



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

Sulfidikaivoksen elinkaaren aikana tuotetun AMD:n synty ja minimointi

Sampo Keränen

Geotieteet
Kandidaatintyö
Joulukuu 2022

Tiivistelmä

Sulfidikaivoksen elinkaaren aikana tuotetun AMD:n synty ja minimointi

Sampo Henrik Kustaa Keränen

Oulun yliopisto, geotieteet tutkinto-ohjelma

Kandidaatintyö 2022, 36 s.

Työn ohjaaja yliopistolla: Pertti Sarala

Sulfidit kuuluvat yleisimpiin louhittaviin materiaaleihin, joita kaivoksissa maailmanlaajuisesti louhitaan. Pääsyy louhimiseen on sulfideista saatavat metallit, jotka voidaan rikastaa ja laittaa käyttöön useissa eri teollisuuden, rakennuksen sekä teknologian muodossa. Sulfidien louhinta voidaan näin ollen nähdä välttämättömänä osana niin teknologian kuin myös yhteiskunnan nykyaikaista olemassaoloa. Saatavilla olevat sulfidimäärät ovat kuitenkin pienentyneet viimeisten vuosikymmenien aikana, johtuen pitoisuuksien heikentymisestä sulfidimalmeissa. Heikkoja pitoisuuksia on pystytty kompensoimaan tehokkaammalla louhinnalla, mutta tämä on vaatinut enemmän resursseja sekä enemmän jätteiden tuotantoa kaivoksista.

Sulfidikaivoksen elinkaaren aikana tulee syntymään useita saasteita, jotka voivat aiheuttaa vakavaa tuhoa kaivosalueen vesistöihin, maaperään sekä ympäristöön yleisesti. Yksi merkittävimmistä syntyvistä saasteista on AMD, eli kaivoksen happovaluma. Happovalumat ovat kaivoksien kannalta vakavia ongelmia, jotka voivat haitata kaivosalueita niin kaivoksen toiminnan, kuin myös toiminnan päättymisen jälkeen. Happovalumat syntyvät hapettumisreaktioissa mineraaliainekselle, jonka myötä tuotetaan happamia yhdisteitä sekä metallipitoisia nesteitä. Hapettumisreaktiot ovat eri mineraaleille erilaisia, niin tuotteiden kuin reaktioiden käynnistymisen kannalta. Yhteistä happovalumiin reaktiolla on kuitenkin se, että ne niiden toteutumien helpottuu happovalumiin edetessä. Reaktioiden helpompi toteutuminen johtaa siihen, että hapettumisreaktiot leviävät laajemmille alueille, reaktioiden aktivointiin tarvitaan vähemmän energiaa, reaktionopeudet kasvavat ja uudempia, entistä hapettavampia reaktioita voidaan suorittaa.

Happovalumiin kiihtyvä kehitys on merkittävä ongelma, joka tekee haittojen sekä valumiin hallinnasta vaikeaa sekä tärkeää. On kuitenkin olemassa menetelmiä sekä tekniikoita, joiden avulla voidaan mitata, lieventää ja korjata happovalumiin aiheuttamia vahinkoja. Happovalumiin liittyvät reaktiot sekä tavat, joilla reaktiot saadaan ehkäistyä ovat entistä tärkeämpiä tekijöitä kaivoksien ympäristöjen kannalta. Tiedon avulla voidaan välttää reaktioiden pahimmat seuraukset, ja paremman tiedon avulla voidaan välttää seurauksia paremmin.

Asiasanat: Happovalumat, Sulfidit, Kaivos, Happotuotanto, AMD

Sisällys

Tiivistelmä

Johdanto	1
1. Kaivoksen tyypillinen elinkaari	1
1.1 Etsintävaihe.....	1
1.2 Suunnitelmavaihe	3
1.3 Rakennusvaihe.....	3
1.4 Tuotantovaihe	4
1.5 Sulkemis- ja jälkihoito	5
2. Sulfidikaivokset ja niiden toiminta	6
3. Happamoitumisreaktiot (AMD)	7
4. AMD-Tuotanto	8
4.1 Avolouhos	9
4.2 Maanalainen kaivos.....	10
4.3 Sivukivet ja jätekivet.....	10
4.4 Rikastushiekka.....	11
5. Happamoitumisreaktiot mineraaleille	12
5.1 Pyriitti.....	12
5.2 Magneettikiisu.....	14
5.3 Sinkkivälke.....	15
5.4 Lyijyhohde.....	16
5.5 Kuparikiisu	16
5.6 Arseenikiisu.....	17
6. AMD ja mikrobit	18
7. AMD neutralisointi	19
7.1 Karbonaatit.....	20
7.2 Hydroksit.....	21
7.3 Sekundääri sulfidit ja muut sulfidipitoiset muodostumat	21
8. AMD Testaus ja mittaus	22
9. AMD hoito	24
9.1 Ehkäisevät tekniikat.....	24
9.2 Lieventäminen ja korjaaminen	25
9.2.1 Abioottiset	26
9.2.2 Bioottiset.....	27
10. Yhteenveto	29
Lähteet	31

Johdanto

Sulfidikaivokset kuuluvat maailman yleisimpiin kaivostyyppeihin, niiden nykytekniikalle ja elämäntyylille välttämättömien metallien sekä mineraalien myötä. Näiden kaivosten toiminta kuitenkin johtaa ympäristöä vahingoittavien yhdisteiden sekä happovalumiin muodostumiseen entistä nopeammin, suurempien louhintojen myötä. Työn tavoitteena on suorittaa katsaus sulfidikaivosten elinkaaren aikana muodostuviin happovalumiin ja niistä peräisin oleviin haittoihin, siinä toivossa, että menetelmiä voitaisiin paremmin ymmärtää. Työssä käydään läpi sulfidikaivoksen elinkaaren eri vaiheet sekä niiden yleinen toiminta, jonka jälkeen käydään läpi mitenkä happovalumat muodostuvat kaivosympäristössä. Työssä käydään myös läpi sitä mitä happovalumat ovat, minkälaisilla mekanismeilla ne toimivat, mitenkä ne esiintyvät, mitkä tekijät edistävät valumiin muodostumista sekä minkälaiset tekijät estävät niiden muodostumisen. Lopussa käydään myös metodeja sekä tekniikoita joiden avulla kaivosten happovalumia voidaan korjata tai mitenkä niiltä voidaan kokonaan välttyä kaivoksissa.

1. Kaivoksen tyypillinen elinkaari

Kaivostoiminta on määritelty toiminnaksi, jossa metallimalmia tai muuta teollisuusmineraalia louhitaan ylös maa- tai kallioperästä hyödynnettäväksi (Heikkinen, 2005). Kaivostoiminta on kuitenkin vain yksi osa koko kaivoksen elinkaaresta, joka alkaa etsintävaiheessa. Kaivoksen elinkaari voidaan jakaa neljään osaan, jotka ovat: etsintävaihe, kaivoksen suunnittelu ja rakentamisvaihe, kaivoksen tuotantovaiheen ja kaivoksen sulkeminen sekä jälkihoito. Näillä vaiheilla on erilaiset tavoitteet sekä toteutustavat toisistaan, myös vaiheiden kestossa on merkittäviä eroja (Badri, 2012).

1.1 Etsintävaihe

Ensimmäinen kaivoksen elinkaaren vaiheista, etsintävaihe, toimii kaivoshankkeen muodostumisen perustana. Etsintävaiheen tavoitteena on etsiä mahdollisia hyödynnettäviä malmi- tai mineraaliesiintymiä. Etsintävaihe voidaan jakaa kahteen eri lohkoon, jotka ovat greenfield-etsintä ja brownfield-etsintä. Greenfield-etsinnällä malminetsintäoperaatioita suoritetaan uudella, ennestään koskemattomalla alueella, jonka mahdollisia malmi- tai mineraalivaroja ei vielä tiedetä (Sarala, 2014). Brownfield-etsinnällä tarkoitetaan malminetsintän suorittamista, jo ennestään tunnetulla ja kartoitetulla alueella (Heikkinen, 2005). Esimerkki brownfield-etsinnästä voi olla jo toiminnassa olevan kaivoksen lähialueiden tutkiminen, mahdollisia esiintymiä kohtaan, joita voitaisiin

taloudellisesti hyödyntää jo ennestään alueella olevien kaivosoperaatioiden myötä (Kurimo, 2013). Etsintävaihe on olennainen vaihe kaivoksen kannalta, sillä kaivoksen mahdollisesta olemassaolosta päätetään sen perusteella, onko löydetty esiintymä hyödynnettävissä. Esiintymän hyödynnettävyys riippuu useista tekijöistä kuten, malmityypistä, malmin laadusta sekä esiintymän sijainnista. Malmin hyödynnettävyyteen vaikuttaa merkittävästi esiintymän sijainti, sillä se voi tehdä muutoin mahdollisesta korkealaatuisesta esiintymästä, käytännössä mahdottoman hyödyntää. Sijaintiin vaikuttavia tekijöitä voivat olla niin geograafiset tekijät, kuin myös ihmiselliset tekijät. Esimerkkejä näistä voivat olla malmiesiintymät vesistöjen, suojelualueiden tai kaupunkien kohdalla.

Etsinnän suorituksessa on omat vaiheensa, joidenka mukaan saadaan mahdollisimman tehokkaasti dataa mahdollisista esiintymistä. Nämä vaiheet ovat tiedustelu, mahdollinen esiintymä, etsintä ”prospektaus” ja taloudellisten näytteiden keruu (Haldar, 2018). Vaiheiden edetessä etsintätavat myös kehittyvät, kun päästään lähemmäs haluttua esiintymää, kun aletaan tuottamaan tarkempaa sekä parempi laatuista dataa. Alkuvaiheessa etsintämenetelmillä tutkitaan laajoja alueita, joille suoritetaan alustavia tutkimuksia. Nämä alustavat tutkimukset eivät kerro esiintymistä riittävästi kaivostoiminnan kannalta, mutta alustavien tutkimusten avulla voidaan paikantaa merkittäviä alueita. Esimerkki tällaisesta menetelmästä on lennokien käyttö, joiden avulla voidaan kerätä alustavaa dataa laajoilta alueilta nopeasti. Myöhemmissä vaiheessa, kun kiinnostavat alueet on saatu paikannettua, voidaan suorittaa lapio näytteiden keräämisiä sekä viimeiseksi mahdollisten kairauksien toteutuksia (Haldar, 2018). Etsintävaiheen edetessä tullaan tarvitsemaan myös erilaisia lupia, jotta voidaan jatkaa perusteellisempia etsintäprosesseja (Kaiva). Etsintävaihe ei ole kestoltaan rajattu, vaan se voi jatkua useita vuosia ennen kuin löydetään hyödynnettäviä esiintymiä (Heikkinen, 2005). Etsintävaihe ei kuitenkaan ole ympäristölle erityisen kuormittava, jos sitä vertaa muihin kaivoksen vaiheisiin. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö syntyisi haittoja työskentelyn seurauksena. Vaikka turvallisuus sekä ympäristö pyritään ottamaan huomioon parhaan mukaan, silti onnettomuuksia sekä riskejä voi esiintyä etsinnän yhteydessä, joka voi vahingoittaa ympäristöä sekä työntekijöitä. Esimerkki tällaisesta voi olla onnettomuus kairalaitteistojen kanssa, sekä siitä aiheutuvat vuodot ympäristöön. Riskien todennäköisyyttä voidaan kuitenkin vähentää riittäväällä valmiudella, huollolla sekä kokemuksella (Singer, 1999). Mikäli etsintävaiheen aikana löydetty esiintymä on hyödynnettävissä, niin voidaan alkaa suunnitella kaivoksen perustamista.

1.2 Suunnitelmavaihe

Kaivoksen suunnitelma on olennainen osa kaivoksen toteutusta. Kaivoksen suunnittelu vaiheen aikana tullaan käymään läpi kuinka suuri kaivos on, mitenkä esiintymä louhitaan, mihinkä jätteet laitetaan, minkälaiset kulkureitit järjestetään, rakennussuunnitelmat sekä niiden toteutus ja muut olennaiset vaiheet (Heikkinen, 2005). Suunnitteluvaiheen aikana tulee olla tarkkaan määritettynä kaivoksen kannalta olennaisimmat osiot niin tuotannon kuin myös jätteiden sekä turvallisuuden kannalta, ennen kuin voidaan aloittaa toteuttamaan mitään suunnitelmia. Suunnitelmat tulee ensin saada hyväksytyä niin lainsäädäntöjen, sekä alueella mahdollisesti elävien paikallisten kanssa, kuten on kaivoslain pykälissä §34, §38 ja §39 määritetty (Kaiva, Finlex). Paikallisten hyväksymisen saaminen voi olla vaikeampi prosessi kuin laillisten vaatimusten täyttö, mutta se on erittäin tärkeä seikka kaivoksen kannattavuuden sekä maineen kannalta. Saasteet ovat yksi näkyvimmistä sekä onnettomuuksien jälkeen vahingoittavimmista tekijöistä maineelle sekä paikallisten hyväksynnälle (Kaiva). Tämä negatiivinen vaikutus maineeseen onkin painostava tekijä useille kaivoksille, joissa pyritään välttämään negatiivisia seurauksia kattavien suunnitelmien luomisen avulla. Ympäristöturvallisuuden takaaminen ja ylläpito ovat myös osa lainsäädäntöjä, jotka tulee olla täytettyinä ennen kuin voidaan alkaa toteuttamaan kaivosprojektia (Finlex, Kaiva). Suunnitteluvaiheen toteutus voi kestää useita vuosia, ennen kuin saadaan hyväksyttävä suunnitelma tuotettua. Hyväksytyt suunnitelman myötä saadaan kaivoslupa, ja voidaan aloittaa kaivoksen rakentaminen.

1.3 Rakennusvaihe

Rakennusvaiheen aikana kaivoksen infrastruktuuri rakennetaan, tiet sekä johdot yhdistetään ja muutetaan aiemmat käyttämättömät alueet, altaiksi kaivostoimintoja varten. Rakennusvaihe on ensimmäinen vaihe, jonka aikana vapautuvat päästöt sekä saasteet voivat olla mittavia, kuten useilla suurilla rakennusprojekteilla on tapana olla. Kaivoksen perustaminen vaatii voimakasta liikennöintiä, jotta saadaan kuljetettu tarvittavat rakennusmateriaalit kaivosalueelle. Liikennöityminen rekkojen avulla on melko tyypillinen tapa toimittaa kaivokselle tarpeellisia materiaaleja, joiden avulla kaivoksen toiminta voidaan aloittaa. Liikennöityminen kuitenkin vaatii sopivat kulkutiet ollakseen kannattavaa, joka usein johtaa uusien teiden rakentamiseen kaivosprojektin aikana. Kuljetuksen aikana vapautuu rekkojen myötä polttoaineesta peräisin olevia päästöjä, hiukkaspäästöjä sekä muita päästöjä, kuten meluhaitat (Heikkinen, 2005). Itse kaivoksen alueelle pitää luoda riittävästi tilaa kaivokselle tarvittaville rakennuksille ja tiloille. Tätä varten voidaan usein joutua raivaamaan tieltä pois alueella sijaitsevaa kasvillisuutta sekä kasvustoa. Raivatuille alueille rakennetaan tarvittavat tilat,

sekä tuodaan tarvittavat laitteistot kaivoksen toimintaa varten. Rakennusvaihe voi kestää muutamia vuosia, riippuen siitä kuinka kaukana kaivosalue sijaitsee, sekä kuinka haastavaa on rakentaminen kyseisellä alueella (Heikkinen, 2005). Kun kaivosalueelle on tuotettu tarvittava infrastruktuuri suunnitelman mukaan, voidaan aloittaa kaivoksen tuotantovaihe.

1.4 Tuotantovaihe

Tuotantovaihe on kaivoksen kannalta sen merkitsevin vaihe niin taloudellisesti, maineen kannalta sekä ympäristön näkökulmasta. Tuotantovaiheen aikana kaivos on toiminnassa ja aktiivisesti louhii sekä käsittelee louhittua ainesta. Kaivosten toimintatavat voivat erota toisistaan niin kaivostyyppien kuin myös louhittavien malmien perusteella, on kuitenkin tiettyjä prosesseja, jotka ovat ominaisia useimmille kaivoksille tuotantovaiheessa. Esiintymän louhinta ja talteenotto ovat olennaisia osia tuotantovaiheen aikana tapahtuvista prosesseista, vaikka louhinta ja talteenotto tapahtuisivatkin useilla eri menetelmillä (Heikkinen, 2005). Räjähdeiden käyttö on tyypillistä useimmissa kaivoksissa, joiden seurauksena vapautuu räjähdaineissa olevia yhdisteitä sekä komponentteja (Heikkinen, 2005). Nämä vapautuneet yhdisteet voivat olla haitallisia, jos ne pääsevät leviämään vesistöihin tai muuhun herkkään ympäristöön. Räjähdyksien avulla saadaan esiintymästä irti materiaalia, joka voidaan jakaa rikastettavaksi aineeksi sekä sivukiveksi, joista rikastettava aines toimitetaan rikastamoon käsiteltäväksi.

Rikastamot ovat myös merkittävä osa tuotantovaihetta, sillä niissä kerätty materiaali käsitellään ja jaetaan hyödyllisiksi kappaleiksi useiden prosessien myötä. Murskaimet sekä muut mekaaniset menetelmät ovat yleisiä rikastuksen alkuvaiheen menetelmiä, joidenka jälkeen voidaan siirtyä erottimiin, joilla saadaan halutut materiaalit erotettua muusta murskasta. Erotusmenetelmiä on useita malmista tai mineraalista riippuen, kuten magneettierotukset, jotka soveltuvat magneettisesti reaktiivisille aineksille. Tämän jälkeen materiaali voidaan jauhaa pienemmiksi kappaleiksi, jonka jälkeen voidaan aloittaa vaahdotusprosessit. Vaahdotuksen avulla voidaan erottaa jauhettu materiaali ominaisuuksiensa perusteella toisistaan. Onnistuneen rikastusprosessin aikana syntyy rikaste, joka toimii haluttuna lopputuotteena rikastamisen päätyttyä. Rikasteen lisäksi saadaan myös rikastushiekkaa, joka sisältää rikastusprosessin aikana syntyneen muun materiaalin. Kaivoksen tuotantovaiheen tuotteet voidaan siis jakaa kolmeen eri pääryhmään, rikasteeseen, rikastushiekkaan sekä sivukiveen. Rikasteen osuus on näistä kolmesta pienin, sillä sen tuotto vaatii suuret määrät rikastushiekan sekä sivukiven louhimista. Tämä johtuu pääasiassa malmien laaduissa esiintyvistä

laskusta, joidenka seurauksena rikasteen tuottoon vaadittavat sivukivi- ja rikastushiekka määrät ovat kasvaneet.

Yleisesti ottaen kaivostoiminnassa käytettävän materiaalin ja aineksen määrällinen tarve on kasvanut merkittävästi alhaisten pitoisuusarvojen takia. Yleinen arvio on, että tarve niin kaivoksesta louhittavalle ainekselle, kuin myös vedelle sekä energialle on kolminkertaistunut tuotantovaiheessa viimeisen 20 vuoden aikana (Simon, 2021). Kasvaneet vaatimukset ovat vaikuttaneet mahdollisten haittavaikutusten suuruuden kasvuun merkittävästi, mikä on entisestään tehnyt saasteiden sekä ympäristön hoidosta ja hallinnasta merkittävämpiä osia kaivostoiminnassa. Nykyään pienemmänkin ongelmakohteen aliarvioiminen tai huomiotta jättäminen voi johtaa katastrofaalisiin seurauksiin, minkä takia kaivoksilla panostetaan entistä enemmän ympäristön ylläpidon takaamiseksi. Ympäristön ylläpito on myös laissa määritelty vastuu, josta useimmat kaivokset eivät halua joutua maksamaan reklamaatioita (Finlex, Kaiva). Ympäristöongelmien huomioonotto sekä ehkäisy voivat olla kaivokselle edullisempia pitkällä aikavälillä, niin taloudellisesti kuin myös maineen kannalta. Tuotantovaihe voi kestää esiintymän koon mukaan useita vuosikymmeniä, joskus on mahdollista, että esiintymästä on sadoiksi vuosiksi louhittavaa, vaikka tällaiset esiintymät ovatkin usein ainutlaatuisia. Kun tuotanto päättyy ja alueella ei ole enää taloudellisesti kannattavaa louhintaa tehtävänä, niin siirrytään kaivoksen sulkemis- ja jälkihoitovaiheeseen.

1.5 Sulkemis- ja jälkihoito

Sulkemis- ja jälkihoitovaihe on kaivoksen elinkaaren viimeinen vaihe, ja usein myös pisin kaivoksen vaiheista sillä jälkihoitoa ja ylläpito tulee toteuttaa säännöllisesti, jotta kaivosalueesta ei olisi haittaa ympäristölle. Sulkemisoperaatiot aloitetaan, kun kaivoksen toiminta päätetään lopettaa. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että kaikki kaivostoiminta lopetetaan heti. Kaivos voidaan sulkea osa kerrallaan sen mukaan kun kaivoksen osat voidaan lopettaa. Mahdolliset sulkemissuunitelmat tulee olla olemassa jo suunnitteluvaiheessa, mutta näihin suunnitelmiin tyypillisesti tulee muutoksia toiminnan sekä parantuneen tiedon ja datan perusteella (Kaiva). Kaivoksen sulkemisen päätavoite on palauttaa ympäristö mahdollisimman lähelle sen kaivosta edeltävää tilaa, kuten on laissa määritelty (Finlex, Kaiva). Tämä voi johtaa kaivoksesta riippuen erilaisiin sulkemiskäytäntöihin, joilla pyritään minimoimaan mahdolliset vahingot. Yleinen ratkaisu esimerkiksi maanalaisille kaivoksille on täyttää ne louhitulla sivukivellä, jonka jälkeen kaivos täytetään vedellä ja suljetaan kiinni. Tämän teon tarkoituksena olisi sulkea sivukivistä aiheuttavat mahdolliset haittavaikutukset takaisin kaivokseen, samalla kuin vesi toimii eräänlaisena hauteena, joka estäisi haittojen leviämisen eteenpäin.

Vesihauteen toteuttaminen kuitenkin vaatisi vielä lisätyötä kaivosta kohtaan, kuten lisätukia kaivoksen romahdusta vastaan. Usein kaivoksen kunnollinen lopetus vaatiikin uusien pysyvien rakenteiden kokoamista, jotta haitalliset elementit sekä mahdolliset sortumiset voitaisiin välttää. Kaivosaluetta pyritään palauttamaan luonnonmukaiseen tilaansa istuttamalla kasvillisuutta alueelle, tai muutoin reklamoimalla kaivosalueen. Kasvillisuutta voidaan myös käyttää saasteita sitovana tekijänä, jonka myötä alueen haitalliset elementit saadaan paremmin hillittyä (Heikkinen, 2005).

Siinä missä sulkemisoperaatiot toteutetaan kertaalleen kaivostoiminnan lopetettua, jälkihoidon ylläpitoa voidaan tulla toistamaan useaan kertaan. Jälkihoito ylläpitoon kuuluu monitorointi sekä tarvittaessa lisäoperaatioita vahinkojen välttämiseksi sekä nykyisen tilan ylläpitämiseksi. Nämä operaatiot ovat säännöllisiä aikaväleillä, usein vuosittaisilla tarkastuksilla, joiden perusteella päätetään jatkotoiminnoista (Heikkinen, 2005). Jatkotoiminnot eivät ole aina tarpeellisia, joka voi johtaa pitkiin aikoihin, jolloin ei ole tarvetta suuremmille jatkotoiminnoille. Tämä tekee jälkihoidon ylläpito vaiheesta mahdollisesti kustannustehokkaan, kun ei tarvita investoida muuhun kuin säännöllisiin tarkastuskierroksiin. Tämä kuitenkin vaatisi sen, että sulkeminen ja sen jälkeiset jälkihoito-operaatiot olisi suoritettu tehokkaasti ja oikeilla tekniikoilla.

2. Sulfidikaivokset ja niiden toiminta

Sulfidikaivokset ovat yksi yleisimpiä kaivostyyppejä, joita maailmassa nähdään ja ne kuuluvat taloudellisesti merkittävimpiin kaivosryhmiin. Sulfidikaivoksissa louhitaan sulfidimalmeja, jotka ovat useiden merkittävien raaka-aineiden sekä metallien lähde. Sulfidikaivoksia esiintyy avolouhoksina sekä maanalaisina kaivoksina, riippuen esiintymän ominaisuuksista sekä koosta. Avolouhoksella tarkoitetaan maan pinnalla tapahtuvaa louhintaa, jota suositaan kallionpintaan ulottuvilla malmiesiintymillä sekä laaja-alaisilla esiintymillä, joita voidaan syvyyden kasvaessa louhia maanalaisten kaivosten avulla. Sivukiven sekä muun sivumateriaalin tuotanto on suurempaa avolouhoksilla verrattuna maanalaisiin kaivoksiin, sillä muun materiaalin louhintaa tulee suorittaa avolouhoksilla laajemmassa mittakaavassa, jotta voidaan päästä käsiksi haluttuihin malmivaroihin (Heikkinen, 2005). Avolouhoksien tuotanto vaatii siis merkittävän lisän sivukivien tuotantoon, ollakseen riittävä rikasteen tuotannon suhteen. Maanalaiset kaivokset sen sijaan rakennetaan maanalle, josta pystytään suoraan louhimaan esiintymää. Tämä johtaa vähäisempään sivukiven tuotantoon verrattuna avolouhoksiin, mutta maanalaisen kaivoksen rakentaminen sekä ylläpito ovat haastavampia toteuttaa. Maanalaisia kaivoksia suositaan, kun esiintymä on laadultaan hyvä, mutta ei ole kooltaan useita kilometrejä. Maanalaisten kaivosten avulla voidaan myös toteuttaa louhintaa

alueilla, joissa avolouhinta muutoin olisi haastavaa, joko sosiaalisista tai maantieteellisistä syistä. Kaivosalueella voi olla avolouhos, maanalainen kaivos tai kumpikin, riippuen esiintymien koosta ja ominaisuuksista (Heikkinen, 2005).

Sulfidikaivoksilla on lukuisia louhittavia malmimineraaleja, joita tarvitaan useiden rakenteiden, teknologioiden sekä tuotteiden raaka-aineina. Sulfidikaivokset voidaankin nähdä yhtenä nykyajan välttämättömyyksistä, sillä ilman niitä ei olisi raaka-aineita useimpiin rakennus- ja tuotantoprosesseihin. Yleisiä haluttuja metalleja, joita sulfidikaivoksista louhitaan ovat esimerkiksi rauta, nikkeli, kupari sekä kromi. Näitä metalleja käytetään kaikilla teollisuuden aloilla ja ne ovat merkittäviä jokapäiväisessä toiminnassa, jonka myötä ihmiset ovat riippuvaisia näiden metallien jatkuvasta tuotannosta. Metallit eivät kuitenkaan esiinny puhtaasti luonnossa, vaan ne ovat komponentteina erilaisissa sulfidimineraaleissa. Kaikki sulfidimineraalit eivät kuitenkaan ole taloudellisesti hyödynnettävissä, joko niiden alhaisten pitoisuuksien tai metallin erottaminen muusta mineraalista olisi liian kallista tai vaivalloista, ollakseen sen arvoista. Yleisiä hyödynnettäviä sulfidimalmeja ovat karsikivissä, magmaattisissa sekä sedimenttisissä sulfidimalmeissa esiintyvät mineraalit, kuten kuparikiisut, sinkkivälkkeet ja lyijyhohteet. Tämän lisäksi louhitaan usein hyödyttömiä tai jopa haitallisia sulfidimineraaleja sivukivinä, kuten pyriitti sekä arseenikiisu. Sulfidien ominaisuuksien tietäminen on olennaista niin rikasteen, kuin myös muun tuotetun materiaalin kannalta, jos halutaan saavuttaa mahdollisimman hyvät taloudelliset voitot, samalla välttämällä ympäristöongelmia.

3. Happamoitusreaktiot (AMD)

Erilaiset happamoitusreaktiot ovat yleisiä kaivosalueilla niiden toiminnan aikana, jolloin ne tuottavat ympäristöä happamoittavia yhdisteitä, jotka voivat aiheuttaa vakavia vaurioita. Happamoitusreaktiot voivat jatkua myös kaivoksen sulkemisen jälkeen, jos niitä ei ole siihen mennessä saatu hallittavaan tilaan. Happamoitus esiintyy kaivoksen happovaluman muodossa eli AMD:nä. AMD:tä käytetään yleisterminä, kun halutaan kuvata kaivosympäristöstä johtuvaa happamoitumista, sillä AMD ei synny yhdestä lähteestä kaivostoiminnan aikana, vaan sillä on useita erilaisia syntytapoja, useista erilaisista mineraaleista (Blowes, 2014). Tyypillisesti AMD-reaktiot johtuvat mineraalien hapettumisreaktioista, joiden seurauksena happamia yhdisteitä sekä metalleja pääsee kaivoksien jätevesiin sekä vesistöihin (Dold, 2014). Happamoitusreaktiot usein alkavat toteutua nopeammin happamissa olosuhteissa, joka johtaa AMD-reaktioiden kasvuun hapettumisreaktioiden jatkumisen aikana (Blowes, 2014). Reaktioiden esteetön jatkuminen johtaa

reaktioiden voimistumiseen ja tämän kautta ympäristön tilan nopeaan heikkenemiseen. AMD:n kaltaisia happamoitumisreaktioita voidaan kuvata myös termillä kivien happovalumana, eli ARD:nä (Dold, 2014). Happamoitumisreaktiot, jotka johtuvat happovalumista voivat olla suurimpia ympäristöhaittoja, jotka leviävät kaivosalueilta. Kaikki kaivoksilla tapahtuvat valumat eivät kuitenkaan ole aina happamia, vaan osa niistä voi olla neutraaleja tai jopa emäksisiä, riippuen valumakohteesta (Nordstrom, 2011).

AMD ilmenee kaivoksien toiminta- sekä sulkemisvaiheiden yhteydessä, sillä ne ovat yleisimmät vaiheet, jolloin hapettumisreaktiot mineraaleille on mahdollisia. Suunnitteluvaiheen voi ottaa epäsuorasti osaksi happovalumien muodostusta, sillä kaivosalueen suunnitelmilla on merkittävä rooli valumien muodostumisen kannalta. Yleisin syy kaivoksien happovalumille ovat sulfidimineraaleille tapahtuvat kemialliset reaktiot. Näistä reaktiosta erityisesti hapettavat reaktiot ovat voimakkaita tekijöitä ympäristön kannalta, mutta sulfideilla on muitakin reaktioita kaivosalueilla. Happamoitumisreaktiot sekä AMD:n muodostuminen ovat pääasiassa sulfaattimineraaleista johtuvia ilmiöitä. Tämä tekee sulfaateista entistä tärkeämmän tekijän kaivosalueilla, niin ympäristötekijänä, sekä niiden mahdollisen taloudellisen arvon lisäksi. Sulfaattimineraaleja on useita, ja niiden happamoitumisreaktiot ovat toisistaan poikkeavia niin reaktiomenetelmiltään kuin myös voimakkuudeltaan (Nordstrom, 1999). AMD:n tuottamat muutokset pH:ssa sekä metallien pitoisuuksissa nesteissä ovat toisiinsa vaikuttavia, sillä pH:n laskiessa entistä useammat metallit alkavat mobilisoitumaan sulfideista (Jurjovec, 2001).

4. AMD-Tuotanto

Happovalumien muodostuminen vaatii happamoitumisreaktioita, joissa hapettava materiaalia tuottaa hapettuessaan tuotteena happamia yhdisteitä. Kaivosalueilla happovaluma alueita voi syntyä ympäristöstä riippuen alueilla, joissa on hapettavaa materiaalia sekä hapettumisreaktiot ovat mahdollisia. Tällaisia alueita voivat olla rikastushiekkakasat, sivukivet, jätekivet sekä kerätyt malmit, joita ei olla varastoitu oikein (Heikkinen, 2005). Kaivosympäristön kaivostavat avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen välillä vaikuttaa merkittävästi kaivosalueella tuotettuun sivukiveen, joka voi johtaa happamoitumisreaktioihin. Vähäisempi määrä tuotettua sivukiveä kaivosalueella tekee kaivoksen happamoitumisen hallitsemisesta helpompaa, mutta se ei ole aina mahdollista kaivostyypistä riippuen (Blowes, 2014). Kaivosalueilla on tyypillistä malmien, sivukivien sekä muun materiaalin kasaaminen ja organisointi tietyille ennalta sovituille alueille kaivoksella. Vaikka käytetään tehokkaita menetelmiä, jotka kykenevät erottamaan suurimman osan sulfaattimateriaalista

muusta, niin silti alle 100 % kaikesta louhitusta sulfidimateriaalista päätyy sille määritettyyn kasaan. Tämä erilleen joutunut määrä sulfidimineraaleja voi alkukäteen vaikuttaa pieneltä, sillä talteenotto määrä voi helposti olla yli 90 % nykyaikaisilla rikastamoilla, mutta kannattaa ottaa huomioon kuinka suuria määriä malmia, sivukiviä sekä muuta materiaalia käsitellään kaivoksilla. Nykyään kaivokset vaativat enemmän resursseja sekä tuottavat enemmän ei haluttua materiaalia, sillä saatavilla olevien malmien pitoisuudet ovat pienentyneet (Simon, 2021). Tämä johtaa siihen, että kaivokset tulevat tuottamaan suurempia määriä sivukiviä kuin ennen, joka voi sivukivestä riippuen johtaa merkittäviin ympäristöongelmiin. Myös ne keräämättä jääneet osuudet malmeista voivat olla mittavia taloudellisesti, mutta ne voivat olla vielä merkittävämpiä ympäristön kannalta, jos sulfideilla alkaa ennalta huomaamaton happamoitumisreaktio alueella, jossa siihen ei oltu varaudutta (Dold, 2010).

Kaivosalueen ympäristöllä sekä ilmastolla on merkittävä rooli happamoitumisreaktioiden muodostumisessa, joka voi vaikuttaa siihen miten happamoitumisreaktioihin suhtaudutaan. Happamoitumisreaktioiden voimakkuus voi vaihdella merkittävästi riippuen siitä minkälaisissa olosuhteissa ollaan. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. kosteus, ilman oksidipitoisuus sekä mikrobit, jotka voivat kaikki avustaa reaktioiden toteuttamisessa. (Nordstrom, 1999). Happotuotannon kannalta on hyvä huomioida, ettei kaikkien mineraalien tuotanto ole saman arvoista, jotkut mineraalit eivät edes kykene muodostamaan merkittäviä haitallisia elementtejä happamoitumisen myötä (Blowes, 2014). On tärkeää keskittyä oikeasti haitallisten happotuotantojen estämiseen, sen sijaan että käydään käsiksi hyvänlaatuisiin valumiin, joiden vaikutukset eivät ole haitallisia. Yleinen lähde kaivosten AMD tuotannolle kuitenkin löytyy rikastushiekasta (Dold, 2014), mutta kaivosten tyypeillä sekä muilla kasoilla on myös merkittävät roolit AMD:n muodostumisessa (Blowes).

4.1 Avolouhos

Avolouhoksissa AMD tuotantoa voi tapahtua laajalti louhoksen seinämissä. Louhimisen myötä mineraalit siirtyvät aiemmasta hapettomasta olotilastaan, happea sisältävään tilaan, joka voi käynnistää AMD tuotannon (Blowes, 2014). Sade sekä pohjavesi avolouhoksilla, tekee hapettumisreaktioista helpompia sekä nopeampia toteuttaa kuin aikaisemmin vain ilman myötä käynnistyvät hapettumisreaktiot. Kaivostoiminnan aikana pyritäänkin pitämään avolouhokset mahdollisimman kuivina, niin pumppujen kuin vesien ohjaamisen avulla. Louhosten rakenteen myötä syntyneet AMD:t ja muut valumat, valuisivat louhoksen pohjalle muodostaen happamia ja metallipitoisia kerroksia (Blowes, 2014). Kaivostoiminnan jälkeen louhokseen annetaan yleensä täyttyä pohjaveden sekä muiden valumavesien myötä. Kunhan louhos pysyy riittävässä määrin

vedellä täytettynä, niin AMD:t eivät pääse leviämään merkittävästi. Täytetyn avolouhoksen vesien haihdunta tulee olla tiedossa, jotta voidaan tarpeen mukaan tulla täyttämään louhos (Blowes, 2014). Louhoksen kuivuessa riittävästi AMD-reaktiot voivat uudelleen käynnistyä, kun ilma pääsee vaikuttamaan mineraaleihin.

4.2 Maanalainen kaivos

Maanalaisissa kaivoksissa AMD tuotanto on usein melko rajallista verrattuna avolouhoksiin ja muihin maanpäällä sijaitseviin kasaumiin. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö maanalaiset kaivokset kykenisi tuottamaan AMD:tä, sillä sulfidien hapettuminen kaivoksen sisällä on mahdollista (Blowes, 2014). Hapettumisreaktiot tapahtuvat useimmiten kaivoksen louhinnasta jäljelle jääneistä jäännössulfidimineraaleista, joita ei olla siirretty pois kaivoksesta (Blowes, 2014). Nämä sulfidimineraalit alkavat hapettua niiden alttiiden mineraalipintojen perusteella, mitä alttiimpi niin sitä paremmat todennäköisyydet kemiallisille reaktioille. Pinnan lisäksi se kuinka kauan mineraalien annetaan olla kaivoksessa tekemättä niille mitään, on merkittävä tekijä hapettumisen kannalta, sillä hapettumisreaktiolla on ollut enemmän aikaa toimia (Blowes, 2014). Vettä hapettumisreaktioiden edistämiseksi mineraalit voivat saada maanalaisessa kaivoksessa pohjaveden ja valumavesien myötä, mikäli kaivoksen pumput eivät ole riittäviä paikkojen kuivana pitämiseksi (Blowes, 2014). Usein sulkemisen yhteydessä maanalainen kaivos täytetään vedellä, jotta hapettumisreaktiot eivät voi käynnistyä (Blowes, 2014). Kuitenkin myös suljetut maanalaiset kaivokset voivat uudelleen hapettua ja muodostaa AMD:tä, mikäli kaivos ei ole enää täynnä vettä. Syitä veden katoamiseen kaivoksesta voivat olla pohjaveden pinnassa tapahtuneet muutokset sekä tarkoituksellisesti suoritettut kaivannaiset kaivoksen tyhjentämiseksi (Blowes, 2014).

4.3 Sivukivet ja jätekivet

Sivukivet ja jätekivet ovat kaivosalueella louhinnan aikana tuotettua materiaalia, jolla ei ole merkittäviä hyötykohteita tai hyötykohteita ei ole lainkaan (Blowes, 2014). Nämä materiaalit kerätään kasoihin kaivoksen toiminnan aikana, jolloin ne jatkavat kasvuaan ja mahdollisesti alkavat tuottamaan AMD:tä. Kasoissa olevista kivistä osa on sulfidipitoisia, sekä kykeneviä muodostamaan happovalumaa (Blowes, 2014). Kasojen suojaaminen vedeltä sekä muilta hapettavilta tekijöiltä voi olla käytännössä mahdotonta, sillä kasojen laajuus voi olla useita neliökilometrejä, joidenka suojaamiseen menisi runsaasti aikaa sekä resursseja (Blowes, 2014). AMD muodostumisen kannalta olennaiset reaktiot tapahtuvat tyypillisesti kasojen sisimmissä kerroksissa, joissa sadevedet pääsevät

valumaan ja käynnistämään kemiallisia reaktioita (Blowes, 2014). Tiiviissä ympäristössä reaktiot voivat aiheuttaa lämpötilan nousua, joka voi olla hyvä tapa paikantaa mahdollisia AMD tuotannon lähteitä kasautumisissa (Blowes, 2014). Maanalaisissa kaivoksissa sivu- ja jätekivet läjitetään suoraan tunneleihin, joten ongelmaa ei muodostu maanpinnalle.

4.4 Rikastushiekka

Rikastushiekka on yksi suurimmista kaivosjätteistä, joita tuotetaan kaivostoiminnan aikana (Dold, 2014). Se on myös yleinen AMD lähde, joka tekee siitä merkittävän kohteen kaivosten ympäristön ylläpitämisen kannalta. Rikastushiekkaa tuotetaan rikastamoissa, halutun rikasteen sivutuotteena. Tämä tarkoittaa, että rikastushiekka on usein suhteellisen hienoksi murskattua ainesta, joka voi auttaa AMD prosessien käynnistystä (Dold, 2014). Rikastamoilla suoritettujen vaahdotusprosessien aikana keskimääräisten arvioiden mukaan takaisin saadaan noin 80–90 % halutusta vaahdotetusta metallista, joka tarkoittaisi, että rikastushiekan mukana voi mennä huomattava määrä sulfideita (Dold, 2014). Nämä kertyneet sulfidit toimivat pääasiassa AMD-reaktioiden lähteenä, kunhan ne pääsevät hapettaviin olosuhteisiin. Rikastushiekkojen suuri määrä voi tehdä hapettumisreaktioiden estämisestä vaikeata, mutta on yleisiä suosittuja menetelmiä, joiden avulla voidaan estää tai ainakin hidastaa AMD:tä ja sen haittoja. Rikastushiekan kannalta käsittelyvaiheet voidaan jakaa kolmeen eri vaiheeseen, joiden mukaan rikastushiekka-alueita tyypillisesti käsitellään (Dold, 2014). Vaiheet ovat: ennen kaivostoiminnan lopetusta, kaivostoiminnan lopetuksen jälkeen ja AMD tuotannon muodostumisen jälkeen, joista AMD tuotannon muodostuminen on mahdollista välttää (Dold, 2014). Tuotannon aikaisessa vaiheessa rikastushiekan hapettumisprosessien valvominen ja estäminen on parhaalla mahdollisella tasolla, sillä tuotannon aikana on mahdollista seurata sekä ylläpitää olennaisia prosesseja hapettumisen estämisen kannalta (Dold, 2014).

Ylläpitäminen tässä vaiheessa perustuu laajalti hapettumisreaktioiden estämiseen, peittämällä rikastushiekat riittävän vesimäärän alle siten, etteivät ne kykene hapettumaan (Dold, 2014). Ideaalisesti tämä estäisi kaiken hapettumisen rikastushiekkojen osalta tuotantovaiheen aikana, mutta rikastushiekka-alueiden täyttäminen vedellä ei ole aina mahdollista kaivosalueen mukaan. Hapettuminen ja AMD:n muodostuminen näin aikaisessa vaiheessa vaatisi lisää käsittelymenetelmien hyödyntämistä alueella. Yleensä ongelmat kuitenkin alkavat vasta kun kaivostoiminta on päättynyt ja rikastushiekkaa ei enää aktiivisesti valvota. Muutokset pohjavesitasoissa sekä alueen kuivuudessa vaikuttaa siihen miten hyvin rikastushiekka pysyy eristettynä hapetusreaktioista (Dold, 2014). Vuosien kuluessa vedenpinnan tasot voivat helposti muuttua rikastushiekka alueella, joka voi

aiheuttaa hapettumisalueiden muodostumiseen rikastushiekan varastointi alueella (Dold, 2014). AMD:n muodostuminen tapahtuu yleensä tämän jälkeen, jonka seurauksena kiihtyvämät reaktiot alkavat yleistyä, joiden myötä suurempi osuus rikastushiekasta joutuu AMD-reaktioiden ja hapettumisen kohteeksi (Dold, 2014).

5. Happamoitusreaktiot mineraaleille

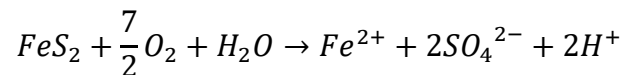
Sulfidimineraalien happamoitusreaktiot ovat merkittävien AMD:n lähde, mutta tämä ei kuitenkaan tarkoita, että kaikkien sulfidien reaktiot olisivat samanarvoisia. Helposti hapettuvilla sulfideilla on tiettyjä samanlaisia piirteitä, kuten korkeat rautapitoisuudet, joka helpottaa hapettumisreaktioiden toteutumista, mutta myös vapauttaa vain rajallisen määrän elementtejä ympäristöön. Sen sijaan on sulfideita, joiden hapettumisreaktiot ovat hitaampia ja haastavampia toteuttaa kuin pelkästään rautapitoisten sulfideitten, mutta hapettuessaan ne voivat vapauttaa laajat määrät erilaisia elementtejä ympäristöön. Hapettumisreaktioiden ymmärtäminen on olennaista, jos halutaan ymmärtää ja ennakoida AMD:n muodostumista (Blowes, 2014). Yleensä sulfidimalmien happamoitusreaktiot hyötävät tietyistä elementeistä. Näitä elementtejä ovat pH (Crundswell, 1988), lämpötila, liuosten happipitoisuus sekä veden saatavuus. Mikäli olosuhteet ovat happamia sekä kuumia, niin mineraalin happamoitusreaktiot tulevat hyötymään siitä. Tämä hyöty voi näkyä alhaisempaa aktivoitumisenergiana, tehokkaampana reaktiona tai nopeampana reaktionopeutena. (Blowes, 2014) Yleisesti katsottuna voidaan kuitenkin sanoa, että happotuotannon kannalta rautasulfidien hapettuminen on vastuussa suurimmasta osasta happotuotannosta kaivosalueilla (Lapakko, 2002).

5.1 Pyriitti

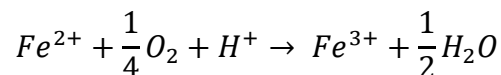
Pyriitti eli rikkikiisu, on AMD:n muodostumisen kannalta yksi tärkeimmistä sulfidimineraaleista. Syytä tähän ovat pyriitin rautapitoisuus, joka tekee hapettumisreaktiosta ja täten hapon tuottamisesta helppoja prosesseja. Näiden lisäksi pyriitti on yksi yleisimmistä sulfidimalmeista, jota esiintyy kaikkialla maailmaa, tehden siitä yleisen mineraalin useissa kaivoksissa (Blowes, 2014). Pyriitin käyttö teollisuudessa on rajallista, joka on johtanut sen pyriittirikkaiden kivien luokitteluun sivukivenä tai jätekivenä useimmissa kaivoksissa. Pyriitin yleisyys ja rajalliset käyttömahdollisuudet tekee siitä tehokkaan AMD lähteen, joka tulee ottaa huomioon etukäteen kaivosalueilla, jos halutaan välttää niistä johtuvat haitat (Blowes, 2014)

Pyriitti, FeS_2 , pystyy hapettumaan helposti useimmissa ympäristöistä, sillä mineraalin pinnan pitää vain olla alttiina hapettaville elementeille. Hapettavaksi elementiksi riittää pelkkä ilma, jotta saadaan hapettumisreaktiot alulle, mutta prosesseja voidaan tehostaa ja nopeuttaa entisestään veden sekä muiden hapetusta tehostavien elementtien avulla. Muita tehostavia elementtejä voivat olla muut mineraalit, jotka voivat toimia katalyytteinä reaktioille sekä mikrobiologiset reaktiot (Nordstrom, 1999). Perushapetusprosessi tapahtuu seuraavalla tavalla, jossa yksi mooli pyriittiä tuottaa yhden moolin Fe^{2+} , kaksi moolia SO_4^{2-} ja kaksi moolia H^+ (Nordstrom, 1982).

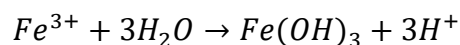
Peruskaava pyriitin hapettumisreaktiolle normaaliolosuhteissa on seuraavanlainen:



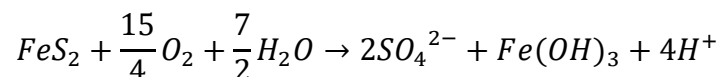
Tämä reaktio tuottaa jo kaksi moolia H^+ protoneita, jotka toimivat happamina ainesosina, joiden tuotantoa halutaan välttää. Reaktio ei kuitenkaan ole lähellekään loppua, sillä hapettuminen voi jatkua aiemmasta reaktiosta syntyneistä tuotteista. Aiemmin tuotettu Fe^{2+} ioni voi jatkaa reaktiota happi- ja vetyionien kanssa, jolloin rauta hapettuu edelleen Fe^{3+} . Tämä raudan hapettumisreaktio väliaikaisesti poistaa yhden tuotetun H^+ protonin pelistä, mutta tämä on vain väliaikaista, sillä seuraavat reaktiot Fe^{3+} kanssa tuottavat lisää H^+ protoneita. Fe^{2+} :n hapettuminen Fe^{3+} :ksi tapahtuu seuraavanlaisen reaktion myötä:



Fe^{3+} reagoi veden kanssa, muodostaen $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yhdisteitä ja lisää H^+ protoneita. Tämän reaktion jatkuminen kuitenkin vaatii, että Fe^{3+} ionit ovat liuenneessa muodossa nesteessä, jolloin ne pystyvät reagoimaan hapen ja veden kanssa. Onnistunut reaktio on seuraavanlainen:



Nämä osareaktiot voidaan yhdistää yhdeksi kokonaisreaktioksi, joka kuvaa kuinka paljon H^+ protoneita muodostuu pyriittiin hapettumisreaktion myötä. Kokonaisreaktio on seuraavanlainen:



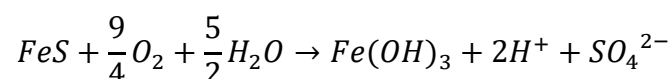
Kokonaisen reaktiosarjan myötä, yksi mooli pyriittiä tuottaisi neljän moolin edestä happoa. Kaikki reaktioon tarvittavat komponentit ovat runsaasti saatavilla kaivosalueilla, joka tekee reaktioista todennäköisiä ja yleisiä. Reaktiot ovat myös suhteellisen yksinkertaisia, sekä helposti käynnistyviä. Pyriitin reaktiosarjat voivat helposti lähteä käyntiin esimerkiksi sateen myötä, joka saa suojaamattoman jättekivi- tai sivukivialtaan reagoimaan. Reaktioiden nopeus voi kuitenkin vaihdella

niin veden happipitoisuuden, veden pH:n, pyriitin altis pinta-ala, pyriitin mineraalimuodon sekä rautaa hapettavien mikrobien perusteella. Nämä tekijät vaikuttavat hapettumisen nopeuteen, ja ne voivat olla ero sen välillä, onko riittävästi aikaa hillitä reaktiot ja selvitä pienin vahingoin, vai onko suuren mittakaavan vahingot jo tapahtuneet. Pyriitillä on vielä enemmän hapettumisreaktioita $Fe(OH)_3$ kanssa, mikäli pH on riittävän alhainen, joka on mahdollista mikäli kokonaisreaktio sarja on päässyt toteutumaan riittävästi. Happamuuden lisääntyminen ympäristössä tekee uusien hapettumisreaktioiden toteutumisesta helpompaa, sillä aktivointienergian vaatimukset reaktioille ovat silloin alhaisemmat ja on useampia mahdollisia hapetusreaktioita, jotka voivat toteutua happamimmissa olosuhteissa (Blowes, 2014).

5.2 Magneettikiisu

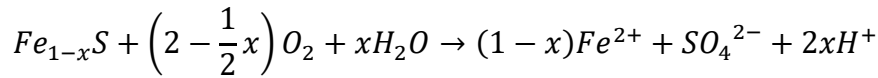
Magneettikiisulla on tiettyjä samanlaisuuksia pyriitin kanssa. Niillä molemmilla on samat avainalkuaineet, ja ne ovat kumpikin yleisiä sulfidimineraaleja, joiden taloudellinen arvo on matala. Matalan arvonsa ja yleisyyteensä myötä magneettikiisua usein päätyy sivukivikasoihin, samoin kuin pyriittiä. Magneettikiisu toimii myös yleisenä AMD lähteenä, aivan kuten pyriitti. Pyriitin ja magneettikiisun kemialliset kaavat ja rakenteet kuitenkin poikkeavat toisistaan, joka vaikuttaa suoraan AMD:n muodostumisreaktioihin. Magneettikiisu, FeS , on monosulfidi, verrattuna pyriitin disulfidiin. Magneettikiisun rakenne on usein epäjärjestynyt, ja se voi usein sisältää ei-stoikiometrisiä sekä stoikiometrisiä koostumuksia, joka johtaa vaihteluun mineraalin suhteen. Rakenne itse voi vaihdella kuusikulmaisen ja monokliinisen muodon välillä. Näiden rakenteellisten ominaisuuksien myötä magneettikiisua usein merkitään kemiallisissa kaavoissa $Fe_{1-x}S$, jossa x vaihtelee arvojen 0,125–0 välillä, jolloin 0,125 on Fe_7S_8 ja 0 on FeS (Blowes, 2014).

Magneettikiisun hapettumisreaktioille on samanlaiset vaatimukset kuin pyriitin hapettumiselle, eli tarvitaan paljas mineraali pinta, ilmaa ja vettä, jotta reaktio saadaan tehokkaasti käynnistettyä. Reaktio itsessään on kuitenkin erilainen monosulfidimuodon myötä. Magneettikiisu pystyy myös tuottamaan erilaisia hapettumisreaktioita, jos kaikkia vettä sekä ilmaa ei ole saatavilla samanaikaisesti. Hapetusreaktio on seuraavanlainen, kun vettä ja ilmaa on saatavilla (Blowes, 2014):

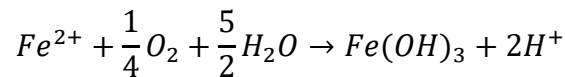


Reaktio tuottaisi kaksi moolia H^+ protoneita, yhtä moolia magneettikiisua kohtaan. Magneettikiisu pystyy myös hapettumaan pelkästään hapen myötä, mutta reaktio ei tule tuottamaan yhtä paljon happoa kuin reaktiot, jotka toteutuvat veden ja ilman kanssa. Reaktiot pelkästään hapen kanssa ovat

myös hitaampia toteutukseltaan, mutta ne voivat silti toimia kiihdyttävänä tekijöinä muille happamoitumisreaktioille. Hapen kanssa tapahtuva hapettumisreaktio on seuraavanlainen:



Hapettuminen vain hapen avulla vaatii mineraalin, jossa on ei-stoikiometrisiä sekä stoikiometrisiä koostumuksia, joiden välillä olevaa varianssia kuvataan arvolla x . x :n arvot ovat 0,125–0 välillä, joka suoraan rajoittaa hapettumisen myötä syntyviä tuotteita. Jos mineraali on ei-stoikiometrinen eli sen arvo on 0,125 tai >0 , silloin kemiallisen reaktion myötä voidaan tuottaa maksimissaan 0,25 moolia H^+ protoneita yhtä magneettikiisu moolia kohden. Jos mineraali on stoikiometrinen eli $x = 0$, niin silloin reaktio ei kykene tuottamaan H^+ protoneita. Tämä reaktio kuitenkin tuottaa niin ei-stoikiometrisesti ja stoikiometrisesti Fe^{2+} ioneja, joita voidaan käyttää myös hapettumisreaktioissa. Reaktiot Fe^{2+} ionin kanssa vaativat vettä ja ilmaa hapettuakseen, ja ne toimivat seuraavanlaisesti:

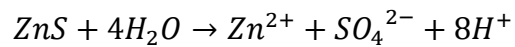


Tämä reaktio tuottaisi enemmän H^+ protoneita, samalla käyttäen edellisessä reaktiossa tuotetut Fe^{2+} ionit. Reaktioon tarvittavat vesi voidaan saada samalla tavalla kuten pyriitin kanssa, sade tai kaivosalueella tapahtunut vuoto on riittävää aloittamaan reaktiot. Fe^{2+} hapettumisreaktio tuottaa saman verran H^+ protoneita, kuin magneettikiisun hapettumisreaktiot, joka tarkoittaa, että kaivostoiminnan aikana Fe^{2+} voi alkaa varastoitua siihen asti, kunnes sopivat olosuhteet hapettumiselle ilmenee. Reaktionopeuteen vaikuttavat tekijät ovat samanlaisia kuin pyriitillä, ja matalat pH arvot parantavat reaktionopeuksia sekä mahdollistavat uusia reaktioita. Happamissa olosuhteissa Fe^{2+} reaktiot voivat toimia samalla tavalla kuin pyriitissä, jossa tuotetaan Fe^{3+} ioneita, joiden kautta hapen tuotanto kasvaa entisestään (Blowes, 2014).

5.3 Sinkkivälke

Sinkkivälke on sulfidimalmi, joka toimii myös AMD lähteenä kaivoksissa. Toisin kuin pyriitti ja magneettikiisu, sinkkivälkettä voidaan hyödyntää taloudellisesti, joten sitä ei kaivoksesta riippuen joudu sivukiveksi tuotannon aikana. Tuotannossa olevat mineraalit eivät ole niin alttiita hapettaville elementeille paremmin varastoinnin myötä, mutta tämä ei kuitenkaan estä hapettumisreaktioiden tapahtumista, niin kaivos- ja rikastusvaiheiden aikana. Hapettumisvaatimukset ovat tyypilliset sulfidimineraalille, vesi, ilma ja altis mineraali pinta ovat riittäviä käynnistämään reaktiot. Hapettumistekijöihin vaikuttavat tekijät ovat myös samanlaiset kuin muillakin sulfidimineraaleilla,

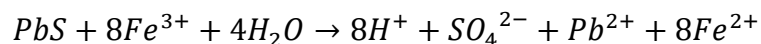
eli hapettavien yhdisteiden konsentraatiot (Bobeck, 1985), pH tasot (Crundswell, 1988) sekä lämpötilat (Rimstidt, 1994), jossa reaktiot tapahtuvat. Sinkkivälkkeen, ZnS, Hapettumisreaktio voi tapahtua seuraavasti:



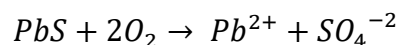
Tämän hapetusreaktion myötä tuotetaan kahdeksan moolia H^+ protonia, yhtä sinkkivälkemoolia kohden. Tämä kuitenkin edellyttäisi, että hapettumisreaktio olisi täydellinen ja rikki hapettuisi sulfaatiksi, mitä ei käytännössä voida taata. Tämä tarkoittaa, että hapettumisreaktio on usein rajoitettu ja ei täysin toteutuva, sillä reaktiivisuus heikkenee reaktion edetessä, jos ympäröivät olosuhteet eivät ole tukemassa (Blowes, 2014).

5.4 Lyijyhohde

Lyijyhohde, PbS, on sulfidimineraali, joka kykenee happotuotantoon, mutta rajoitetuissa olosuhteissa. Hapettumisen tapahtuminen vaatii tyypilliset elementit, vettä, ilmaa sekä alttiin mineraalipinnan, ja lisäksi vaatii Fe^{3+} ioneita, jotta H^+ protoneita tuottava reaktio toteutuisi (Rimstidt, 1994). Reaktio tapahtuu seuraavasti:



Hapettumisreaktio tuottaisi yhtä mineraalin mooli kohden kahdeksan moolia H^+ protoneita, mutta reaktio itsessään vaatisi runsaasti Fe^{3+} ioneja toteutuakseen. Protonien lisäksi tuotteena syntyisi myös lyijyioneita, jotka ovat merkittäviä ympäristötekijöitä jo itsestään. Lyijyhohde pystyy myös hapettumaan pelkästään ilman myötä, mutta tämä reaktio ei tuota H^+ protoneita. Reaktio kuitenkin tuottaisi lisää lyijy ioneita, joka tekee siitä merkittävän hapetusreaktion, vaikka sen vaikutus happamuuteen olisikin heikko (Shapter, 2000). Reaktio on seuraavanlainen:

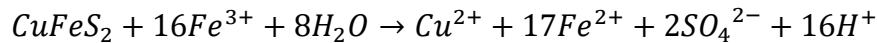
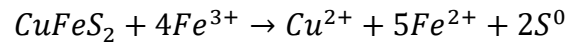


Useimmissa tilanteissa lyijyhohde ei kykene happoa tuottaviin reaktioihin, ellei se ole jo ennestään happamissa olosuhteissa, joissa on runsaasti muita liuenneita elementtejä (Jennings, 2000).

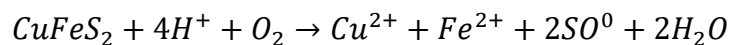
5.5 Kuparikiisu

Kuparikiisu on yleinen louhittava sulfidimalmineraali, joka toimii yhtenä kuparin päälähteistä maailmalla. Kuparikiisun hapettumisreaktiot ovat samankaltaisia kuin lyijyhohdeella tarkoittaen sitä,

että se tarvitsee Fe^{3+} ioneita hapettuakseen tehokkaasti (Blowes, 2014). Kuparikiisu pystyy hapettumaan ilman vettä ja veden kanssa seuraavien reaktiosarjojen myötä (Blowes, 2014):



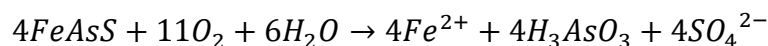
Happoa tuottavat reaktiot vaativat jo ennestään happamat olosuhteet, jotta ne pystyisivät tuottamaan lisää happoja ja happamia yhdisteitä. Kuparikiisu pystyy myös kuluttamaan happoa alhaisesti happamissa olosuhteissa seuraavan kaavan mukaisesti (Blowes, 2014):



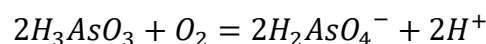
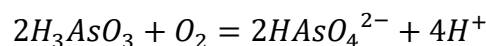
Tuottamalla puhdasta rikkiä, kuparisulfaatti pystyy toimimaan happamuutta vähentävänä tekijänä.

5.6 Arseenikiisu

Arseenikiisu, $FeAsS$, on yksi kaivostoiminnan aikana louhittava sulfidimineraali, joka on taloudellisesti arvotonta sekä ympäristölle haitallista. Arseenikiisua louhintaan kultakaivoksissa kullan tuotannon aikana, mutta muissa kaivoksissa arseenikiisua halutaan välttää jos se on mahdollista, sen arvottomuuden sekä haitallisuuden takia. Kuitenkin on tilanteita, jolloin ei voida välttyä arseenikiisun louhinnalta, tai louhinnan katsotaan olevan kaivostoiminnan jatkumisen kannalta välttämätöntä. Arseenikiisun hapettumisreaktio on seuraavanlainen (Walker, 2006):



Reaktio jatkuu seuraavanlaisesti:



Kun otetaan huomioon Fe^{2+} tapahtuvat reaktiot, niin yksi mooli arseenikiisua tuottaa 3,5 moolia H^+ protoneita (Walker, 2006). Arseenikiisu on nopeampi ja tehokkaampi reaktioiltaan kuin muut sulfidimineraalit, johtaen tilanteisiin, jolloin AMD ympäristöissä olevien arseenikiisujen reaktioiden aktivoitumisenergia oli negatiivinen. Tämä johtuu siitä, että arseenikiisussa tapahtuvien hapettumisreaktioiden kohdalla on aktiivista kilpailua niin As^{3+} ja As^{5+} välillä, ja samalla tapahtuvien sivureaktioiden nopeutta rajoittavien tekijöiden ansiosta, aktivointi kynnys on voinut laskea (Rimstid, 1994). Entistä happamemmat olosuhteet kiihdyttävät reaktioprosesseja entisestään, joka kiihdyttää AMD-reaktioiden seurauksia niin arseenikiisulle, kuin myös muillekin sulfideille (Corkhill, 2009).

Arsenikiisun pinnalla tapahtuu merkittäviä reaktioita hapettavan liukenemisen aikana, sillä mineraali pyrkii suojaamaan itseänsä happamoitumiselta passiivisten kerrosten avulla (Nesbitt, 1998). Tilanteissa, joissa happamuus on korkea, arsenikiisu voi alkaa muodostamaan sekundäärimineraaleja itsensä pinnalle, jotka tekisivät hapettavasta liukenemisestä vaikeampaa. Tämä onnistuu, kun sekundäärimineraalit rajoittavat reaktioita itse arsenikiisulle, joka pystyy pääasiassa levittämään lähtöaineita sekä reaktiotuotteita (Paktunc, 2004). Tämä tarkoittaa, että arsenikiisu hyötyy happamuudesta tiettyyn pisteeseen asti, jonka jälkeen sekundäärimineraalit jatkaisivat reaktioita sen sijasta. Sekundäärimineraalit kykenevät arseenin kanssa jatkamaan happamoitumisreaktioita laajemmilla väleillä, kun pH arvo ja aktivoitumisenergia eivät ole niin rajattuja (Lengke, 2003). Happamoitumisen lisäksi reaktiot arsenikiisun kohdalla vapauttavat happoyhdisteiden lisäksi myös arseeniyhdisteitä, jotka ovat erittäin haitallisia ympäristölle. Näiden yhdisteiden synnyn ja leviämisen estäminen on olennaista, jos halutaan välttää vakavat ympäristöongelmat tulevaisuudessa.

6. AMD ja mikrobit

On olemassa useita kemiallisia ja geokemiallisia reaktioita, joissa mikrobit osallistuvat. Tämä koskee myös kaivosympäristöjä, joissa lukuisat erilaiset bakteerit ja arkit osallistuvat useisiin erilaisiin kemiallisiin reaktioihin (Mills, 1999). Suurin osa kaivosympäristöissä elävistä bakteereista on asidofiilisiä, mikä tarkoittaa, että ne menestyvät happamissa olosuhteissa (Mills, 1999). Nämä happamat olosuhteet ovat varsin tyypillisiä happamien vesien sekä AMD:n vaikutusten seurauksena, joka tekee näistä bakteereista varsin yleisiä kaivosalueilla. Usein näitä bakteereja jopa viljellään, jotta ne voivat auttaa tietyissä halutuissa kemiallisissa reaktioissa (Blowes, 2014). Bakteereilla on oikeastaan vain yksi oma tavoite, lisääntyminen, ja tämän tavoitteen saavuttamiseksi bakteerit tarvitsevat energiaa. Bakteerit pystyvät tuottamaan tätä tarvitsemaansa energiaa monin eri tavoin bakteerityypistä riippuen. Useimmat bakteerit ovat kuitenkin jossain määrin kemotrofeja, eli saavat energiansa kemiallisten reaktioiden, erityisesti hapettumisreaktioiden kautta (Mills, 1999). Useimmat kaivosalueella vallitsevista bakteereista kuuluu kemotrofin alajaksoon, kemolitotrofi, joka tarkoittaa, että bakteerit saavat energiansa kemiallisista reaktioista epäorgaanisten ainesten kanssa (Mills, 1999). Näillä kemolitotrofeilla on merkittävä rooli useissa kaivosympäristön kemiallisissa reaktioissa, sillä ne kykenevät auttamaan kemiallisissa reaktioissa esimerkiksi katalyytteinä (Blowes, 2014).

Nämä bakteerit voivat keskittyä tiettyihin sulfidimineraaleihin, sulfidimineraalin happoliukoisuuden mukaan. On kaksi erilaista mekanismia, joilla bakteerit pystyvät nopeuttamaan sulfidimineraalien

liukenemista, ja ne tunnetaan tiosulfaatti- ja polysulfaattimekanismeina (Blowes, 2014). Näiden mekanismien myötä sulfaatissa voi tapahtua lisää hapetusreaktioita, joissa bakteerit voivat olla osallisena esimerkiksi katalyytin muodossa (Mills, 1999). Reaktioiden tapahtumisen kannalta bakteerien tulee pystyä kiinnittymään sulfidimineraaliin, jonka pinnalle ne alkavat muodostaa biofilmikerroksen, jossa reaktiot tapahtuvat (Blowes, 2014). Tiedetyt bakteerit kykenevät myös suorittamaan tarvittavat reaktiot ilman että olisivat fyysisessä kosketuksessa sulfidimineraalin pinnan kanssa (Blowes, 2014). Tämä on johtanut termeihin kontakti- ja kontaktiton liuotus, jotka perustuvat siihen kiinnittyykö bakteeri sulfidin pinnalle vai ei. Tämän tietäminen on tärkeää, kun suunnitellaan mahdollisia AMD-hoitokeinoja, sillä kummallakin liuotus tavalla on omat hyötynsä (Mills, 1999).

Bakteerien aiheuttamat liuotusreaktiot voidaan karkeasti jakaa kolmeen eri ryhmään. Ensimmäinen ryhmistä on bakteerit, jotka kykenevät aiheuttamaan Fe^{2+} raudan hapettumisen Fe^{3+} muotoon katalyyysin avulla. Fe^{3+} muodossa oleva rauta kykenee käynnistämään useita erilaisia happamoitumisreaktiota, jotka voivat vaikuttaa esimerkiksi pyriitin hapettumisen edistämässä (Blowes, 2014). Toinen ryhmistä vaikuttaa rikkihapon muodostumiseen, jossa bakteerit sekä arkit hapettavat rikkiä, ja täten ylläpitävät happamia olosuhteita muille asidofiilille mikrobeille (Blowes, 2014). Viimeinen ryhmä koostuu bakteereista sekä arkeista, jotka orgaanista hiiltä, joka estää raudan sekä sulfidin hapetusreaktioita (Blowes, 2014).

Bakteerit ja arkit voivat auttaa lukuisissa sulfidimineraaleille tapahtuvissa kemiallisissa reaktioissa, joista hapetus- ja pelkistysreaktiot toimivat välttämättöminä energianlähteinä (Mills, 1999). Hapetusreaktiot ovat yleisimpiä reaktioita, joita mikrobit tukevat, joiden myötä hapettumisreaktiot voivat entisestään kiihtyä kaivosympäristössä (Mills, 1999). Kaivosalueilla kuitenkin myös esiintyy pelkistysreaktioita tukevia mikrobeja, joiden avulla voidaan vähentää sulfidien aiheuttamia reaktioita (Mills, 1999). Näitä pelkistäviä bakteereita esiintyy merkittävästi vähemmän kuin hapettavia bakteereita, jonka takia pelkistäviä bakteereita usein viljellään lisää kaivostoiminnan aikana (Mills, 1999). Pelkistysreaktiot itse eivät ole erityisen pitkäkestoisia AMD vesissä, sillä jotkut hapettumisreaktiot voivat nopeasti kumota pelkistysten vaikutukset. Pelkistysreaktioiden hyödyt voidaan kuitenkin säilyttää, jos pelkistynyt sulfidi poistetaan tai eristetään muista lähteistä, joka takaisi, että pelkistykseen hyödyt kestäisivät pitempään ja AMD haitat vähenisi (Mills, 1999).

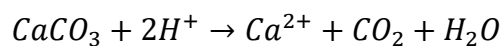
7. AMD neutralisointi

Neutralointimekanismit ovat keskeinen osa AMD:n ja niiden kielteisten vaikutusten hillitsemistä ja ehkäisyä. Nämä ovat usein erilaisia geokemiallisia reaktioita, joihin kuuluu alkalimetalleja sekä

mineraaleja, jotka auttavat torjumaan sulfideista johtuvia happamia vaikutuksia. Nämä voivat joko johtaa suoraan happamoitumisreaktioiden vastareaktioihin tai ne voivat toimia eräänlaisena pH-puskurina, joka voi estää tulevien happamoitumisreaktioiden muodostumisen (Jurjovec, 2002). Neutraloitumisreaktioiden myötä tapahtuva pH:n nousu voi johtaa kaivosjätteissä olevien liuenneiden metallien pitoisuuksien laskuun, mikä heikentää niiden vaarallisuutta ympäristölle (Blowes, 2014). Neutralointimekanismit voivat tapahtua karbonaattien, hydroksidien, oksidien, silikaattien ja sekundaaristen sulfidien kautta (Blowes, 2014). Neutralisointireaktioiden kannalta on hyödyllistä huomioda minkälaisia mineraaleja kaivos voi tuottaa sivukivenä, sillä tuotettua sivukivi ainesta voidaan mahdollisesti hyödyntää AMD:n neutraloinnissa. Neutraloinnin aikana on olennaista hyödyntää sopivia mineraaleja ja yhdisteitä, kun neutralisointia suoritetaan. Neutralisaatioreaktiot voivat usein olla porrasmaisia, joissa aloitetaan käyttämällä heikosti neutraloivia yhdisteitä, ennen kuin siirrytään voimakkaampiin neutralisaatioreaktioihin (Jurjovec, 2002).

7.1 Karbonaatit

Karbonaatit ovat yleisimmin käytettyjä mineraaleja neutraloitumisreaktioissa, joista yleisimmät mineraalit ovat kalsiitti, dolomiitti, ankeriitti ja sideriitti (Blowes, 2014). Karbonaatit liukenevat happamiin nesteisiin, jonka seurauksena pH nousee happamasta neutraalia kohti. Karbonaatin liukeneminen vaatii kuitenkin riittävän happamat olosuhteet, muutoin mineraali ei liukene ja sen aiheuttamat neutralisaatiovaikutukset ovat merkittävästi heikompia (Blowes, 2014). Tyypillinen karbonaatin liukenemisreaktio on seuraavanlainen kalsiitilla (Blowes, 2014):



Reaktiossa hapon neutralisoinnin lisäksi nesteeseen vapautuu myös Ca^{2+} ioneita, jotka entisestään alkalisoiavat liuosta, täten edistäen happamuuden laskua. Eri karbonaateilla on toisistaan poikkeavat liukoisuustasot, joiden mukaan ne voidaan jaotella (Blowes, 2014). Yleisesti ottaen voimakkaamman liukoisuuden omaavat karbonaatit ovat parempia neutralointilähteitä, joka tarkoittaisi, että kalsiitti olisi yksi parhaimmista neutraloinninlähteistä. Liukoisuusjärjestyksessä kalsiitti olisi ensimmäinen, jonka jälkeen tulisi, dolomiitit, ankeriitit ja viimeisenä sideriitit (Blowes, 2014). Karbonaatteja voi esiintyä osana kaivostoimintaa sivukivien muodossa, joka voi tehdä niistä yleisiä kaivosalueilla. Karbonaatteja ei kuitenkaan ole aina riittävästi kaivosalueella, joka voi tarkoittaa muihin mineraaleihin turvautumista tai karbonaattien tuomista muualta. Vaikka karbonaatit ovatkin voimakkaita neutralointitekijöitä, tämä ei kuitenkaan tarkoita, että ne ovat paras vaihtoehto kaikissa tilanteissa. Esimerkiksi voimakkaasti happamoituneet vedet hyötyisivät enemmän muiden

mineraalien aiheuttamista neutralisaatioreaktiosta ensin, jonka jälkeen voidaan hyödyntää karbonaatteja (Blowes, 2014). Liuenneilla karbonaateilla on myös tärkeä rooli sekundäärimineraalien muodostamisessa, kuten esimerkiksi sekundaaristen hydroksien muodostamisessa. Näitä muodostuneita sekundäärimineraaleja voidaan hyödyntää tulevissa neutralisointireaktioissa (Blowes, 2014).

7.2 Hydroksit

Hydroksidimineraaleja voi alkaa muodostua sekundäärimineraaleina joko muista mineraaleista tai kaivosalueen liuenneista karbonaateista (Blowes, 2014). Näitä muodostuneita mineraaleja voidaan käyttää happojen neutralointiin tietyillä pH-tasoilla, kun hydroksidit liukenevat emäksisiä reaktioita varten. Nämä reaktiot eivät ole yhtä voimakkaita kuin karbonaateilla saavutetut reaktiot, mutta niitä voidaan silti hyödyntää kaivosalueilla. Neutralisointireaktioiden lisäksi osaa syntyneistä hydrokseista voidaan käyttää säiliövyöhykkeinä muodostamisessa, jotka auttaisivat hidastamaan tai estämään happojen mobilisointia ympäristöön (Blowes, 2014). Tyypillisesti tällaiset mineraalit ovat hyödyllisimmillään alhaisilla pH-tasoilla, joissa niiden emäksisyys ja tehokkuus voidaan maksimoida.

7.3 Sekundääri sulfidit ja muut sulfidipitoiset muodostumat

Sulfideja voi muodostua myös sekundäärisinä mineraaleina kaivosympäristössä, jossa niitä usein kutsutaan sekundääri sulfideiksi. Sekundääriset sulfidit voivat muodostua kemialliselta koostumukseltaan samanlaisia mineraaleja primaari sulfideihin, kuten esimerkiksi, pyriitillä FeS ja kovelliini FeS on samankaltainen kemiallinen koostumus, mutta mineraalien rakenteet kuitenkin poikkeavat toisistaan (Blowes, 2014). Sekundääriset sulfidit voivat auttaa neutraloimisessa omalla tavallaan, sillä mineraalit ovat ottaneet itseensä jo happamissa vesissä olevia metalleja ja laskemalla happamuutta (Blowes, 2014). Nämä muodostuneet mineraalit voivat kuitenkin liueta ja vapauttaa niiden keräämät metallit kaivosvesiin, jos olosuhteet ovat tarpeeksi happamat (Blowes, 2014). Poistamalla muodostuneet sulfidit kaivosvesistä, voidaan laskea kaivosvesien kokonaismetallipitoisuutta sekä happamuutta (Blowes, 2014). Sekundäärisulfidien lisäksi kaivosalueella voi muodostua liukoisia- sekä niukkaliukoisia sulfaatteja, sekundääristen mineraalireaktioiden seurauksena (Blowes, 2014). Nämä liukoiset sekä niukkaliukoiset sulfaatit muodostavat kuivuneessa suolia, jotka sisältävät metalleja sekä happamia yhdisteitä (Blowes, 2014). Suolat voidaan kuivuneessa muodossa ottaa pois altaastaan, ja näin voidaan laskea altaan metalli- ja

happopitoisuutta hieman. Suolan käsittely kuitenkin vaatisi kuivat olosuhteet, joissa suola ei kykenisi liukenemaan, mikä ei ole aina mahdollista (Blowes, 2014).

8. AMD Testaus ja mittaus

Mikäli halutaan tehdä arvioita mahdollisista AMD seurauksista sekä niiden kehityksistä kaivosalueella, niin tulee suorittaa testauksia sekä mittauksia, joiden avulla saadaan määritettyä AMD:n vaarallisuus kaivoalueelle (Lapakko, 2002). Mittausten ja arvioinnin kannalta voidaan hyödyntää geoympäristömalleja, joiden avulla voidaan suorittaa alustavia arviointeja kaivosympäristön AMD vaikutuksista. Nämä mallit koostuvat geologisesta, geofysikaalisesta, geokemiallisesta, teknisestä sekä hydrologisesta datasta, joka on kerätty ennen kaivostoiminnan aloittamista sekä kaivostoiminnan aikana (Plumlee, 1995). Dataa voidaan soveltaa muihin kaivosalueisiin, joissa on ollut jotain samanlaisia tekijöitä. Näitä tekijöitä verrataan datassa oleviin tekijöihin, ja vertailun avulla voidaan tehdä alustavia arvioita vahinkojen tyypeistä sekä määristä. Alustavat arviot eivät kuitenkaan ole riittäviä kattavan ymmärryksen saamiseksi, minkä takia tulee suorittaa mittauksia ja tutkimuksia kaivosalueella, jotta saadaan riittävästi dataa AMD ominaisuuksista (Lapakko, 2002).

Tarkempia selvityksiä AMD osalta voidaan alkaa suorittamaan useilla eri tavoilla ja tekniikoilla, mutta yleensä aloitetaan käyttämällä ei häiritseviä menetelmiä aluksi. Tekniikat, kuten kuvausspektroskopia ja geofysikaaliset menetelmät, joita voidaan suorittaa dronien avulla, ovat yleisiä alkuvaiheen ei häiritseviä menetelmiä. Kumpaakin menetelmää hyödynnetään, kun halutaan paikantaa kaivosten jätekasoissa tapahtuvia reaktioita. Kuvausspektroskopian avulla voidaan tunnistaa mineraaleja, jotka muodostuvat sulfidimineraalien kulumisen myötä kasoissa, joka voi olla olennaista tietoa AMD tuotantotyyppin tunnistamisessa (Lapakko, 2002). Ei häiritsevät menetelmät voivat antaa tietoa AMD:n muodostumiskohdista sekä mineraaleista, mutta lisätiedon saamiseksi tarvitaan käytettäviä näytteitä, jotka voidaan kerätä löydetyiltä AMD muodostumiskohteista.

Staattiset testit ovat yksi yleisemmistä testeistä, joiden avulla selvitetään AMD tuotantoon liittyviä reaktiivisia ominaisuuksia. Staattiset testit ovat lyhytaikaisia sekä edullisia testejä, joiden avulla määritellään kaivosjätteen kyky tuottaa ja neutralisoida happoa. Nämä testit eivät kuitenkaan huomioi happotuottavien sekä neutralisoivien mineraalien määrää ja saatavuutta, tai liukenemisnopeuksia eri mineraalien väleillä. Rajallisuutensa myötä testejä käytetään ensisijaisesti seulontatyökaluina kaivosalueille, jossa niiden antamat tulokset vaativat lisää selvityksiä (White, 1999). Staattiset testit voidaan jakaa kolmen päätyyppiin, jotka ovat happo-emäs laskenta eli acid-base accounting ABA,

nettohappotuotanto, net acid production NAP ja nettohappotuotanto, net acid generation NAG (Lapakko, 2002). Näistä yleisin on ABA sillä sen avulla pystytään tuottamaan arvioita kaivoksen yleisestä kyvystä tuottaa ja neutralisoida happoja. ABA toimii määrittämällä hapon tuottamispotentiaalia sekä neutraloitumispotentiaalia, kokonaisrikin ja rikkisulfaatin arvojen avulla. Vaikka potentiaalit poikkeavatkin todellisista arvoista, sillä niiden laskennassa ei huomioida sulfaattimineraalien tuottamia happoja kunnolla, sillä ABA ei huomioi malmin mineralogialla, joka näkyy saaduissa tuloksissa ja arvioissa (Dold, 2017). Tämä näkyy kokonaissulfaatille liian vähäisenä happotuotantona sulfaattimineraaleista, ja rikkisulfaatin arvioinnissa liian suurena happotuotantona sulfaattimineraaleista. Menetelmän avulla voidaan kuitenkin helposti selvittää, onko sulfaattimineraaleista peräisin olevaa happotuotantoa alueella, jonka jälkeen voidaan hyödyntää tarkempia menetelmiä (Lapakko, 2002). NAP- ja NAG- menetelmät perustuvat siihen periaatteeseen, että vetyperoksidi nopeuttaa rautasulfidien hapettumista (Lapakko, 2002). Tämä mahdollistaisi systeemissä muodostuneiden ja neutralisoituneiden happojen laskemisen, sillä tuotettu happo liuottaisi neutralisoivat mineraalit tutkittavalla alueella, jonka myötä nettotuotanto sekä neutralisointi voidaan määrittää. Menetelmät eivät myöskään vaadi rikkiä määritysten kannalta, joka helpottaa niiden toteuttamista kentällä (Lapakko, 2002). Staattisten testien lisäksi reaktiivisuutta voidaan määrittellä liukoisten happoperäisten suolojen avulla, sekä metallien jakautumisen avulla, vaikka kumpikin tekniikka onkin harvemmin käytetty (Lapakko, 2002).

AMD:n tutkimisessa voidaan myös hyödyntää perinteisiä geokemiallisia menetelmiä, joissa tutkitaan happoa tuottavia mineraaleja. Geokemiallisten tutkimusten myötä voidaan määrittää mineraalien happotuotanto, mineraalien happoneutralisaatio, koko kiven koostumus sekä mineraloginen koostumus ja tarkemmin määrittää hapettumiseen vaikuttavien jälkimetallien osuus (Lapakko, 2002). Geokemiallisen analyysin lisäksi on vielä kineettiset testit, jotka ovat pitemmän aikavälin testejä. Testien avulla voidaan määrittää syntyneen valuman laatu, jättekivikasaa kohden. Testien avulla voidaan myös määrittää kivilasojen suhteelliset potentiaalit tuottaa happovalumaa sekä mineraalien hapettumisnopeuksia (Lapakko, 2002). Testi perustuu kiven rapauttamisen kiihdyttämiseen joko laboratoriossa tai kentällä, joiden myötä saadaan tietoon pitkien aikavälien liukenemisestä ja uutosta. Testit eivät tuota täysin tarkkaa tietoa sillä kiihdytetty rapauttaminen ei aina vastaa todellisen kiven rapautumista, mutta kiihdytetty rapauttaminen on usein välttämätöntä, jos halutaan saada tulokset ajoissa (Lapakko, 2002). Kineettiset testit suoritetaan usein staattisten testien jälkeen, sillä kineettisten testien avulla voidaan selvittää, olivatko staattisten testien määritelmät mahdollisia.

9. AMD hoito

AMD:n hoitaminen kaivosalueella on elintärkeää, jos halutaan pitää kaivosalueen ympäristö hyvässä kunnossa. Hoitotavat perustuvat usein veden pH:n tai hapetus-pelkistys reaktioiden olosuhteiden muuttamiseen siten, että ei toivottujen ainesosien liukoisuus saataisiin rajoitettua (Walton-Day, 2003). Päähoitomenetelmät voidaan jakaa ehkäisyyn, lieventämiseen ja korjaamiseen. Ehkäisevät strategiat nähdään usein mieluisempana vaihtoehtona näistä kahdesta, sillä niiden myötä ei tarvitse huolehtia suurista korvausoperaatiosta, jotka ovat syntyneet AMD:n myötä. Ehkäisevät tekniikat eivät kuitenkaan ole aina riittäviä kaivosalueelle, niin joudutaan myös käyttämään lieventäviä sekä korjaavia metodeja. Lieventävien ja korjaavien metodien tavoitteena on vähentää AMD:sta johtuvaa haittaa, neutralisoimalla ne heikommiksi, asettamalla syntyneet hapot karanteenialueisiin tai muutoin minimoimalla syntyneet ongelmat (Johnson, 2005). AMD:n ehkäisylle, lieventämiselle ja korjaamiselle on useita erilaisia hyödynnettäviä tekniikoita ja toimenpiteitä. Tekniikat voidaan jakaa aktiivisiin ja passiivisiin, joista passiiviset toimivat vähäisillä resursseilla tai ilman uusia resursseja sekä työstämistä, ja aktiiviset vaativat jatkuvasti uusia resursseja jatkaakseen toimintaansa (Johnson, 2005). Mahdolliset hyödynnettävät tekniikat ja metodit riippuvat kaivosalueen sijainnista, ilmastosta, louhituista malmeista sekä mineraaleista, ja muista mahdollisista vaikuttavista tekijöistä.

9.1 Ehkäisevät tekniikat

Ehkäisytekniikoita pidetään AMD:n hallinnan kannalta arvokkaimpina hyödynnettävinä menetelminä, sillä niiden avulla voidaan välttää happovalumista johtuvat haitat täysin. Näitä tekniikoita voidaan myös kutsua nimellä ”lähteen valvonta- ja hallintapiteiksi” (Johnson, 2005), sillä AMD lähteen valvonnan ja hallinnan kautta voidaan estää happojen sekä vahinkojen muodostuminen. Useimmat näistä ehkäisy toimenpiteistä perustuu siihen, että alttiilta mineraalilta estetään mahdollisuus hapettumiseen, poistamalla vesi tai happi kokonaan mineraalin ympäristöstä. Mikäli tässä onnistutaan niin mineraali ei enää kykene hapettumisreaktioihin ympäristönsä takia, ja se on täten neutralisoitu, ainakin tilapäisesti (Johnson, 2005). Yleinen ehkäisytekniikka onkin peittää mahdolliset AMD:tä tuottavat mineraalit veden alle, joko niille tehtäviin altaisiin tai maanalaisiin kaivoksiin sulkemisen yhteydessä. Liunneen hapen vedessä voidaan estää hyödyntämällä mikrobeja, jotka estävät mineraalien hapettumisen (Johnson, 2005). Veden avulla neutralisoiminen vaatii kuitenkin melko hyvää tuntemusta hyödynnettävistä mikrobeista, kaivosalueen mineraaleista, sekä altaiden ja maanalaisten kaivosten sisällä olevista mineraaliesiintymien sijainneista.

Mineraaleille voidaan myös tehdä kuivasijoituksia, joissa mineraali loppusijoitetaan ilman että se peitettäisiin vedellä. Sen sijaan mineraali haudattaisiin maahan tiivistekerroksen ympärille, jonka kautta haitallinen aines ei pysty reagoimaan muun materiaalin kanssa. Tämä tiivistekerros peitettäisiin vielä suojaavalla kerroksella, jonka päälle voidaan laittaa normaali maakerrostuma (Johnson, 2005). Kuivasijoitus kuitenkin vaatii sopivanlaisen ilmaston sekä soveltuvat maaperätekijät ollakseen riittävän tehokas. Alueet, joilla on merkittävät kuivat sekä kosteat vuodenaajat voivat johtaa suojakerrosten murtumiseen, joka voi rajoittaa kuivasijoitusten käyttöä useissa osissa maailmaa (Johnson, 2005). AMD:tä tuottavia materiaaleja voidaan myös murskata pienemmiksi kappaleiksi, happoa käyttävien materiaalien kanssa, täten luoden ympäristölle harmittomia kappaleita (Johnson, 2005). Tämän toteutus voi kuitenkin olla haastavaa, sillä tulisi tietää minkälaisia mineraaleja on murskattavana sekä niiden osuudet, jotta voidaan neutralisoida yhdisteet kunnolla. Myös käytännön toteutus voi olla ongelmallista, jos ei ole riittävästi happoa käyttävää materiaalia saatavilla murskausvaiheessa. Mineraaleille voidaan myös tarvittaessa tuottaa eräänlainen pinnoitekerros, joka estäisi hapettumisreaktiot. Mineraalista riippuen pinnoite ei kestä pitkiä aikoja vaan kuluu pois, tehden siitä parhaimmillaan väliaikaisen ratkaisun (Johnson, 2005). Hapettumisreaktioita voidaan myös yrittää hallita tappamalla niitä edistäviä litotrooppisia ”kivisyöjä” bakteereita sivukivi- ja jätekivikasoissa (Johnson, 2005). Tämä ei kuitenkaan ole pitkäikäinen tai pakosta edes merkittävä ehkäisy metodi, sillä mineraali voi hapettua ilman bakteerien avustusta.

Ehkäisy ratkaisut olisivat ihanteellisessa maailmassa vastaus kaikkiin AMD huolenaiheisiin, mutta valitettavasti ne eivät ole. Tekniikkojen käyttöjen rajallisuus erilaisissa ympäristöissä ja tiettyjen tekniikkojen heikkous, voi helposti johtaa tilanteisiin, jolloin ei voida välttyä AMD muodostumiselta. Tapauksissa, jossa ehkäisevät tekniikat eivät riitä, tulee turvautua lieventäviin ja korjaaviin tekniikoihin.

9.2 Lieventäminen ja korjaaminen

Lieventämis- ja korjaamistekniikoilla pyritään vähentämään ja minimoimaan AMD:stä johtuvia seurauksia. Näitä tekniikoita voidaan myös kutsua migraation valvonta- ja hallintatoimenpiteiksi, sillä yhtenä menetelmien päätavoitteista on estää haitallisen AMD:n leviäminen muualle ympäristöön (Johnson, 2005). Käytettävät tekniikat voidaan jakaa abioottisiin ja bioottisiin tekniikoihin, jotka voidaan vielä jakaa aktiivisiin sekä passiivisiin tekniikoihin kummankin osalta.

9.2.1 Abioottiset

Abioottisissa prosesseissa käytetään muita mineraaleja ja kemiallisia tekijöitä saastumisen kielteisten vaikutusten minimoiseksi. Aktiivisessa muodossaan tämä voi tarkoittaa kemiallisten neutralointiaineiden ja mineraalien, kuten karbonaattien, lisäämiseen happamiin nesteisiin, jotka sisältävät AMD tuotantoa. Tuloksena nesteen pH laskee, mahdolliset metallit saostuvat hydroksideiksi ja karbonaateiksi, kun samalla muodostuu metallirikasta lietettä reaktion myötä (Johnson, 2005). Nesteen pH saadaan neutraaliksi käyttämällä emäksisiä mineraaleja tai neutralisoivia kemikaaleja tämän jälkeen. Prosessin myötä voidaan poistaa nesteestä metalleja sekä sulfaatteja, jotka ovat vastuussa AMD-reaktioiden jatkumisesta alueella, samalla tuoden pH arvoa lähemmäs neutraalia. Eri kemiallisilla- tai mineraaliperäisillä neutralointimateriaaleilla on erilaisia reaktioita happamissa aineissa, jotkut reaktiot voivat vaikuttaa pH:n voimakkaasti, mutta lyhytaikaisesti, kun taas toiset reaktiot voivat aiheuttaa heikompia, mutta pitempään vaikuttavampia muutoksia (Johnson, 2005). Tällä materiaalilla on suora vaikutus siihen, kuinka tehokkaasti se saa saostettua muita aineksia nesteestä pois. Jatkuvasti uuden materiaalin tuominen aktiivisessa metodissa voi käydä hyvin kalliiksi pitkällä aikavälillä, varsinkin jos käyttää tehokkaita mineraaleja sekä kemiallisia neutralointiaineita (Johnson, 2005).

Passiivinen abioottinen tekniikka perustuu laajalti samaan periaatteeseen kuin aktiivinen menetelmä, sillä siinäkin lisätään neutraloivia mineraaleja nesteeseen. Passiivisessa tekniikassa lisätään hapettomia kalkkikiviä happamiin AMD liuoksiin. Kalkkikivet reagoivat liuoksen kanssa, lisäten emäksisiä yhdisteitä AMD ympäristöön, samalla kun ympäristössä oleva rauta saadaan pelkistettyyn muotoon (Johnson, 2005). Pelkistyneessä muodossa rauta ei kykene jatkamaan AMD tuotantoa, taikka saostumaan kalkkikivien pinnalle panssarointivaikutuksin myötä (Johnson, 2005). Tämä voidaan toteuttaa, pakottamalla kaivoksista kertyvät AMD liuokset virtaamaan kalkkikivisorakerrosten läpi. Vaikka tekniikka vaatiikin uuden kalkkikiven tuottamista AMD ympäristöön, se kuitenkin nähdään passiivisena menetelmänä sen alhaisten kustannusten sekä työmäärän puolesta. Passiivinen menetelmä ei kuitenkaan toimi kaikille AMD vesille sellaisenaan, sillä liian suuret konsentraation rautaa tai alumiinia vesissä aiheuttaa saostumista kalkkikivien pinnalle. Tämä saostuminen tulee heikentämään kalkkikivien kykyä neutralisoida happoja sekä pelkistää rautaa (Johnson). Kuitenkaan passiivista kalkkikivitekniikkaa ei käytetä yksinään, sillä sen suhteellisen edullinen rakentaminen ja hyvät tulokset tekee siitä yleisen vaihtoehdon useiden samanaikaisten lieventämis- ja korjaamistekniikoiden kanssa. Erityisesti osa bioottisista tekniikoista

hyötyy suuresti hapettomista kalkkikivistä, mahdollisesti parantaen kokonaisprosesseja moninkertaisesti (Kleinmann, 1998).

9.2.2 Bioottiset

Bioottisilla prosesseilla on merkittävä rooli lieventämis- ja korjaamisprosesseissa, sillä ne ovat usein monipuolisempia kuin abioottiset vastineet (Johnson, 2005). Bioottisten prosessien päätavoitteena on hyödyntää mikrobeja, jotka pystyvät tuottamaan emäksisiä yhdisteitä ja estää metallien liikkumista ympäristössä (Johnson, 2005). Mikrobit tuottavat emäksisyyttä pääasiassa pelkistysreaktiosarjojen avulla, kuten raudan pelkistymisen ja sulfaattipelkistymisen avulla (Walton-Day, 2003). Kaikki nämä pelkistysprosessit eivät kuitenkaan ole mahdollisia ilman että lisätään tiettyjä pelkistymisen kannalta olennaisia komponentteja AMD ympäristöihin (Walton-Day, 2003). Mahdollisia hyödynnettäviä mikrobeja ovat esimerkiksi fotosynteettiset mikrobit, joiden sisäiset reaktiot tuottavat vahvoja emäksiä, sekä katalyytteinä toimivat mikrobit, joiden myötä on mahdollista toteuttaa tarvittavia kemiallisia reaktioita (Johnson, 2005). Bioottiset prosessit koostuvat suureksi osaksi passiivisista tekniikoista sekä yhdestä aktiivisesta tekniikasta. Passiivisiin tekniikoihin kuuluu aerobiset kosteikot, anaerobiset kosteikot ja kompostibioreaktorit, yhdistetyt aerobiset ja anaerobiset kosteikot, rautaa hapettavat bioreaktorit ja läpäistävät reaktiiviset esteet (Blowes, 2014). Aktiivisiin tekniikoihin kuuluu sulfidogeeniset bioreaktorit, jotka ovat ainoita yleisesti käytettyjä aktiivisiä bioottisia tekniikoita (Johnson, 2005).

Aerobisia kosteikkoja käytetään, kun kaivosvedet ovat liian emäksisiä niiden saapuessa kosteikkoon. Jotenka happamuuden sijasta aerobiset kosteikot on tarkoitettu liian emäksisille aineksille, mutta niitä voidaan kuitenkin hyödyntää myös happamilla vesillä, jos vedet saadaan käsittelyyn ennen kuin ne tuodaan aerobiseen kosteikkoon. Abioottisia menetelmiä hyödynnetään yleensä aerobisen kosteikon yhteydessä, joka mahdollistaa kosteikkojen käytön myös happamille vesille (Johnson, 2005). Aerobisissa kosteikoissa tapahtuu hapettumisreaktioita Fe^{3+} ioneille, joiden myötä tuotetaan $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yhdisteitä. Kosteikot ovat usein melko matalia, joka johtaa rautahydroksidin muodostumiseen halutuille osiolla kosteikosta, josta sen voidaan kerätä pois, näin vähentäen veden rautapitoisuutta (Johnson, 2005). Vedessä hapettumisessa auttaa rautaa hapettavat bakteerit, ja samalla rautayhdisteitä hajottaa muut mikrobit, kuten *Leptothrix*, joiden myötä raudan pitoisuus vedessä tulee laskemaan prosessin aikana (Johnson, 2005). Raudan lisäksi aerobista kosteikkoa hyödynnetään arseenipitoisissa sulfideissa, jossa arseeni voidaan poistaa vedessä, adsorptiolla lietyneet arseenit

osaksi positiivisesti varautuneita rauta ioneita (Johnson, 2005). Aerobisia kosteikkoja voidaan siis käyttää kahden merkittävän ympäristöhaitan, raudan sekä arseenin, poistamiseen vesistöistä.

Aerobisten kosteikkojen vastineena toimii anaerobiset kosteikot, joissa minimoidaan AMD:tä hapettomissa ympäristöissä suoritettavien reaktioiden avulla. Anaerobisia kosteikoita kutsutaan myös kuvaavammalla nimellä, kompostibioreaktorit, sillä niiden sisällä tapahtuu suurin osa reaktioita (Johnson, 2005). Bioreaktorien sisällä olevat mikrobit toimivat katalyytteinä reaktioille, joiden myötä kaivosten vedet saataisiin happamista ja metallirikkaista, lähemmäs emäksisyyttä ja metallikyhyttä (Blowes, 2014). Bioreaktorin sisällä reaktiot ovat pelkistysreaktioita, joissa elektronin luovuttavat materiaalit ovat peräisin itse bioreaktorin kompostista (Johnson, 2005). Käytettävät kompostit koostuvat nopeasti biohajoavan materiaalin ja heikommasta biohajoavan materiaalin sekoituksista (Johnson, 2005). Heikommin biohajoavaa materiaali tarvitaan ylläpitämään bioreaktorin mikrobeita, kun taas nopeammin biohajoavat toimivat elektronin luovutuksessa (Johnson, 2005). Anaerobisia ja aerobisia systeemejä voidaan myös hyödyntää yhdessä, jolloin jätevesi kulkee kummankin systeemin läpi. Kummankin systeemin hyödyntäminen voi olla riittävää tiettyjen kaivosten AMD huolien hallintaan, mutta tämä ei ole taattua kaikissa kaivoksissa (Blowes, 2014).

Viimeinen AMD kannalta olennainen passiivinen tekniikka ovat läpäisevät reaktiiviset esteet (permeable reactive barriers) eli PRB:t (Blowes, 2014). PRB:tä käytetään erityisesti pohjavesien käsittelyssä, sillä esitetyistä menetelmistä ne pärjäävät parhaiten pohjavesien kanssa (Johnson, 2005). Tekniikalla on samankaltaiset tavoitteet kuin kompostibioreaktoreilla, eli ne vähentävät happamuutta ja sitovat metalleja pois vesistä (Johnson, 2005). PRB perustuu seinien ja kerrosten rakentamiseen, jotka estävät useimmat tekijät, mutta päästävät tietyt aineet lävitseen (Blowes, 2014). Tyypillisesti tämä tarkoittaa sitä, että PRB päästää läpi vain veden, mutta estää muut veden mukana kulkevan aineksen. Tämä estävä kerros voi koostua useista erilaisten materiaalien sekoituksesta, joista yleisiä käytettyjä ovat kalkkikivet ja kompostikerrostumat (Blowes, 2014). Kompostin mikrobit ja kalkkikivet reagoivat saastuneen veden kanssa, vähentäen happamuutta sekä poistaen metalleja pohjavedestä. PRB:n pituus vaikuttaa siihen, kuinka tehokkaasti se voi käsitellä mahdollisesti saastunutta aineista, suureksi määritellyt PRB:t ovat satoja metrejä pitkiä (Johnson, 2005).

Bioottisilla menetelmillä on vain yksi yleinen hyödynnettävä aktiivinen tekniikka, joka on sulfidogeeniset bioreaktorit. Tekniikalla on monia hyötyjä verrattuna passiivisiin bioreaktoreihin, kuten niiden hallinta ja ohjattavuus ovat helpommin saavutettavissa, ne pystyvät keräämään talteen haluttuja metalleja saastuneista vesistä ja ne ovat tehokkaampia verrattuna passiivisiin versioihinsa (Johnson, 2005). Tekniikka kuitenkin on kalliimpi rakentaa ja käyttää, sen vaatimien resurssiensa takia (Johnson, 2005). Reaktorit toimivat tuottamalla vetysulfidia biogeenisten prosessien myötä,

jonka avulla nostetaan veden pH:ta sekä poistetaan vedessä olevia metalleja (Johnson, 2005). Reaktoreita voidaan hyödyntää kahdella yleisimmällä tavalla, jotka ovat biosulfidi- ja Thiopaq-prosessit. Biosulfidiprosessi hyödyntää tekniikan kemiallista sekä biologista osiota (Johnson, 2005). Prosessin aikana biologinen osio tuottaa vetysulfidia kemialliseen osioon, jonka kautta AMD tulee kulkemaan. Kemiallisen osion avulla voidaan muokata olosuhteita, joissa AMD kyseisellä hetkellä on, kuten pH ja sulfidipitoisuus (Johnson, 2005). Olosuhteiden muokkausten avulla on mahdollista poistaa AMD:stä haluttuja metalleja kemiallisessa osiossa. Käsitelty AMD jatkaa matkaa kemiallisesta osiosta biologiseen osioon, jossa AMD:n sisältämä sulfaattilähteet toimivat bioreaktorin ylläpitäjänä, sulfaattia pelkistävien bakteerien myötä (Johnson, 2005). Bakteerien myötä tapahtuvat pelkistysreaktiot laskevat veden happamuutta, mutta ne eivät aina riitä jatkamaan itse biosulfidi prosessia. Tilanteissa, joissa bakteerit eivät riitä voidaan lisätä emäksisiä aineksia helpottamaan prosessia. Thiopaq-prosessissa hyödynnetään kahta erilaista mikrobiryhmää, kahdessa eri vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa pyritään pelkistämään sulfaatteja, sulfaatteja pelkistävien bakteerien avulla, samalla saostaen sulfideita. Tämän jälkeen muutetaan bioreaktorista syntynyt vetysulfidi, puhtaaksi rikkiä hyödyntämällä sulfideita hapettavia bakteereita (Johnson, 2005). Näin saadaan niin metallit kuin myös sulfaattien rikki poistettua käsiteltävistä vesistä. Kummassakin prosessissa käytettävät sulfaatteja pelkistävät bakteerit, vaativat orgaanista hiiliperäistä materiaalia jatkaakseen toimintaansa, mikä voi tulla poikkeuksena muihin bakteereihin verrattuna, jotka vaativat orgaanisia ympäristöjä pysyäkseen suojassa haitallisilta aineksilta (Johnson, 2005).

10. Yhteenveto

Kaivosten happovalumiin muodostuminen on merkittävä uhka ympäristöille tällä hetkellä, ja tulee olemaan entistä suurempi uhka tulevaisuudessa, kun vaaditut louhinta määrät kasvavat. Kasvavat louhintamäärät tulee ottaa huomioon uusien kaivoksien suunnitelmissa, jotta voitaisiin välttää kaivosten toiminta- ja sulkemisvaiheiden aikana muodostuvat AMD haitat. Olennaista on tietää alttiimmat muodostumis ympäristöt AMD:lle kaivosalueilla, sekä mitkä mineraalit ovat kyseisillä alueilla hapettumassa. Muodostumisalueille tulee suorittaa testejä, joiden avulla voidaan paremmin ymmärtää AMD:n muodostumista sekä mineraalien reaktioita, jotta niiden vaikutukset voidaan estää. Paremmalla datalla voidaan hyödyntää neutralisointireaktioita paremmin kohteilla, jonka avulla voidaan suorittaa prosesseja, jotka ovat taloudellisesti sekä ympäristöllisesti edullisia kaivosalueelle. Kattavien hoitosuunnitelmien avulla on mahdollista luoda systeemejä, joiden avulla AMD tuotannosta syntyvät haitat saadaan pysäytettyä ja hoidettua ennen kuin ne pystyvät leviämään pois kaivosalueelta. Näiden hoitosuunnitelmien toteutumien kuitenkin vaatii riittävästi dataa

AMD:stä alueella, ennen kuin ne pystytään toteuttamaan siten että niiden menetelmillä on merkittävä vaikutus AMD:hen. Yleisesti tarvitaan lisää tietoa mineraalien erilaisista reaktioista mikrobien kanssa, joiden avulla voidaan estää hapettumisreaktioiden toteutumiset ja mahdollistaa pelkistävät reaktiot korjaavien tekniikkojen aikana. AMD:n käsittely on pitkälti tasapainottelua hapettavien ja pelkistävien reaktioiden välillä alueilla, joissa hapettavien reaktioiden komponenttien määrä koko ajan kasvaa. Tasapainon ylläpitäminen on kuitenkin välttämätöntä, jos halutaan pitää kaivostoiminta sekä ympäristö toimivina kokonaisuuksina.

Lähteet

- Badri A., Nadeau S., (2012), A mining project is a field of risks: A systematic and preliminary portrait of mining risks, DOI: [10.2495/SAFE-V2-N2-145-166](https://doi.org/10.2495/SAFE-V2-N2-145-166)
- Blowes D.W., (2014), The geochemistry of acid mine drainage, <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0>
- Bobeck G.E., Su H., (1985), The kinetics of dissolution of sphalerite in ferric chloride solution. Metallurgical and Materials Transactions B 16b: 413–424. <https://doi.org/10.1007/BF02654839>
- Corkhill C.L., Vaughan D.J., (2009), Arsenopyrite oxidation – A review. Applied Geochemistry 24: 2342–2361. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2009.09.008>
- Crundwell F.K., (1988) Effect of iron impurity in zinc sulfide concentrates on the rate of dissolution. AIChE Journal 34: 1128–1134. <https://doi.org/10.1002/aic.690340709>
- Dold B., (2010), Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management, Waste Management, Er Sunil Kumar (Ed.), ISBN: 978-953-7619-84-8, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/waste-management/basic-concepts-in-environmental-geochemistry-of-sulfidic-mine-waste-management>
- Dold B., (2014), Evolution of Acid Mine Drainage Formation in Sulphidic Mine Tailings, Minerals 2014, 4, 621-641, <https://doi.org/10.3390/min4030621>
- Dold B., (2017), Journal of geochemical exploration, Acid rock drainage prediction: a critical review (s.120-132), <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.09.014>
- Finlex.fi, kaivoslain pykälät, 10.6.2011/621, viitattu 1.12.2022
<https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2011/20110621?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=kaivos>
- Haldar S.K., (2018), Mineral Exploration (Second edition), Chapter 4 – Exploration Geology, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814022-2.00004-6>
- Heikkinen P.M., (2005), Kaivoksen sulkemisen käsikirja
https://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_053.pdf
- Jurjovec J., Pateck J.C, Blowes D.W., (2002), Acid neutralization mechanisms and metal release in mine tailings: A laboratory column experiment, Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 66, No. 9, pp. 1511–1523, [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00874-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00874-2)

Jennings S.R., Dollhopf D.J., and Inskeep W.P., (2000), Acid production from sulfide minerals using hydrogen peroxide weathering. *Applied Geochemistry* 15: 247–255.

[https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(99\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(99)00041-4)

Johnson D.B., Hallberg K.B., (2005), Acid mine drainage remediation options: a review, doi:10.1016/j.scitotenv.2004.09.002

Kaiva.fi, tietoa kaivostoiminnasta, viitattu 2.12.2022,

<https://kaiva.fi/kaivannaisala/lainsaadanto/kaivostoiminta/>

Kleinmann R.L.P., Hedin R.S., Nairn R.W., (1998), Treatment of mine drainage by anoxic limestone drains and constructed wetlands. In *Acidic mining lakes* (pp. 303-319). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-71954-7_16

Kurimo M., Aatos S., Lahti I., (2013), GTK, GTK:n ZTEM-mittaukset kesällä 2013,

https://tupa.gtk.fi/posteri/tp_0068.pdf

Lapakko K., (2002), Metal mine rock and waste characterization tools: an overview. *Mining, Minerals and Sustainable Development*, 67, 1-30

<https://www.iied.org/sites/default/files/pdfs/migrate/G00559.pdf>

Lengke M.F., Tempel R.N., (2003), Natural realgar and amorphous AsS oxidation kinetics.

Geochimica et Cosmochimica Acta 67: 859–871. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01227-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01227-9)

Mills, A. L. (1999). The role of bacteria in environmental geochemistry. The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: processes, techniques, and health issues. Society of Economic Geologists Inc., Littleton, 125-132. https://lmevol.evsc.virginia.edu/pubs/C13-Mills_Bull%20Econ%20Geol%20.PDF

Nesbitt H.W., Muir I.J., (1998), Oxidation states and speciation of secondary products on pyrite and arsenopyrite reacted with mine waste waters and air. *Mineralogy and Petrology* 62, 123–144.

<https://doi.org/10.1007/BF01173766>

Nordstrom DK (1982), Aqueous pyrite oxidation and the consequent formation of secondary iron minerals. *Acid sulfate weathering*, 10, 37-56. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub10.c3>

Nordstrom D.K., Alpers C.N., (1999), Geochemistry of acid mine waters. *The environmental geochemistry of mineral deposits*, 6(October), 133-160,

https://www.researchgate.net/publication/236246844_Geochemistry_of_acid_mine_waters

- Nordstrom D.K., (2011), Mine Waters: Acidic to Circumneutral, **DOI:** 10.2113/gselements.7.6.393
- Paktunc D., Foster A., Heald S., Laflamme G., (2004) Speciation and characterization of arsenic in gold ores and cyanidation tailings using X-ray absorption spectroscopy. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 68: 969–983. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.07.013>
- Plumlee, G.S., Nash, J.T. (1995), *Geoenvironmental models of mineral deposits - fundamentals and application*: U.S. Geological Survey Open-File Report 95-831, p. 1-9. Denver, CO.
https://www.academia.edu/download/40503085/Geoenvironmental_models_of_mineral_depos20151130-19848-1xm853a.pdf
- Rimstidt J.D., Chermak J.A., and Gagen P.M., (1994), Rates of reaction of galena, sphalerite, chalcopyrite, and arsenopyrite with Fe (III) in acidic solutions. **DOI:** 10.1021/bk-1994-0550.ch001
- Sarala P., Nykänen V., (2014), GTK, NovTecEx - Novel technologies for greenfield exploration, https://tupa.gtk.fi/posteri/tp_0330.pdf
- Shapter J.G., Brooker M.H., and Skinner W.M., (2000), Observation of oxidation of galena using Raman spectroscopy. *International Journal of Mineral Processing* 60: 199–211.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(00\)00017-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(00)00017-X)
- Simon P.M., (2021), The mining of minerals and the limits of growth, GTK, 16/2021
https://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/16_2021.pdf
- Singer D.A., Kouda R., (1999), *Natural Resources research vol 8, Examining risk in mineral exploration*, 1520-7439/99/0600-0111\$16.00/1 https://www.researchgate.net/profile/Donald-Singer-4/publication/346816106_Exploration_Risk/links/61c01548a6251b553acea278/Exploration-Risk.pdf
- Walker F.P., Schreiber M.E., and Rimstidt J.D., (2006), Kinetics of arsenopyrite oxidative dissolution by oxygen. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 1668–1676.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2005.12.010>
- Walton-Day K., (2003). *Environmental aspects of mine wastes*, chapter 16. passive and active treatment of mine drainage, ISBN 0-921294-31-x, GTK kirjasto 0000018498
- White, W.W. III, Lapakko, K.A., Cox, R.L. (1999), Static-test methods most commonly used to predict acid-mine drainage: practical guidelines for use and interpretation. *Reviews in economic geology*, 6, 325-338. https://www.researchgate.net/profile/Kim-Lapakko-2/publication/294699008_The_Environmental_Geochemistry_of_Mineral_Deposits_Part_A_Proce

[sses_Techniques_and_Health_Issues/links/57670f6f08ae1658e2f719e1/The-Environmental-Geochemistry-of-Mineral-Deposits-Part-A-Processes-Techniques-and-Health-Issues.pdf](#)