan rikastamisprosessissa syntyy kaivoksella sivutuotteena magnetiittia, joka on tähän asti ohjattu kaivoksen jätekasolle. Uuden investoinnin myötä kaivoksen magnetiitti otetaan talteen magneettisen separoinnin, suotimien sekä murskaimien avulla. Sivuvirta sisältää myös hematiittia, mutta hematiitin talteenottoa ei laitoksella pystytä käytännössä toteuttamaan eikä hematiitilla ole samankaltaisia magneettisia ominaisuuksia kuin magnetiitilla. Magneettisilla erottimilla magnetiitti otetaan talteen kuparin rikastuksen sivuvirrasta. Erotettu magnetiitti myydään Aasian terästeollisuuden käyttöön, mutta magnetiitti voitaisiin myös ohjata hiilen jalostuksen pesunesteeksi. Markkinarako käytetyille magnetiitille löytyy ja investointi on erittäin kannattava myös kaivoksen eliniän suhteen.

5 YHTEENVETO

Kaivosteollisuus elää suuren nousun aikaa, kun Suomen kaivoksiin sijoitetaan miljardeja euroja. Metallimalmien louhinnassa syntyvien kiinteiden jätteiden ympäristövaikutukset on siis aiheena hyvin ajankohtainen, sillä jätteitä syntyy enenevässä määrin kaivosteollisuuden kukoistaessa. Jätteiden synnyn ehkäisyyn sekä kierrättämiseen ja hyötykäyttöön tulisikin kiinnittää erityisen paljon huomiota. Kaivosten jätevesiä ja -liuoksia on tutkittu paljon, mutta kiinteiden jätteiden hävitys ja hyötykäyttö on vielä vähäistä. Tämän työn tarkoituksena oli keskittyä kaivoksella syntyviin kiinteisiin jätteisiin.

Kaivoksilla syntyvät jätteet voidaan jakaa poistomaahan, rikastushiekkaan sekä sivukiveen. Poistomaata syntyy runsaimmin avolouhoksilla, sillä poistomaa on pintamaakerros, joka siirretään pois ennen louhinnan aloitusta. Poistomaata höytykäytetään muun muassa kaivoksen sulun yhteydessä maisemointiin. Sivukiveä syntyy kaivoksen louhintavaiheessa, jolloin malmi irroitetaan kaivoksesta. Arvotonta kiveä malmin ympärillä kutsutaan sivukiveksi. Sivukiveä voidaan ohjata uudelleenkäyttöön esimerkiksi kaivoksen täyttöön, läjitysalueiden pohjarakenteisiin sekä teiden rakentamiseen. Kiinteistä jätteistä ympäristölle suurimman riskin asettaa rikastushiekka, jota syntyy malmin rikastamisen sivutuotteena. Vaikka rikastusmenetelmiä kehitetään jatkuvasti ja ne ovat jo melko tehokkaita, syntyy useimmiten rikastuksen yhteydessä ympäristölle haitallista rikastushiekkajätettä. Syntyviä sivuvirtoja pyritään hyödyntämään ottamalla talteen niistä kaikki arvometallit ja kierrättämällä prosessivettä. Rikastushiekkaa jää hyödyntämisestä huolimatta läjitettäväksi, jolloin jäte kuivataan, saatetaan stabiiliksi ja sijoitetaan mahdollisimman turvallisesti jätepatoihin. Esimerkiksi kullan rikastamisprosessissa syntyy syanidipitoista rikastushiekkaa. Voitaisiko esimerkiksi Talvivaaran sivuprosessina muodostunutta kipsiä jalostaa niin, että sitä voitaisiin käyttää prosessissa kalkin sijaan?

Kiinteitä jätteitä syntyy kaivosteollisuudessa useita kymmeniä tonneja vuosittain. Jätekasojen varastointi maksaa yhä enemmän ja jätelupien saanti tulee tulevaisuudessa luultavasti hankaloitumaan, joten jätteiden vähentämiseen, käsittelyyn ja hyötykäyttöön tulisi sijoittaa paljon resursseja. Usein investointikustannukset ovatkin merkittävä asia jätteiden käsittelyä ja hyötykäyttöä mietittäessä. Nykyisessä tiedeyhteisössä akateeminen tutkimus on tuottanut lukuisia tuloksia, mutta tuntemattomaista syistä näitä ei vielä ole pystytty saattamaan teolliseen mittakaavaan. Voidaankin miettiä onko usea tässä työssä mainituista vaihtoehtoisista jätteenkäsittelymenetelmistä, esimerkiksi Bayer –prosessivaihtoehto, taloudellisesti kannattavaa. Tulevaisuuden kaivosten kiinteiden jätteiden käsittely riippuu siis pitkälti siitä, kuka investoi siihen vai ohjataanko teollisuuden toimijat erilaisin laein ja säädöksin ennen pitkää siihen.

6 LÄHTEET

Brady, J.E., Humiston, G.E., 1980. *General Chemistry: Principles and structure*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons. s. 601

Brown, T.J., Bide, T., Hannis, S.D., Idoine, N.E., Hetherington, L.E., Shaw, R.A., Walters, A.S., Lusty, P.A.J., Kendall, R., 2010. *World Mineral Production 2004-2008*. Buckinghamshire: Halstan & Co Ltd. s. 17, 31, 41-42, 49, 65, 68, 72, 90-91, 109

CME Group, Price of Silver. [verkkokuvaaja] Saatavilla: <http://www.cmegroup.com/trading/metals/precious/silver.html> kohdasta Charts. [viitattu 18. kesäkuuta 2011]

Da Pelo, S., Musu, E., Cidu, R., Frau, F., Lattanzi, P., 2009. Release of toxic elements from rocks and mine wastes at the Furtei gold mine (Sardinia, Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, 100, s. 142-152.

DiMarch, J., Vohden, J., 2011. Waste management practices at Alaska's large mines. *Tailings and mine waste '10*. Chapter 28. s. 285-293.

Driussi, C., Jansz, J., 2006. Technological options for waste minimisation in the mining industry. *Journal of Cleaner Production*, 14, s. 682-688.

Ekono Oy, 1987. *Vuorimiesyhdistyksen tutkimusloste A 79. Kaivosten kiinteiden jätteiden ja jätevesien käsittely – ohjeita ja suosituksia*. Helsinki: Vesi- ja ympäristöhallituksen monistamo.

Ericsson, M., 2010. *Global Mining Towards 2030: Food for thought for the Finnish mineral policy process 2010*. Tutkimusraportti 187. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. s. 6,7.

Euroopan komissio, 2009. *Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities*. s. 49, 65, 68.

Fourie, A., 2009. Preventing catastrophic failures and mitigating environmental impact of tailings storage facilities. *Procedia Earth and Planetary Science*, 1, s. 1067-1071.

Geologian tutkimuskeskus, 2010. *Suomen metallipotentiaaliset alueet*. Saatavilla: <http://www.gtk.fi/luonnonvarat2/metallit> [Viitattu 14. marraskuuta 2011]

Hakapää, A., Lappalainen P., 2009. *Kaivos- ja louhintatekniikka*. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy. s. 30, 73-74, 183, 198, 206.

Heikkinen P.M., Noras P., Salminen R., 2008. *Mine Closure Handbook*. Espoo: Vammalan Kirjapaino. s. 14.

Hitch, M., Ballantyne, S.M., Hindle S. R., 2010. Revaluing mine waste rock for carbon capture and storage. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 24(1), s. 64-79.

Härmä, T., Dahl, O., Mäenpää, I., 2005. *Suomen kaivostoiminnan ainevirrat ja sivuvirtojen hallinta*. Oulu: Yliopistopaino s. 6, 13, 15, 16.

Härmä, T., Mäenpää, I., 2007. *Suomen kaivostoiminnan ainevirrat ja sivuvirtojen hallinta, aikasarjataulukot*. [Excel-työkirja] Saatavilla: <http://thule.oulu.fi/raportit/kaivostoim/kaivostoim.htm> [Viitattu 22.9.2011]

IMF, 2011. *Actual Market Prices for Non-Fuel and Fuel Commodities, 2008-2011*. [verkkojulkaisu] Saatavilla: <http://www.imf.org/external/np/res/commod/Table3.pdf> [Viitattu 18. kesäkuuta 2011]

Itä-Suomen ympäristölupavirasto, 2008. Pampalon kultakaivosta ja rikastamoaa koskeva ympäristölupa ja Lietojanlammen padon vahvistaminen. Päätös nro 23/08/2. s. 8-11.

Jalovaara, V-M., 2011. Lapin miljardit löysivät ottajansa. *Tekniikka & Talous*, 21.10., s.14-17.

L 10.6.2011/621. Kaivoslaki. IV osa, 11. luku, 120 § ja V osa, 15. luku, 143 §.

Kitco, 2011. *Kullan hinta Yhdysvaltain dollareissa unssia kohti*. Saatavilla: <http://charts.kitco.com/KitcoCharts/index.jsp> [Viitattu 18. kesäkuuta 2011]

Kloek, W., Blumenthal K., 2009. *Generation and treatment of waste*. Eurostat: Statistics in focus. 30. s. 3.

Kosomaa, L., 1973. *Kaivosten jätteisiin liittyvät ympäristönsuojelulliset kysymykset*. Mikkeli. s. 10, 14.

Lehtonen, Pekka, Lehtonen, Paula, 2008. *Teknisten alojen kemia*. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit Oy. s. 242.

Marabini, A.M., Plescia, P., Maccari, D., Burragato, F., Pelino, M., 1998. New materials from industrial and mining wastes: glass-ceramics and glass-and rock-wool fibre. *International Journal of Mineral Processing*, 53, s. 121-134.

Marshall, M., 2010. Lax laws led to mud flood. *The New Scientist*, 208 (2782), s. 6.

McMurry, J., Fay, R.C., 2001. *Chemistry*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. s. 698, 913.

Navarro, P., Vargas, C., Alonso, M., Alguacil, J., 2007. Towards a more environmentally friendly process for gold: models on gold adsorption onto activated carbon from ammoniacal thiosulfate solutions. *Desalination*, 211, s. 58-63.

Pohjois-Suomen ympäristölupavirasto, 2007. Talvivaaran kaivoksen ympäristö- ja vesitalouslupa. Lupapäätös nro 33/07/1. s. 22-26.

Power, G., Gräfe, M., Klauber, C., 2011. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. *Hydrometallurgy*, 108, s. 33-45.

Pussinen, K., 2008. *Kaivosteollisuudessa syntyvän kipsin hyödyntäminen*. [Diplomityö] s. 2, 27, 106.

Raghavan, P.K.N., Kshatriya, N.K., Wawrynink, K., 2011. Recovery of metal values from red mud. *The Minerals, Metals & Materials Society*. s. 103-106.

Rampacek, C, 1982. An Overview of Mining and Mineral Processing Waste as a Resource. *Resources and Conservation*, 9, s. 75-86.

Saarela, J., 1990. Vesi- ja ympäristöhallinnon julkaisuja – sarja A 64. *Kaivosjätteiden geoteknisistä ominaisuuksista*. s. 11, 82, 83.

Siliézar, J., Stoll, D., Twomey, J., 2011. Unlocking the Value in Waste and Reducing Tailings – Magnetite Production at Ernest Henry Mining. *Iron ore conference /Perth, WA, 11. -13.7.2011.* s. 529-535.

Talvivaara, 2009. *Tuotantoprosessi.* [verkkojulkaisu] Saatavilla: <http://www.talvivaara.com/toiminta/tuotantoprosessi> [Viitattu 30. elokuuta 2011]

Tilastokeskus, 2010. *Jätetilasto 2008.* [verkkojulkaisu] Saatavilla: http://www.stat.fi/til/jate/2008/jate_2008_2010-05-26_fi.pdf [Viitattu 31. toukokuuta 2011] s. 3.

Totten, G.E., MacKenzie, D.S., 2003. *Handbook of Aluminum.* Vol. 1. New York: Marcel Dekker, Inc. s. 16-17.

Työ- ja elinkeinoministeriö, TEM, 2011. Tilastotietoja vuoriteollisuudesta 2010. *Vuorimiesyhdistys: Materia, 2, s. 57.*