Vuonoksen rikastushiekka-alueella sulkemisen jälkeen muodostuvan suotoveden laadun mallinnus

Mondo Minerals B.V. Branch Finland

Projektinumero: 101028115-001

19.1.2026

AFRY Finland Oy

Sisältö

1 Johdanto 3

2 Lähtötiedot 4
2.1 Rikastushiekka-alueen kuvaus 4
2.2 Peräkkäisuutto (BCR) 5
2.3 Prosessiveden koostumus 8
2.4 Lämpötila, sadanta ja virtaamat 9

3 Mallin konseptualisointi 10

4 Tulokset 11
4.1 Sulkemisen jälkeinen suotovedenlaatu 11
4.2 Kuormitus ympäristöön 13

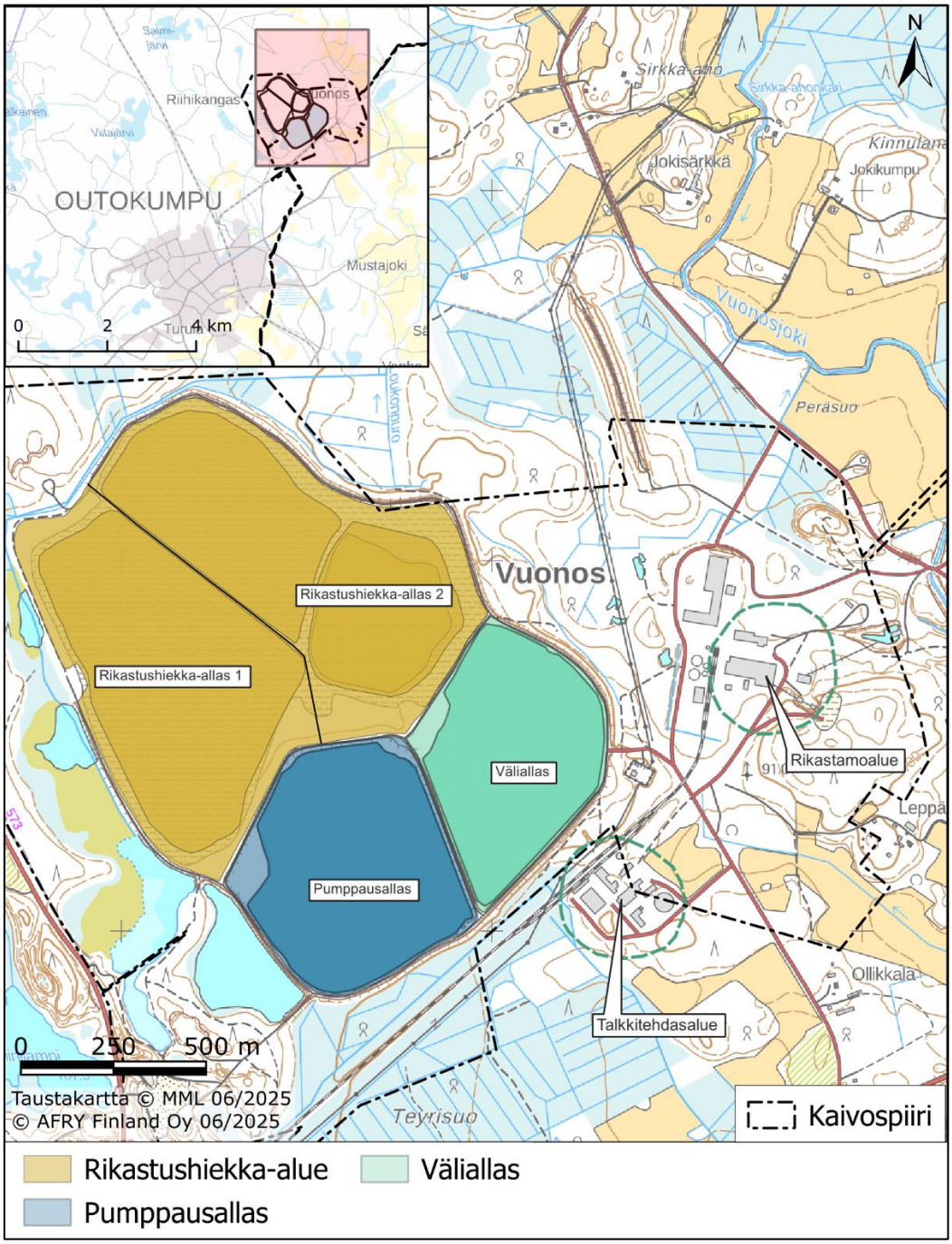
5 Herkkyydet ja epävarmuudet 14
5.1 Herkkyystarkastelu 14
5.2 Epävarmuudet 14

6 Syötetiedot ja oletukset 16
6.1 Mallin lähtötiedot ja konseptualisointi 16
6.2 Geokemiallinen tasapainomallinnus 16

7 Lähdeluettelo 17

1 Johdanto

Tämä raportti on AFRY Finland Oy:n laatima ja käsittelee Mondo Mineralsin Vuonoksen rikastushiekka-alueella muodostuvia suotovesiä. Mallinnuksen tavoitteena oli arvioida rikastushiekka-alueelta sulkemisen jälkeen muodostuvan suotoveden koostumusta ja määrää, ja siten luoda lähtötietoja ympäristövaikutusten arvioimiseen. Rikastushiekka-alue on esitetty kuvassa 1-1. Rikastushiekka-allas on mallinnettu sen lopullisessa maksimilaajuudessa.



Kuva 1-1. Vuonoksen rikastushiekka-alueen sijainti. Kaivospiiri on esitetty kuvassa katkoviivalla.

2 Lähtötiedot

Geokemiallisen mallinnuksen perustana ovat rikastushiekka-alueen (todellisia näytteitä vuodelta 2025) geokemiallisia ominaisuuksia kuvaavat analyysit. Näiden tietojen sekä teknisten suunnitelmien ja paikallisten luonnonolosuhteiden pohjalta rakennettiin konseptuaalinen malli, jonka perusteella muodostuvien suotovesien koostumusta arvioitiin geokemiallisen tasapainomallinnuksen avulla. Numeerisessa geokemiallisessa mallinnuksessa käytettiin Geochemist's Workbench-ohjelmaa (GWB).

2.1 Rikastushiekka-alueen kuvaus

Rikastushiekka-altaalla sijaitsee sulfidirikastushiekkaa; vuosina 1972–1977 läjitettyä nikkeli-rikastushiekkaa ja vuosina 1973–1985 läjitettyä kupari-rikastushiekkaa yhteensä noin 9,1 Mt (Cody 1998). Lisäksi rikastushiekka-altaalla sijaitsee vuosina 1986–2025 läjitettyä magnesiitti-rikastushiekkaa ja nikkelilaitoksen rikastusjätettä yhteensä noin 11,5 Mt, jotka läjitetään paikalleen. Alue suljetaan ja suotovedet johdetaan suotovesiojiin. Rikastushiekka-allas peitetään sulkemisvaiheessa tiiviillä peittorakenteella. Peittorakenteella voidaan vähentää kuormaa, joka liukenee veteen kaivannaisjätteiden hapettumisen seurauksena, sekä jätteisiin pääsevän ja suotovettä muodostavan veden määrää. Toiminnallisten tavoitteiden kannalta tärkeintä on kaksi parametria: peittorakenteen kyky hidastaa hapen kulkeutumista ja toisaalta kyky vähentää vedenläpäisyä. Esimerkkirakenne esitetään kuvassa 2-1.



Kuva 2-1. Esimerkki toiminnalliset tavoitteet täyttävästä peittorakenteesta.

Bentoniittiin perustuvassa peittorakenteessa painotuskerroksen tärkein tavoite on auttaa ylläpitämään bentoniittimaton kosteus tavoitetasolla, sekä estää bentoniittia fyysisiltä vaurioilta (mm. puhkeamat esimerkiksi eläinten vaikutuksesta ja jäätyminen maan routimisen vaikutuksesta). Kasvukerros edesauttaa suojakerroksen paikallaan pysymistä erityisesti ääriolosuhteissa (kuten rankkasateet), lisää haihduntaa ja pidättää lunta, joka eristää pakkaselta eli vähentää roudan syvyyttä.

Rikastushiekka-alue koostuu kahdesta rikastushiekka-altaasta 1 ja 2 (rikastushiekka-allas 1 ja rikastushiekka-allas 2), välialtaasta ja pumppausaltaasta. Rikastushiekka-altaille 1 ja 2 sekä välialtaaseen on läjitetty sulfidista rikastushiekkaa ja sen päälle magnesiittirikastushiekkaa. Pumppausaltaaseen ei ole läjitetty rikastushiekkaa. Rikastushiekka-altaan 1 pinta-ala on 33 ha, Rikastushiekka-altaan 2 pinta-ala on 50 ha ja välialtaan pinta-ala on 26 ha. Rikastushiekka-altaan 1, Rikastushiekka-altaan 2 ja välialtaan alue peitetään sulkemisvaiheessa ja peittämisen jälkeen suotovedet johdetaan suotovesiojiin. Peittorakenteena käytetään tiivistä peittorakennetta. Vedenläpäisyn tavoite on maksimissaan 10 % nettosadannasta ja hapenläpäisyn 1 mol/m^2/vuosi.

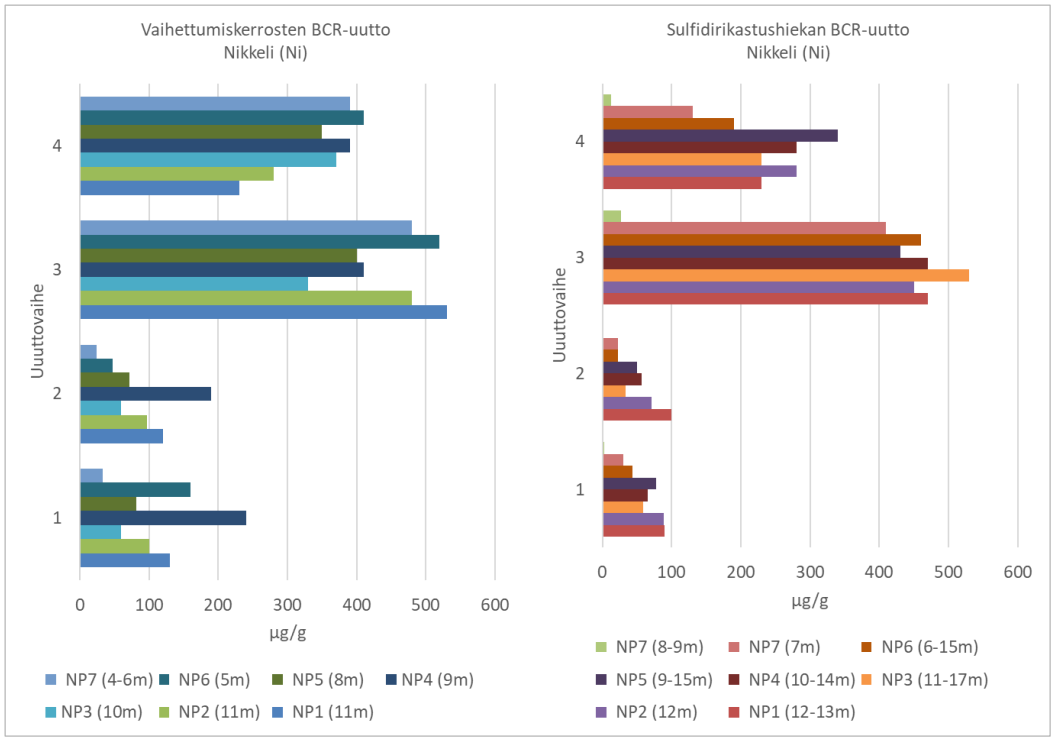
2.2 Peräkkäisuutto (BCR)

Rikastushiekan ominaisuuksia tutkittiin keräämällä näytteitä seitsemästä eri pisteestä rikastushiekka-alueen välialtaan sekä rikastushiekka-altailta 1 ja 2 eri syvyyksiltä. Näytteet on kerätty vuonna 2025 ja analysointi on suoritettu vuoden 2025 aikana. Valituille näytteille tehtiin 4-vaiheinen BCR-peräkkäisuutto, jossa kiinteä:neste suhde oli 1:50.

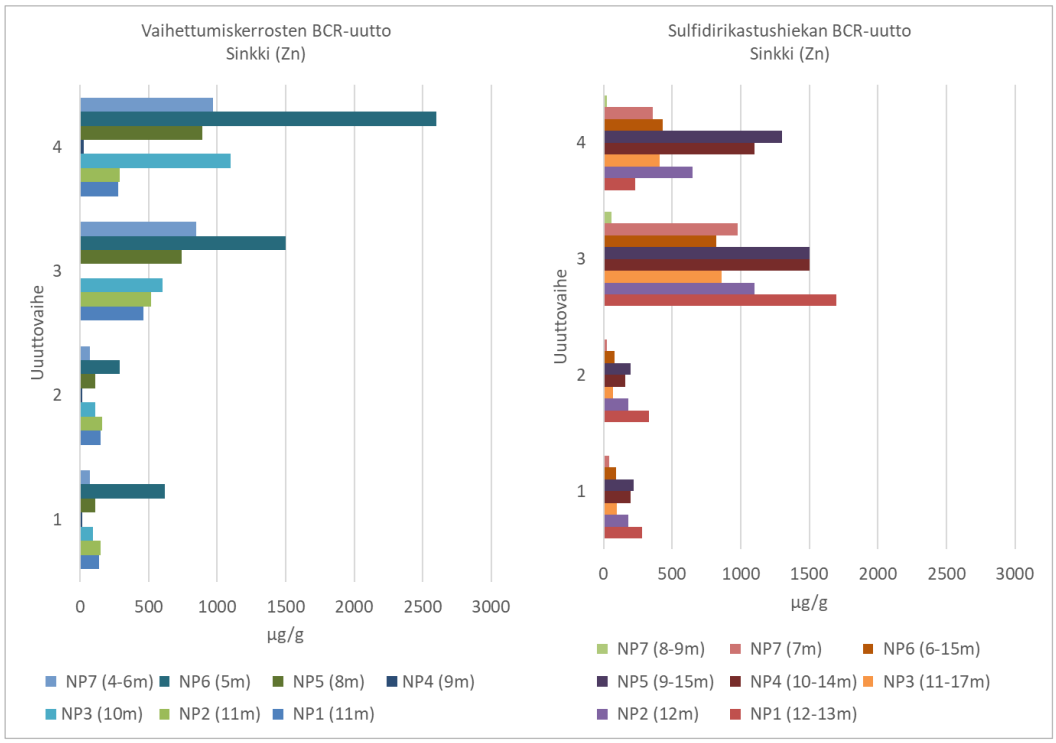
Pelkkä kokonaispitoisuus ei anna riittävää tietoa aineiden ympäristökäyttäytymisestä, sillä aineiden vapautuminen riippuu niiden esiintymismuodoista. Metallien sitoutumismuotoja ja potentiaalista vapautumista voidaan arvioida mm. peräkkäisuutolla. BCR-peräkkäisuutossa käytetään Euroopan komission kehittämää ja validoimaa BCR-referenssimenetelmää (Rauret et al. 1999).

BCR-peräkkäisuutossa näytteet uutetaan neljässä peräkkäisessä vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa vaihdettava ja heikosti happoliukoinen fraktio uutetaan etikkahapolla, jolla vapautetaan pääasiassa karbonaatteihin sitoutuneet metallit. Toisessa vaiheessa uutetaan hydroksyyliammoniumkloridilla pelkistyvä fraktio, joka edustaa rauta- ja mangaanioksideihin sitoutuneita metalleja. Kolmannessa vaiheessa uutetaan vetyperoksidilla hapettuva fraktio, joka sisältää orgaaniseen aineeseen ja sulfideihin sitoutuneet metallit. Neljännessä vaiheessa jäännösfraktio määritetään hajottamalla jäljelle jäänyt kiinteä jäännös kuningasvedellä, joka vapauttaa mineraalirakenteisiin sitoutuneet metallit.

Rikastushiekkanäytteiden nikkelin, sinkin, rikin ja kuparin BCR-peräkkäisuuttokokeen tulokset on esitetty kuvissa 2-2…2-5. Kuvissa vasemmalla (sinivihreällä) on esitetty rikastushiekka-altaan vaihettumiskerroksesta otettujen näytteiden tulokset ja oikealla (punertavalla) sulfidirikastushiekan tulokset. Kuvaajista nähdään, että liukenemisen jaottuminen eri uuttovaiheisiin on hyvin samanlainen niin vaihettumiskerroksen näytteissä kuin sulfidirikastushiekkanäytteissä. Liukeneminen on hyvin pientä kaikkien aineiden kohdalla uuton kahdessa ensimmäisessä vaiheessa, joissa liuotetaan karbonaatteihin ja oksideihin sitoutuneet aineet. Kaiken kaikkiaan tulosten perusteella voidaan todeta, että nikkeli, sinkki, rikki ja kupari esiintyvät ainakin pääosin samassa muodossa vaihettumiskerroksessa ja sulfidirikastushiekassa. Nikkeliä liukenee eniten uuton kolmannessa vaiheessa eli vetyperoksidiuutossa, jossa uutetaan sulfideihin sitoutuneet metallit. Liukeneminen on suurta myös 4. uuttovaiheessa eli kuningasvesiuutossa. Vetyperoksidi hapettaa kemiallisesti helposti hapettuvat sulfidit, kun taas kuningasvesi hajottaa myös rakenteellisesti stabiilit sulfidimineraalit.



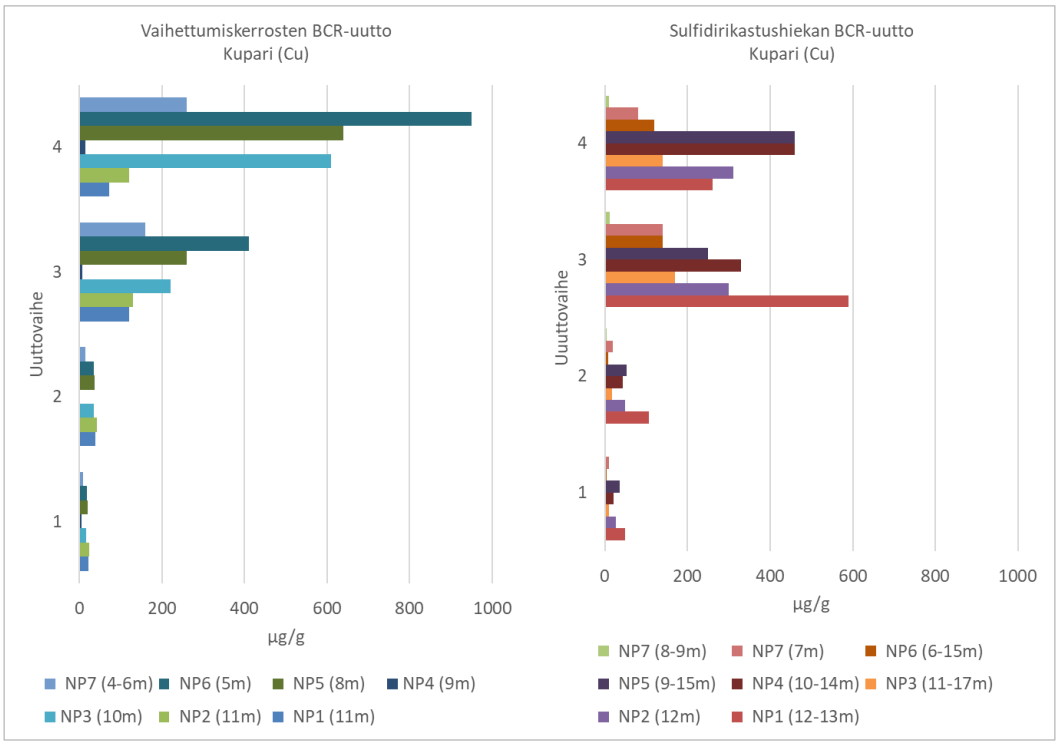
Kuva 2-2. Liuenneen nikkelin määrä BCR-peräkkäisuuton eri uuttovaiheissa vaihettumiskerroksesta otetuissa näytteissä (vas.) ja sulfidirikastushiekkanäytteissä (oik.)



Kuva 2-3. Liuenneen sinkin määrä BCR-peräkkäisuuton eri uuttovaiheissa vaihettumiskerroksesta otetuissa näytteissä (vas.) ja sulfidirikastushiekkanäytteissä (oik.)



Kuva 2-4. Liuenneen rikin määrä BCR-peräkkäisuuton eri uuttovaiheissa vaihettumiskerroksesta otetuissa näytteissä (vas.) ja sulfidirikastushiekkanäytteissä (oik.)



Kuva 2-5. Liuenneen kuparin määrä BCR-peräkkäisuuton eri uuttovaiheissa vaihettumiskerroksesta otetuissa näytteissä (vas.) ja sulfidirikastushiekkanäytteissä (oik.)

Peräkkäisuuttotuloksista koostettiin mallin syöte. Näytteet valittiin edustamaan sulfidirikastushiekkaa, magnesiittihiekkaa ja sulfidirikastushiekan vaihettumiskerrosta sekä magnesiittihiekkaa. Vaiheittumiskerroksesta otettu näyte NP4 9 m poikkesi selvästi muista näytteistä, mikä viittaisi siihen, että näytteessä on todennäköisesti enemmän

magnesiittihiekkaa kuin sulfidirikastushiekkaa. Tästä syystä näyte NP4 9 m valittiin edustamaan magnesiittihiekkaa. Mallin syötteeseen valittiin ensimmäisen ja toisen uuttovaiheen tulokset, koska BCR-tulosten perusteella magnesiittihiekkaläjitys suojaa jo nykyiselläänkin sulfidisia rikastushiekkoja hapettumiselta tehokkaasti. Lisäksi syötteeseen käytettiin kolmannen uuttovaiheen tuloksia, jotka skaalattiin muuntokertoimella 0,002 (Barnes ym. 2015) ja joiden osalta huomioitiin tiivispeiton vaikutus hapenläpäisyyn.

2.3 Prosessiveden koostumus

Rikastushiekka-altaan veden koostumukseen vaikuttaa rikastushiekan rapautumistuotteiden lisäksi rikastushiekan mukana tulevan prosessiveden koostumus. Taulukossa (Taulukko 2-1) on esitetty prosessiveden nikkelin, sulfaatin, raudan ja arseenin pitoisuudet keskiarvona vuosien 2020–2024 mittaustuloksista, joita oli 518 kpl.

Taulukko 2-1. Rikastushiekka-altaan veden geokemiallisessa tasapainomallinnuksessa käytetyn prosessiveden koostumus (keskiarvo vuosien 2020–2024 tuloksista, N=518).

Parametri	Prosessivesi (mg/l)
Ni	0,35
SO_4	790
Fe	0,59
As	0,068

Prosessivedestä otettiin vuonna 2025 lisänäyte, jolle tehtiin kattavampi karakterisointi. Prosessiveden lisänäytteen tuloksia (Taulukko 2-2) käytettiin myös rikastushiekka-alueen suotovesilaadun mallinnuksessa.

Taulukko 2-2. Rikastushiekka-altaan veden geokemiallisessa tasapainomallinnuksessa syötetietona käytetyn prosessiveden lisänäytteen tulokset.

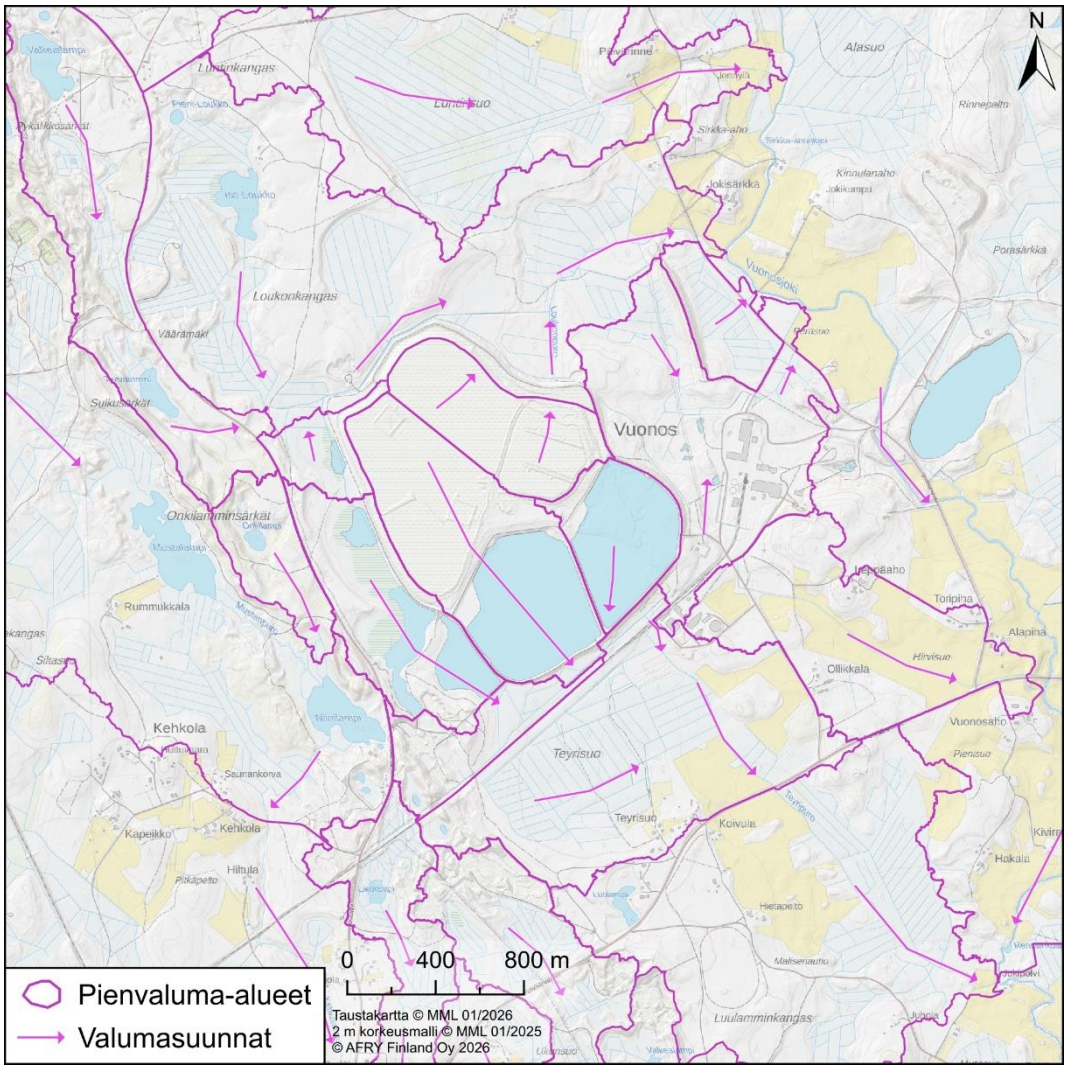
Parametri	Yksikkö	Prosessivesi	Parametri	Yksikkö	Prosessivesi
pH		9,1	Co	µg/l	1,1
Sjk	mS/m	120	Cr	µg/l	4,2
K-aine	mg/l	16	Cu	µg/l	0,6
COD Mn	mg/l O2	3,1	Fe	µg/l	330
N	µg/l	1100	Hg	µg/l	0,005
P	µg/l	10	K	mg/l	8,3
SO_4	mg/l	560	Mg	mg/l	110
As	µg/l	54	Na	mg/l	29
kovuus	mmol/l	6,5	Ni	µg/l	62
Ca	mg/l	85	Pb	µg/l	0,05
Cd	µg/l	0,01	Zn	µg/l	1,6

2.4 Lämpötila, sadanta ja virtaamat

Vuotuinen sadanta alueella on keskimäärin 635 mm/a. Sadannan kasvu lisää veden määrää läjitysalueella, mikä laimentaa pitoisuuksia. Toisaalta sadannan kasvu lisää suotoveden määrää ja näin kokonaiskuormitusta, eikä siksi voida sanoa onko konservatiivista arvioida sadantaa ylös vai alaspäin.

Lämpötilalla sen sijaan on reaktionopeutta kasvattava vaikutus, eli keskilämpötilojen nousu lisää haitallisten aineiden vapautumista rikastushiekasta. Keskilämpötilaksi malliin määritettiin 3,5°C perustuen Joensuun ilmastotietoihin.

Rikastushiekka-alueen rikastushiekka-altaan 1 ja 2 sekä välialtaan pinta-ala on yhteensä 109 ha. Alueelle osuvasta sadannasta noin 30 % oletetaan haihtuvan, eli nettosadanta on 445 mm/vuosi. Rikastushiekka-alueen rikastushiekka-altaat 1 ja 2 sekä väliallas peitetään tiivispeitolle eli satavasta vedestä 90 % oletetaan poistuvan pintavaluntana ja 10 % muodostavan suotovettä. Noin 60 % suotovesistä saadaan otettua talteen suotovesiojiin ja noin 40 % jää talteenottamatta. Talteenottamaton suotovesi suotautuu rikastushiekka-alueen pohjarakenteen kautta maaperään ja pohjaveteen. Sulkemisen jälkeen pintavalunta jakautuu lähtökohtaisesti luontaisten mikrovaluma-alueiden mukaisesti (Kuva 2-6).



Kuva 2-6. Mikrovaluma-alueet ja niiden valumasuunnat Vuonoksen tehdas- ja rikastamoalueella sulkemisen jälkeen.

3 Mallin konseptualisointi

Tiivis peittorakenne hidastaa rapautumista rajoittamalla hapen saatavuutta (1 mol/m^2/a). Peiton vedenläpäisynä käytetään 10 % sadannasta, jota käytetään teknisen suunnittelun yläraja-arvona. Perusperiaatteina mallinnuksessa käytetään kaivosten ympäristötutkimuksissa vakiintuneita käytäntöjä (mm. MEND 1997).

Rikastushiekka-alueen suotoveden geokemiallinen mallinnus toteutettiin kolmelle sulkemisen jälkeistä tilaa edustavalle vaiheelle.

Vaihe 1 edustaa heti sulkemisen jälkeisiä ensimmäisiä vuosia. Rikastushiekka-alue on kokonaan peitetty eli hapen ja vedenläpäisykyky on toiminnan aikaisesta rajoittunut, mutta rikastushiekan prosessivesipitoinen huokosvesi ei ole vielä alkanut korvautumaan sadevedellä.

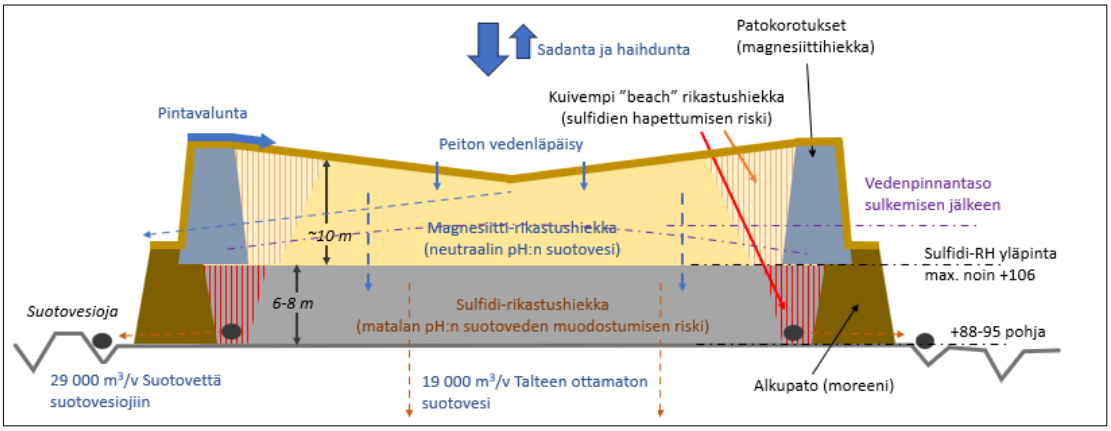
Vaihe 2 edustaa sulkemisen jälkeistä keskipitkän ajan ennustetta noin 66 vuotta sulkemisen jälkeen. Vaihe 2 on muutoin vastaava kuin vaihe 1, mutta huokosvedestä noin puolet oletetaan korvautuneen sadevedellä.

Vaihe 3 edustaa sulkemisen jälkeistä pitkän ajan ennustetta noin 132 vuotta sulkemisen jälkeen. Konseptuaalinen tilanne näytetään kuvassa (Kuva 3-1). Vaihe 2 on muutoin vastaava kuin vaihe 1, mutta huokosveden oletetaan kokonaan korvautuneen sadevedellä.

Lähtötiedot rikastushiekka-alueesta ja paikallisista olosuhteista ovat mallinnuksen perusta. Lisäksi tulokset muunnetaan vastaamaan todellista tilannetta käyttäen kirjallisuudesta saatuja muunnoskertoimia. Konseptualisoinnissa huomioitavat tekijät on esitetty taulukossaTaulukko 2-2.

Mallin lähtökohta on esittää 1) suotoveden koostumus vaiheittain tasapainotettuna vuosikeskiarvona, 2) laskea vuotuinen kokonaiskuorma. Eli mallin perustana käytetään lämpötilojen ja muiden oletusten osalta vuotuisia keskiarvoja. Samoin oletetaan, että vuoden aikana muodostuva kuorma poistuu saman vuoden aikana.

Yksinkertainen konseptualisointi esitetään kuvassa (Kuva 3-1).



Kuva 3-1. Mallin konseptuaalinen kuvaus.

4 Tulokset

4.1 Sulkemisen jälkeinen suotovedenlaatu

Mallinnuksen tuloksena tuotettu suotovedenlaatu on esitetty taulukossa 4-1. Taulukossa on lisäksi esitetty vertailuksi pohjaveden ympäristölaatunormin (341/2009) pitoisuusrajat. On tärkeä huomata, että raja-arvot on määritetty kuvaamaan pohjaveden laatua, eivätkä siten ole suoraan sovellettavissa suotoveden laatuun. Pitoisuus suotovedessä ei ole pitoisuus pohjavedessä. Tässä yhteydessä arvoja käytetään vain suuruusluokan hahmottamisen tukena. Sulkemisen jälkeisenä aikana muodostuvan suotoveden laatua tarkasteltiin kolmessa eri skenaariossa (ks. luku 3).

Vaiheessa 1 suotovesi on lievästi hapanta (pH 6). Arseenin, kadmiumin, koboltin, kuparin, nikkelin, lyijyn, sinkin, sulfaatin ja ammoniumin pitoisuudet ylittävät pohjaveden ympäristölaatunormin mukaiset pitoisuudet. Muiden aineiden osalta pitoisuudet ovat maltillisia. Prosessiveden vaikutus näkyy etenkin nikkelin, sulfaatin, typen, kadmiumin ja arseenin pitoisuuksissa.

Vaiheessa 2 suotovesi on edelleen lievästi hapanta (pH 6,4), mutta lähempänä neutraalia kuin vaiheessa 1. Kadmiumin, koboltin, kuparin, nikkelin, lyijyn, sinkin, sulfaatin ja ammoniumin pitoisuudet ylittävät pohjaveden ympäristölaatunormin

mukaiset pitoisuudet. Muiden aineiden osalta pitoisuudet ovat maltillisia. Prosessiveden vaikutus suotoveden laatuun näkyy edelleen, mutta etenkin nikkelin, sulfaatin, typen, kadmiumin ja arseenin pitoisuudet ovat laskeneet selvästi prosessivesipitoisen huokosveden korvauduttua sadevedellä.

Vaiheessa 3 suotovesi on lievästi emäksistä (pH 8,3). Prosessivesipitoinen huokosvesi on korvautunut kokonaan sadevedellä, eikä prosessiveden vaikutusta enää näy suotoveden laadussa. Kadmiumin, koboltin, nikkelin ja sinkin pitoisuudet ylittävät pohjaveden ympäristölaatunormin mukaiset pitoisuudet. Muiden aineiden osalta pitoisuudet ovat maltillisia.

Taulukko 4-1. Rikastushiekka-alueelta tulevan suotoveden koostumus sulkemisen jälkeen. Suuruusluokan hahmottamisen tueksi esitetään pohjaveden ympäristölaatunormin (VNA 341/2009) pitoisuuksia, vaikka nämä eivät olekaan suoraan sovellettavissa suotoveden vedenlaadulle.

Muuttuja	Yksikkö	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	VNA 341/2009
pH		6,0	6,4	8,3	
Ag	mg/l	0,000054	0,000054	0,000053	
Al	mg/l	0,42	0,42	0,00038	
As	mg/l	0,016	0,0012	8,4E-07	0,005
B	mg/l	0,00078	0,00078	0,00078	
Ba	mg/l	0,0031	0,0031	0,0031	
Be	mg/l	0,000052	0,000052	0,000052	
Ca	mg/l	93	50	7,9	
Cd	mg/l	0,057	0,052	0,044	0,0004
Cl	mg/l	0,00076	0,00076	0,00076	25
Co	mg/l	0,073	0,072	0,07	0,002
Cr	mg/l	0,000022	3,6E-06	3,3E-10	0,01
Cu	mg/l	0,059	0,026	0,00068	0,02
F	mg/l	5,8	5,8	5,8	
Fe	mg/l	5,8E-06	1,6E-06	8,8E-09	
Hg	mg/l	6,8E-06	1,5E-06	2,9E-08	
K	mg/l	8,4	4,3	0,14	
Li	mg/l	0,0013	0,0013	0,0013	
Mg	mg/l	120	69	14	
Mn	mg/l	0,36	0,36	0,36	
Mo	mg/l	0,00049	0,00049	0,00049	
Na	mg/l	46000	15	0,02	
Ni	mg/l	0,5	0,32	0,14	0,01
P	mg/l	0,0084	0,0042	0,0015	
Pb	mg/l	0,14	0,078	0,00058	0,005
Sb	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,0025
Se	mg/l	0,00025	0,00025	0,00025	
Si	mg/l	0,49	0,49	0,49	
Sn	mg/l	0,000046	0,000072	0,0022	
Sr	mg/l	0,0076	0,0077	0,0077	
Th	mg/l	0,00082	0,00082	0,00082	
Ti	mg/l	0,28	0,28	0,28	
U	mg/l	0,00033	0,00012	0,0012	

Muuttuja	Yksikkö	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3	VNA 341/2009
V	mg/l	0,003	0,003	0,003	
W	mg/l	0,00	0,00	0,00	
Zn	mg/l	0,42	0,42	0,31	0,06
SO_4	mg/l	810	420	20	150
NO_3-N	mg/l	0,55	0,27	0,00	50
NH_4-N	mg/l	0,55	0,27	0,00	0,2

4.2 Kuormitus ympäristöön

Taulukossa (Taulukko 4-2) esitetään aineiden vuotuinen kuormitus perustuen tasapainotettuun suotovedenlaatuun sulkemisen jälkeen.

Taulukko 4-2 Suotovesien mukana rikastushiekka-alueelta tuleva kuormitus (kg/v) sulkemisen jälkeen.

Muuttuja	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3
Ag	0,0026	0,0026	0,0026
Al	20	20	0,018
As	0,79	0,058	4,1E-05
B	0,038	0,038	0,038
Ba	0,15	0,15	0,15
Be	0,0025	0,0025	0,0025
Ca	4500	2400	380
Cd	2,7	2,5	2,2
Cl	0,037	0,037	0,037
Co	3,5	3,5	3,4
Cr	0,0011	0,00017	1,6E-08
Cu	2,9	1,2	0,033
F	280	280	280
Fe	0,00028	0,00008	4,3E-07
Hg	0,00033	7,1E-05	1,40E-06
K	410	210	6,9
Li	0,061	0,061	0,061
Mg	6000	3300	670
Mn	17	17	17
Mo	0,024	0,024	0,024
Na	2200000	700	0,95
Ni	24	16	6,6
P	0,41	0,2	0,073
Pb	7	3,8	0,028
Sb	0,051	0,051	0,051
Se	0,012	0,012	0,012
Si	24	24	24
Sn	0,0022	0,0035	0,11
Sr	0,37	0,37	0,37
Th	0,04	0,04	0,04

Muuttuja	Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 3
Ti	13	13	13
U	0,016	0,0057	0,058
V	0,15	0,15	0,15
W	0	0	0
Zn	20	20	15
SO4	39000	20000	980
NO3-N	27	13	0
NH4-N	27	13	0

5 Herkkyydet ja epävarmuudet

5.1 Herkkyystarkastelu

Käytetty mallinnustapa on pitkälle yksinkertaistettu ja käsittelee mallinnettavat skenaariot tasapainotiloina, joissa vuoden aikana muodostuvat hapettumistuotteet liukenevat vuosittaiseen kokonaisvesimäärään ja poistuvat saman vuoden aikana. Tulokset edustavat viimeistä vuotta sen jakson aikana, jota konseptuaalinen malli edustaa. Todellisuudessa vuodenaikoihin ja vuosittaiseen vaihteluun liittyy merkittäviäkin kuivien ja märkien jaksojen välisiä eroja.

Jotta tasapainomallinnusta voidaan hyödyntää, on ensin tunnistettava mallinnettavan kohteen pääasialliset saostumisreaktiot. Kaivannaisjätteille, erityisesti sulfidimalmien osalta, käytetään tyypillisesti raudan saostumistuotteita. Tasapainomallinnuksessa sorptio on määritelty yksinkertaistetusti käyttäen ferrihydriittia pääasiallisena pintareaktioalustana, ja sekundäärisinä sorboivina pintoina götiittiä ja hematiittia. Mallinnuksen tasapainoreaktioissa myös oletetaan, että raudan vapaa pitoisuus on riittävä, ja että kaikki rauta on vaihdettavissa vastaavaan mineraaliin eli ferrihydriittiin.

Mallien herkkyyksistä mainittakoon keskeisimpänä hapettumisolosuhteet. Peittorakenne vähentää merkittävästi aineiden pitoisuuksia pienentämällä happivuota ja siihen liittyvät oletukset vaikuttavat suoraan mallinnuksen tuloksiin.

Reaktiivisen massan skaalaus vaikuttaa tuloksiin: jos veden virtaus läjityksessä on oletettua tasaisempaa (ts. kanavoitumiskerroin suurenee), suurempi määrä altistuu rapautumiselle ja huuhtoutumiselle, jolloin mineraalien hapettumistuotteiden määrä kasvaa lineaarisesti suhdelukujen kanssa.

Myös lämpötilan merkitys hapettumisnopeuteen on suuri, mutta toisaalta vuoden keskilämpötilamuutosten täytyisi olla suuria (>>5 °C) vaikuttaakseen mallinnustuloksiin suuruusluokkatasolla. Ilmastonmuutoksella voi olla vaikutusta suotovesien koostumukseen. Lämpötilan nousu nopeuttaa rapautumista eli kasvattaa pitoisuuksia ja vuosittaista kuormaa, sadannan kasvu taas laimentaa, muttei vaikuta kokonaiskuormiin.

5.2 Epävarmuudet

Mallin on tarkoitus luoda tietoja, joilla voidaan ohjata suuntaa antavasti tulevaisuuden toimintaa. Epävarmuutta malliin tulee monesta lähteestä. Näistä mainittakoon mm. lähtötietoihin (esim. näytteiden edustavuus, menetelmien soveltuvuus), parametrisointiin ja muihin mallinnukseen liittyviin yksinkertaistuksiin, sekä

tulevaisuuden ennustamiseen liittyvät puutteet. Epävarmuuksien vähentäminen täytyy aloittaa muuttujista, joihin voidaan vaikuttaa ja joihin liittyy suurin epävarmuus. Mallinnuksessa ei ole tarkoituksenmukaista pyrkiä minimoimaan kaikkea epävarmuutta, jonka periaatteessa voisi, koska osaoptimoinnilla voi olla hyvin pieni vaikutus kokonaisuuteen.

Edustavien näytteiden valintaan ja niistä koostettuihin syötteisiin liittyy subjektiivista epävarmuutta. Näytteet valittiin edustamaan realistista, mutta konservatiivisuuteen kallistuvaa tilannetta.

Rikastushiekkanäytteiden peräkkäisuuttojen ja prosessivesinäytteiden analyysitulosten alle määritysrajan oleville pitoisuuksille annettiin arvoksi puolet määritysrajasta.

Vedenlaadun kannalta tärkeimmät tekijät ovat muodostuvan suotoveden pH ja rautapitoisuus. Näillä on suora vaikutus sorptiokykyisten sekundäärimineraalien muodostumiseen ja metallien pidättymiseen.

Laboratoriossa kokeet tehdään 25 ± 2°C lämpötilassa. Sulfidien hapettumisreaktiot ovat pääsääntöisesti sitä hitaampia, mitä alhaisempi lämpötila on, joten tulokset on muutettava vastaamaan paikallisia olosuhteita. Kuten herkkyystarkastelussa mainitaan, lämpötilan suuretkaan muutokset eivät aiheuta kertaluokkatason epävarmuutta. Lämpötilakertoimen määrittäminen perustuu pyriitin käyttäytymiseen ja Arrheniuksen yhtälöön (esim. Nicholson ym. 1988). Tapa on yleisesti käytetty sulfidisiin malmeihin liittyvissä veden koostumuksen mallinnuksissa, joiden oikeellisuus on todennettu mittauksiin perustuvin validointi- ja verifikaatiomenetelmin.

Skaalaukseen käytetään veden läpäisydynamiikan ja hapettumisreaktioiden eroa heijastavaa arvioita. Kertoimiin itseensä sisältyy episteemistä epävarmuutta, vaikka kertoimet on verifioitu toteutuneissa kohteissa, mutta suurempi epävarmuus liittyy kertoimien valintaan ja miten ne kuvastavat todellista tilannetta. Kertoimet vähentävät reaktiivisen massan määrää lineaarisesti eli niillä on merkittävä vaikutus tuloksiin.

Mallinnuksessa käytetty arvo 1 mol/m^2/a on tyypillinen Vuonoksen suunnitelmien kaltaisille tiivispeitoille, ja sallii peiterakenteessa olevan konservatiivisiin arvioihin perustuvaa rikkonaisuutta. Happivuon muutoksilla on merkittävä vaikutus tuloksiin (herkkyystarkastelu).

Vesimäärien epävarmuudet liittyvät sääoloihin, sekä peittorakenteen läpäisyyn. Vesimäärän lisääntyminen pienentää pitoisuuksia, mutta lisää suotoveden määrää. Sadannan määrään liittyy epävarmuutta, myös liittyen ilmastonmuutokseen seuraavien vuosikymmenien aikana. Sadanta on arvioitu varovasti perustuen menneeseen ilmastodataan, joten tuonee malliin konservatiivisuutta. Peittorakenteen läpäisynä käytetty 10 % on toimintatavoitteeksi määritetty arvo eli yläraja-arvo.

Käytettyyn vuotuisen keskilämpötilan arvioon sisältyy epävarmuutta, mutta sitä ei arvioida erityisen merkittäväksi verrattuna muihin lähtötietoihin ja oletuksiin. Ilmaston lämpötilan epävarmuudet sisältyvät lämpötilan skaalauskertoimeen, jolla laboratorio-olosuhteita muunnetaan paikallisiin olosuhteisiin.

6 Syötetiedot ja oletukset

6.1 Mallin lähtötiedot ja konseptualisointi

Mallin syötteiden rakentamisessa käytetyt lähtötiedot ja muunnoksissa käytetyt skaalauskertoimet esitetään taulukossa 6-1.

Taulukko 6-1. Rikastushiekka-alueen geokemiallisen mallin lähtötiedot ja konseptualisoinnissa käytetyt arvot.

Parametri	Syötetieto tai oletus	Yksikkö
Säätietojen vuotuiset keskiarvot		
Lämpötila	3,5	°C
Vuotuinen nettosadanta	445	mm/a
Skaalauskertoimet		
Lämpötilakerroin	0,25	Arrheniuksen yhtälö
Huuhtoutumiskerroin	0,2	
Kanavoitumiskerroin	0,2	
Tekniset tiedot (maksimilaajuus) ja konseptualisointi		
Pinta-ala	109	ha
Tilavuus	9,8	Mm^3
Massa	20,6	Mt
Vuotuinen suotauma (avoin)	0,5	Mm^3/a
Vuotuinen suotauma (peitetty)	44,5	mm/a
Vuotuinen suotauma (peitetty)	0,05	Mm^3/a
Suotovesien talteenotto ojiin	60	%
Peittorakenteen veden läpäisy	10	% nettosateesta
Sulfidirikastushiekan osuus massasta	38	%
Vaiheittumiskerroksen osuus massasta	6	%
Magnesiittirikastushiekan osuus massasta	56	%
Hapen pääsy rikastushiekka-alueelle (peittorakenteen vaikutus)		
Happivuo	1	$mol/m^2/a$

6.2 Geokemiallinen tasapainomallinnus

Geokemiallisessa tasapainomallinnuksessa kuvataan tutkittavan liuoksen koostumusta aineiden tasapainovakioiden eli liukenemisen ja saostumisen sekä sorption avulla. Myös mahdollinen aineiden sorptio saostuvien rautaoksihydroksidien pinnalle otetaan huomioon. Mallinnustulokseen vaikuttaa merkittävästi käytettävän termodynaamisen ja kineettisen vertailukirjaston laajuus, johon tutkittavan liuoksen komponentteja verrataan.

Tässä työssä käytettiin Geochemist’s Workbench -mallinnusohjelman versiota 18.0. Mallinnuksessa käytettiin seuraavia olettamuksia:

- Reaktiot tapahtuvat äkillisesti ja tasapainoon asti eli mineraalien muodostumiseen liittyviä kineettisiä tekijöitä ei ole huomioitu, eikä mahdollisia sekoittumiseen liittyviä reaktioita hidastavia vuorovaikutuksia.

- Adsorptiomalli: Dzombak ja Morel (1990), 2-kerrosvakiokapasitanssimalli, C=2,0 F/m^2.
- Ferrihydriitti ensisijaisena sorboivana mineraalina, liukoisuus ja sorptio-ominaisuudet kirjastosta FeOH+(V8.R6+)AB_AW_20220607.sdat. Kirjastoon on lisätty antimoni(V):n kineettinen aineisto VisualMINTEQ-ohjelman kirjastosta.
- Termodynaaminen kirjasto: thermo.com.V8.R6+_AW_17052022.tdat. Kirjastoon on lisätty antimoni(V):n kineettinen aineisto VisualMINTEQ-ohjelman kirjastosta.
- CO_2:n osapaine fugasiteetin logaritmina -3,5, H^+ tasapainossa hiilidioksidin (kaasumainen) kanssa. Vaihe 1 tasapainomallinnettiin vakio-pH:ssa 6.
- HCO_3:n pitoisuuden sallitaan muuttua ionitasapainon ylläpitämiseksi.

7 Lähdeluettelo

Barnes, A., Bowell, R., Warrander, R., Sapsford, D., Sexsmith, K., Charles, J., Declerq, J. Santonasto, M. & Dey, B. 2015. Comparison between Long-Term Humidity Cell Testing and Static Net Acid Generation (NAG) Tests: Potential for NAG Use in Preliminary Mine Site Water Quality Predictions. 10th ICARD IMWA.

Cody S. J. 1998. Hydrogeological and hydrochemical investigation of leachate from copper, nickel and magnesite sand tailings storage facility (TSF) at Vuonos plant, Outokumpu, Northern Karelia, Finland. Thesis, The University of College of London. September 1998.

Dzombak, D.A. ja Morel, F.M.M., 1990. Surface complexation modeling: Hydrous ferric oxide. John Wiley & Sons, New York, 416 p. ISBN: 978-0-471-63731-8.

MEND 1997. Short course for prediction models for acid rock drainage. 4th International conference on acid rock drainage. Vancouver 1997.

Nicholson, R. V., Gillham, R.W. ja Reardon, E.J., 1988. Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: 1. Experimental kinetics. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 52, pp. 1077-1085.

Rauret G., López-Sánchez J. F., Sahuquillo A., Rubio R., Davidson C., Ure A. ja Quevauviller Ph. 1999. Improvement of the BCR three-step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. Journal of Environmental Monitoring, 1, 57–61.