

Liite 2

- Kaivannaisjätealueiden vesilaatumallinnusraportti - toiminnanaikainen
- Kaivannaisjätealueiden vesilaatumallinnusraportti – sulkemisen jälkeinen
- Louhosjärvimallinnus



Sotkamo Silver Oy

Toiminnanaikaiset suoto-, dekantti- ja kuivatusvesilaadut Sotkamo Silverin kaivannaisjätteiden läjitysalueilla sekä louhoksissa.

8.4.2024

Projektinnumero/Dokumentti ID: 101022809-001



Sisältö

1	Johdanto.....	5
1.1	Työn sisältö	5
1.2	Vedenlaadunarviointimenetelmien kuvaus.....	7
2	Rikastushiekka-altaat	8
2.1	Rikastushiekan ominaisuudet.....	8
2.2	Rikastushiekka-altaiden mallinnuksessa käytetyt kemialliset syötetiedot ...	9
2.2.1	Prosessiveden laatu.....	9
2.2.2	Kosteuskammiokokeen tulokset.....	10
2.3	Rikastushiekka-altaiden konseptualisointi.....	11
2.4	Rikastushiekka-altaiden vedenlaatu	12
2.5	Suotoveden määrä rikastushiekka-alueella.....	14
3	Pyriittiallas	15
3.1	Pyriittirikasteen ominaisuudet	15
3.2	Pyriittirikasteen määrä.....	16
3.3	Pyriittialtaan mallinnuksessa käytetyt kemialliset syötetiedot	16
3.3.1	Prosessivesi pyriittialtaalla	16
3.3.2	Pyriittinäytteen kosteuskammiokokeen tulokset.....	17
3.4	Pyriittialtaan konseptualisointi.....	21
3.5	Tuotannon lisäämisen vaikutus pyriittialtaaseen	24
3.6	Pyriittialtaan suotoveden laatu	25
3.6.1	Sulfidien hapettumisen etenemisen mallintaminen	25
3.6.2	Geokemiallinen malli.....	28
3.6.3	Pyriittialtaan suotoveden mitattu koostumus.....	30
4	Sivukivet.....	31
4.1	Sivukivien karakterisointi	31
4.2	Kosteuskammiokokeiden tulokset	32
4.3	Konseptualisointi	34
4.4	Sivukivialueen suotoveden laatu.....	34
4.5	Suotoveden määrä sivukivialueella	36
5	Avolouhos ja maanalainen louhos.....	37
5.1	Seinämien karakterisointi.....	37
5.2	Pohjaveden laatu	37
5.3	Konseptualisointi	38
5.4	Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvesien laadut.....	39



6	Herkkyydet ja epävarmuudet.....	44
6.1	Herkkyydet.....	44
6.2	Epävarmuudet.....	44
6.2.1	Rikastushiekka-altaan suotovesiin liittyvät epävarmuudet	44
6.2.2	Pyriittialtaan suotovesilaadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet	45
6.2.3	Sivukiven läjitysalueen suotovesilaadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet	47
6.2.4	Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvesien laadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet	47
7	Syötetiedot ja oletukset.....	48
7.1	Rikastushiekka-altaan syötetiedot ja oletukset.....	48
7.2	Pyriittialtaan syötetiedot ja oletukset.....	48
7.3	Sivukiven läjitysalueiden syötetiedot ja oletukset	49
7.4	Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen syötetiedot ja oletukset	50
7.5	Geokemiallinen tasapainomallinnus.....	51
8	Viitteet	52



TERMI	SELITE
ABA-testi	<i>acid base accounting test</i> - hapon ja emäksen tasapainon laskentamenetelmä, jossa hapontuottopotentiaali lasketaan kokonais- ja sulfidirikistä ja neutralointipotentiaali karbonaattihiilen pitoisuudesta
AP	Hapontuottopotentiaali, <i>Acid Potential</i>
C	Hiili, <i>Carbon</i>
C _{carb.}	Karbonaattisessa (CO ₃) muodossa oleva hiili
C _{non-carb.}	Muu kuin karbonaattinen hiili
dekanttivesi	allasmaisen kaivannaisjätealueen päältä tai vesialtaalta pumpattava poistovesi (suotovesimallinnuksessa)
konseptualisointi	käsitteellistäminen, vuorovaikutusten, reaktioiden tai virtausten kuvaaminen -ei-numeerisesti
Kosteuskammiokoe	<i>Humidity cell test</i> , eräs kineettinen koetyyppi, jolla selvitetään kaivannaisjätteen tai kiviaineksen pitkäaikaiskäyttäytymistä. Kokeessa näyte on peräkkäin kuvissa ja kosteissa olosuhteissa, syklien välillä näytekammio huuhdotaan tislattulla vedellä.
NAF	<i>non acid forming</i> - ei happoa tuottava
NP	Neutralointipotentiaali
NPR	Neutralointi- ja hapontuottopotentiaalisuhde, NPR=NP/AP
PAF	<i>potentially acid forming</i> - happoa tuottava
skaalauskerroin	kerroin, jonka avulla muunnetaan laboratorioanalyysien tuloksia vastaamaan kenttäolosuhteita (esimerkiksi raekoon tai lämpötilan korjauskerroin)
staattinen testaus	analyysi, joka voidaan tehdä suhteellisen nopeasti (esim. alkuaineanalyysi, ABA-koe, NAG-testi, ravistelutesti)
sulfidinen rikki (S _{sulf})	rikin osuus, joka esiintyy osana sulfidimineraaleja
suotovesi	kaivannaisjätteen läjitysalueelta poistuva/tihkuva ylimääräinen vesi, joka on ollut kontaktissa kaivannaisjätteen kanssa



1 Johdanto

1.1 Työn sisältö

Tämä raportti on AFRY Finland Oy:n laatima ja käsittelee Sotkamo Silver Oy:n kaivosalueen tuotannon aikaisten kaivannaisjätealueiden ja louhittujen tilojen vesijakeiden laatuja. Lisäksi raportissa kuvataan käytetyt arviointimenetelmät.

Vedenlaatuarviot toteutettiin osana rikastushiekka-altaan laajennuksen ympäristövaikutusten arviointiin liittyviä ympäristöselvityksiä. Vaikka YVA-menettelyssä tarkastellaan kahta eri sijoitusvaihtoehtoa uudelle rikastushiekka-altaalle, on tässä työssä tutkittu vain yhtä vaihtoehtoa, koska eri vaihtoehdot eivät merkittävästi poikkea toisistaan muuten kuin sijainnin osalta. Altaiden pinta-ala ja korkeus ovat likimain samoja eri vaihtoehdoissa, läjitettävän rikastushiekan määrä on molemmissa vaihtoehdoissa sama. Kaivannaisjätteen läjitysalueiden ja avolouhoksen sijainti on esitetty kuvassa 1-1. Osakohteiden vedenlaatuja arvioinnissa louhoksia ja kaivannaisjätealueita on tarkasteltu niiden laajimmassa mittakaavassa.



Kuva 1-1. Rikastushiekka-altaan (VE1 tai VE2) sekä avolouhoksen laajennuksen sijainti kaivosalueella sekä kaivoksen nykyiset kaivannaisjätealueet ja toiminnot.

1.2 Vedenlaadunarviointimenetelmien kuvaus

Osakohteiden vedenlaadun arvioinnin lähtökohtana käytettiin kunkin jätejakeen määrää, jätealueen dimensioita, paikallista vuotuista nettosadantaa sekä kosteuskammiokokeen tuloksia. Jotta laboratorio-olosuhteissa tehtyjen kokeiden tuloksia voitaisiin soveltaa kenttäolosuhteisiin, on laboratoriotulokset muunnettava kenttäolosuhteita vastaaviksi. Tärkeimpiä huomioonotettavia tekijöitä ovat mm. lämpötilan vaikutus reaktionopeuteen (MEND 2006), raekoko (Sanchidrian ja Singh 2012) sekä sivukiviläjäytyksissä myös veden kanavoituminen (MEND 1997). Louhosseinämien vaikutuksen arvioinnissa sovellettiin vaurioituneen seinämän periaatetta. Louhosseinämissälle oletetaan olevan tietyn paksuinen rakoillut ja hienoinesta sisältävä vyöhyke, joka huomioidaan arvioinnissa reaktiivisena massana. Rikastusjätteiden (rikastushiekka, pyriitti) osalta huomioitiin myös prosessiveden vaikutus muodostuvien vesijakeiden laatuun.

Osa rapautumistuotteista jää kaivosveteen ja osa saostuu sekundäärimineraaleina ja/tai pidättyy louhoksessa sorption kautta. Pidättyneitä aineita myös uudelleenliukenee. Muodostuvien vesijakeiden koostumusta arvioitiin geokemiallisen tasapainomallinnuksen avulla. Geokemiallisessa tasapainomallinnuksessa kuvataan tutkittavan liuoksen koostumusta aineiden tasapainovakioiden eli liukenemisen ja saostumisen sekä sorption avulla. Tasapainomallintamiseen käytettiin Geochemist's Workbench (GWB) -ohjelmaa.

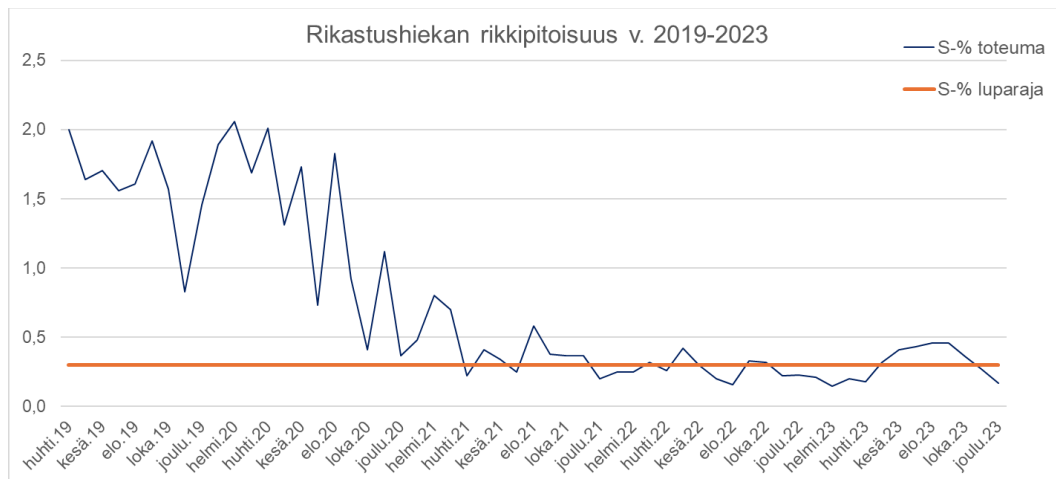
Louhinnassa käytetyistä räjähteistä kulkeutuu myös tyyppijäämiä kaivannaisjätteisiin, ja ne on otettu huomioon tyyppilisänä (Ramboll Finland Oy 2019; Sjölund 1997) niiltä osin kuin kosteuskammiokoeksissa käytettiin kairasydän- tai muita ei tavanomaisessa kaivostoiminnassa syntyneitä näytteitä.

2 Rikastushiekka-altaat

Sotkamo Silverin kaivoksen toiminnassa muodostuu kahdenlaista rikastusjäännöstä: rikastushiekkaa sekä pyriittirikastetta. Pyriittirikaste on myös kaupallinen tuote. Rikastushiekan rikkipitoisuus saadaan pidettyä matalana pyriitin rikastuksen avulla. Tässä kappaleessa on esitetty rikastushiekka-altaiden suotoveden laatu. Pyriittirikasteen ominaisuudet ja pyriittialtaan suotoveden laatu on esitetty kappaleessa 3.

2.1 Rikastushiekan ominaisuudet

Rikastushiekka-altaan laajennuksen alueelle läjitettävän rikastushiekan oletetaan vastaavan ominaisuuksiltaan nykyisessä toiminnassa muodostuvaa rikastushiekkaa. Rikastushiekan ominaisuuksia on tutkittu v. 2019–2023. Vuosina 2019–2020 rikastusprosessissa syntyneen rikastushiekan rikkipitoisuus oli vielä huomattavasti nykyistä korkeampi. Rikastushiekan rikkipitoisuus v. 2019–2023 on esitetty kuvassa 2-1.



Kuva 2-1. Rikastushiekan rikkipitoisuus v. 2019–2023.

Rikastushiekasta v. 2020–2023 määritetyt keskimääräiset kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet on esitetty taulukossa 2-1. Sinkin pitoisuus on ylittänyt PIMA-asetuksen (VNa 214/2007) mukaisen ylemmän ohjearvon vuosina 2022 ja 2023. Arseenin, lyijyn ja antimonin pitoisuudet ylittävät alemman ohjearvon, minkä lisäksi kadmiumin pitoisuudet ylittävät kynnysarvon.

Taulukko 2-1. Vuosien 2020–2023 rikastushiekanäytteiden kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet. Vuoden 2020–2023 näytteistä on esitetty keskiarvo (n = näytemäärä).

	Metallit										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Määrittäysraja	1	0,01	0,1	1	0,5	0,01	1	0,2	0,05	1	1
Taustapitoisuus	0	0	4,7	20	13	0	13	0	0	19	17
Kynnysarvo	5	1	20	100	100	0,5	50	60	2	100	200
Alempi ohjearvo	50	10	100	200	150	2	100	200	10	150	250
Ylempi ohjearvo	100	20	250	300	200	5	150	750	50	250	400
2020 (n=2)	110	2,4	2,1	15	41	0,06	4,5	460	20	2	680
2021 (n=2)	75	1,1	0,3	4	19	<0,05	3	250	13	1	380
2022 (n=3)	60	2,1	0,7	4,5	21	<0,05	3	290	13	1,7	560
2023 (n=4)	67	1,7	0,8	6,8	19	0,04	3	313	13	1,1	440



	Metallit										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Määrittäysraja	1	0,01	0,1	1	0,5	0,01	1	0,2	0,05	1	1
RH_1_2023	33	3	0,56	6,4	20	0,021	3,2	510	17	1,5	630
RH_4_2023	92	1,9	0,64	6	15	0,015	2,4	250	11	0,9	450
RH_7_2023	61	1,1	1,2	8,8	19	0,1	3,6	290	11	1,2	440
RH_10_2023	80	0,99	0,71	6,8	22	0,01	2,6	200	13	0,71	240

Rikastushiekan ABA-testin tulokset on esitetty taulukossa 2-2. Rikastushiekka ei tulosten perusteella ole happoa muodostavaa. Lisäksi sulfidisen rikin pitoisuus sekä NPR täyttävät kaivannaisjäteasetuksessa (VNa 190/2013) liitteen 1 kohdassa 2b) esitetyt pysyvän jätteen kriteerit ($0,1 \% < S(\text{sulf.}) < 1 \%$ ja samanaikaisesti $\text{NPR} > 3$).

Taulukko 2-2. Rikastushiekan ABA-testin keskimääräiset tulokset. Vuoden 2021-2023 tuloksista on esitetty keskiarvo ($n = \text{näytemäärä}$). Vuoden 2023 tulokset on huomioitu toukokuuhun asti.

Rikastushiekka	S _{kok}	S _{sulf}	S _{sulf} /S _{kok}	AP	NP	NPR
Määrittäysraja	0,005	0,01			0,5	
Vuosi/kk	%	%	%	kg CaCO ₃ / tn	kg CaCO ₃ /tn	
v. 2021 (n=6)	0,37	0,31	0,81	9,6	57	6,8
v. 2022 (n=12)	0,25	0,21	0,80	6,5	47	8,9
v. 2023 (n=5)	0,28	0,21	0,65	9,0	51	7,5
Maksimi	0,65	0,61	1,09	19	68	22
Minimi	0,15	0,07	0,47	2,2	40	2,7

2.2 Rikastushiekka-altaiden mallinnuksessa käytetyt kemialliset syötetiedot

Rikastushiekka-altaan vesijakeiden koostumukseen vaikuttaa rikastushiekan rapautumistuotteiden lisäksi rikastushiekan mukana tulevan prosessiveden koostumus. Rikastushiekka-altaan vesi koostuu mallinnuksessa siis kahdesta osatekijästä: rikastushiekan rapautumistuotteista (kosteuskammiookeen tulokset) ja rikastusprosessissa veteen vapautuvista aineista (rikastuksen prosessivesi).

2.2.1 Prosessiveden laatu

Prosessiveden koostumus on esitetty taulukossa 2-3. Koostumus on keskiarvo selkeytysaltaalta S2 mitatuista pitoisuuksista ajalta, jolloin rikastushiekan rikkipitoisuus on ollut luparajan tasolla ($S = 0,3 \%$).

Prosessivesi käsittää n. 93 % rikastushiekka-altaalle tulevasta vedestä, eli prosessiveden ja sadeveden kokonaismäärästä.

Taulukko 2-3. Prosessiveden koostumus Tulokset ovat selkeytysaltaalta S2 mitattujen pitoisuuksien keskiarvoja (kk välein mitattuna 1.2022–9.2023).

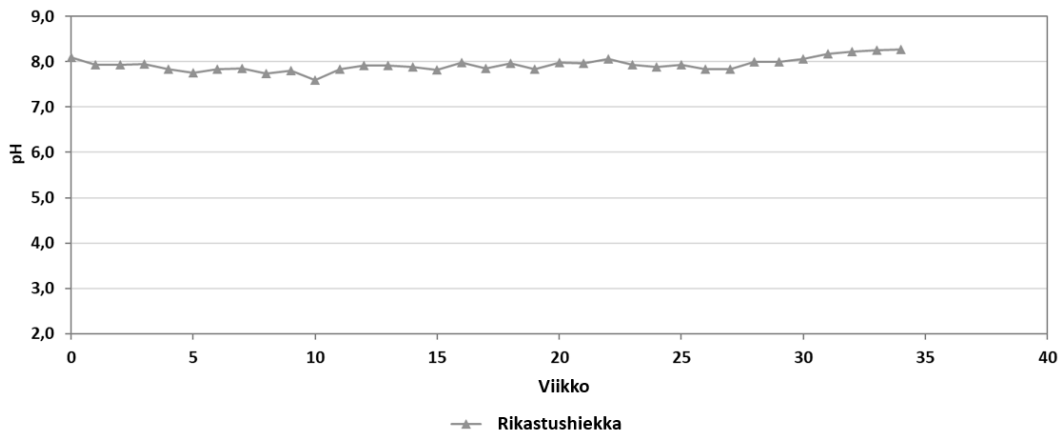
Suure	Yksikkö	Pitoisuus	Suure	Yksikkö	Pitoisuus
pH		9,2	Mg	mg/l	5,2
Ag	µg/l	1	Mn	µg/l	520
Al	µg/l	290	Na	mg/l	50
As	µg/l	28	Ni	µg/l	7,8
Ca	mg/l	310	P	µg/l	610
Cd	µg/l	0,74	Pb	µg/l	8



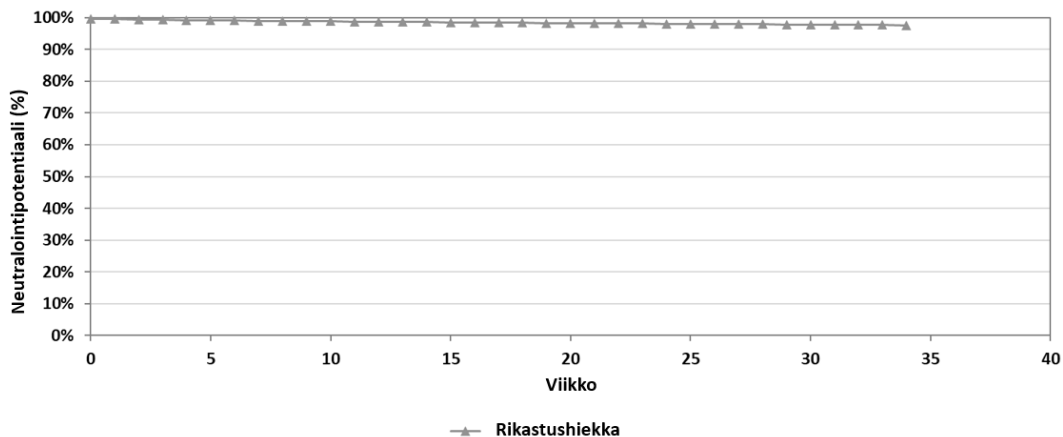
Suure	Yksikkö	Pitoisuus	Suure	Yksikkö	Pitoisuus
Cl	mg/l	69	Sb	µg/l	220
Co	µg/l	4,6	Th	µg/l	0,54
Cr	µg/l	0,5	U	µg/l	0,74
Cu	µg/l	3	Zn	µg/l	320
Fe	µg/l	290	SO ₄	mg/l	730
Hg	µg/l	0,08	NO ₃ +NO ₂ (N)	mg/l	30
K	mg/l	110	NH ₄ (N)	mg/l	13

2.2.2 Kosteuskammiokokeen tulokset

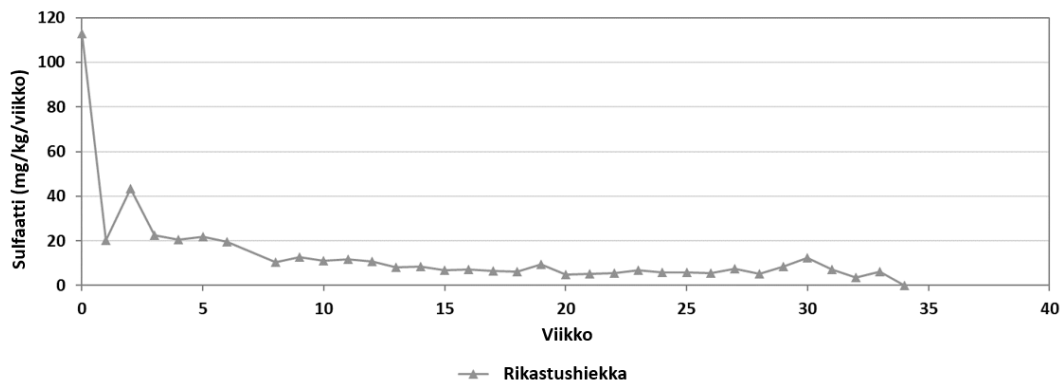
Kosteuskammiokokeet on aloitettu maaliskuussa 2023 ja tuloksia oli mallinnuksen aikaan saatavilla 34 viikon ajalta kemiallisten parametrien ja anionien osalta ja 28 viikon ajalta hivenaineiden osalta. Toiminnanaikaisen rikastushiekka-altaan vedenlaadun mallinnuksessa käytettiin viikkojen 0–28 tuloksia. Kosteuskammiokokeissa rikastushiekkanäytteen viikkoliuoksen pH on pysynyt neutraalina (pH 7,6–8,1) kokeen ensimmäisen 34 viikon ajan (Kuva 2-2) ja neutralointipotentiaalia on 34 viikon kohdalla jäljellä 98 % (Kuva 2-3). Myös sulfaatin muodostus on ollut ensimmäisten viikkojen hapettumiskiikin jälkeen vähäistä (Kuva 2-4). Alkuvaiheen huuhtoutumiskiikki on tyypillistä kosteuskammiokokeille, ja se aiheutuu pikemminkin näytteenvalmistuksesta ja -käsittelystä kuin nopeasta kemiallisesta reaktiosta.



Kuva 2-2. pH:n kehittyminen rikastushiekkanäytteen viikkoliuoksessa (Geochemic Ltd 2023).



Kuva 2-3. Jäljellä oleva neutralointipotentiaali rikastushiekkanäytteen viikkoliuoksessa (Geochemic Ltd 2023).



Kuva 2-4. Sulfaatin muodostus rikastushiekan kosteuskammiokeissa (Geochemic Ltd 2023).

2.3 Rikastushiekka-altaiden konseptualisointi

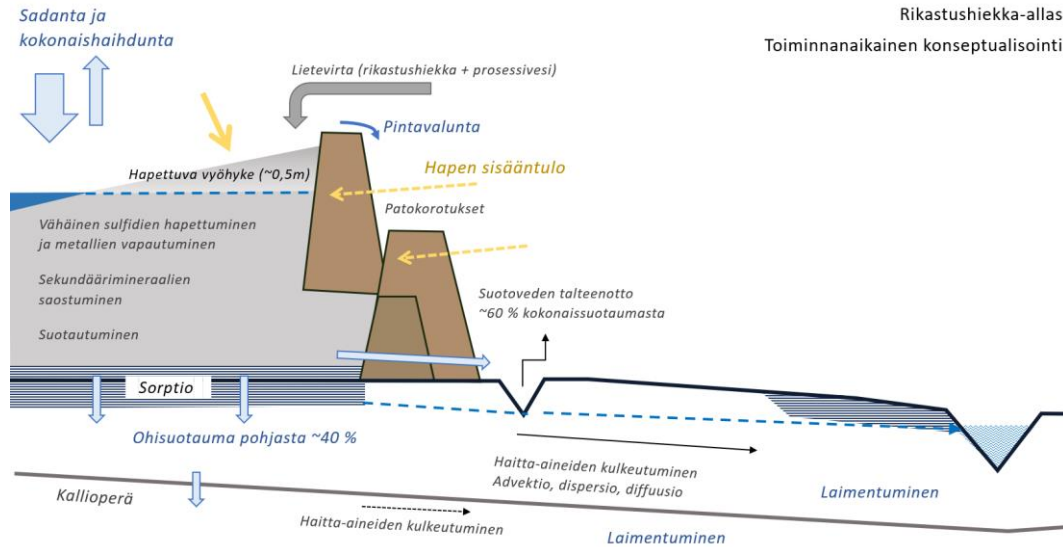
Rikastushiekka-altaan vedenlaatu mallinnettiin nykyiselle rikastushiekka-altaalle ja rikastushiekka-altaan laajennukselle. Rikastushiekka-altaan laajennukselle on YVA-menettelyssä tarkasteltu kahta vaihtoehtoista sijaintia, jotka on esitetty kuvassa 1-1. Mallinnus toteutettiin vaihtoehdolle VE1 eli laajennuksen sijoituessa Hanhipetäikön pohjoispuolelle. Hankevaihtoehdon VE2 mukaista tilannetta, jossa rikastushiekka-allas sijoittuu Hanhipetäikön eteläpuolelle, ei ole mallinnettu erikseen, koska vedenlaatuun keskeisesti vaikuttavat tekijät eivät eroa merkittävästi toisistaan. Hankevaihtoehdon VE2 vedenlaatuun liittyviä epävarmuuksia on avattu kappaleessa 6.2.1.

Mallinnetussa skenaariossa rikastushiekka-altaat ovat lopullisessa lakikorkeudessaan (+234 m mpy). Rikastushiekassa on vain vähän sulfidimineraaleja, mutta jonkun verran sulfidien hapettumista tapahtuu pääasiassa rikastushiekka-altaan vedellä kyllästymättömissä osissa altaan pintakerroksissa. Reaktiivisen massan määritelmä on erilainen eri yhdisteille. Sulfidisidonnaisille aineille pintaosan hapettumiselle altis kerros on reaktiivinen massa, ja muille aineille pintaosan hapettumiselle altis kerros ja sen alapuolinen vuorovaikutuskerros yhdessä muodostavat reaktiivisen massan.

Dekanttivesi poistetaan aktiivisesti rikastushiekka-altaanvapaan vesipinnan keskeltä. Rikashiekka-altaan dekanttiveden ja huokosveden laatu perustuu prosessiveden jäänteisiin, sadeveteen ja rikastushiekan rapautumistuotteisiin. Mallinnus on tehty huokosvedelle (suotovesi) ja rikastushiekka-altaasta poistettavalle dekanttivedelle erikseen.

Vaikka altaan eri osissa vedenlaatuun muodostunee todellisuudessa jonkin verran eroja, kaikki suotovedet on käsitelty mallissa yhtenä suotovedenlaatuna. Vedenkyllästämättömässä, aktiivisessa pintakerroksessa sulfidimineraalit voivat hapettua, ja hapettumistuotteita sekä muita rapautumistuotteita liukenee rikastushiekka-altaan pinnalla olevaan vapaaseen veteen sekä rikastushiekan huokosveteen. Altaan eri osissa veteen liuenneista ja liukenevista aineista saostuu sekundäärimineraaleja, ja liuenneita aineita myös pidättyy altaalle sorption kautta. Rikastushiekkaan pidättyneitä aineita myös liukenee uudelleen.

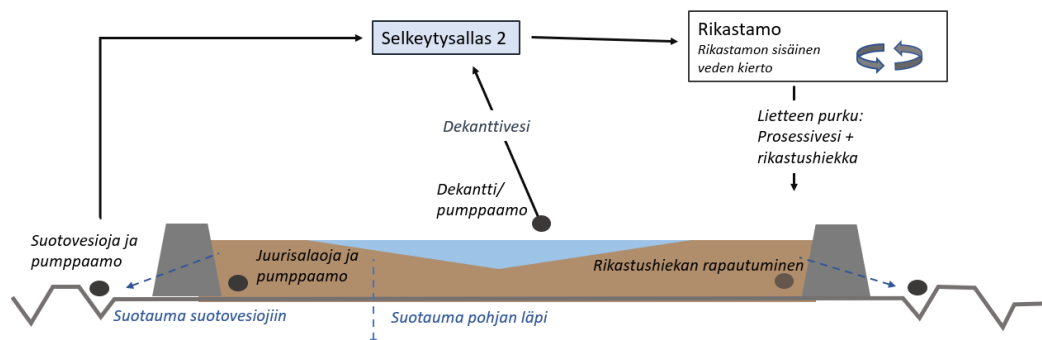
Toiminnanaikaisen tilanteen konseptualisointi on esitetty kuvassa 2-5. Konseptualisointi kuvaa sekä nykyistä rikastushiekka-allasta, että rikastushiekka-altaan laajennusta. Mallinnukseen keskeisesti vaikuttavat tekijät ovat periaatteeltaan samoja molemmilla rikastushiekka-altailla, ainoastaan sijainti ja altaiden dimensiot ovat erilaisia.



Kuva 2-5. Rikastushiekka-altaiden vesien ja päästöjen toiminnanaikainen konseptualisointi.

Rikastushiekka-altaiden vedenlaatu arvioitiin vesi/kiintoaine -suhteen skaalauksen sekä geokemiallisen tasapainomallinnuksen avulla toiminnanaikaiselle suotovedelle ja altaan pinnalta pumpattavalle dekanttivedelle. Suoto- ja dekanttivesilaadun mallinnuksen konseptualisointi on esitetty kuvassa 2-6. Mallinnuksessa käytetyt lähtötiedot on esitetty kappaleessa 7.1.

Rikastushiekka-allas
 Toiminnanaikainen konseptualisointi



Kuva 2-6. Rikastushiekka-altaiden suoto- ja dekanttivesilaadun mallinnuksen konseptualisointi.

2.4 Rikastushiekka-altaiden vedenlaatu

Tasapainomallinnuksen tulokset on esitetty taulukossa 2-4. Mallinnettu dekanttivesi muistuttaa laadultaan nykyisen rikastushiekka-altaan dekanttiveden tarkkailutuloksia. Mallinnettu sulfaattipitoisuus on nykyisen rikastushiekka-altaan korotuksen (+234 m mpy) jälkeisellä dekanttivedessä 770 mg/l ja rikastushiekka-altaan laajennuksen dekanttivedessä 775 mg/l. Tarkkailutulosten perusteella nykyisen rikastushiekka-altaan dekanttiveden sulfaattipitoisuus on ollut keskimäärin 820 mg/l vuonna 2023.

Nykyisen rikastushiekka-altaan juurisalaojen 1 ja 5 veden laatu vuonna 2023 on esitetty taulukossa 2-5. Juurisalaojen keskimääräinen sulfaattipitoisuus on ollut 930 mg/l (juurisalaoja 1) ja 980 mg/l (juurisalaoja 2), kun tasapainomallinnettu toiminnanaikainen sulfaattipitoisuus on 960–1200 mg/l.

Toiminnanaikana rikastushiekka-altaan juurisalaojista ja suotovesiojista pumpataan suotovettä takaisin rikastamon vesikiertoon. Suotovesien tehokas talteenotto pienentää altaasta suotautuvan veden ympäristövaikutusta.



Taulukko 2-4. Rikastushiekka-altaan geokemiallisen tasapainomallinnuksen tulokset. Suuruusluokan hahmottamisen tueksi vertailuarvoina esitetään pohjaveden ympäristölaatunormin (341/2009) ja talousvesiasetuksen (STM 1352/2015) raja-arvoja, vaikka pitoisuus rikastushiekka-altaalla tai altaan suotovedessä ei ole pitoisuus pohjavedessä tai juomavedessä.

		Nykyinen rikastushiekka-allas		Rikastushiekka-altaan laajennus		Vertailuarvoja	
		Suotovesi	Dekanttivesi	Suotovesi	Dekanttivesi	STM 1352/2015	PV YLN 341/2009
pH		8,8	8,3	8,9	8,3	6,5–9,5	
Ag	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001		
Al	mg/l	1	0,4	1,8	0,3	0,2	
As	mg/l	0,09	0,03	0,2	0,03	0,01	0,005
B	mg/l	0,03	0,003	0,06	0,003	1	
Ba	mg/l	0,03	0,003	0,06	0,003		
Be	mg/l	0,0003	0,00003	0,0005	0,00003		
Ca	mg/l	410	310	540	310		
Cd	mg/l	0,002	0,0008	0,002	0,0008	0,005	0,0004
Cl	mg/l	67	65	72	66	250	25
Co	mg/l	0,005	0,004	0,005	0,004		0,002
Cr	mg/l	0,0006	0	0,002	0	0,05	0,01
Cu	mg/l	0,0002	0,00009	0,0007	0,00009	2	0,02
F	mg/l	0,7	0,07	1,4	0,07	1,5	
Fe	mg/l	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	
Alk. as HCO ₃ ⁻	mg/l	1160	947	1430	955		
Hg	mg/l	0	0	0	0		
K	mg/l	160	110	230	110		
Li	mg/l	0,005	0,0005	0,01	0,0005		
Mg	mg/l	19	6,4	34	6,3		
Mn	mg/l	1	0,5	1,5	0,5	0,05	
Mo	mg/l	0,007	0,0008	0,01	0,0007		
Na	mg/l	50	47	55	47	200	
Ni	mg/l	0,009	0,007	0,01	0,007	0,02	0,01
P	mg/l	0,9	0,6	1,2	0,6		
Pb	mg/l	0,003	0,0005	0,007	0,0005	0,01	0,005
Rb	mg/l	0,06	0,007	0,1	0,006		
Sb	mg/l	0,9	0,3	1,7	0,3	0,005	0,0025
Se	mg/l	0,03	0,003	0,06	0,003	0,01	
Si	mg/l	15	1,6	31	1,5		
Sn	mg/l	0,0008	0,00008	0,002	0,00007		
Sr	mg/l	0,2	0,02	0,3	0,02		
Th	mg/l	0,0008	0,0005	0,001	0,0005		
Ti	mg/l	0,0008	0,00008	0,002	0,00008		
U	mg/l	0,009	0,002	0,02	0,002	0,03	
V	mg/l	0,001	0,0001	0,003	0,0001		
W	mg/l	0,004	0,0005	0,009	0,0004		
Zn	mg/l	0,3	0,3	0,4	0,3		0,06
SO ₄	mg/l	960	770	1200	780	250	150
NO ₃ -N	mg/l	29	28	30	29	50	50
NH ₄ -N	mg/l	12	12	12	12	0,5	0,2



Taulukko 2-5. Nykyisen rikastushiekka-altaan juurisalaojen 1 ja 5 vedenlaatu v. 2023.

		Juurisalaoja 1	Juurisalaoja 5
pH		8,5–9,1	6,5–8,4
Kiintoaine	mg/l	3,2	6,0
Kokonaistyyppi	mg/l	26	18
Sulfaatti	mg/l	930	980
Al	mg/l	0,055	3,1
As	mg/l	0,023	0,071
Cd	mg/l	0,0021	0,030
Cu	mg/l	0,020	0,100
Fe	mg/l	0,032	2,9
Mn	mg/l	0,12	20
Pb	mg/l	0,020	0,047
Sb	mg/l	0,095	0,084
Zn	mg/l	0,014	5,8

2.5 Suotoveden määrä rikastushiekka-alueella

Rikastushiekkapatjan korkeuden kasvu lisää altaan pohjasta ja reunoilta suotautuvan veden määrää. Mallinnuksessa reaktiivisen massan pinta-ala on oletettu altaan alkuvaiheen pinta-alaksi, vaikka se todellisuudessa pienenee kaivoksen toiminnan edetessä: patokorotukset rakennetaan ”ylävirtaan”, mikä pienentää rikastushiekka-altaan yläosan pinta-alaa ja vähentää rikastushiekka-altaan vapaalle pinnalle tulevan sadannan määrää. Samalla suurempi osa koko alueen sadannasta osuu patojen alueelle ja ohjautuu niistä suotovesiojiin.

Rikastushiekka-altaiden suotovesiojista pystytään tyypillisesti ottamaan talteen pääsääntöisesti patoalueilta ja niiden läheisyydestä suotautuvat vedet. Tarvittaessa läjitysalueen keskiosiin on myös mahdollista rakentaa ojitukset, jotta myös keskiosista suotautuvat vedet on mahdollista ottaa kiinni. Suotovesimäärinä mallinnuksessa on käytetty rikastushiekka-altaan läjitysmallin mukaisia suotaumia. Nykyisen rikastushiekka-altaan ollessa lakikorkeudessaan (+ 234 m mpy) padoista suotautuu n. 160 m³/d ja pohjan kautta n. 177 m³/vrk. Rikastushiekka-altaan laajennuksen ollessa lakikorkeudessaan (+234 m mpy) padoista suotautuu n. 95 m³/vrk ja pohjan kautta n. 147 m³/vrk. Kokonaissuotaumasta noin 60 % on arvioitu olevan talteenotettavissa suotovesiojilla. Pohjan läpi maaperään suotautuva ns. karkaava suotovesimäärä on nykyisellä rikastushiekka-altaalla noin 97 m³/vrk ja rikastushiekka-altaan laajennuksen alueella noin 134 m³/vrk.



3 Pyriittiallas

Pyriittirikaste välivarastoidaan rikastuksen jälkeen, jonka jälkeen se toimitetaan jatkojalostusta varten kaivoksen ulkopuoliselle sulatolle tai loppusijoitetaan pyriittirikasteelle varattuun altaaseen.

3.1 Pyriittirikasteen ominaisuudet

Pyriitin mineralogia

Pyriitin päämineraalit ovat nimensä mukaisesti pyriitti sekä vähäisemmin kvartsi ja pyrrotiitti eli magneettikiisu (Taulukko 3-1).

Taulukko 3-1. Pyriittirikasteen mineraloginen koostumus.

Mineraali	Kemiallinen kaava	2020 Pyriittirikaste	2022 Pyriittirikaste
		(m-%)	(m-%)
Kvartsi	SiO ₂	10	7,9
Muskoviitti	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	4,5	2,7
Ankeriitti	CaFe(CO ₃) ₂	4	
Pyriitti	FeS ₂	72	82
Kalkopyriitti	CuFeS ₂	0,9	
Pyrrotiitti	Fe _(1-x) S	5,5	7,3
Arsenopyriitti	FeAsS	2,4	
Molybdeniitti	MoS ₂	0,6	
Yhteensä		100	100

Pyriitin geokemiallinen koostumus

Pyriittirikasteen v. 2020–2023 määritetyt kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet on esitetty taulukossa 3-2. Useat metallit ja metalloidit ylittävät PIMA-asetuksen (214/2007) kynnysarvon, minkä vuoksi pyriittirikaste luokitellaan ei-pysyväksi kaivannaisjätteeksi. Useat metallit ylittävät myös PIMA-asetuksen ylemmän ohjearvon. Vuoden 2023 näytteessä metalli- ja metalloidipitoisuudet ovat hieman laskeneet aiemmilta vuosilta, mutta luokitus on pysynyt samana.

Taulukko 3-2. Vuoden 2020–2022 pyriittirikastenäytteiden kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet sekä PIMA-asetuksen (VNa 214/2007) mukaiset kynnys- ja ohjearvot

Vuosi/näytteiden määrä	Metallit										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
Yksikkö	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Määrittäysraja	1	0,01	0,1	1	0,5	0,01	1	0,2	0,05	1	1
Taustapitoisuus	0	0	4,7	20	13	0	13	0	0	19	17
Kynnysarvo	5	1	20	100	100	0,5	50	60	2	100	200
Alempi ohjearvo	50	10	100	200	150	2	100	200	10	150	250
Ylempi ohjearvo	100	20	250	300	200	5	150	750	50	250	400
2020 (n=2)	6100	39	63	26	220	0,41	75	1600	140	24	7500
2021 (n=2)	5900	46	81	30	310	0,33	110	2600	200	1	8800
2022 (n=3)	5700	84	69	24	250	0,43	98	2200	230	1	16000
2023 (n=1)	650	34	32	41	160	0,36	66	960	75	0,65	7400



Pyriitin haponmuodostus- ja liukoisuusominaisuudet

ABA-testin ja NAG-testin loppuliuksen pH:n perusteella pyriitti on mahdollisesti happoa muodostavaa. Pyriittirikasteen rikkipitoisuus on tarkoituksellisesti korkea eikä sillä ole neutralointipotentiaalia (Taulukko 3-3).

Taulukko 3-3. Pyriittirikasteiden 2020–2023 vuoden ABA-testien tulosten keskiarvot, minimi ja maksimit. Näytteitä yhteensä 18 kpl.

Pyriittirikaste	S kok	S sulfidi	sulfidi S/ kok S	AP	NP	NPR
Määrittäysraja	0,005	0,01			0,5	
Vuosi/kk	%	%		kg CaCO ₃ / tn	kg CaCO ₃ /tn	
Maksimi	50	51	1,1	2000	25	0,02
Minimi	39	39	0,89	1200	-6,5	0
2020, yksittäinen näyte	45	45	1	1400	23	0,02
2021, keskiarvo, n=6	47	45	0,96	1400	19	0,02
2022 keskiarvo, n=10	45	45	1	1500	8,7	0,01
2023, yksittäinen näyte	45	45	1	1400	1,9	<0,1

3.2 Pyriittirikasteen määrä

Pyriittirikastetta muodostuu vuodessa n. 15 000 t/v nykytilassa ja n. 25 000 t/v tuotannon mahdollisen laajennuksen jälkeen. Kuva 3-1 esittää pyriittirikasteen määrän vuosina 2021–2023. Vuonna 2023 rikastetta myytiin aikaisempia vuosia enemmän, joten myös läjitetty määrä oli pienempi.



Kuva 3-1. Pyriittirikasteen kokonaistuotantomäärä vuosina 2021–2023, sekä myyntiin ja läjitykseen menneet osuudet.

3.3 Pyriittialtaan mallinnuksessa käytetyt kemialliset syötetiedot

3.3.1 Prosessivesi pyriittialtaalla

Pyriittialtaalle tulevan prosessiveden koostumus on sama kuin rikastushiekka-altaalle tulevan. Prosessiveden laatu on esitetty kappaleessa 2.2.1. Pyriittirikasteen kosteus on mittausten mukaan ~15 %. Kosteutta käytetään altaaseen kertyvän vesimäärän laskennassa.

3.3.2 Pyriittinäytteen kosteuskammiokokeen tulokset

Kosteuskammiokokeet on aloitettu maaliskuussa 2023 ja tuloksia oli mallinnuksen aikaan saatavilla 34 viikon ajalta kemiallisten parametrien ja anionien osalta ja 28 viikon ajalta hivenaineiden osalta. Toiminnanaikaisen pyriittialtaan vedenlaadun mallinnuksessa käytettiin viikkojen 0–28 tuloksia.

Pyriittinäytteen pH laski jo kosteuskammiokokeen alkuvaiheessa selvästi happamaksi (<4) ja on viikon 13 jälkeen pysytellyt alle pH 3. Kosteuskammiokokeen tuloksia esitetään kuvissa 3-2...3-5.

Kuvassa 3-1 nähdään raudan ja sulfaattiin sitoutuneen rikin vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa. Viikolla 9 raudan vapautuminen lisääntyy selkeästi. Noin viikoilla 20–24 Fe/S suhde on lähellä puhtaan pyriitin (FeS₂) hapettumista. Raudan määrällä 800 mg/kg/viikko rikkiä vapautuisi pyriitistä noin 920 mg/kg/vko. Muut kuin rautasulfidit ja toisaalta magneettikiisu (FeS) siirtävät suhdetta pois päin tästä.

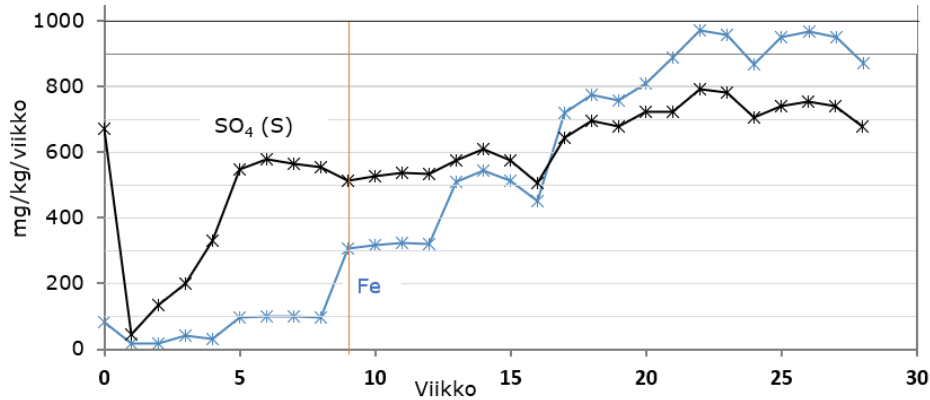
Sinkkivälke lienee muista kuin rautasulfideista tärkein sulfidimineraali pyriittirikasteessa. Kuvassa 3-3 esitetään sinkin vapautuminen näytteestä. Viikoilla 21–24 sinkin vapautuminen näytteestä on noin 200 mg/kg/vko, joka on selkeästi vähemmän kuin huipun aikoihin (700 mg/kg/vko). Sinkkivälkkeen hapettuminen aikaisin selittää osaltaan alun alhaista Fe/S suhdetta, jolloin pyriitin hapettuminen ei vielä ole täysin käynnistynyt. Kadmium seuraa sinkin käyrää ja on yleinen hivenaine sinkkivälkkeessä, joten kadmiumin voidaan tulkita olevan pääsääntöisesti sitoutuneena tässä mineraalissa.

Lyijyä on näytteessä suhteellisen paljon (~0,2 %), mutta sitä irtoaa näytteestä melko vähän (Kuva 3-3; aina <1 mg/kg/vko). Lyijyllä on (sinkin tavoin) alun nopean hapettumisen jälkeen laskeva käyrä.

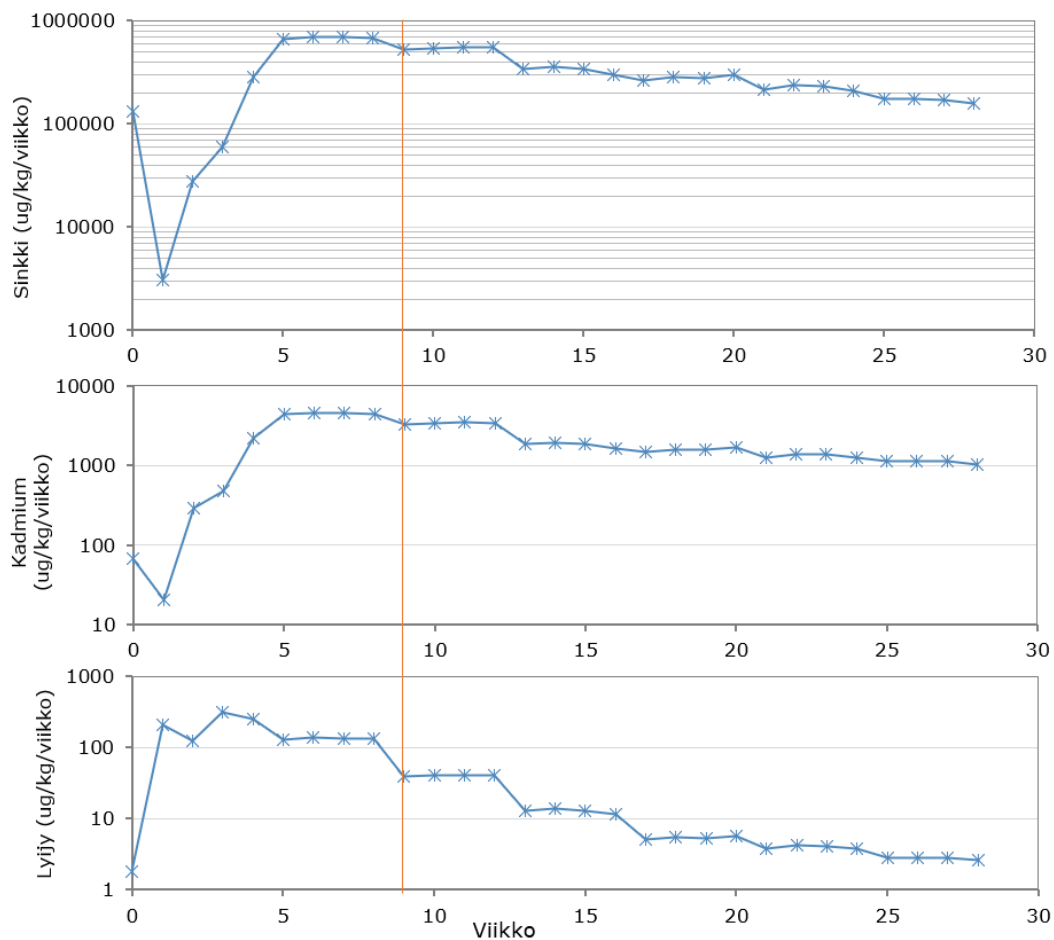
Kuvassa 3-4 esitetään nikkelin ja koboltin liukeneminen pyriittirikasteesta. Nämä alkunaineet seuraavat samaa trendiä eli ovat luultavimmin sitoutuneena samaan mineraaliin, luultavasti pentlandiittiin, jossa on tyypillisesti kobolttia mineraalihilassa. Nikkelin ja koboltin kokonaispitoisuudet näytteessä ovat pieniä (<100 ppm), mutta niiden vapautumisnopeudet näytteestä ovat suuremmat kuin lyijyllä. Raudan vapautumisen lisääntyessä viikolla 9, näidenkin alkuaineiden vapautuminen vähenee.

Kuvassa 3-5 esitetään arseenin ja kuparin vapautuminen pyriittirikasteesta. Kuparia on näytteessä suhteellisen vähän (230 ppm), mutta sillä on suhteellisen suuri vapautumisnopeus (maksimissaan noin 6,5 mg/kg/vko). On oletettavaa, että kupari on sitoutuneena kuparikiisuun, jonka hapettumishuippu nähdään tuloksissa.

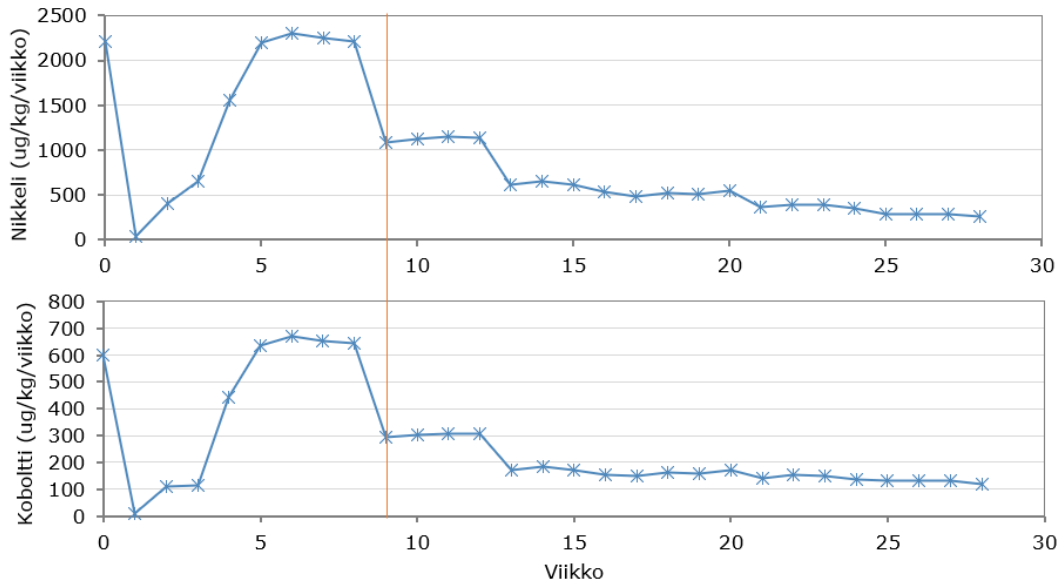
Arseenia on näytteessä paljon (~0,57 %), mutta sen vapautumisnopeus pyriittirikasteesta on alhainen (maksimi noin 1,6 mg/kg/vko). Arseenin käyttäytyminen poikkeaa selkeästi muiden tärkeimpien ei-rautametallien käyttäytymisestä. Sen vapautuminen käynnistyy kunnolla vasta viikon 20 jälkeen. Arseni on hyvin yleinen hivenaine pyriitissä. Onkin oletettavaa, että arseenin vapautuminen seurailee jokseenkin pyriittiä. Käytöksen voisi tulkita tarkoittavan, että magneettikiisun hapettumisen merkitys suhteessa pyriitin hapettumiseen vähenee selkeästi viikon 20–25 aikoihin, kun taas pyriitin hapettuminen on vasta kunnolla alkamassa siinä vaiheessa.



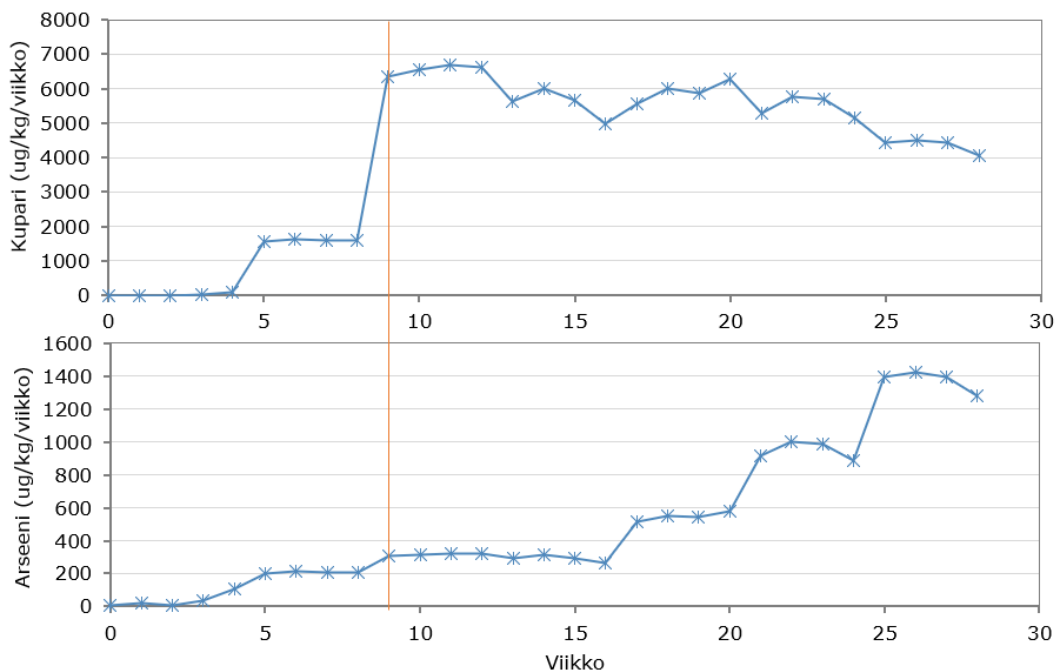
Kuva 3-2. Sulfaatin ja raudan vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa (mg/kg/viikko). Viikolla 9 raudan vapautuminen lisääntyy ja viikoilla 13-16 suhde on hyvin lähellä teoreettista vain pyriitin hapettumisesta muodostuvan liuoksen Fe/S suhdetta.



Kuva 3-3. Sinkin, kadmiumin ja lyijyn vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa (mg/kg/viikko). Viikolla 9 raudan vapautuminen lisääntyy selkeästi, mikä nähdään muiden aineiden määrän laskemisena. Huomaa logaritmiset asteikot.



Kuva 3-4. Nikkelin ja koboltin vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa (mg/kg/viikko). Viikolla 9 raudan vapautuminen lisääntyy selkeästi, mikä nähdään muiden aineiden määrän laskemisena.



Kuva 3-5. Kuparin ja arseenin vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa (mg/kg/viikko). Kuparia vapautuu hyvin paljon suhteessa sen kokonaismäärään näytteessä (jopa ~3 %/viikko), arseenia taas todella vähän (viikolla 26 <0,03 %/viikko). Arseenin voidaan tulkita indikoivan pyriitin hapettumisen käynnistymistä.

Taulukossa 3-4 esitetään pyriittialtaan toiminnanaikaisen suotoveden laadun mallinnuksessa käytetty kosteuskammiosyöte (HCT-viikkojen 0–28 tulosten keskiarvot). Koska näytteen koostumus on poikkeuksellinen, laboratoriossa on tulosten perusteella jouduttu käyttämään epätavallisen suuria laimennoksia, ja siten raportoidut määräysrajat ovat epätavallisen korkeita. Yleisen käytännön mukaan alle määräysrajan pitoisuudelle annetaan luvuksi määräysrajan puolikas. Kuitenkin tämä johtaisi epärealistisen korkeisiin arvoihin pyriittirikasteen osalta. Siksi tehtiin vertailu kokonaispitoisuuksien avulla rikastushiekkanäytteen (GCL0201-009) ja pyriittirikasteen



välillä. Siten tuotettiin realistisempia, mutta konservatiivisia pitoisuuksia seuraavalla metodilla.

1. Onko suureella useita alle määritysrajan olevia tuloksia, ja määritysraja on normaalia selkeästi korkeampi? Mikäli kyllä, suure menee jatkoon.

2. Onko kokonaispitoisuus pyriittirikasteessa korkeampi kuin rikastushiekassa? Mikäli kyllä ja määritysrajan ylittäviä tuloksia on joitakin, oletetaan, että arvo on luultavasti pitoisuuksia liioitteleva, mutta tulosta ei käsitellä poikkeavasti. Näitä alkuaineita ovat: Ag, Be, Cr, Mo, Sb, Si ja Th.

2. Kokonaispitoisuutta ei ole mitattu, mutta ei ole syytä olettaa, että pyriittirikaste sisältäisi tätä ainetta huomattavan korkeita pitoisuuksia. Näille aineille määritetään alle määritysrajan oleville pitoisuuksille pitoisuudeksi "normaali" määritysraja. Ei käytetä määritysrajan puolikasta, mutta ei myöskään huomattavan suuria määritysrajoja. Näitä aineita ovat Cl, F, Hg ja Li, taulukossa 3-4 ne on merkitty tähdellä (*).

3. Kokonaispitoisuus pyriittirikasteessa on matalampi kuin rikastushiekassa eli ei ole syytä olettaa selkeästi korkeampia pitoisuuksia kosteuskammiokeeseen viikkoliuoksissa. Näissä tapauksissa alle määritysrajan oleville tuloksina käytettiin rikastushiekanäytteen tuloksia. Näitä aineita ovat K, Na, P, Sn, Ti, V ja W, taulukossa 3-4 ne on merkitty kahdella tähdellä (**).

Taulukko 3-4. Pyriittialtaan toiminnan aikaisen suotoveden koostumuksen mallinnuksessa käytetyt kosteuskammiosyötteet. Luku on kosteuskammiokeeseen viikkojen 0-28 tulosten keskiarvo. Näytteen epätavallisen koostumuksen takia ICP analyysin määritysrajat olivat toisinaan hyvin korkeita ja lukuja oli manipuloitava järkevien tulosten luomiseksi, tekstissä selitetään tehdyt laskennalliset toimenpiteet tarkemmin alkuaineryhmittäin (ja **). Luvut ovat suoraan kosteuskammiokeeseen tuloksia ilman muunnoskertoimia eli ne eivät edusta mitään todellista suotoveden koostumusta.*

Suure	Yksikkö	Pitoisuus	Suure	Yksikkö	Pitoisuus
Ag	mg/kg/vk	0,0013	Mo	mg/kg/vk	0,0047
Al	mg/kg/vk	7,4	Na**	mg/kg/vk	0,25
As	mg/kg/vk	0,51	Ni	mg/kg/vk	0,88
B	mg/kg/vk	0,94	P**	mg/kg/vk	0,034
Ba	mg/kg/vk	0,02	Pb	mg/kg/vk	0,058
Be	mg/kg/vk	0,0044	Sb	mg/kg/vk	0,0048
Ca	mg/kg/vk	73	Se	mg/kg/vk	0,022
Cd	mg/kg/vk	2,0	Si	mg/kg/vk	6,7
Cl*	mg/kg/vk	0,20	Sn**	mg/kg/vk	0,000076
Co	mg/kg/vk	0,26	Sr	mg/kg/vk	0,066
Cr	mg/kg/vk	0,032	Th	mg/kg/vk	0,015
Cu	mg/kg/vk	4,1	Ti**	mg/kg/vk	0,00012
F*	mg/kg/vk	0,008	U	mg/kg/vk	0,028
Fe	mg/kg/vk	490	V**	mg/kg/vk	0,00020
HCO ₃ ⁻	mg/kg/vk	0 ^a	W**	mg/kg/vk	0,00032
Hg*	mg/kg/vk	<0,00001	Zn	mg/kg/vk	330
K**	mg/kg/vk	5,1	SO ₄	mg/kg/vk	1700
Li*	mg/kg/vk	0,00040	NO ₃ (N)	mg/kg/vk	0,025
Mg	mg/kg/vk	24	NH ₄ (N)	mg/kg/vk	0,12
Mn	mg/kg/vk	21			

^aAlkaliteettia ei ole viikon 0 jälkeen, joten kaikki alkaliteetti katsotaan liittyvän alkuhuuhdteluun (prosessivesi) eli jätetään huomiotta, koska prosessivesi huomioidaan erillisenä syötteenä.

3.4 Pyriittialtaan konseptualisointi

Pyriittirikaste läjitetään kuivana, joka tuo jätealueelle tyypillisestä märkäläjitystä hyödyntävästä rikastushiekka-altaasta poikkeavia piirteitä. Näitä käsitellään lyhyesti alla. Lisäksi on huomioitava, että pyriittirikaste pyritään mahdollisuuksien mukaan myymään. Esimerkiksi vuonna 2023 pyriittirikastetta läjitettiin pyriittialtaalle vähän (~3 000 t eli 20 % rikasteesta). Tällaisina vuosina voidaan suotoveteen joutuvien kuormien olettaa olevan pienempiä kuin läjityksen aktiivisina vuosina. Mallissa pyritään konservatiiviseen arvioon kaikkien parametrien suhteen eli mallinnuksessa kuvataan aktiivisen läjityksen vuosi ja pyriittialtaan maksimilaajuus. Konseptualisoinnin pääperiaatteet esitetään kuvassa 3-7.

Kuivaläjitetyksen fysikaaliset ominaisuudet

Verrattuna märkäläjitukseen, kuivaläjitetty pyriittirikaste ei lajitu eikä leviä ympäristöön rakeiden laadun ja koheesion vaikutuksesta eli läjitykseen ei muodostu vyöhykkeitä, jotka lisäävät hapontuottopotentiaalia. Märkäläjitetyssä tapahtuvaa materiaalipaksuuden lisääntymisen ja hautautumisen johdosta tapahtuvaa tiivistymistä ei juuri nähdä kuivaläjitetyssä pyriittirikasteessa eli materiaalin tiheydessä ei tapahdu muutoksia läjityksen aikana. Nämä tekijät auttavat minimoimaan huokostilavuuden ja lisäämään tortuositeettia eli rakeiden väliin jäävien nesteiden kulkeutumisreittien mutkaisuutta. Molemmat edellä mainitut seikat ovat suosiollisia haitta-aineiden vapautumisen vähentämiseksi.

Läjityksessä vuosittain muodostuvan vesikuorman oletetaan pumppauksen vuoksi myös poistuvan vuosittain.

Kaasun kulkeutuminen

Läjitetyn materiaalin hienorakeisuudesta ja pienestä huokostilavuudesta johtuen kaasunvaihto huokostilavuuden ja ilmakehän välillä tapahtuu pääsääntöisesti diffuusiolla. Konvektiivisen virtauksen puute vähentää huomattavasti hapettumisnopeuksia. Tiivispakkautuminen myös auttaa pidättämään huokosissa kosteutta, joka osaltaan myös hidastaa kaasunvaihtoa. Ilmanpaine-erot voivat aiheuttaa pumppausreaktiota kasan pinnalla, mutta tämän vaikutus jää vähäiseksi.

Lämmön kulkeutuminen

Lämpötila konseptualisoidaan vuosittaisen keskiarvolämpötilan mukaan. On oletettavaa, että talvella kasan pinta jäätyy, ja toisaalta kesällä lämpötilat ovat keskiarvoa korkeampia. On tyypillistä, että kaivannaisjätealueiden geokemiallisissa malleissa oletetaan hapettumisen ja haitta-aineiden poistumisen kokonaan loppuvan talvella. Toisaalta muutaman asteen lämpötilan nousulla ei ole suurta vaikutusta keskimääräisiin hapettumisnopeuksiin, joten laskemalla vuotuinen kuorma vuoden keskimääräisessä lämpötilassa saadaan tyypillisesti konservatiivinen arvio kuormista. Lisäksi pyriitin hapettuminen on eksotermiä eli lämpöä tuottava reaktio, joten suoraan paikalliseen säähän perustuva arvio korjataan ylöspäin (lämpötilakertoimena käytetään 0,21 sijaan 0,3).

Veden kulkeutuminen

Kuivaläjitys antaa mahdollisuuksia vähentää läjityksen läpi kulkeutuvan veden määrää läjityksen rakentamisen avulla. Kasan pinnan muotoilulla voidaan 1) edistää veden valumista pois rakentamalla pinnat sopivasti kalteviksi, 2) estää lätäkköjen muodostuminen. Lisäksi kuivaläjitys mahdollistaa materiaalin tiivistämisen lähelle maksimimaalista proctor-tiiviyttä, joka lisää pintavaluntaa. Pyriittialtaan pienen koon ja

erittäin tiiviin pohjarakenteen takia pinnan muotoilua ei oteta tarkemmin huomioon mallinnuksessa, mutta suotoveden määrää voitaisiin näillä keinoin pienentää.

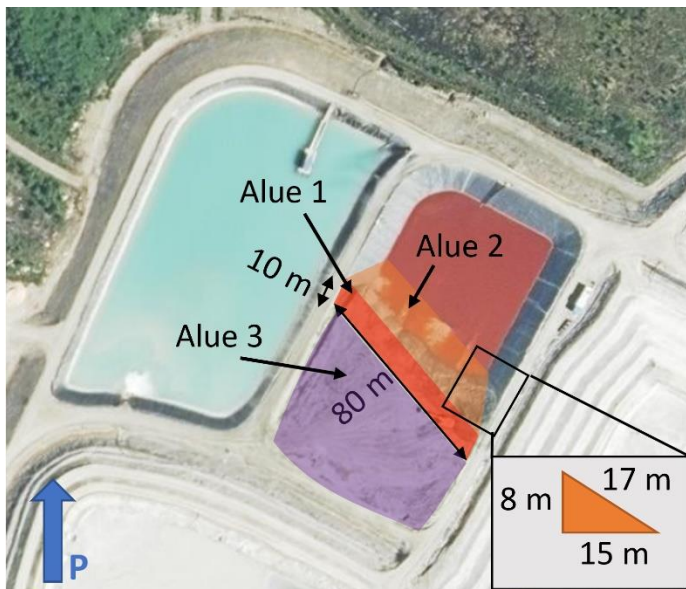
Hapettuvat alueet

Kuvassa 3-6 näytetään pyriittialtaan ilmakuvaa hyödyntäen toiminnan aikaisen mallin konseptualisoinnin perusteet. Kuvassa 3-7 näytetään toiminnan aikaisen mallin konseptualisointi altaan pitkittäissuuntaisessa leikkauksessa (koillinen-lounas). Hapettava alue jaetaan kolmeen eri alueeseen seuraavasti:

Alue 1: Aktiivisen läjityksen horisontaali alue, jolla hapettumista tapahtuu hapenläpäisymallinnuksen (kts. kohta Hapettumissyvyys) mukaan täysimääräisesti (30 cm). Pinta-ala on 100x10 m.

Alue 2: Aktiivisen läjityksen rinne, jolla hapettumista tapahtuu hapenläpäisymallinnuksen mukaan täysimääräisesti (30 cm). Pinta-ala on laskettu pyriittialtaalla maksimi syvyyden mukaan olettaen rinteeseen kaltevuudeksi noin 30°. Alueen suuruus on 100 mx17 m ja pinta-ala 1700 m².

Alue 3: Passiivinen läjitysalue, jolle pyriittirikastetta on läjitetty aikaisempien vuosien aikana. Läjityksen pintakerrokseen oletetaan muodostuneen hapenläpäisyä hidastavia kerroksia sekundäärimineraaleista ("hard pan") ja pintakerroksen muun tiivistymisen seurauksena. Tämä on tyypillinen havainto sulfidirikkailla kaivannaisjätealueilla, mutta kiteytymien muodostumiseen vaikuttavien prosessien vaikutusta ei ymmärretä tarkoin. Hapettumisnopeus myös pienenee tunkeutumisvyyden lisääntyessä ja hapettuneen kerroksen paksuuden kasvaessa. Tällä alueella hapettumisen tehokkuuden oletetaan olevan 10 % aktiivisilla alueilla tapahtuvasta hapettumisesta. Kuvassa 3-6 näytetään tämän hetken tilanne, mutta toiminnan aikaisessa mallissa oletettiin pyriittialtaan olevan maksimilaajuudessaan eli pinta-ala oli 1 ha ja passiivisen läjitysalueen (alue 3) laskettiin käsittävän 90 % kokonaispinta-alasta. Tuotannon mahdollisen laajentumisen vaikutukset käsitellään kappaleessa 3.5.



Kuva 3-6. Pyriittialtaan nykytilanteen konseptualisointi ja reaktiivisen massan määrittämisessä käytettyjen alueiden (alueet 1-3) dimensiot (mallissa on käytetty tilannetta, jossa allas on läjitetty täyteen).

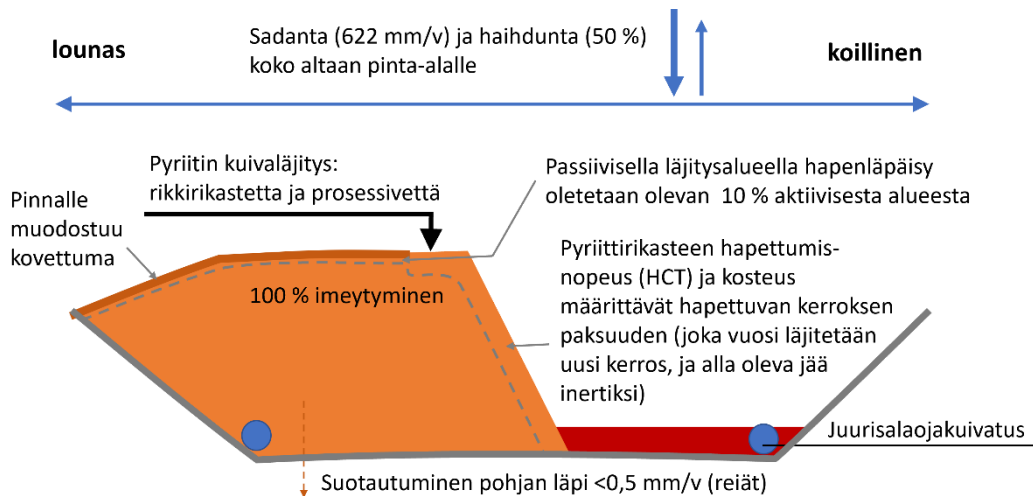
Vesimäärät

Toiminnan aikana pyriittialtaaseen satavan veden määrä lasketaan keskimääräisen vuotuisen sadannan (622 mm/vuosi) ja haihdunnan (50 %), sekä altaan pinta-alan

(nykytilassa 1 ha, mahdollisen tuotannon laajentamisen jälkeen 1,75 ha) mukaan. Nykyisellä vuotuisella maksimiläjitysmäärällä 15 000 tonnia (kuivapaino), prosessivettä tulee pyriittialtaalle 2 650 m³/vuosi. Mahdollisen tuotannon kasvun jälkeen prosessivettä tulee altaalle maksimissaan 4 410 m³/vuosi. Veden suolaisuuden ei juuri oleteta vaikuttavan sen tiheyteen. Yhteensä vettä tulee altaalle nykytilassa noin 5 800 m³ vuodessa (tuotannon mahdollisen laajentamisen jälkeen noin 9 900 m³). Kaiken veden oletetaan valuvan altaan pohjalle, josta valumavesi kerätään juurisalaojia pitkin käsittelyyn. Oletuksena on, että sadevesi ja prosessivesi sekoittuvat täydellisesti, todellisuudessa prosessiveden tulo rajoittuu alueelle, jossa tapahtuu aktiivista läjitystä, kun taas sadanta levittäytyy tasaisesti koko altaan alueelle.

Altaalla on erittäin tiivis pohjarakenne. Pohjarakenteessa on kalvotuksen lisäksi bentoniittikerros, joka vähentää entisestään läpisyötyä. Mallinnuksessa kuitenkin oletetaan konservatiivisesti bentoniittikerroksen puuttuvan. Kalvossa olevien reikien määräksi oletetaan noin 5/ha (Rowe ym. 2017) ja tästä johtuva veden läpisyöty vastaa 0,5 mm/vuosi vesipatsasta, eli yhteensä vesimäärää 5 m³/vuosi (nykyinen altaan laajuus). Pohjan läpi suotautuvan määrä toiminnan aikana on siis 0,09 % kokonaisvesimäärästä.

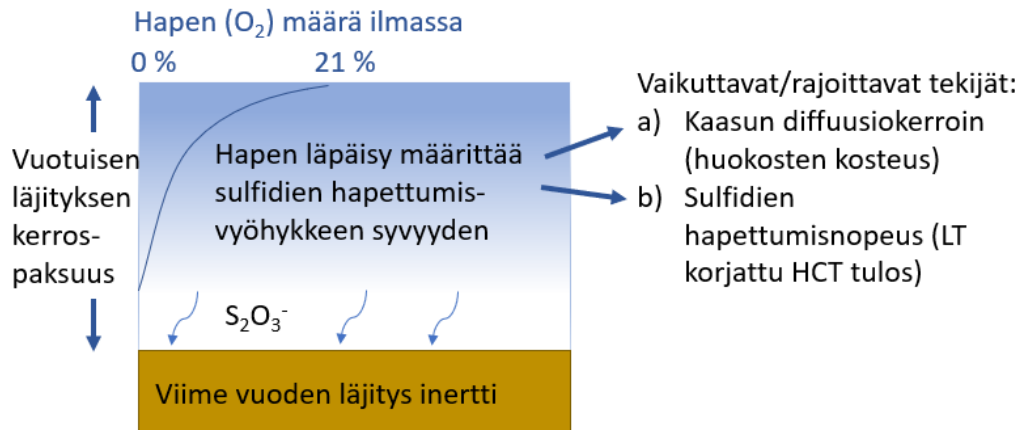
Sadevettä tulee nykyisin altaalle noin 3 110 m³/a eli prosessiveden osuus kokonaisvedestä on noin 46 %. Tuotannon mahdollisen kasvun jälkeen prosessiveden osuus on lähes sama (45 %).



Kuva 3-7. Pyriittialtaan konseptualisointi pitkittäissuuntaisessa projektiossa (nykytila).

Hapettumissyvyys

Hapettumissyvyyden ja siten vapautuvien haitta-aineiden määrän laskemiseksi käytetään hapen diffuusiomallinnusta. Koska pyriitti on erittäin nopeasti hapettuvaa eli paljon happea kuluttavaa materiaalia, hapettumisnopeus on rajoittava tekijä, joka määrittää hapen tunkeutumissyvyyden. Mallin konseptualisointi esitetään kuvassa 3-8. Tarkemmin happimallinnuksen perusteet esitetään kappaleessa 3.6.3.



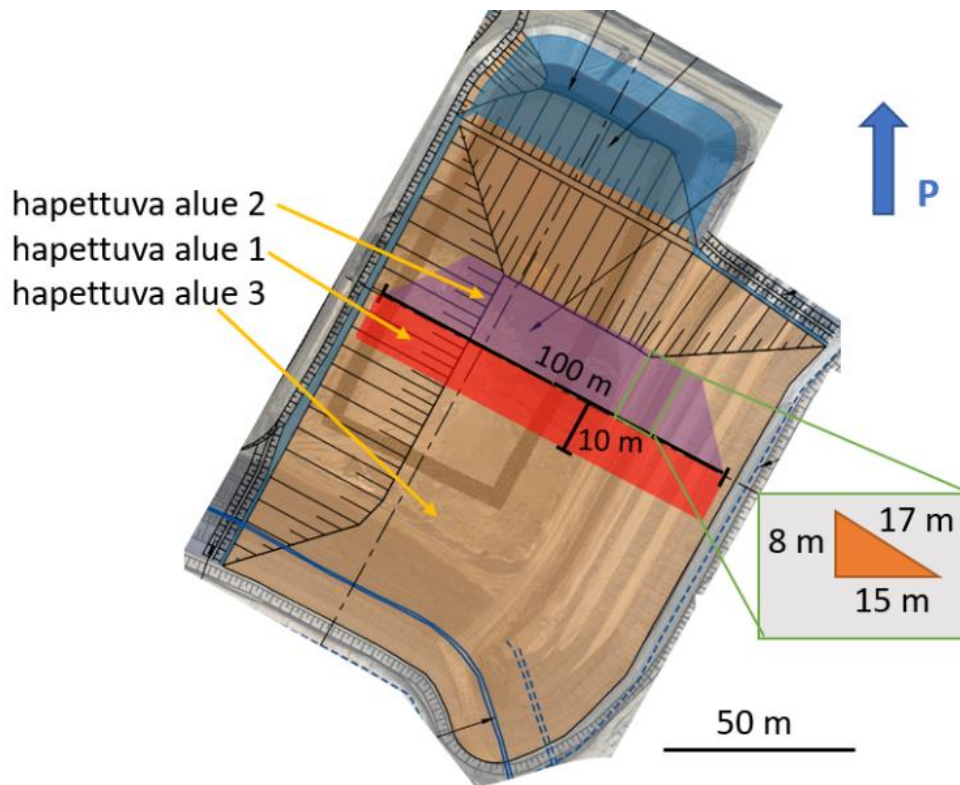
Kuva 3-8. Hapen tunkeutumisvyöhykkeen mallinnuksessa käytettävä konseptualisointi

3.5 Tuotannon lisäämisen vaikutus pyriittialtaaseen

Pyriittialtaan nykytilanteen mallinnus perustuu kappaleessa 3.3.2 esitettyihin lähtötietoihin. Tuotannon mahdollinen lisäys tulee lisäämään myös pyriittirikasteen vuotuisen muodostumisen määrää 67 %:lla. Mikäli pyriittiä ei saada toimitettua jatkojalostukseen, pyriittialtasta laajennetaan. Laajennuksen suunnitelma esitetään kuvassa 3-9. Lisäksi kuvassa esitetään, miten mahdollinen laajennus vaikuttaa toiminnan aikaisen suotoveden mallinnukseen. Alla kuvataan muutokset lyhyesti:

1. Vesimäärän lisääntyminen. Sadevettä oletetaan satavan kuvassa 3-9 olevalle ruskealle alueelle sekä koillisnurkassa olevan vesialtaan pinta-alalle (yhteensä 17 500 m²). Läjityksen mukana tulevan prosessiveden määrä lisääntyy vastaavasti 67 %:lla.
2. Hapettuvan pinta-alan lisääntyminen. Alue 1 eli vertikaali aktiivisen läjityksen ja maksimaalisen hapettumisen alue levenee 80 m:stä 100 m:iin. Alue 2 eli rinne pysyy dimensioiltaan muuten samana, paitsi leveys lisääntyy kuten alueella 1. Aktiivisen läjityksen rinteelle käytettiin konservatiivisia arvoja (korkeus 8 m) ja oletetaan, että uusien kerrosten tekeminen vanhojen päälle ei vaikuta aktiivisen läjityksen operatiiviseen toimintaan. Alue 3 laajenee 9 000 m²:sta noin 13 400 m²:een.

Läjitys tapahtuu rinnettä pitkin. Tyypillisesti yhdellä läjitettävällä kerroksella on paksuutta joitain metrejä ja kerroksen tultua täyteen läjitys jatkuu vanhan kerroksen päälle. Nykyisin rinteiden korkeus on noin 5 m (eli käytetty 8 m on konservatiivinen arvio), mutta on todennäköistä, että ylemmät kerrokset tullaan läjittämään käyttäen ohuempaa kerrospaksuutta. Rinteiden jyrkkyydeksi oletetaan nykyinen noin 30°. Rinnettä voidaan loiventaa huomattavasti vaikuttamatta hapettuvan pyriittirikasteen määrään, mikäli kerrospaksuus pienenee. Määritetyllä aktiivisen läjityksen alueen pinta-alalla on suora vaikutus reaktiivisen massan määrään ja altaan haitta-ainekuormiin. Vedenlaatu määräytyy hapettuvan eli reaktiivisen massan ja liuottavan vesimäärän mukaan, joten vedenlaatu voi laajentumisen takia parantua, mikäli vesimäärä kasvaa enemmän suhteessa hapettuvan aineksen määrään.



Kuva 3-9. Pyriittialtaan maksimilaajuus mahdollisen tuotannon kasvun jälkeen ja konseptualisointi toiminnan aikaisen vesilaadun mallinnuksessa

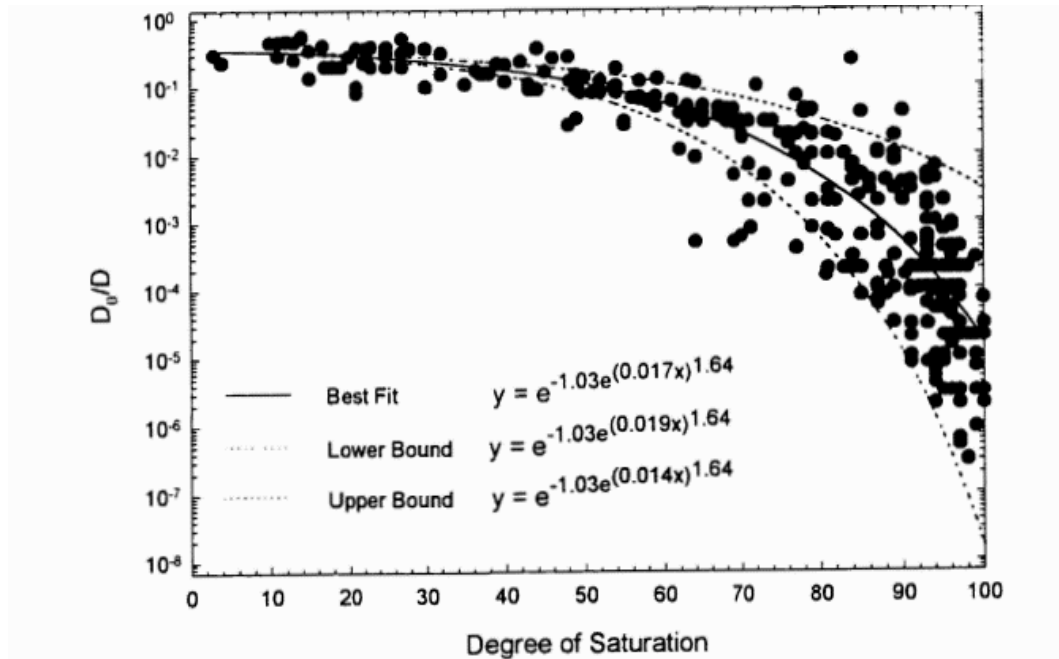
3.6 Pyriittialtaan suotoveden laatu

3.6.1 Sulfidien hapettumisen etenemisen mallintaminen

Haitta-aineiden mobilisoituminen kuivaläjitetystä pyriittirikasteesta perustuu olettamukseen, että hapenläpäisyä rajoittavat a) hapen diffuusio osittain vedellä kyllästyneen huokostilavuuden läpi ja b) hapen kulutus sulfidien hapettumisen seurauksena. Eli kosteus, happipitoisuus ja lämpötila ovat tärkeimpiä haitta-aineiden vapautumiseen vaikuttavia tekijöitä. Hapen tunkeutumisvyvyys voidaan määrittää Fickin lain perusteella, jos tiedetään hapen diffuusiokerroin materiaalissa ja sulfaatin tuoton nopeus. Näiden suureiden määrittäminen ja happidiffuusiomallinnuksen periaate selitetään tässä kappaleessa.

Hapen diffuusiokerroin

Hapen diffuusiokerroin perustuu MacKay (1997) tuloksiin, jossa hapen diffuusiota mitattiin erilaisissa rakeisissa maa-aineksissa erityisesti huokostilavuuden kosteuden vaihdellessa. Maa-aineksen huokostilavuus ja läpäisevyys vaikuttavat hapenläpäisyyn, mutta pääsääntöisesti juuri kosteuden ylläpitokyvyn kautta eli vain kosteuden käyttäminen mallinnuksessa antaa hyvän käsityksen hapen diffuusio-ominaisuuksista. Kuvassa 3-10 esitetään kokeelliset tulokset, joista mallinnuksessa otetaan käyttöön parhaiten tuloksiin sopiva regressioyhtälö ("best fit"). X-akselilla on huokostilavuuden saturaatioaste ja Y-akselilla on D_0/D , jossa D_0 on mittaustulos eli kaasun diffuusiokerroin maa-aineksen huokostilavuuden läpi ja D on kaasun diffuusiokerroin ilmassa (m^2/s). D_0 laskemiseksi tarvitaan D , joka on $2,01 \times 10^{-5} m^2/s$ ($20^\circ C$; Armstrong, 1979).



Kuva 3-10. Hapen diffuusion mittaustuloksia (MacKay, 1997), tässä käytetään "best fit" regressiota.

Kuivaläjityksen kosteudeksi on määritetty 15 % (massa/massa). Pyriittirikasteen tiheys läjityksessä on noin 2500 kg/m³. Mitä tiheämpää aines on, sitä lyhyemmän matkaa happi pääsee tunkeutumaan (eli hapen reaktiota mg/kg tapahtuu enemmän samalla "matkalla") eli tiheyden arviointi alaspäin tuottaa suuremman reaktiivisen massan ja siten myös kuormituksen. Saturaatioasteen (epäsuorasti kosteuden) lisääntyminen hidastaa hapen diffuusiota (kuten kuvasta X.X Pyriittialtaan suotoveden ja altaaseen kertyneen veden keskimääräiset koostumukset 2020–2023. Elohopean alle määritysrajan olevia tuloksia ei ole puolitettu.

nähdään). Kuivaläjityksessä huokosvettä poistetaan mahdollisimman paljon ja mallissa oletetaan lähes kaiken vapaan veden valuvan altaan pohjalle. Läjityksen kosteuden avulla laskettuna diffuusiokerroin on 6,4x10⁻⁶. Kuten kuvasta X.X Pyriittialtaan suotoveden ja altaaseen kertyneen veden keskimääräiset koostumukset 2020–2023. Elohopean alle määritysrajan olevia tuloksia ei ole puolitettu.

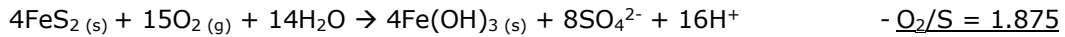
voidaan huomata, huokosen kyllästyneisyys alkaa merkittävämmiin vaikuttaa hapen diffuusioon vasta noin 50 % saturaatioasteen jälkeen. Hapen tunkeutumissyvyys olisi noin 50 % pienempi (eli noin 20 cm) huokossaturaation ollessa 45 % luokkaa. Suure on suoraan verrannollinen kuormiin eli kuormat pienenisivät samassa suhteessa.

Hapenkulutus pyriittirikasteessa

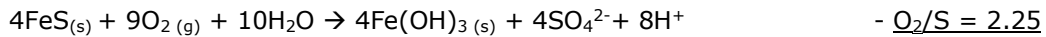
Hapen kulutus määritetään perustuen kosteuskammiokeeseen sulfaatinmuodostukseen (Taulukko 3-4). Tämä luku kuvastaa sulfaatin muodostumista laboratorio-olosuhteissa, joten luku korjataan lämpötilan suhteen vastaamaan paikallista lämpötilaa. Muille jätealueille käytettyä kerrointa 0,21, joka perustuu suoraan paikallisiin vuotuisiin lämpötiloihin ei pyriittiläjitykselle voida käyttää, koskapyriitin hapettuminen on eksotermiäinen prosessi eli se tuottaa lämpöä, joten lämpötilakertoimenä käytettiin lukua 0,3.

Sulfidien hapettumisen hapen kulutus riippuu mineraalista ja käytetystä reaktiosta. Price (2009) listaa pyriitin ja magneettikiisun hapettumisreaktiot yli 3,5 pH:ssa.

Pyriitti + Happi + Vesi → Ferrihydriitti + Sulfaatti + happamuutta

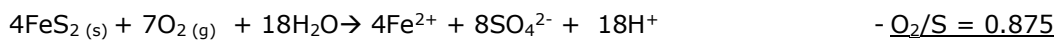


Magneettikiisu + Happi + Vesi → Ferrihydriitti + Sulfaatti + happamuutta



Pyriitin täydellinen hapettuminen kuluttaa vähemmän happea yhtä rikki-moolia kohden kuin magneettikiisun hapettuminen, koska pyriittinen rikki on hapetusluvultaan 1- ja magneettikiisussa rikin hapetusluku on 2-. Mikäli kaksiarvoinen rauta Fe(II) ei täydellisesti hapetu kolmiarvoiseksi raudaksi Fe(III):ksi, pyriitin hapettuminen kuluttaa selkeästi vähemmän happea kuin magneettikiisun hapettuminen.

Pyriitti + Happi + Vesi → Fe(II) + Sulfaatti + happamuutta



Magneettikiisu + Happi → Fe(II) + Sulfaatti



Pyriittirikasteessa magneettikiisua on paljon vähemmän kuin pyriittiä, joten mallinnuksessa lasketaan hapenkulutus pyriitin mukaan käyttämällä hapen ja rikin suhdelukuna 1.875. On oletettavaa, että magneettikiisu reagoi pyriittiä nopeammin ja siksi suurempi osa siitä ehtii hapettua ennen kuin materiaali peittyy uuden läjityksen alle ja muuttuu inertiksi.

Hapen tunkeutumissyvyyden numeerinen malli

MacKayn (1997) kokeellisten tulosten mukaan huokostilavuuden kyllästyneisyys on verrannollinen hapen diffuusiokertoimeen. Lisäksi hapen kulutus läjityksessä voidaan laskea perustuen sulfaatin muodostumiseen kosteuskammiokeudessa. Mallinnuksessa nämä tekijät sidotaan yhteen käyttäen Mbonimpan ym. (2002) kuvaamaa mallia, jossa käytetään hyödyksi ekvivalentti(vastaavuus)huokoisuutta. Tämä on tarpeen erityisesti kaivannaisjätealueiden peittorakenteille (Collin, 1987). Tekijöiden yhdistämisellä saadaan otettua huomioon hapen kulkeutuminen vesi- ja ilmafaaseissa (Aubertin et al. 1999, 2000b)

Ekvivalenttihuokoisuus:

$$\theta_{eq} = \theta_a + H\theta_w$$

jossa θ_a on ilman huokoisuus, θ_w on veden huokoisuus ja $H = C_w/C_a$ = Henryn tasapainovakio, joka on hapelle (20°C) ~0,03.

Mbonimpa johtaa yhtälön Fickin laista, joka ottaa huomioon efektiivisen diffuusiokertoimen (D_e) ja hapen kulumisnopeuden kertoimen (K_r):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_{eq}C) = \frac{\partial}{\partial z}\left(D_e \frac{\partial C}{\partial z}\right) - K_r C$$

Ratkaisu voidaan yleistää hyödyntäen ekvivalenttihuokoisuutta sekä materiaalin yleistä diffuusiokerrointa (D^*) ja yleistä reaktionopeuden kerrointa (K_r^*):

$$D_e = \theta_{eq}D^*$$

ja

$$K_r = \theta_{eq}K_r^*$$

Jossa D on yksikössä L²/t (m²/s) ja K on yksikössä 1/t (1/s). Huokoisuus on yksikötön suure.



Alla johdetaan yksinkertaistettu yhtälö, jossa θ_{eq} and D_e oletetaan riippumattomiksi ajasta (t) ja syvyydestä materiaalissa (z). Yksinkertaistaminen ei ole välttämätön, mutta selkeyttää konseptualisointia ja laskentaa.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - K_r^* C$$

Hapen kulkeutumisnopeus $F(z,t)$ ja pitoisuus $C(z,t)$ paikassa z ajanhetkellä t määrittyvät Fickin toisesta laista yksiulotteiselle diffuusiolle (Hillel, 1980):

$$F(z,t) = -D_e \frac{\partial C(z,t)}{\partial z}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\theta_{eq} C) = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_e \frac{\partial C}{\partial z} \right)$$

Näissä yhtälöissä $F(z,t)$ on hapen diffuusiovirta [$ML^{-2}T^{-1}$; mol/m²/s] ja D_e on efektiivinen diffuusiokerroin [L^2/T ; m²/s]. $C(z,t)$ on huokostilavuuden happipitoisuus paikassa z ajanhetkellä t. θ_{eq} on ekvivalentti huokoisuus diffuusiolle kahdessa faasissa kuten yllä määriteltiin.

”Yleinen hapettumisnopeus” (Global Oxidation Rate, GOR), yksikössä [$ML^{-2}T^{-1}$; mol/m²/s], määritellään:

$$GOR = \sqrt{2C_0 K_r^* D^*}$$

jossa C_0 on happipitoisuus alussa (ilmankehässä 21 %).

Tästä voidaan laskea hapen tunkeutumisvyvyys (L):

$$L = \sqrt{\frac{2C_0 D^*}{K_r^*}}$$

Täten tunkeutumisvyvyys (L; m) voidaan laskea, mikäli tiedetään hapen diffuusiokerroin läjityksessä, materiaalin hapenkulutusnopeus ja lähtötilanteen happipitoisuus. Samoin voidaan määrittää läjitysalueen yleinen hapettumisnopeus.

3.6.2 Geokemiallinen malli

Geokemiallisessa mallinnuksessa hyödynnetään perussyötteenä kosteuskammiokokeen viikkoliuoksiin perustuvia haitta-aineiden liukenemisnopeuksia (mg/kg/viikko). Geokemiallinen mallinnus perustuu vuosittain mobilisoituvien aineiden määrään, jonka lähtötietona käytettiin kosteuskammiokokeen viikkojen 0–28 tuloksien keskiarvoa. Alkuhuuhtelun merkitys on tässä tapauksessa pieni verrattuna rikastusprosessin jäänteiden tyypilliseen käyttäytyvät kosteuskammiokokeissa. Joidenkin alkuaineiden mobilisoituminen kasvaa kokeen aikana, eikä käytettyjen tulosten (viikot 0–28) aikana huippuarvoa ole vielä saavutettu. Käytettävissä ollut ajanjakso kuvaa kuitenkin riittävällä tasolla pyriittirikasteen käyttäytymistä, sillä kaivoksen toiminta-aika on suhteellisen lyhyt, ja toiminnan päättyessä pyriittiallas suljetaan tiiviillä peittorakenteella, joka minimoi sekä sadeveden että hapen kulkeutumisen läjitykseen.

Reaktiivinen massa lasketaan hapettumisvyvyyden perusteella, joka puolestaan lasketaan erillisellä sulfidien hapettumisen etenemisvyvyyttä laskevalla mallilla (ks. kappale 3.6.3). Hapettumistehokkuuden katsotaan olevan 100 % alueilla, jotka ovat aktiivisen läjityksen piirissä ja 10 % passiivisilla alueilla, joilla hapettuminen on edennyt pidemmälle samalla luoden eristävää kerrosta rikkirikasteen pintaan. Lisäksi alhaisen kosteuden pyriittirikasteessa oletetaan tapahtuvan kanavoitumista, joka pienentää vedelle alttiin materiaalin määrää.



Mallinnuksen perustaksi on otettu vuosi, jolloin pyriittirikasteen läjitysalueen laajuus on suurimmillaan. Tällä hetkellä läjitys on edennyt noin puoleen väliin allasta molemmissa suunnissa eli pinta-alasta noin puolet altaasta on peittynyt pyriittirikasteella ja korkeudeltaan läjitys on noin puolessa välissä maksimikorkeutta. Lisäksi mallinnuksessa oletetaan, että kyseessä on aktiivisen läjityksen vuosi ts. pyriittirikastetta ei toimiteta kaivoksen ulkopuolelle. Toiminta-aikana oletetaan kuitenkin olevan vuosia, jolloin läjitys on tauolla, tai hyvin vähäistä, mikä vähentää haitta-aineiden liukenemista.

Tuloksena mallinnuksesta saatu laskennallinen vedenlaatu (Taulukko 3-5) on oletetusti hieman väkevämpi kuin pyriittialtaan nykyinen, mitattu vedenlaatu. Nykyinen vedenlaatu on mitattu näytteistä, jotka on otettu altaan pohjalle kertyneestä vedestä. Mallinnuksena on käytetty konservatiivisia arvioita monien parametrien suhteen, jotta vedenlaatu ei ainakaan olisi liian laimea verrattuna toteutuvaan. Suurin ero tulosten välillä tulee siitä, että mallinnuksessa oletetaan läjityksen edenneen pidemmälle, tämä nähdään selkeimmin sulfaatin määrässä. Sulfaatti on huonosti pidättyvä ioni, ja sen voidaan olettaa heijastavan hapettumisnopeutta yleisellä tasolla hyvin. Jarosiitin mahdollinen kiteytyminen voi aiheuttaa sulfaatin pidättymistä läjitetyssä materiaalissa. Pääsääntöisesti pyriittirikasteesta hapettumisen seurauksena liukenevat ionit ovat mallinnetussa vedessä siinä suhteessa kuin ne liukenevat kosteuskammiokoikeissa.

Taulukko 3-5. Pyriittialtaan toiminnan aikaisen suotoveden koostumus nykyisellä laajuudella ja tuotannon mahdollisen lisäyksen jälkeen, sekä pyriittialtaan veden mitattu koostumus (vuodet 2022–2023). Lisäksi on annettu mallinnettuihin pitoisuuksiin perustuvat vuotuiset kuormat. Rikasteen epätavallisen koostumuksen takia kosteuskammiokoikeiden ICP analyysin määritysrajat olivat toisinaan hyvin korkeita ja lukuja oli muokattava järkevien tulosten luomiseksi, tekstissä selitetään tehdyt laskennalliset toimenpiteet tarkemmin alkuaineryhmittäin (ja **).*

Aine	Yksikkö	Pyriitti-allas laskennallinen (nykyinen, 1 ha)	Pyriitti-allas laskennallinen (1,75 ha)	Pyriittiallas, mitattu	Yksikkö	VuosiKuormitus, laskennallinen /v (nykyinen, 1 ha)	VuosiKuormitus, laskennallinen (1,75 ha)
pH		3,1	3,2				
Ag	mg/l	0,0024	0,002	0,0015	kg/v	0,014	0,019
Al	mg/l	12	9	10	kg/v	67	88
As	mg/l	0,049	0,053	0,25	kg/v	0,28	0,52
B	mg/l	1,5	1,1		kg/v	8,4	11
Ba	mg/l	0,032	0,024		kg/v	0,18	0,24
Be	mg/l	0,0068	0,0052		kg/v	0,039	0,051
Ca	mg/l	260	230	170	kg/v	1500	2200
Cd	mg/l	3,1	2,4	0,24	kg/v	18	24
Cl*	mg/l	32	31	2,5	kg/v	180	310
Co	mg/l	0,40	0,31	0,078	kg/v	2,3	3,1
Cr	mg/l	0,043	0,03	0,037	kg/v	0,25	0,29
Cu	mg/l	6,3	4,9	0,40	kg/v	36	48
F*	mg/l	0,012	0,0095		kg/v	0,071	0,094
Fe	mg/l	770	590	300	kg/v	4400	5800
HCO ₃ ⁻	mg/l	0	0		kg/v	0	0
Hg*	mg/l	<0,000001	<0,000001	0,00008	kg/v	<0,001	<0,001
K**	mg/l	59	56	25	kg/v	340	550
Lj*	mg/l	0,00062	0,00047		kg/v	0,0035	0,0047
Mg	mg/l	39	31	150	kg/v	220	300
Mn	mg/l	33	25	53	kg/v	190	250
Mo	mg/l	0,0022	0,0017		kg/v	0,012	0,017
Na**	mg/l	23	22	7,0	kg/v	130	220
Ni	mg/l	1,4	1,1	0,41	kg/v	7,9	10
P**	mg/l	0,0031	0,0041	0,81	kg/v	0,018	0,04
Pb	mg/l	0,087	0,065	0,20	kg/v	0,50	0,64
Sb	mg/l	0,10	0,1	0,0046	kg/v	0,60	0,99



Aine	Yksikkö	Pyriitti-allas laskennallinen (nykyinen, 1 ha)	Pyriitti-allas laskennallinen (1,75 ha)	Pyriittiallas, mitattu	Yksikkö	VuosiKuormitus, laskennallinen /v (nykyinen, 1 ha)	VuosiKuormitus, laskennallinen (1,75 ha)
Se	mg/l	0,033	0,025		kg/v	0,19	0,25
Si	mg/l	10	8,1		kg/v	60	80
Sn**	mg/l	<0,000001	<0,000001		kg/v	<0,001	<0,001
Sr	mg/l	0,10	0,079		kg/v	0,59	0,77
Th	mg/l	0,024	0,018	0,013	kg/v	0,14	0,18
Ti**	mg/l	0,00018	0,00014		kg/v	0,0011	0,0014
U	mg/l	0,040	0,029	0,013	kg/v	0,23	0,29
V**	mg/l	0,00031	0,00024		kg/v	0,0018	0,0023
W**	mg/l	0,00050	0,00038		kg/v	0,0029	0,0038
Zn	mg/l	510	390	88	kg/v	2900	3900
SO ₄	mg/l	2900	2300	1800	kg/v	17000	23000
NO ₃ (N)	mg/l	14	13	0,73	kg/v	80	130
NH ₄ (N)	mg/l	6,0	5,8	0,69	kg/v	35	57
TDS		4 450	3 570				

3.6.3 Pyriittialtaan suotoveden mitattu koostumus

Taulukossa 3-6 esitetään pyriittirikasteen läjitysalueen suoto-ojan S1 veden ja pyriittialtaan pohjalle kertyneen veden keskimääräiset pitoisuudet ajalta 2020–2023. Mittauksista on poistettu 2 arvoa selkeästi anomaalisten tulosten takia, esimerkiksi hyvin korkea alumiini- tai kiintoainepitoisuus. Suoto-ojan S1 vedenlaatu esitetään taulukossa koostumuksien vertailuksi, jotta voidaan arvioida esimerkiksi suoraan laimenemisen ja altaan ja suoto-ojan välissä tapahtuvan pidättymisen vaikutusta. Esimerkiksi kloorin ja natriumin pitoisuudet ovat suoto-ojassa suurempia kuin pyriittialtaan vedessä, typpiyhdisteiden pitoisuudet ovat samanlaisia tarkkailupisteillä.

Pyriittialtaaseen kertyvän veden laatuominaisuuksia on seurattu kuukausittain 5.2022–9.2023. Sarjasta poistettiin yksi mittaus anomaalisten tulosten takia, useat arvot olivat ko. näytteenotokerralla jopa 10 kertaa suurempia kuin muiden mittausten keskiarvo. Altaalta mitattuja pitoisuuksia käytetään mallinnustulosten varmentamiseen.

Taulukko 3-6. Pyriittialtaan suotoveden ja altaaseen kertyneen veden keskimääräiset koostumukset 2020–2023. Elohopean alle määrittämissä olevia tuloksia ei ole puolitettu.

Suure	Yksikkö	Suoto-oja S1, mitattu	Pyriitti-allas, mitattu	Suure	Yksikkö	Suoto-oja S1	Pyriitti-allas
pH		5,3	2,8	Mg	mg/l	11	150
Ag	µg/l	1,0	1,5	Mn	µg/l	2 000	53 000
Al	µg/l	1 800	10 000	Na	mg/l	17	7,0
As	µg/l	1,2	250	Ni	µg/l	54	410
Ca	mg/l	62	170	P	µg/l	45	810
Cd	µg/l	26	240	Pb	µg/l	2,6	200
Cl	mg/l	16	2,5	Sb	µg/l	0,63	4,6
Co	µg/l	50	78	Th	µg/l	0,12	13
Cr	µg/l	0,19	37	U	µg/l	5,8	13
Cu	µg/l	10	400	Zn	µg/l	1 300	88 000
Fe	µg/l	320	300 000	SO ₄	mg/l	110	1 800
Hg	µg/l	0,030	0,080	NO ₃ +NO ₂ (N)	mg/l	1,0	0,73
K	mg/l	8,4	25	NH ₄ (N)	mg/l	0,76	0,69



4 Sivukivet

4.1 Sivukivien karakterisointi

Osana sivukiven geokemiallista karakterisointia sivukiven kuningasvesiliukoisia alkuainepitoisuuksia on määritetty useana vuotena. Taulukossa 4-1 on esitetty vuosien 2018, 2020 ja 2022 avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen näytteistä määritetyt kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet ja niiden vertailu PIMA-asetuksen (VNa 214/2007) kynnys- ja ohjearvoihin. Näytteiden (yhteensä 14 kpl) mediaanipitoisuuksista kynnysarvon ylittäviä ovat arseeni-, kadmium- ja antimonipitoisuudet, alemman ohjearvon ylittää lyijypitoisuus ja ylemmän ohjearvon sinkkipitoisuus. Kynnysarvojen ylityksen vuoksi sivukivi luokitellaan ei-pysyväksi kaivannaisjätteeksi.

Avolouhoksen sivukivissä pitoisuudet ovat maanalaisen kaivoksen pitoisuuksia alhaisempia. Minimi- ja maksimipitoisuuksista on nähtävissä kohtuullisen suuri vaihtelu geokemiallisissa ominaisuuksissa, mutta pitoisuuksien keskiarvot kuvastavat kohtuullisen hyvin keskimääräistä sivukiveä. Maanalaisessa kaivoksessa yhden näytteen arseenipitoisuus oli muista poiketen huomattavan korkea (kaikki näytteet, max = 380 mg/kg) minkä takia maanalaisen kaivoksen näytteiden arseenipitoisuuden keskiarvo näyttäytyy myös korkeana.

Taulukko 4-1. Vuosien 2018, 2020 JA 2022 sivukivinäytteiden kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet ja vertailu paikalliseen taustapitoisuuteen sekä PIMA-asetuksen (VNa 214/2007) kynnys- ja ohjearvoihin. Näytemäärät: avolouhos n=10, maanalainen kaivos n=4. Tarkkailunäytteet ovat maanalaisesta kaivoksesta.

Tunnus	Metallit										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Määrittäysraja	0,1	0,02	0,1	5	0,2	0,005	0,2	0,5	0,05	5	2
Taustapitoisuus			4,7	20	13		13			19	17
Kynnysarvo	5	1	20	100	100	0,5	50	60	2	100	200
Alempi ohjearvo	50	10	100	200	150	2	100	200	10	150	250
Ylempi ohjearvo	100	20	250	300	200	5	150	750	50	250	400
Avolouhos, ka.	15	3,2	2,8	4,6	23	0,02	5,7	290	3,5	5	730
Maanalainen, ka.	120	11	5,3	3,9	50	0,09	7,4	590	7,5	11	2100
Kaikki näytteet, min.	2,2	0,06	0,5	2,5	11	0,005	2,3	12	0,3	2,5	69
Kaikki näytteet, maks.	380	16	16	8	96	0,3	21	1300	14	36	3300
Kaikki näytteet, med.	44	5,3	3,5	4,4	31	0,04	6,2	370	4,7	6,6	1100
Tarkkailu 01/2023	340	9,4	3,2	1,8	39	0,095	8,3	520	18	1,4	2200
Tarkkailu 07/2023	86	7,1	2,9	2,5	42	0,082	8,6	510	11	1,7	1300
Tarkkailu 10/2023	170	4,5	2,5	3,5	23	0,046	10	250	5,9	1,2	880

Sivukiven hapontuottopotentialia on tutkittu ABA-testeillä vuosina 2018, 2020, 2022 ja 2023. Taulukossa 4-2 on esitetty maanalaisesta kaivoksesta ja avolouhoksesta otettujen näytteiden tulokset sekä erillisten, vuosien 2022–2023 maanalaisen kaivoksen tarkkailunäytteiden tulokset. Sivukivi luokituu ABA-testin keskiarvotulosten perusteella mahdollisesti happoa tuottavaksi, sillä rikkipitoisuus on alle 1 % ja hapontuottokyvyn ja neutralointipotentiaalın suhde (NPR) on alle kolme.



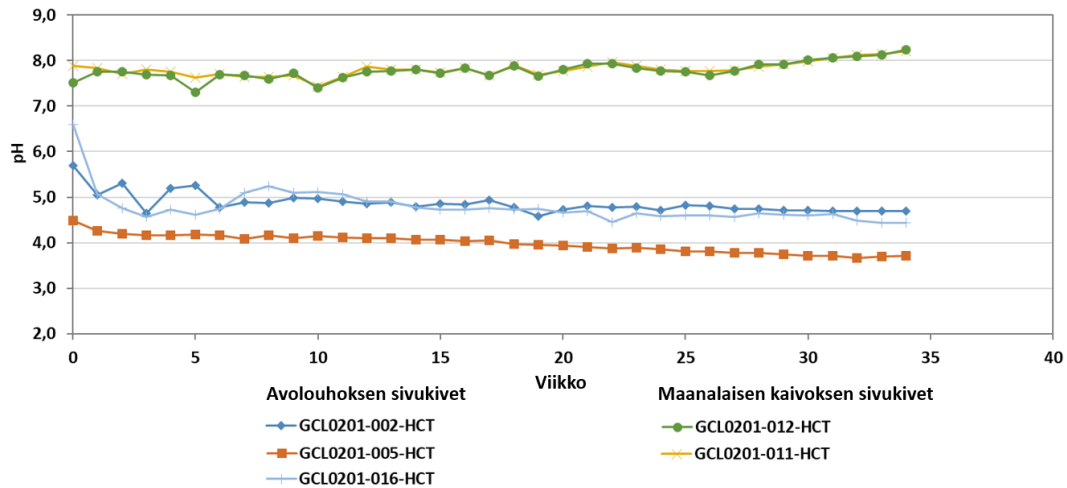
Taulukko 4-2 Sivukivinäytteiden keskimääräinen rikin kokonaispitoisuus, sulfidisen rikin pitoisuus, orgaanisen ja epäorgaanisen hiilen osuus, nettohapontuottokapasiteetti (AP), neutralointipotentiaali (NP) ja hapontuottokapasiteetin ja neutralointipotentiaalin suhde (NPR). Tarkkailunäytteet (v. 2022–2023) ovat maanalaisesta kaivoksesta.

Näyte	S (kok)	S (sulf.)	S(sulf.)/ S(kok)	AP	NP	NPR
Määrittäysraja	0,005	0,01			0,5	
	%	%		kg CaCO ₃ / tn	kg CaCO ₃ / tn	
Sivukivi, maanalainen (n=15)	0,95	0,86	0,91	28	29	1,5
Sivukivi, avolouhos (n=6)	0,91	0,86	0,95	29	6,3	0,30
minimi (n=21)	0,23	0,18	0,69	5,6	-0,6	-0,10
maksimi (n=21)	2,0	1,8	1,00	65	81	6,4
keskiarvo (n=21)	0,94	0,86	0,89	28	22	1,2
tarkkailu v. 2022 ka (n=9)	0,89	0,78	0,88	24	24	1,3
tarkkailu v. 2023 ka (n=4)	1,4	1,2	0,83	45	53	1,2
minimi (n=13)	0,23	0,18	0,69	5,6	-0,60	-0,11
maksimi (n=13)	1,6	1,6	0,99	51	70	3,7
keskiarvo (n=13)	1,1	0,91	0,84	31	33	1,3

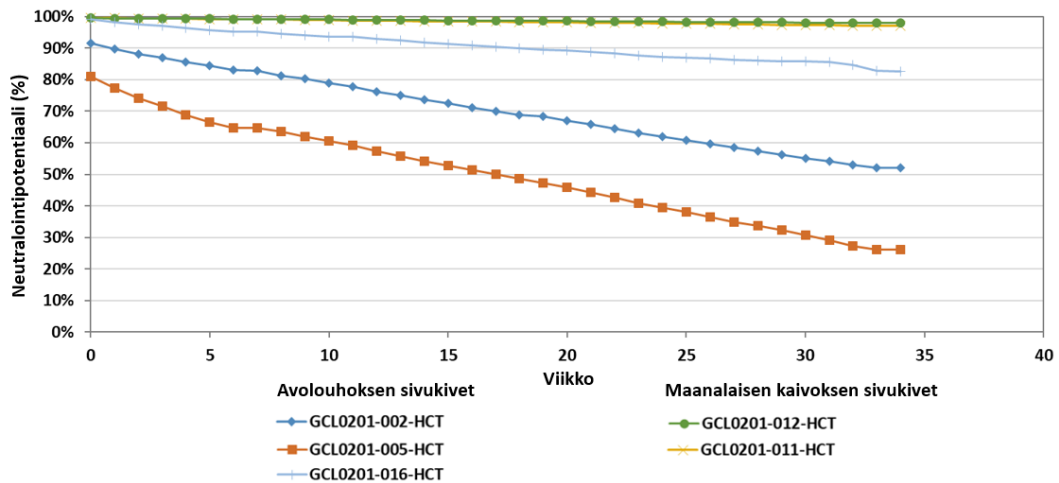
4.2 Kosteuskammiokokeiden tulokset

Sivukivialueelle on läjitetty pääosin avolouhoksesta louhittuja kiviä, ja siksi mallinnuksessa käytettiin syötteenä vain avolouhoksen kivien kosteuskammiokokeiden tuloksia. Mallinnuksen aikaan kosteuskammiokokeiden tuloksia oli saatavilla 34 viikon ajalta kemiallisten parametrien ja anionien osalta ja 28 viikon ajalta hivenaineiden osalta.

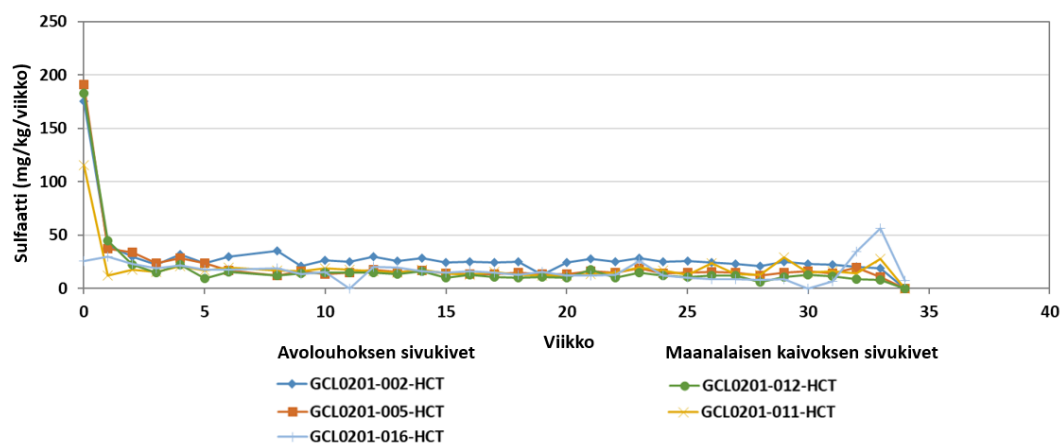
Kosteuskammiokokeissa avolouhoksen sivukivinäytteiden viikkoliuoksen pH laski heti ensimmäisten viikkojen aikana alle pH 5. Yhden sivukivinäytteen pH laski jakson loppupäässä hieman alle pH 4. Avolouhoksen sivukivinäytteiden neutralointipotentiaalista oli viimeisellä viikolla jäljellä 86 %, 55 % ja 31 % (Kuva 4-2). Metalleja on mobilisoitunut kaikista sivukivistä, mutta varsinaisia vapautumispiikkejä ei ole vielä havaittavissa ja vapautumisnopeudet (mg/kg/vko) ovat varsin maltillisia. Myös sulfaatin muodostumisnopeutta kaikissa sivukivinäytteissä voidaan pitää alhaisena (Kuva 4-3).



Kuva 4-1. pH kehittyminen sivukivien kosteuskammiokokeissa (Geochemic Ltd 2023).



Kuva 4-2. Jäljellä oleva neutralointipotentiaali sivukivien kosteuskammiokokeissa (Geochemic Ltd 2023).



Kuva 4-3. Sulfaatin muodostus sivukivien kosteuskammiokokeissa (Geochemic Ltd 2023).

4.3 Konseptualisointi

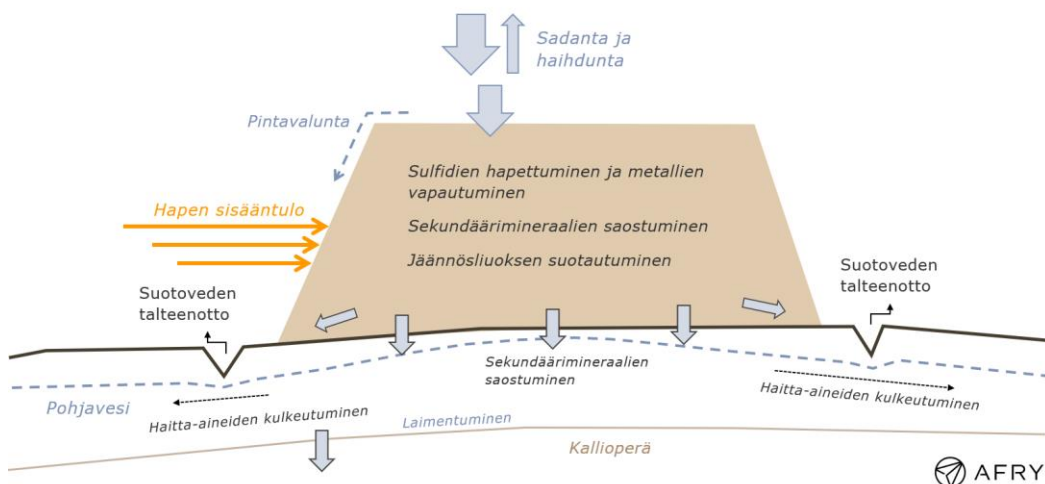
Sivukivialueen oletettiin olevan nykyisessä maksimilaajuudessaan. Sivukivimäärä ei kaivoksen toiminnan aikana enää kasva, koska maanalaisessa kaivoksessa louhittavat sivukivet ajetaan suoraan kaivostäyttöihin.

Sivukivialueen kuormitus muodostuu alueelle satavan veden ja sivukiven pinta- ja rapautumisreaktioiden yhteisvaikutuksesta sekä sekundäärimineraalien muodostumis- ja liukenemisreaktioista. Kemiallisia reaktioita rajoittaa tyypillisesti hapen saatavuus, jota ei ole mallissa rajoitettu toiminnan ajalle. Sivukiven hienoainemäärä oletetaan siinä määrin vähäiseksi, että hapen saatavuus läjityksessä ei merkittävästi esty.

Koska avolouhoksen sivukivinäytteet otettiin louhosseinämästä lohkomalla, ei räjäyttämällä, arvio räjähdeainetyypin määrästä perustuu kirjallisuustietoihin räjähteiden koostumuksesta, sekä tarvittavasta vuotuisesta määrästä ja räjähtämättömän aineen osuudesta. Räjähdyksineperäisen tyypin määrä skaalataan keskimäärin viime vuosina muodostuneen sivukiven kokonaismäärään. Sivukivialueen yksinkertaistettu konseptualisointi on esitetty kuvassa 4-4.

Sivukiven läjitysalue

Toiminnanaikainen konseptualisointi

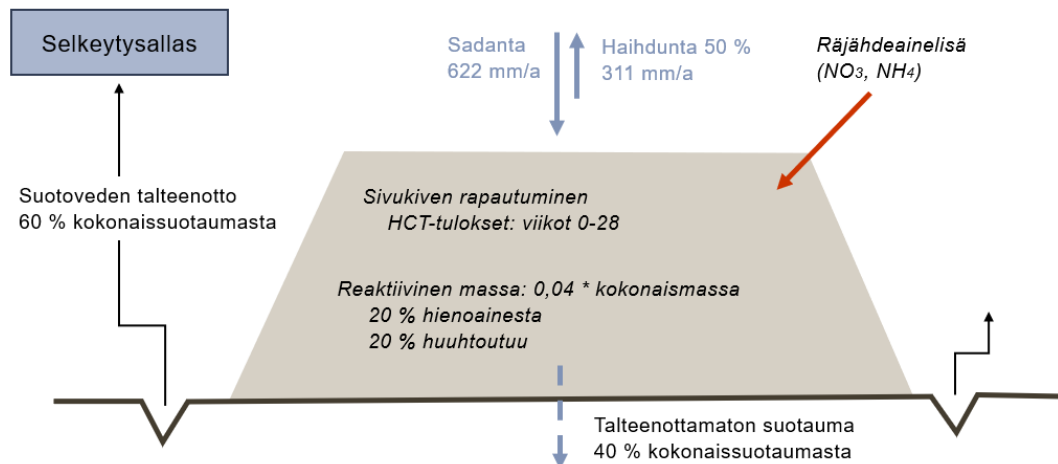


Kuva 4-4 Sivukivialueen toiminnanaikainen yksinkertaistettu käsitteellistäminen.

4.4 Sivukivialueen suotoveden laatu

Sivukivien pitkäaikaiskäyttämistä on tutkittu kineettisillä kosteuskammiokokeilla (HCT). Olosuhteet, joissa laboratoriotutkimukset suoritetaan, eivät kuitenkaan vastaa kaivosalueella vallitsevia olosuhteita. Kaivannaisjätteen pitkäaikaiskäyttämistä ja suotoveden laatua ei näin ollen voida suoraan arvioida HCT-tulosten perusteella, vaan niitä käytetään vedenlaatuarvion perustana. Suotoveden laatuun vaikuttavia tekijöitä ovat mm. lämpötila, sadanta, raekoko ja veden kanavoituminen sivukivialueella.

Source term -mallinnus, jota käytetään menetelmänä sivukivialueilla muodostuvan veden laadun arvioinnissa, perustuu kosteuskammiokokeiden tulosten skaalaamiseen laboratorio-olosuhteista kenttäolosuhteisiin. Mallinnuksen aikaan kosteuskammiokokeiden tuloksia oli saatavilla 28 viikon ajalta. Sivukivialueen suotoveden laadun mallintamisessa käytettiin syötteenä avolouhoksesta otettujen sivukivinäytteiden kosteuskammiokokeiden tuloksia. Sivukiven läjitysalueiden suotoveden mallinnuksen konseptualisointi on esitetty kuvassa 4-5 ja mallinnettu suotovedenlaatu taulukossa 4-3.

Sivukiven läjitysalue
 Mallinnuksen konseptualisointi


Kuva 4-5. Sivukivialueen suotovesilaadun mallinnuksen konseptualisointi.

Taulukko 4-3. Sivukivialueen toiminnanaikainen suotovedenlaatu. Suuruusluokan hahmottamisen tueksi esitetään pohjaveden ympäristölaatu normin (VNA 341/2009) pitoisuuksia, vaikka nämä eivät olekaan suoraan sovellettavissa suotovesille.

		Sivukivialue, toiminnan- aikainen suoto- vedenlaatu	VNA 341/ 2009			Sivukivialue, toiminnan- aikainen suoto- vedenlaatu	VNA 341/ 2009
pH		3,5		Mo	mg/l	0	
Ag	mg/l	0		Na	mg/l	2,3	
Al	mg/l	1,8		Ni	mg/l	0,2	0,01
As	mg/l	0,004	0,01	P	mg/l	0,2	
B	mg/l	0,07		Pb	mg/l	7,4	0,01
Ba	mg/l	0,2		Rb	mg/l	0,02	
Be	mg/l	0,002		Sb	mg/l	0,006	0,003
Ca	mg/l	30		Se	mg/l	0,01	
Cd	mg/l	0,09	0,0004	Si	mg/l	22	
Cl	mg/l	0,9	25	Sn	mg/l	0	
Co	mg/l	0,1	0,002	Sr	mg/l	0,1	
Cr	mg/l	0,002	0,01	Th	mg/l	0,001	
Cu	mg/l	0,3	0,02	Ti	mg/l	0,002	
F	mg/l	0,4		U	mg/l	0,005	
Fe	mg/l	6,8		V	mg/l	0,004	
Alk. as HCO ₃	mg/l	2,4		W	mg/l	0,001	
Hg	mg/l	0		Zn	mg/l	16	0,06
K	mg/l	22		SO ₄	mg/l	206	150
Li	mg/l	0,008		NO ₃ -N	mg/l	5,5	50
Mg	mg/l	4,8		NH ₄ -N	mg/l	6,1	0,2
Mn	mg/l	0,4					

Sivukivialueen suotovesi on mallinnuksen perusteella hapanta. Suotovedessä esiintyy kohonneina pitoisuuksina mm. kadmiumia, kobolttia, kuparia ja nikkeliä. Suotovedessä on mallinnuksen mukaan jäämiä räjähdysaineista, jotka näkyvät kohonneina typpiyhdisteiden pitoisuuksina. Läjitysolosuhteissa suurin osa tyypeistä on tämänhetkessä tilanteessa jo huuhtoutunut, eikä sivukivialueelle tuoda enää tuoretta kiveä, jossa räjähdysainejäämiä vielä olisi.



4.5 Suotoveden määrä sivukivialueella

Sivukivialueen suotoveden määrää ei ole mallinnettu toiminnan ajalle, vaan arvio perustuu kokemuseräiseen ymmärrykseen sadeveden imeytymisestä läjitykseen ja veden poistumisesta vastaavilta läjitysalueilla. Sivukivialueen ollessa tämänhetkisessä maksimilaajuudessaan, suotovesiä muodostuu n. 21 m³/vrk.



5 Avolouhos ja maanalainen louhos

5.1 Seinämien karakterisointi

Avolouhoksen ja maanalaisen louhoksen seinämien oletetaan vastaavan ominaisuuksiltaan kaivostoiminnassa muodostuvia sivukivityyppejä. Sivukivien karakterisointitiedot on esitetty 4.1:n kappaleessa 4.1.

5.2 Pohjaveden laatu

Kuivatusveden laadun mallinnus käyttää syötteenä maaperäpohjaveden sekä kalliopohjaveden laatua. Maaperäpohjaveden laatuna on käytetty vuosien 2019–2023 aikana otettujen pohjavesinäytteiden keskiarvoa. Näytteet on otettu pohjavesiputkista 301...307. Kalliopohjaveden laatuna on käytetty maanalaisen kaivoksen kuivatusveden laatua v. 2020–2022, koska kalliopohjaveden laatua ei ole erikseen tutkittu.

Taulukko 5-1. Kuivatusvesilaadun mallinnuksessa käytetyt pohjavesisyötteen.

		Kalliopohjavesi	Maaperäpohjavesi
Ag	mg/l	0,03	
Al	mg/l	0,4	0,2
As	mg/l	0,005	0,0005
Ca	mg/l	110	8,5
Cd	mg/l	0,03	0,00002
Cl	mg/l	8	
Co	mg/l	0,02	0,002
Cr	mg/l	0,001	0,001
Cu	mg/l	0,003	0,002
F	mg/l		0,00007
Fe	mg/l	0,5	6,4
Alk. as HCO_3^-	mg/l	410	
Hg	mg/l		0,00007
K	mg/l	15	1,6
Mg	mg/l	14	2,5
Mn	mg/l	2,6	0,3
Na	mg/l	12	2,6
Ni	mg/l	0,03	0,008
P	mg/l	0,01	0,09
Pb	mg/l	0,01	0,0002
Sb	mg/l	0,06	0,0001
Th	mg/l		0,0003
U	mg/l	0,002	0,0002
Zn	mg/l	3,1	4,4
SO_4	mg/l	260	8,9
NO_3	mg/l		0,09
NH_4	mg/l		0,7

5.3 Konseptualisointi

Mallinnetussa skenaariossa avolouhos ja maanalainen kaivos ovat laajimmillaan. Louhosten dimensiot on esitetty kappaleessa 7.4.

Avolouhos ja maanalainen kaivos ovat kaivoksen toiminnan aikana hydrologisesti yhteydessä toisiinsa. Avolouhoksen pohjasta on louhittu malmia niin, että avolouhos on yhdistynyt maanalaiseen kaivokseen. Aukko on täytetty louheella, ja tukitaan tiiviimmin sulkemisvaiheessa. Toiminnan aikana kaikki avolouhoksessa muodostuva vesi valuu louheen tai avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen seinämien rikkonaisen vyöhykkeen läpi maanalaiseen kaivokseen, ja vedet pumpataan maanalaisesta kaivoksesta. Avolouhoksesta ei siis pumpata kuivatusvesiä, vaan vedet sekoittuvat maanalaisen kaivoksen vesiin.

Kuivatusveden laatu muodostuu pohjaveden ja sadeveden ominaisuuksien perusteella. Vedenlaatuun vaikuttaa lisäksi kontakti louhosseinämien rakoilleen ja osin hienoainespitoisen kivimateriaalin kanssa. Seinämille oletetaan kaksi vyöhykettä; räjäytystyön seurauksena voimakkaasti rakoillut, osin hienoainespitoinen vyöhyke sekä ulompi vähemmän rakoillut vyöhyke. Nämä vyöhykkeet huomioidaan louhokseen tulevan veden kanssa reagoivana. Lisäksi maanalaisen kaivoksen vedenlaadussa huomioidaan maanalaiseen kaivokseen sijoitettava sivukivi- ja rikastushiekkatäyttö.

Numeerisen pohjavesimallinnuksen perusteella kaivoksen kuivattamisen aiheuttama pohjavedenpinnan alenemakartio ulottuu maaperässä ja kallion pintaosissa vain muutamien satojen metrien päähän kaivoksen reunasta, mutta vaikutukset syvemmällä kallioperässä ovat selvästi laajemmat (AFRY Finland Oy 2024). Nykyiseltä rikastushiekka-altaalta ja hankevaihtoehdon VE2 (Hanhipeäikön eteläpuoli) mukaiselta altaalta ei kulkeudu pohjavesiä louhokseen. Louhoksen alenemakartio ei myöskään suoraan ulotu VE1 mukaiselle altaalle (Hanhipeäikön pohjoispuoli) vuoden 2035 loppuvaiheessa eli louhoksen ollessa syvimmillään ja alenemakartion ollessa laajimmillaan, mutta altaat patoineen ja reunaojineen aiheuttavat alenemaa. VE1-altaalta suotautuvat partikkelit lähtevä kohti louhosta, mutta kulkeutumisaajat ovat syvällä kallioperässä hyvin pitkiä. Kaivoksen toiminnanaikaisessa kuivatusveden laadun arvioimisessa ei tästä syystä huomioitu pohjavedessä louhokseen kulkeutuvia kuormia.

Pohjaveden laatu perustuu vuosien 2019–2023 tarkkailutuloksiin alueella. Avolouhokseen valuvan pohjaveden pitoisuudet huomioitiin siinä suhteessa, jossa kallio- ja maaperäpohjavettä tulee louhokseen. Kalliopohjaveden osuudeksi arvioitiin 95 % pohjaveden kokonaismäärästä ja maaperän osuudeksi 5 %.

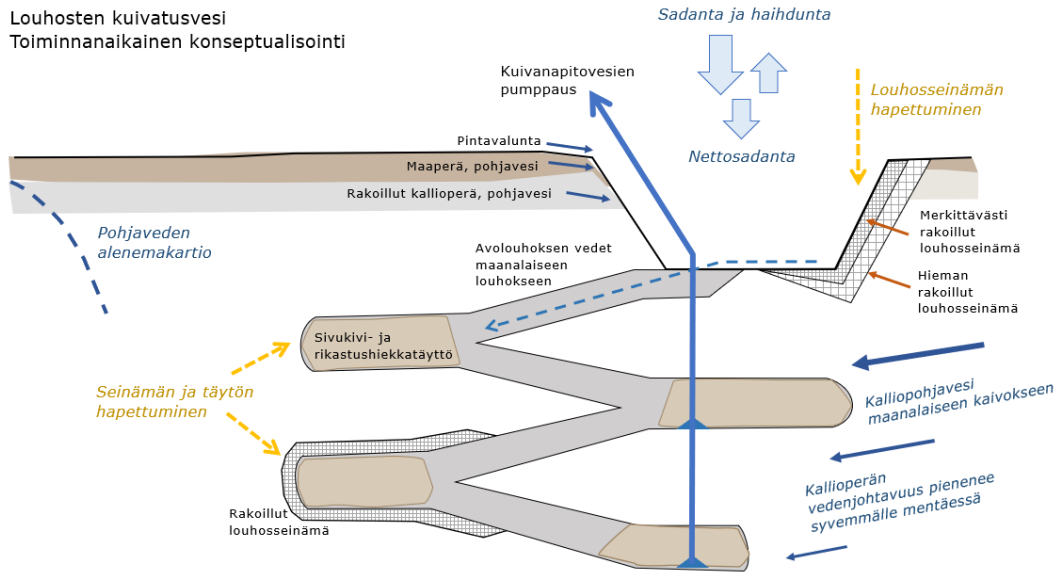
Arrheniuksen yhtälön avulla voidaan arvioida kaivosalueella vallitsevassa lämpötilassa tapahtuvan sulfidien hapettumisreaktion nopeuden suhde laboratorio-olosuhteissa tapahtuvaan reaktioon (mm. Elberling 2005, MEND 2006). Suhde on fraktio (esim. 0,21) eli nk. lämpötilakerroin, jota käytetään geokemiallisessa mallinnuksessa. Maanalaisessa kaivoksessa vuotuinen keskilämpötila on korkeampi kuin maanpinnalla. Sotkamo Silverin alueella ei ole tehty geotermisiä mittauksia, mutta lämpötilaa voidaan arvioida hyödyntäen aiheen kirjallisuutta. Geotermien gradientti kuvaa lämpötilan nousua syvyyden kasvaessa. Suomessa geotermien gradientti on tyypillisesti 8–15 K km⁻¹ (Kukkonen 2000). Lämpötilat 500 metrin syvyydessä maanpinnasta ovat yleensä 8–14 °C ja 1000 metrin syvyydessä 14–22 °C (Kukkonen 2000). Näitä tietoja hyödyntämällä Sotkamo Silverin 1 kilometrin syvyisen maanalaisen kaivoksen keskilämpötila arvioitiin olevan noin 7 °C. Arrheniuksen yhtälöstä saatiin lämpötilakertoimeksi 0,32.

Avolouhoksen kiviaines hapettuu ja rapautuu. Osa rapautumistuotteista jää kaivosveteen ja osa saostuu sekundäärimineraaleina ja/tai pidättyy louhoksessa sorption kautta. Pidättyneitä aineita myös uudelleenliukenee. Yksinkertaistettu malli



olettaa, että rapautumisessa vapautuvia aineita tulee kuivatusveteen vuosittain saman verran kuin vastaavia aineita poistuu kuivatusveden mukana. Kuvassa 5-1 on esitetty avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen konseptualisointi.

Louhosten kuivatusvesi
Toiminnanaikainen konseptualisointi



Kuva 5-1. Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvesien yksinkertaistettu konseptualisointi.

5.4 Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvesien laadut

Avolouhokselle ja maanalaiselle kaivokselle on mallinnettu yhteinen kuivatusvedenlaatu. Lisäksi avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvedet on mallinnettu erikseen, jotta pitoisuuksien lähteiden jakautuminen hahmottuu. Mallinnetut kuivatusvedenlaadut on esitetty taulukossa 5-2.

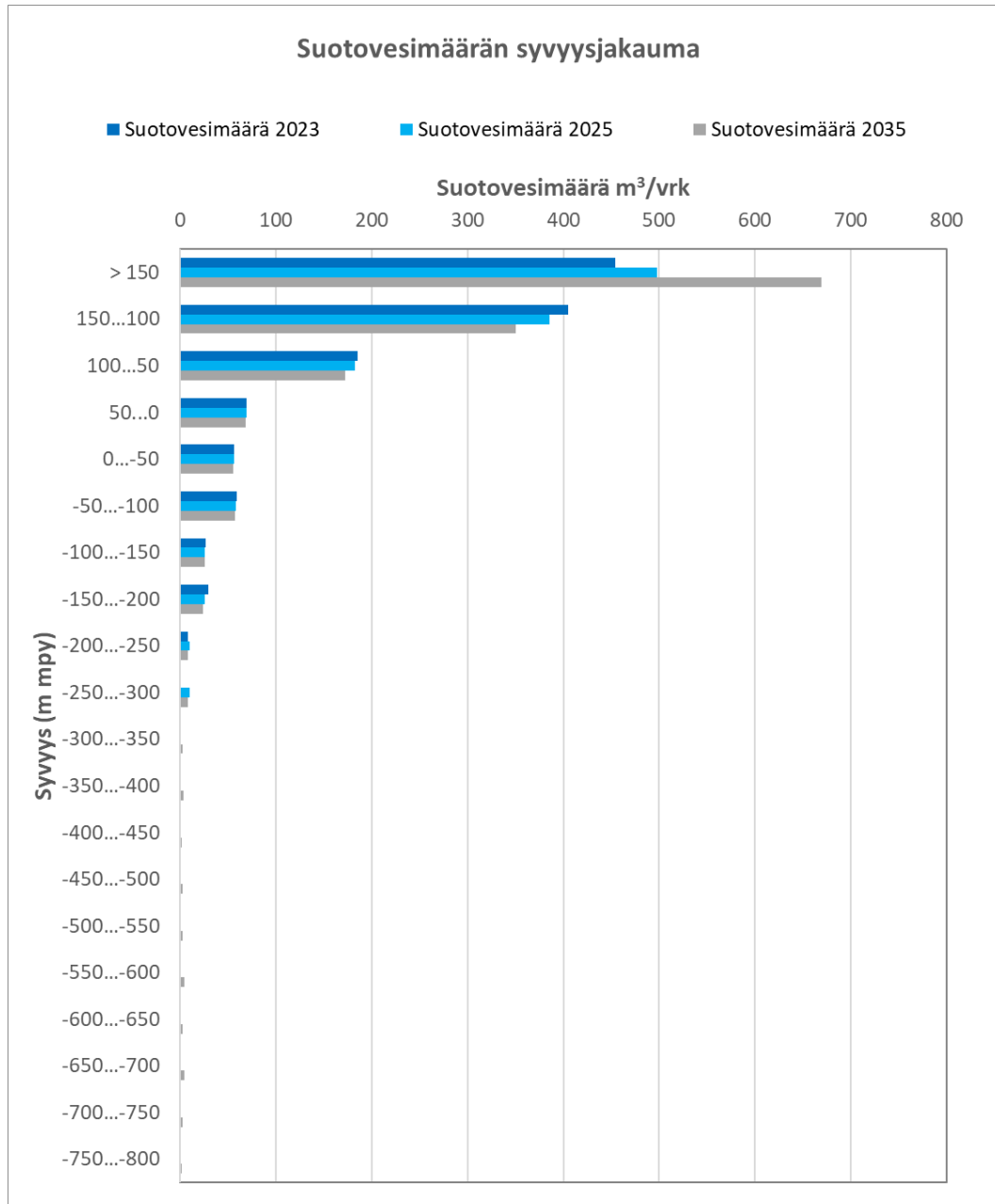
5-2. Louhosten mallinnetut kuivatusvesilaadut.

		Koko louhos, kuivatusvesi		Maanalainen kaivos, kuivatusvesi		Avolouhos, laajennettu, kuivatusvesi
		Sivukivitäyttö	Sivukivi- ja rikastushiekka-täyttö	Sivukivitäyttö	Sivukivi- ja rikastushiekka-täyttö	
pH	mg/l	5,8	8,2	4	8,2	7,8
Ag	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Al	mg/l	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7
As	mg/l	0,004	0,0002	0,006	0,0005	0,00007
B	mg/l	0,06	0,01	0,06	0,009	0,03
Ba	mg/l	0,1	0,02	0,1	0,01	0,06
Be	mg/l	0,002	0,0002	0,002	0,0002	0,0007
Ca	mg/l	98	90	100	110	87
Cd	mg/l	0,03	0,02	0,02	0,02	0,05
Cl	mg/l	2,8	5,4	1,4	6,4	5,7
Co	mg/l	0,03	0,02	0,02	0,02	0,05
Cr	mg/l	0,00007	4E-07	0,001	0,000001	6E-07



		Koko louhos, kuivatusvesi		Maanalainen kaivos, kuivatusvesi		Avolouhos, laajennettu, kuivatusvesi
		Sivukivitäyttö	Sivukivi- ja rikastushiekka-täyttö	Sivukivitäyttö	Sivukivi- ja rikastushiekka-täyttö	
Cu	mg/l	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02
F	mg/l	0,4	0,09	0,4	0,1	0,2
Fe	mg/l	1,5	0,9	0,9	0,8	3,6
HCO3-	mg/l	320	290	340	360	270
Hg	mg/l	0	0	0,000001	0	0
K	mg/l	18	18	18	21	16
Li	mg/l	0,01	0,002	0,01	0,002	0,004
Mg	mg/l	12	10	12	13	11
Mn	mg/l	3,2	2,3	2,4	2,4	5,9
Mo	mg/l	0,005	0,0009	0,005	0,001	0,0002
Na	mg/l	9,5	8,1	9,6	9,7	9,2
Ni	mg/l	0,05	0,03	0,03	0,03	0,1
P	mg/l	0,05	0,05	0,04	0,05	0,1
Pb	mg/l	0,8	0,4	0,8	0,5	1,1
Rb	mg/l	0,04	0,009	0,04	0,01	0,009
Sb	mg/l	0,1	0,1	0,1	0,2	0,04
Se	mg/l	0,03	0,006	0,03	0,008	0,005
Si	mg/l	31	4,6	30	5	9,2
Sn	mg/l	0,00004	0,0001	0,00009	0,0001	0,0003
Sr	mg/l	0,1	0,03	0,1	0,03	0,06
Th	mg/l	0,0006	0,0001	0,0006	0,00009	0,0004
Ti	mg/l	0,002	0,0003	0,002	0,0003	0,001
U	mg/l	0,0007	0,002	0,002	0,003	0,004
V	mg/l	0,003	0,0005	0,003	0,0004	0,002
W	mg/l	0,1	0,01	0,1	0,02	0,0003
Zn	mg/l	4,7	3	3,1	2,9	10
SO4	mg/l	280	200	290	240	250
NO3-N	mg/l	28	25	25	25	14
NH4-N	mg/l	9	7,9	7,9	7,9	4,7

Numeerisen pohjavesimallin mukaan 97 % kalliopohjavedestä tulee maanalaiseen kaivokseen tason -250 m mpy yläpuolelta (Kuva 5-2), mikä vastaa syvyyttä 462 m. Mallinnuksessa edellä mainitun syvyyden alapuolelle ulottuvan louhosseinämän ja kaivostäytön reaktiivisen massan oletetaan olevan merkityksetön kokonaislaskennassa, eikä sitä ole siksi otettu huomioon. Kuivatusvedenlaadun mallinnuksessa syötetietoina on siis käytetty tason -250 m mpy yläpuolista louhostilojen seinämien reaktiivista massaa sekä kalliopohjaveden määrää.



Kuva 5-2. Numeerisen pohjavesimallin mukainen louhoksiin suotautuva pohjaveden määrä (AFRY Finland Oy 2024).

Maanalaisen kaivoksen täyttöihin käytetään sivukiviä sekä avolouhoksesta että maanalaisesta kaivoksesta. Mallinnuksessa syötetietona sivukivitäytölle on käytetty kaikkien sivukivinäytteiden kosteuskammiokokeiden tulosten keskiarvoa. Näytteistä laskettiin painotettu keskiarvo niin, että maanalaisen kaivoksen sivukivet muodostivat yhteensä 70 % keskiarvosta ja avolouhoksen sivukivet 30 %.

Maanalaisen kaivoksen seinämille on käytetty maanalaisen kaivoksen sivukivinäytteiden tuloksia sekä yhden avolouhoksesta otetun näytteen tuloksia. Kyseinen sivukivinäyte on otettu malmin läheisyydestä, ja sen tulkitaan edustavan parhaiten myös maanalaisessa kaivoksessa malmin läheisyydessä esiintyviä kiviä. Kosteuskammiokokeiden tuloksista laskettiin painotettu keskiarvo niin, että maanalaisen kaivoksen sivukivet muodostivat jaetusti 85 % keskiarvosta ja malmikontaktinäyte (GCL0201-016-HCT) 15 % keskiarvosta.



Avolouhoksen seinämille syötetietona on käytetty avolouhoksen sivukivinäytteiden kosteuskammiokokeiden tuloksia. Näytteistä laskettiin painotettu keskiarvo niin, että kaksi näytettä (GCL0201-002-HCT ja GCL0201-005-HCT) muodostivat samassa suhteessa pääosan keskiarvosta (90 %). Kolmas näyte (GCL0201-016-HCT), joka muodosti 10 % keskiarvosta, on otettu malmin läheisyydestä. Mallinnetussa skenaariossa avolouhosta on laajennettu tarvekiviosalla kaivoksen täyttökiviä varten, ja siksi malmin läheisyydestä otetun näytteen oletettiin edustavan vain pientä osaa seinämissä esiintyvien kivien koostumuksesta.

Kaivostäyttönä on mahdollista käyttää joko pelkkää sivukiveä tai sivukiveä ja rikastushiekkaa yhdessä. Vedenlaatumallissa tarkasteltiin kummankin vaihtoehdon vaikutusta kuivatusveden laatuun. Mallinnuksessa syötetietona rikastushiekalle käytettiin rikastushiekan kosteuskammiokokeen tuloksia.

Taulukko 5-2. Louhosten mallinnetut kuivatusvesilaadut.

		Koko louhos, kuivatusvesi		Maanalainen kaivos, kuivatusvesi		Avolouhos, laajennettu, kuivatusvesi
		Sivukivitäyttö	Sivukivi- ja rikastushiekka-täyttö	Sivukivitäyttö	Sivukivi- ja rikastushiekka-täyttö	
pH	mg/l	5,8	8,2	4	8,2	7,8
Ag	mg/l	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Al	mg/l	0,6	0,5	0,6	0,6	0,7
As	mg/l	0,004	0,0002	0,006	0,0005	0,00007
B	mg/l	0,06	0,01	0,06	0,009	0,03
Ba	mg/l	0,1	0,02	0,1	0,01	0,06
Be	mg/l	0,002	0,0002	0,002	0,0002	0,0007
Ca	mg/l	98	90	100	110	87
Cd	mg/l	0,03	0,02	0,02	0,02	0,05
Cl	mg/l	2,8	5,4	1,4	6,4	5,7
Co	mg/l	0,03	0,02	0,02	0,02	0,05
Cr	mg/l	0,00007	4E-07	0,001	0,000001	6E-07
Cu	mg/l	0,03	0,01	0,03	0,02	0,02
F	mg/l	0,4	0,09	0,4	0,1	0,2
Fe	mg/l	1,5	0,9	0,9	0,8	3,6
HCO ₃ ⁻	mg/l	320	290	340	360	270
Hg	mg/l	0	0	0,000001	0	0
K	mg/l	18	18	18	21	16
Li	mg/l	0,01	0,002	0,01	0,002	0,004
Mg	mg/l	12	10	12	13	11
Mn	mg/l	3,2	2,3	2,4	2,4	5,9
Mo	mg/l	0,005	0,0009	0,005	0,001	0,0002
Na	mg/l	9,5	8,1	9,6	9,7	9,2
Ni	mg/l	0,05	0,03	0,03	0,03	0,1
P	mg/l	0,05	0,05	0,04	0,05	0,1
Pb	mg/l	0,8	0,4	0,8	0,5	1,1
Rb	mg/l	0,04	0,009	0,04	0,01	0,009
Sb	mg/l	0,1	0,1	0,1	0,2	0,04



		Koko louhos, kuivatusvesi		Maanalainen kaivos, kuivatusvesi		Avolouhos, laajennettu, kuivatusvesi
		Sivukivitäyttö	Sivukivi- ja rikastushiekka-täyttö	Sivukivitäyttö	Sivukivi- ja rikastushiekka-täyttö	
Se	mg/l	0,03	0,006	0,03	0,008	0,005
Si	mg/l	31	4,6	30	5	9,2
Sn	mg/l	0,00004	0,0001	0,00009	0,0001	0,0003
Sr	mg/l	0,1	0,03	0,1	0,03	0,06
Th	mg/l	0,0006	0,0001	0,0006	0,00009	0,0004
Ti	mg/l	0,002	0,0003	0,002	0,0003	0,001
U	mg/l	0,0007	0,002	0,002	0,003	0,004
V	mg/l	0,003	0,0005	0,003	0,0004	0,002
W	mg/l	0,1	0,01	0,1	0,02	0,0003
Zn	mg/l	4,7	3	3,1	2,9	10
SO ₄	mg/l	280	200	290	240	250
NO ₃ -N	mg/l	28	25	25	25	14
NH ₄ -N	mg/l	9	7,9	7,9	7,9	4,7

Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvesi on tasapainomallinnuksen perusteella hapanta (pH 5,8), kun täyttömateriaalina on pelkkä sivukivi. Rikastushiekkaa käytettäessä kuivatusvesi on emäksistä (pH 8,2). Typpipitoisuudet ovat korkeammat, jos rikastushiekkaa ei hyödynnetä täytössä, koska tällöin avolouhosta laajennetaan riittävän täyttökivimäärän saavuttamiseksi ja räjähdäaineperäistä tyypeä muodostuu enemmän.

Maanalaisen kaivoksen kuivatusveden laatuun vaikuttaa eniten louhosseinämistä mobilisoituvat aineet, minkä takia yksittäisten aineiden kokonaispitoisuudet kuivatusvedessä ovat pääosin samaa suuruusluokkaa. Rikastushiekassa olevat maa-alkalimetallit vaikuttavat kuivatusveden tasapainomallinnettuun vedenlaatuun tehden vedestä emäksistä, mikä johtaa myös eroihin liuenneiden aineiden pitoisuuksissa. Kaivostäytöistä vain pieni osuus on kontaktissa kaivokseen tulevan veden kanssa, kun veden pääasiallinen virtausreitti on louhosseinämiä pitkin (vrt. sivukivikasa tai rikastushiekka-allas, jossa sadanta jakautuu tasaisesti läjitysalueelle). Mallinnuksen perusteella voidaan todeta, että tarkasteltujen kaivostäyttövaihtojen vaikutuksessa kuivatusveden laatuun ei ole merkittäviä eroja.

6 Herkkydet ja epävarmuudet

6.1 Herkkydet

Käytetty mallinnustapa on pitkälle yksinkertaistettu ja käsittelee mallinnettavat skenaariot tasapainotiloina, joissa vuoden aikana hapettumistuotteita muodostuu ja poistuu läjityksestä yhtä paljon.

Jotta tasapainomallinnusta voidaan hyödyntää, on ensin tunnistettava mallinnettavan kohteen pääasialliset saostumisreaktiot. Kaivannaisjätteille käytetään tyypillisesti raudan saostumistuotteita. Tasapainomallinnuksessa sorptio on määritelty yksinkertaistetusti käyttäen rikastushiekka-alueella saostuvaa ferrihydriittiä pääasiallisena pintareaktioalustana, ja sekundäärisinä sorboivina pintoina götiittiä ja hematitiittiä. Mallinnuksessa myös oletetaan, että kaikki liuoksessa oleva rauta on vaihdettavissa vastaavaan mineraaliin eli ferrihydriittiin.

Mallien herkkyyksistä mainittakoon keskeisimpänä reaktiivinen massa eli hapettumiselle altistuvan massan suuruus. Suotoveden laatumalli on aina herkkä hapettumiselle altistuvan vyöhykkeen tai mineraalimäärän määritelmän suhteen. Mikäli rikastushiekka-altaan arvioinnissa hapen kulkeutuminen sallitaan merkittävästi syvemmälle, reaktiivinen massa kasvaa. Tällöin myös suotoveden laatu heikkenee eli pitoisuudet kasvavat. Sivukivissä vastaavasti vaikuttava tilanne olisi, että sivukivi sisältäisikin arvioitua suuremman määrän (poikkeuksellisen määrän) hienoainesta: hapettumiselle altistuvaa mineraalipinta-alaa olisi enemmän. Päinvastaisena nämä herkkydet eivät olisi relevantteja: rikastushiekan raekoko on hyvin tunnettu ja sivukiviläjityksessä vedellä kyllästyneen kiven määrä on niin pieni, että mallinnuksessa kaikki kivi käsitellään ei-kyllästyneenä.

Sulfidien hapettumiseen liittyy myös muita tekijöitä (esimerkiksi lämpötila), jotka myös osaltaan vaikuttavat mallin tulokseen. Vaikka lämpötilan merkitys hapettumisnopeuteen on kiistaton, toisaalta vuoden keskilämpötilamuutosten täytyisi olla todella suuria vaikuttaakseen mallinnustuloksiin suuruusluokkatasolla. Louhoksissa epävarmuuksia ja herkkyyksiä liittyy erityisesti louhosseinämien (räjäytystyön seurauksena) rakoilleen ja hienontuneen kerroksen mineraalipinta-alan käsittelyyn mallissa. Rakoilu on keskeinen osa reaktiivisen massan määrittelyä louhoksissa ja kuten jo yllä todettiin, geokemiallisen mallinnuksen tulokset ovat aina herkkiä reaktiivisen massan määrälle.

6.2 Epävarmuudet

6.2.1 Rikastushiekka-altaan suotovesiin liittyvät epävarmuudet

Vedelaadun kannalta tärkeitä tekijöitä ovat mm. rikastushiekka-altaalle muodostuvan veden pH sekä rautapitoisuus. Näillä on suora vaikutus sorptio-kykyisten sekundäärimineraalien muodostumiseen ja metallien pidättymiseen. Mallinnustuloksien perusteella rikastushiekan suotoveden pH on emäksinen. Eräs sorptiota rajoittavista tekijöistä on raudan määrä, jota voidaan arvioida useilla eri menetelmillä, joista jokainen sisältää epävarmuuksia. Tässä työssä raudan määrä oletettiin vastaavan kosteuskammiokoekiden viikkoliuoksessa esiintyvää rautaa. Todellisuudessa suurin osa raudasta saostuu testisylinteriin eikä ole mitattavissa liukoisena huuhteluvedessä. Kyseinen tarkastelutapa aliarvioi raudan määrän ja johtaa korkeampiin haitta-ainepitoisuuksiin. Geokemiallisissa tarkasteluissa on kuitenkin muistettava, että jotkut metallit pysyvät neutraalissa tai lievästi emäksisessä vedessä suhteellisen hyvin liukoisina, vaikka rautaa olisikin enemmän tarjolla kuin mallissa on nyt oletettu.

Kosteuskammio koe ja edustavan koejakson valinta kullekin kaivoksen vaiheelle tuovat tuloksiin epävarmuutta. Kosteuskammio koe on paras mahdollinen koeasetelma, jolla

rikastushiekan hapettumista pitkällä aikavälillä voidaan tutkia. Kosteuskammiokokeet on aloitettu maaliskuussa 2023 ja tuloksia oli mallinnuksen aikaan saatavilla 34 viikon ajalta kemiallisten parametrien ja anionien osalta ja 28 viikon ajalta hivenaineiden osalta. Toiminnanaikaisen rikastushiekka-altaan vedenlaatuojen mallinnuksessa käytettiin viikkojen 0–28 tuloksia. Käytettävissä olleen jakson pituuden voidaan olettaa riittäväksi rikastushiekka-aldaiden toiminnanaikaisten vesien laadun arvioimiseen.

Laboratoriossa analyysit tehdään $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Kemialliset reaktiot ovat hitaampia mitä alhaisempi lämpötila on, joten tulokset pitää muuttaa vastaamaan paikallisia olosuhteita. Vuoden keskilämpötilaksi on määritetty $2,6^{\circ}\text{C}$ (Ilmatieteenlaitos 2023), jonka perusteella lämpötilakertoimeksi saatiin Arrheniuksen yhtälöllä 0,21. Tällä on suora vaikutus kosteuskammiokokeista tulevaan syötteeseen.

Reaktiivisen massan määrä lisää jokseenkin lineaarisesti rikastushiekasta vuosittain irtoavien aineiden määrää. Reaktiivisen kerroksen paksuus perustuu rikastushiekka-altaan kuivarantojen geometriaan ja tilavuuteen. Käytetyllä läjitystekniikalla rantojen geometriaan liittyy vähän epävarmuutta, sen sijaan altaalla olevan veden määrä voi vaihdella jonkin verran. Tätä voidaan kuitenkin toiminnan aikana säätää pumppauksella. Kuivana pysyvän rikastushiekkakerroksen keskipaksuutena käytetty 0,5 m ottaa kohtuudella huomioon epävarmuudet. Se perustuu rikastushiekan lepokulmaan ja rannan suunniteltuun pituuteen. Padon tuntumassa kuivan kerroksen paksuus on suurimmillaan, kun taas altaan keskiosassa rikastushiekka on veden alla ja kauttaaltaan vedenkylästä.ää.

Rikastushiekka-altaan vedenlaatumallinnus toteutettiin hankevaihtoehdolle VE1 eli laajennuksen sijoittuessa Hanhipetäikön pohjoispuolelle. Hankevaihtoehdon VE2 mukaista tilannetta ei ole mallinnettu erikseen. Hankevaihtoehtojen mukaisten rikastushiekka-aldaiden suunnitelmien eroavaisuus, joka vaikuttaa muodostuvaan vedenlaatuun, on pinta-ala. Rikastushiekka-altaan pinta-ala vaihtoehdossa VE1 on noin 30 hehtaaria, ja vaihtoehdossa VE2 noin 28 hehtaaria. Pinta-ala vaikuttaa suoraan rikastushiekan reaktiiviseen massaun. Rikastushiekka-altaalla muodostuva kuorma on suoraan verrannollinen rikastushiekan reaktiiviseen massaun. Koska vaihtoehdossa VE2 rikastushiekka-altaan pinta-ala on hieman pienempi kuin vaihtoehdossa VE1, on myös muodostuva kuorma pienempi.

Veden määrien epävarmuudet liittyvät sääoloihin, sekä tekniseen toteutukseen. Mallissa imeynnän/suotauman määrän lisääntyminen pienentää aineiden pitoisuuksia erityisesti rikastushiekka-altaan dekanttivesissä, mutta ei vaikuta kokonaiskuormiin. Lukuihin liittyvät epävarmuudet ovat suhteellisen pieniä, ja niihin voidaan vaikuttaa projektin teknisellä toteutuksella.

6.2.2 Pyriittialtaan suotovesilaadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet

Pyriittialtaan suotovedenlaatuun toiminnan aikana liittyy pääsääntöisesti samoja epävarmuuksia kuin rikastushiekka-altaan mallintamiseen, tosin olosuhteiden huomattavat erot (esim. pH) ja läjitystavan ero (märkä-/kuivaläjitys) tuovat eroja epävarmuuksiin.

Pyriittialtaan suotovedessä on hyvin matala pH (2–3). Näissä olosuhteissa rautaoksihdyroksidien muodostuminen ei ole tasapainotilassa todennäköistä ja siten myös sorption osuus on hyvin pieni. Kuitenkin empiirisesti on havaittu rautasakkakerrosten vaikuttavan korkearikkisten kaivannaisjätteidien läjitysaluiden geokemiallisiin prosesseihin ja vuorovaikutussuhteisiin. Pyriittialtaassa vallitsevassa pH:ssa voi myös muodostua jarosiittia, jonka mukana suotovedestä poistuu sulfaattia ja metalleja, erityisesti rautaa. Näitä prosesseja ei olla huomioitu täysimääräisesti mallissa, mikä johtaa pitoisuuksien yliarvioimiseen. Tällä hetkellä kosteuskammiokokeet

ovat käynnissä, joten testisylinteriin jäävästä materiaalista ei ole tarkkaa tietoa. Kokeiden loputtua ”jäävän faasin” epävarmuuksia voidaan pienentää todentamalla testisylinteriin jääneen materiaalin koostumus testein.

Mallinnuksen tärkeimpänä lähtötietona toimii kosteuskammiokeesta saatu viikkoliuoksien keskimääräinen koostumus. Kaikki tähän liittyvä epävarmuus heijastuu suoraan mallinnustuloksiin. Esimerkiksi sinkin pitoisuudet suhteessa sulfaattiin ovat huomattavasti suurempia kosteuskammiokeesta kuin kalibrointiin käytetyssä suotovedessä. Tämä johtunee kosteuskammiokeesta olleen näytteen korkeasti sinkkipitoisuudesta verrattuna keskimääräiseen pyriittirikasteeseen. Kosteuskammioke on yksi aikaan ja paikkaan sidottu ote koko pyriittirikasteesta, ja siten pienilläkin mineralogisilla eroilla voi olla suuri vaikutus joidenkin alkuaineiden käyttäytymiseen. Arviota olisi mahdollisuus tarkentaa tutkimalla pyriittirikasteen koostumusta (kemian ja mineralogia) ja sen muutoksia vuosien aikana ja vertaamalla sitä sitten kosteuskammiokeeseen lähetetyn näytteen kokonaispitoisuuksiin ja mineralogiaan.

Myös hapen tunkeutumisvyvyysmallinnus perustuu kosteuskammiokeesta havaittuun sulfaatin muodostumisnopeuteen. Tästä lasketaan hapenkulutus olettamalla kaiken hapen reagoivan sulfidimineraalien kanssa. Toinen rajoittava tekijä on hapen diffuusiokerroin läjityksessä, johon vaikuttaa eniten huokostilan vedellä kyllästynisyys. Huokostilan vedellä kyllästynisyyteen eli saturaatioon liittyy merkittävä epävarmuus. Mallissa saturatio on arvioitu selkeästi alaspäin (15 %), mutta suurikaan realistinen lisäys ei aiheuta merkittävää virhettä penetraatiosyvyyteen (joka on suoraan verrannollinen reaktiiviseen massa- ja siten muodostuvaan vedenlaatuun). Saturatiolla 50 % reaktiivinen massa vähentyisi hieman alle 50 %. Tässä mallissa huomioidaan myös materiaalin tiheys. Tiheyden kasvu pienentää penetraatiosyvyyttä. Kuivaläjätyksen tiheydestä ole tarkkaa tietoa, joten konservatiivisesti oletetaan sen oleva 2,5 t/m³. Tiheyden nousu 3,5 t/m³:n pienentäisi kuormaa noin 15 %.

Lämpötila vaikuttaa pyriitin hapettumiseen merkittävästi. Laboratoriotestaus tehdään 25 ± 2°C lämpötilassa, mutta paikalliset olosuhteet ovat kylmemmät ja siksi hapettuminen hitaampaa. Sotkamo Silverin kaivoksella vuotuinen keskilämpötila on 2,6 °C, josta on johdettu Arrheniuksen yhtälön mukainen lämpötilakerroin 0,21, mutta pyriitin hapettumisen seurauksena muodostuvan lämmön takia kertoimena käytetään konservatiivisesti 0,3.

Selkeästi eniten epävarmuutta suotovesimallinnuksessa liittyy reaktiivisen massan pinta-alan konseptualisointiin, sekä niin sanottuun huuhtoutumiskertoimeen eli arvioon kuinka suuri osa läjityksestä on kontaktissa altaalle tulevaan veteen. Reaktiivisen massan konseptualisointi perustuu arvioon aktiivisesta alueesta, sekä passiivisesta alueesta, joka käsittää loput altaan pinta-alasta. Passiiviselle pinta-alalle annetaan kertoimeksi 0,1 perustuen nykyisillä läjitysalueilla havaittuun huomioon, että pyriitin hapettuminen aiheuttaa ”itsetiivistymisen” eli hapettumistuotteista muodostuu eristävä kerros. Tiivistymisen tehokkuudesta sen sijaan ei voida kuin antaa arvio. Huuhtoutumiskerrointa ei yleensä käytetä hienorakeiselle ainekselle, mutta tässä se katsottiin tarpeelliseksi johtuen veden luontaisesta taipumuksesta muodostaa kanavia, joita pitkin se pääsääntöisesti virtaa ja siitä, että pyriittirikaste on hyvin kuivaa verrattuna tyypilliseen kuivaläjätykseen (jossa huokostilan kosteus on usein >75 %). Lisäksi prosessivesi huuhtoo vain aktiivisella alueella olevaan rikastetta. Huuhtoutumiskertoimena käytettiin arvoa 0,25. Tämä on suoraan verrannollinen kuormiin eli kertoimen käyttö pienentää kuormat neljännekseen.

6.2.3 Sivukiven läjitysalueen suotovesilaadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet

Mallinnuksen toteutuksen aikana kosteuskammiokokeiden tuloksia oli käytettävissä 28 viikon ajalta. Jakson pituus katsottiin olevan nykyisen sivukivialueen suotoveden arvioimiseen riittävä, sillä sivukivialue on ollut vasta 4 vuotta toiminnassa ja aluetta ollaan nyt tyhjentämässä sivukivistä. Sivukivialueelle läjitettyjä sivukiviä käytetään maanalaisen kaivoksen täyttöön.

Sotkamo Silverin kaivosalueella muodostuvia sivukiviä ei ole ryhmitelty kivilajeittain tai litologioittain. Sivukivinäytteitä on otettu useita, ja niistä kosteuskammiokokeissa on parhaillaan kolme avolouhoksesta otettua näytettä ja kaksi maanalaisesta kaivoksesta otettua näytettä. Sivukivialueelle on läjitetty pääosin avolouhoksesta louhittuja kiviä, ja siksi mallinnuksessa käytettiin syötteenä vain avolouhoksen kivien kosteuskammiokokeiden tuloksia. Tuloksista otettiin kolmen näytteen keskiarvot, joiden arvioidaan edustavan parhaiten sivukivialueelle läjitettyjä sivukiviä.

Sivukivialueen mallinnetun suotovesilaadun osalta on huomioitavaa, että sivukivialue on pieni ja vesiä muodostuu alueella vähän, minkä lisäksi sivukivialueella on tässä vaiheessa enää vain vähän sivukiveä ja määrä on pienenemässä. Sivukivialueen muodostamalla kuormituksella on vähäinen merkitys kaivoksen kaivannaisjätealueiden kuormituksen kokonaislaskennassa.

6.2.4 Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvesien laadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet

Avolouhoksen kuivatusvedenlaadun mallinnuksessa hyödynnettiin samaa kosteuskammiokokeiden aineistoa kuin sivukivialueiden mallinnuksessa, sillä seinämäkivinä ei ole missään vaiheessa kiviä, joita ei esiintyisi myös sivukivinä. Kosteuskammiokokeisiin liittyviä epävarmuuksia on käsitelty edellisessä kappaleessa 6.2.2.

Näytteiden valinnan lisäksi mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa erityisesti reaktiivinen massa. Reaktiivinen massa muodostuu räjäytysten seurauksena rakoilleesta kallioperästä sekä hienoaineksen määrästä (mm. raoissa ja louhoksen penkereillä) ja huuhtoutuvasta osuudesta. Louhosseinämään syntyvän rikkonaisuusvyöhykkeen laajuus ja muodostuvan hienoaineksen määrä riippuu pääosin räjäytys suunnitelmasta (mm. porattujen räjäytysreikien geometria, räjähdysaine ja sen määrä) ja kiven ominaisuuksista (Gazdek et al. 2017). Huuhtoutuvan aineksen määrään puolestaan vaikuttaa seinämien kaltevuus (avolouhos), rakoilun geometria ja louhoksen ympäristön hydrogeologiset olosuhteet. Reaktiivisen massan määrittämiseen käytettiin kertoimia, jotka on verifioitu toteutuneissa kohteissa ja joita pyrittiin hienosäätämään kohdealueeseen sopivaksi, mutta mainittujen massa vaikuttavien tekijöiden määrä huomioon ottaen kertoimien valintaan liittyä väistämättä epävarmuuksia.

Maanalaisessa kaivokseen vettä tulee louhosseinämien raoista ja osittain ylemmiltä tasoilta tunneliteiden reunaojituksia pitkin. On siis oletettavaa, että kaivostäytöt eivät huuhtoudu yhtä suurelta osin kuin maanpäällisellä sivukivikasalla tai rikastushiekka-altaalla, jossa sadanta jakautuu tasaisesti koko läjitysalueelle. Mallinnuksessa 2 % kaivostäytöstä oletettiin huuhtoutuvaksi (vrt. sivukivialueella 20 %). Käytetty kerroin ei perustu kirjallisuuteen vaan oli paikkakohtaisesti harkittu, ja sen valintaan liittyy väistämättä epävarmuuksia.



7 Syötetiedot ja oletukset

Alla olevissa kappaleissa on esitetty kunkin läjitysalueen sekä louhosten suotovesilaadun mallintamisessa käytetyt lähtötiedot. Lämpötila- ja sadantatietona on käytetty havaintoaseman Sotkamo Kuolaniemi keskimääräisiä arvoja vuosina 2010–2022 (Ilmatieteenlaitos 2023).

7.1 Rikastushiekka-altaan syötetiedot ja oletukset

Rikastushiekka-altaan dekantti- ja suotoveden geokemiallisessa mallinnuksessa käytetyt lähtötiedot ja oletukset annetaan taulukossa 7-1. Tasapainomallinnuksen oletukset esitetään kappaleessa 7.5.

Taulukko 7-1. Rikastushiekka-altaiden vedenlaatumallinnuksessa käytetyt oletukset ja lähtötiedot.

Muuttujat	Lähtötiedot, oletukset
Kosteuskammiokokeet	Rikastushiekkanäyte, ka viikot 0–28
Hapettuvan pintaosan paksuus	0,5 m
Nettosadanta	331 mm/a
Vuotuinen keskilämpötila	2,6°C
Raekokomuunnoskerroin	1
Lämpötilamuunnoskerroin	0,21 (Arrheniuksen yhtälö)
Läjitetyn rikastushiekkan kosteus	20 %
Prosessiveden koostumus	S2-altaan tarkkailutulokset (prosessivesiallas)
Nykyinen rikastushiekka-allas	
Pinta-ala	20 ha
Talteenottamattomissa oleva suotovesi	97 m ³ /vrk
Prosessivettä huokosvedestä, Vaihe 1	94 %
Rikastushiekka-altaan laajennus	
Pinta-ala	30 ha
Talteenottamaton suotovesi	134 m ³ /vrk
Prosessivettä huokosvedestä, Vaihe 1	92 %

7.2 Pyriittialtaan syötetiedot ja oletukset

Taulukossa 7-2 esitetään pyriittialtaan mallinnuksessa käytetyt oletukset ja lähtötiedot. Tuotannon mahdollisen laajentumisen aiheuttamat muutokset lähtötietoihin osoitetaan hakasuluissa []. Lämpötila- ja sadantatietona on käytetty havaintoaseman Sotkamo Kuolaniemi keskimääräisiä arvoja vuosina 2010–2022 (Ilmatieteenlaitos 2023).

Taulukko 7-2. Pyriittialtaan suotovedenlaatumallinnuksessa käytetyt lähtötiedot ja oletukset.

Muuttujat	Lähtötiedot, oletukset
Pyriittirikasteen allas	
Kosteuskammiokokeet	Pyriittirikasteenäyte, ka viikolta 0–28
Rikasteen kosteus (käytetään huokostilavuuden kyllästyneisyytenä)	15 %
Hapen diffuusiokerroin	6,4*10 ⁻⁶



Muuttujat	Lähtötiedot, oletukset
Pyriittirikasteen allas	
Hapettuvan pintaosan paksuus	30 cm (O ₂ tunkeutumissyvyysmallista)
Pinta-ala	1 ha [1,75 ha, josta 1,49 ha rikastushiekkaa]
Nettosadanta	311 mm/vuosi
Haihdunta	50 %
Kokonaissuotauma	5 757 m ³ /vuosi [9 854 m ³ /vuosi]
Vuotuinen keskilämpötila	2,6 °C
Raekokomuunnoskerroin	1
Lämpötilamuunnoskerroin	0,3 (Arrheniuksen yhtälö, lisälämpöä pyriitin hapettumisesta)
Läjäityksen määrä (kuiva)	15 000 tonnia/vuosi [25 000 t/v]
Läjäityksen mukana tuleva prosessivesimäärä	2 647 m ³ /vuosi [4412]
Karkaava suotoveden määrä	0,5 mm/vuosi eli 5,0 m ³ /vuosi [8,8 m ³ /v]
Huuhoutumiskerroin	0,25
Tiheys	2 500 kg/m ³
Hapettava "aktiivisen läjäityksen" leveys poikittain läjäityksen etenemisen suuntaa	80 m [100 m]
Hapettava "aktiivisen läjäityksen" pituus läjäityksen etenemisen suunnassa	10 m
Hapettava "aktiivisen läjäityksen" rinteen pituus	17 m
Hapettava "passiivisen läjäityksen" pinta-ala	90 % altaan kokonaispinta-alasta
Passiivisen alueen kuorma verrattuna aktiiviseen alueeseen	10 %

7.3 Sivukiven läjitysalueiden syötetiedot ja oletukset

Sivukivialueiden mallinnuksessa käytetyt syötetiedot ja oletukset on esitetty taulukossa 7-3.

Taulukko 7-3. Sivukiven läjitysalueiden vesilaadun mallinnuksessa käytetyt syötetiedot ja skaalausoletukset.

Parametri	Syötetieto tai oletus
Säätietojen vuotuiset keskiarvot	
Sadanta	622 mm/vuosi
Nettosadanta	331 mm/vuosi
Vuotuinen keskilämpötila	2,6°C
Skaalauskerroimet	
Lämpötilakerroin	0,21 (Arrheniuksen yhtälön mukaan)
Raekokerroin	0,2
Huuhoutumiskerroin	0,2
Pinta-ala	2,5 ha
Vuotuinen ulosvirtaama	7775 m ³ /vuosi
Kokonaismassa	0,15 Mt
Tyypillisä (Sjölund 1997)	



Parametri	Syötetieto tai oletus
Räjähdysaineista peräisin oleva NH ₄ -lisä	2,7 g/tn
Räjähdysaineista peräisin oleva NO ₃ -lisä	2 g/tn

7.4 Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen syötetiedot ja oletukset

Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusveden mallinnuksessa käytetyt syötetiedot ja oletukset on esitetty taulukossa 7-4.

Taulukko 7-4. Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvesilaadun mallinnuksessa käytetyt syötetiedot ja skaalausoletukset.

Parametri	Syötetieto tai oletus
Skaalaus	
Lämpötilakerroin	0,32 (Arrheniuksen yhtälön mukaan)
Raekokokeroin, kaivostäyttö	0,2
Huuhtoutumiskerroin, kaivostäyttö	0,02
Erittäin rakoillut vyöhyke	0,9
Raekokokeroin	0,2
Huuhtoutumiskerroin	0,75
Rakoillut vyöhyke	2,9
Raekokokeroin	0,05
Huuhtoutumiskerroin	0,5
Avolouhos	
Pinta-ala	11,35 ha
Nettosadanta	331 mm/vuosi
Vuotuinen keskilämpötila	2,6°C (Ilmatieteenlaitos 2023)
Muodostuva vesimäärä (sis. sadannan)	126 830 m ³ /vuosi
Louhosseinämän 3D pinta-ala	79 500 m ²
Reaktiivinen massa	0,45 Mt
Maanalainen kaivos	
Syvyys	1 km
Vuotuinen keskilämpötila maanalaisessa kaivoksessa	~7°C
Reaktiivinen massa, maksimisyyvyys	~460 m (taso -250 m mpy)
Muodostuva vesimäärä (sis. sadannan)	406 500 m ³ /vuosi
Kuivatusvesi vuodessa (sis. avolouhoksen vedet)	533 300 m ³ /vuosi
Louhosseinämän pinta-ala	444 400 m ²
Kokonaismassa, raakku	4,5 Mt
Kokonaismassa, raakku (yhdistelmätäyttö)	2,4 Mt
Kokonaismassa, rikastushiekka (yhdistelmätäyttö)	1,6 Mt

7.5 Geokemiallinen tasapainomallinnus

Geokemiallisessa tasapainomallinnuksessa kuvataan tutkittavan liuoksen koostumusta aineiden tasapainovakioiden eli liukenemisen ja saostumisen sekä sorption avulla. Mallinnustulokseen vaikuttaa merkittävästi käytettävän termodynaamisen ja kineettisen vertailukirjaston laajuus, johon tutkittavan liuoksen komponentteja verrataan.

Tässä työssä käytettiin Geochemist's Workbench -mallinnusohjelman versiota 15.0. Mallinnuksessa käytettiin seuraavia oletuksia:

- 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, $C=2,0 \text{ F/m}^2$.
- 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.
- HCO_3 :n pitoisuuden sallitaan muuttua ionitasapainon ylläpitämiseksi. Lähtötietojen ionitasapainovirhe oli korkeimmillaan n. 5 % ennen tasapainomallinnusta.

8 Viitteet

- AFRY Finland Oy 2024. Sotkamo Silver Oy - Sotkamon kaivoksen numeerinen pohjavesimalli. Luonnosversio. 8.1.2024.
- Armstrong, W. 1979. Aeration in higher plants. *Advances in Botanical Research* 7. 325.
- Aubertin, M., Bussière, B. Monzon, M., Joanes, A.-M., Gagnon, D., Barbera, J.-M., Aachib, M., Bédard, C. Chapuis, R.P., and Bernier, L. 1999. Étude sur les barrières sèches construites à partir des résidus miniers. – Phase II : Essais en place. Rapport de recherche Projet CDT P1899. Rapport NEDEM/MEND 2.22.2c, 331 pages.
- Aubertin, M., Aachib M, and Authier, K. 2000b. Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. *Geotextiles and Geomebranes*, 18: 1-19.
- 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.
- Elberling B. 2005. Temperature and oxygen control on pyrite oxidation in frozen mine tailings. *Cold Regions Science and Technology* 41, 121–133
- Geochemic Ltd 2023. ASTM D 5744-18 Humidity Cell Testing. Sotkamo Silver Static and Kinetic Testing. Issue 4. 1.11.2023.
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of Soils Physics*. Academic Press, New York.
- Ilmatieteenlaitos 2023. Havaintojen lataus. Sivulla vierailtu syyskuu 2023. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- MacKay, P.L. 1997. Evaluation of Oxygen Diffusion In Unsaturated Soils. Masters Thesis. University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M, Aachib, M., and Bussiére, B. 2002. Oxygen Diffusion and Consumption in Unsaturated Cover Materials. Report EPM-RT-2002-04 prepared by the École Polytechnique de Montréal
- MEND 1997. Short course for prediction models for acid rock drainage. 4th International conference on acid rock drainage. Vancouver 1997.
- MEND 2006. Update on Cold Temperature Effects on Geochemical Weathering. Report prepared by SRK Consulting. MEND Report 1.61.6
- Price, W. 2009. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geological Materials. MEND Report 1.20.1
- Rowe, K, Joshi, P, Brachman, M & McLeod, H, 2017. Leakage through Holes in Geomembranes below Saturated Tailings
- Sanchidrian J. ja Singh A. (Ed.) 2012. Measurement and Analysis of Blast Fragmentation. CRC Press 2012.
- Sjölund G. 1997. Kväveläckage från sprängtesmassor. Examensarbete. Luleå Tekniska Universitet. Institutionen för Samhällsbyggnadsteknik.



Sotkamo Silver Oy

Sulkemisen jälkeiset vedenlaadut Sotkamo Silverin
kaivannaisjätteiden läjitysalueilla ja louhosjärvessä.

8.4.2024

Projektinnumero/Dokumentti ID: 101022809-001



Sisältö

1	Johdanto.....	5
1.1	Työn sisältö	5
1.2	Vedenlaatuojen arviointimenetelmien kuvaus	6
2	Rikastushiekka-altaat	7
2.1	Rikastushiekkan ominaisuudet.....	7
2.2	Rikastushiekka-altaiden mallinnuksessa käytetyt kemialliset syötetiedot ...	8
2.2.1	Prosessiveden laatu.....	8
2.2.2	Kosteuskammiookeen tulokset.....	9
2.3	Rikastushiekka-altaiden konseptualisointi.....	10
2.4	Rikastushiekka-altaiden vedenlaadut.....	11
2.5	Suotoveden määrä rikastushiekka-alueella.....	13
3	Pyriittiallas	14
3.1	Pyriittirikasteen ominaisuudet	14
3.2	Pyriittirikasteen määrä.....	15
3.3	Pyriittialtaan mallinnuksessa käytetyt kemialliset syötetiedot	15
3.3.1	Pyriittinäytteen kosteuskammiookeen tulokset.....	15
3.4	Pyriittialtaan konseptualisointi.....	19
3.5	Pyriittialtaan suotoveden laatu	21
3.5.1	Hapenkulutus pyriittirikasteessa	21
3.5.2	Geokemiallinen malli.....	22
3.5.3	Pyriittialtaan suotoveden mitattu koostumus.....	24
4	Louhosjärvi.....	25
4.1	Seinämien karakterisointi.....	25
4.2	Kosteuskammiookeiden tulokset	26
4.3	Pohjaveden laatu	27
4.4	Konseptualisointi	28
4.5	Louhosjärven vedenlaatu	29
5	Sulkemisen jälkeinen kuormitus.....	31
6	Herkkydet ja epävarmuudet.....	35
6.1	Herkkydet.....	35
6.2	Epävarmuudet.....	35
6.2.1	Rikastushiekka-altaan suotovesiin liittyvät epävarmuudet	35
6.2.2	Pyriittialtaan vedenlaadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet ..	36
6.2.3	Louhosjärven vedenlaadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet ..	37



6.3	Ilmastonmuutos	38
7	Syötetiedot ja oletukset.....	39
7.1	Rikastushiekka-altaan syötetiedot ja oletukset.....	39
7.2	Pyriittialtaan syötetiedot ja oletukset.....	39
7.3	Louhosjärven syötetiedot ja oletukset	40
7.4	Geokemiallinen tasapainomallinnus.....	41
8	Viitteet	42



TERMI	SELITE
ABA-testi	<i>acid base accounting test</i> - hapon ja emäksen tasapainon laskentamenetelmä, jossa hapontuottopotentiaali lasketaan kokonais- ja sulfidirikistä ja neutraloimispotentiaali karbonaattihiilen pitoisuudesta
AP	Hapontuottopotentiaali
C	Hiili
C _{carb.}	Karbonaattisessa (CO ₃) muodossa oleva hiili
C _{non-carb.}	Muu kuin karbonaattinen hiili
kineettinen testaus	kaivannaisjätteen pitkäaikaiskäyttämistä tutkiva koe, jolla mineraalien luonnolliset reaktiot mahdollistuvat, voi kestää kuukausia tai vuosia.
konseptualisointi	käsitteellistäminen, vuorovaikutusten, reaktioiden tai virtausten kuvaaminen -ei-numeerisesti
Kosteuskammiokoe	<i>Humidity cell test</i> , koe, jolla selvitetään kaivannaisjätteen (tai louhosseinämän) pitkäaikaiskäyttämistä, kokeessa syötetään näytteeseen useiden kuukausien ajan tehostetusti ilmaa ja huuhdotaan ilmasyöttöjen välissä
NAF	<i>non acid forming</i> - ei happoa tuottava
NP	Neutralointipotentiaali
NPR	Neutralointi- ja hapontuottopotentiaalisuhde, NPR=NP/AP
PAF	potentially acid forming - happoa tuottava
skaalauskerroin	kerroin, jonka avulla skaalataan laboratorioanalyysien tuloksia vastaamaan kenttäolosuhteita (esimerkiksi raekoon tai lämpötilan korjauskerroin)
staattinen testaus	analyysi, joka voidaan tehdä suhteellisen nopeasti (esim. alkuaineanalyysi, ABA-koe, NAG-testi, ravistelutesti)
sulfidinen rikki (S _{sulf})	se osuus rikistä, joka esiintyy osana sulfidimineraaleja
suotovesi	kaivannaisjätteen läjitysalueelta poistuva/tihkuva ylimääräinen vesi, joka on ollut kontaktissa kaivannaisjätteen kanssa
ylitevesi	allasmaisen kaivannaisjätealueen päältä tai vesialtaalta pumpattava poistovesi (suotovesimallinnuksessa)

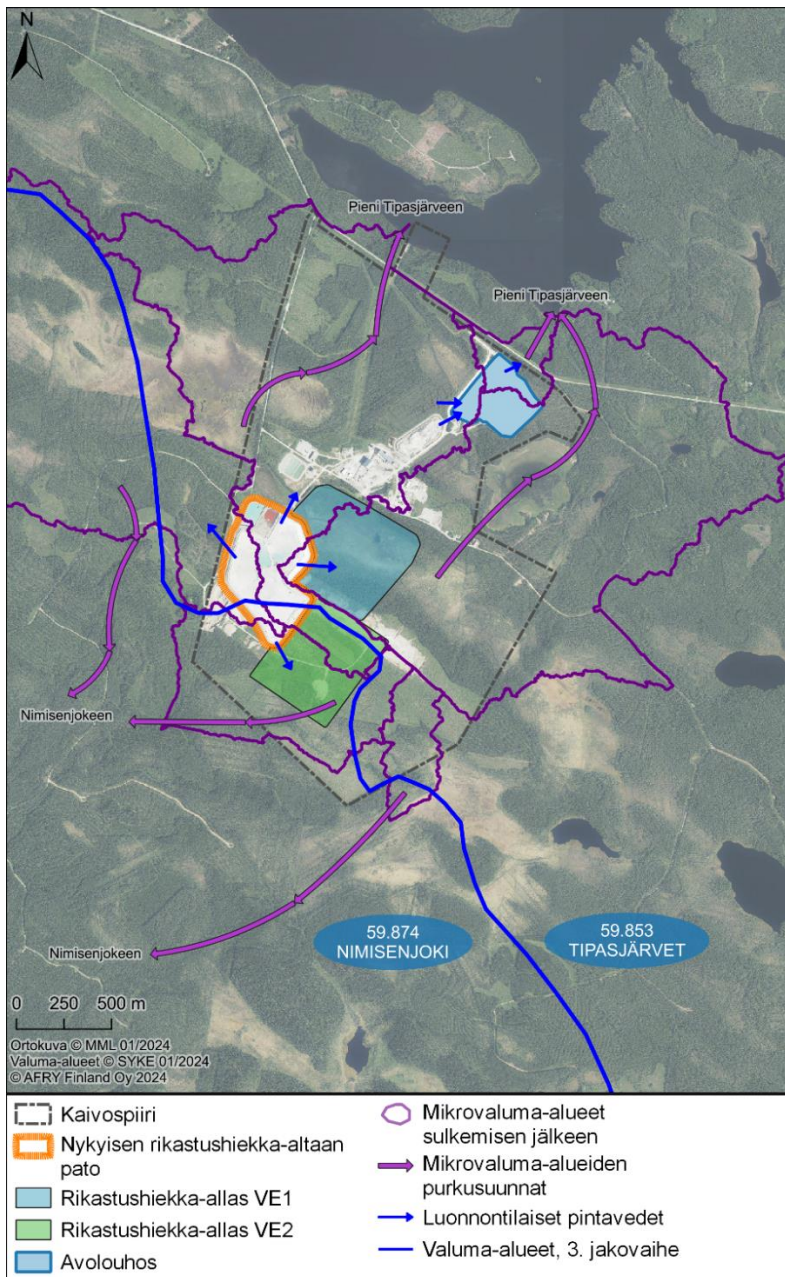


1 Johdanto

1.1 Työn sisältö

Tämä raportti on AFRY Finland Oy:n laatima ja käsittelee Sotkamo Silver Oy:n kaivosalueen sulkemisen jälkeisten vesijakeiden laatuja. Lisäksi raportissa kuvataan vedenlaatujen arviointimenetelmät.

Vedenlaatuarviot toteutettiin osana rikastushiekka-altaan laajennuksen ympäristövaikutusten arviointiin liittyviä ympäristöselvityksiä. Kaivannaisjätteen läjitysalueiden ja avolouhoksen sijainti on esitetty kuvassa 1-1. Osakohteiden vedenlaatujen arvioinnissa louhoksia ja kaivannaisjätealueita on tarkasteltu niiden laajimmassa mittakaavassa.



Kuva 1-1. Kaivosalueelle jäävät kaivannaisjätealueet (nykyinen rikastushiekka-allas ja rikastushiekka-altaan laajennus) sekä avolouhos (louhosjärvi) sulkemisen jälkeen. Nykyisen rikastushiekka-altaan padon sisäpuolelle pohjoisosassa jää myös pyriittiallas ja selkeytysallas 3.

1.2 Vedenlaatujen arviointimenetelmien kuvaus

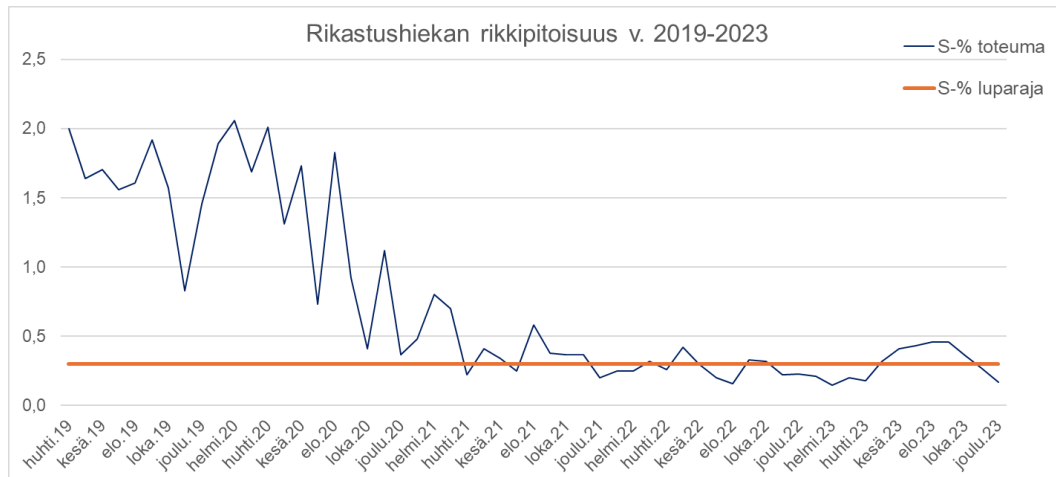
Osakohteiden vedenlaatujen arvioinnin lähtökohtana käytettiin kunkin jätejakeen määrää, jätealueen dimensioita, paikallista vuotuista nettosadantaa sekä kosteuskammiokokeen tuloksia. Jotta laboratorio-olosuhteissa tehtyjen kokeiden tuloksia voitaisiin soveltaa kenttäolosuhteisiin, on laboratoriotulokset muunnettava kenttäolosuhteita vastaaviksi. Tärkeimpiä huomioonotettavia tekijöitä ovat mm. lämpötilan vaikutus reaktionopeuteen (MEND, 2006), raekoko (Sanchidrian ja Singh, 2012) sekä sivukiviläjäytyksissä myös veden kanavoituminen (MEND, 1997). Louhosseinämien vaikutuksen arvioinnissa sovellettiin vaurioituneen seinämän periaatetta. Louhosseinämille oletetaan tietyn paksuinen rakoillut ja hienoainesta sisältävä vyöhyke, joka huomioidaan arvioinnissa reaktiivisena massana. Rikastusjätteiden osalta huomioitiin myös prosessiveden vaikutus muodostuvien vesijakeiden laatuun niiltä osin, kuin prosessivettä on sulkemisvaiheessa jäljellä läjäytyksissä.

Osa rapautumistuotteista jää kaivosveteen ja osa saostuu sekundäärimineraaleina ja/tai pidättyy louhoksessa sorption kautta. Pidättyneitä aineita myös uudelleenliukenee. Muodostuvien vesiliuosten koostumusta arvioitiin geokemiallisen tasapainomallinnuksen avulla. Geokemiallisessa tasapainomallinnuksessa kuvataan tutkittavan liuoksen koostumusta aineiden tasapainovakioiden eli liukenemisen ja saostumisen sekä sorption avulla. Tasapainomallintamiseen käytettiin Geochemist's Workbench (GWB) -ohjelmaa.

2 Rikastushiekka-altaat

2.1 Rikastushiekan ominaisuudet

Rikastushiekka-altaan laajennuksen alueelle läjitettävän rikastushiekan oletetaan vastaavan ominaisuuksiltaan nykyisessä toiminnassa muodostuvaa rikastushiekkaa. Rikastushiekan ominaisuuksia on tutkittu v. 2019–2023. Vuosina 2019–2020 rikastusprosessissa syntyneen rikastushiekan rikkipitoisuus oli vielä huomattavasti nykyistä rikkipitoisuuden rajaa ($S = 0,3 \%$) korkeampi. Rikastushiekan rikkipitoisuus v. 2019–2023 on esitetty kuvassa 2-1.



Kuva 2-1. Rikastushiekan rikkipitoisuus v. 2019–2023.

Rikastushiekasta v. 2021–2023 määritetyt kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet on esitetty taulukossa 2-1. Sinkin pitoisuus on ylittänyt PIMA-asetuksen (VNa 214/2007) mukaisen ylemmän ohjearvon vuosina 2022 ja 2023. Arseenin, lyijyn ja antimonin pitoisuudet ylittävät alemman ohjearvon, minkä lisäksi kadmiumin pitoisuudet ylittävät kynnysarvon.

Taulukko 2-1. Vuosien 2020–2023 rikastushiekanäytteiden kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet. Vuoden 2020–2022 näytteistä on esitetty keskiarvo (n = näytemäärä).

	Metallit										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Määrittysraja	1	0,01	0,1	1	0,5	0,01	1	0,2	0,05	1	1
Taustapitoisuus	0	0	4,7	20	13	0	13	0	0	19	17
Kynnysarvo	5	1	20	100	100	0,5	50	60	2	100	200
Alempi ohjearvo	50	10	100	200	150	2	100	200	10	150	250
Ylempi ohjearvo	100	20	250	300	200	5	150	750	50	250	400
2020 (n=2)	110	2,4	2,1	15	41	0,06	4,5	460	20	2	680
2021 (n=2)	75	1,1	0,3	4	19	<0,05	3	250	13	1	380
2022 (n=3)	60	2,1	0,7	4,5	21	<0,05	3	290	13	1,7	560
2023 (n=4)	67	1,7	0,8	6,8	19	0,04	3	313	13	1,1	440
RH_1_2023	33	3	0,56	6,4	20	0,021	3,2	510	17	1,5	630
RH_4_2023	92	1,9	0,64	6	15	0,015	2,4	250	11	0,9	450
RH_7_2023	61	1,1	1,2	8,8	19	0,1	3,6	290	11	1,2	440
RH_10_2023	80	0,99	0,71	6,8	22	0,01	2,6	200	13	0,71	240



Rikastushiekan ABA-testin tulokset on esitetty taulukossa 2-2. Rikastushiekka ei tulosten perusteella ole happoa muodostavaa. Lisäksi sulfidisen rikin pitoisuus sekä NPR täyttävät kaivannaisjäteasetuksessa (VNa 190/2013) liitteen 1 kohdassa 2b) esitetyt pysyvän jätteen kriteerit ($0,1 \% < S(\text{sulf.}) < 1 \%$, $\text{NPR} > 3$).

Taulukko 2-2. Rikastushiekan ABA-testin tulokset. Vuoden 2021-2023 tuloksista on esitetty keskiarvo ($n = \text{näytemäärä}$).

Rikastushiekka	S _{kok}	S _{sulf}	S _{sulf} /S _{kok}	AP	NP	NPR
Määrittäysraja	0,005	0,01			0,5	
Vuosi/kk	%	%	%	kg CaCO ₃ / tn	kg CaCO ₃ / tn	
v. 2021 (n=6)	0,37	0,31	0,81	9,6	57	6,8
v. 2022 (n=12)	0,25	0,21	0,80	6,5	47	8,9
v. 2023 (n=5)	0,28	0,21	0,65	9,0	51	7,5
Maksimi	0,65	0,61	1,09	19	68	22
Minimi	0,15	0,07	0,47	2,2	40	2,7

2.2 Rikastushiekka-altaiden mallinnuksessa käytetyt kemialliset syötetiedot

Rikastushiekka-altaan veden koostumukseen vaikuttaa rikastushiekan rapautumistuotteiden lisäksi rikastushiekan mukana tulevan prosessiveden koostumus. Rikastushiekka-altaan vesi koostuu mallinnuksessa siis kahdesta osatekijästä: rikastushiekan rapautumistuotteista (kosteuskammiokokeen tulokset) ja rikastusprosessissa veteen vapautuvista aineista (rikastuksen prosessivesi). Toiminnan loputtua rikastushiekka-altaalla oleva prosessivesi korvautuu vähitellen sadevedellä. Tämän vuoksi rikastushiekka-altaalle on arvioitu kaksi sulkemisen jälkeistä suotovedenlaatua: toinen kuvaa tilannetta juuri sulkemisen jälkeen, kun prosessivettä on vielä altaalla (Vaihe 1), ja toinen tilannetta prosessiveden korvautumisen jälkeen ns. pitkällä aikavälillä (Vaihe 2).

2.2.1 Prosessiveden laatu

Prosessiveden koostumus on esitetty taulukossa 2-3. Koostumus on keskiarvo selkeytysaltaalta S2 mitatuista pitoisuuksista siltä ajalta, kun rikastushiekan rikkipitoisuuden raja ($S < 0,3 \%$) on saavutettu (v. 2022–2023).

Prosessivesi käsittää toiminnan aikana n. 93 tilavuus-% rikastushiekka-altaalle tulevasta vedestä, eli prosessiveden ja sadeveden kokonaismäärästä.

Taulukko 2-3. Prosessiveden koostumus pyriittialtaan sulkemisen jälkeisen, lyhyen aikavälin suotovesimallinnuksessa. Tulokset ovat selkeytysaltaalta S2 mitattujen pitoisuuksien keskiarvoja (kk välein mitattuna 1.2022–9.2023).

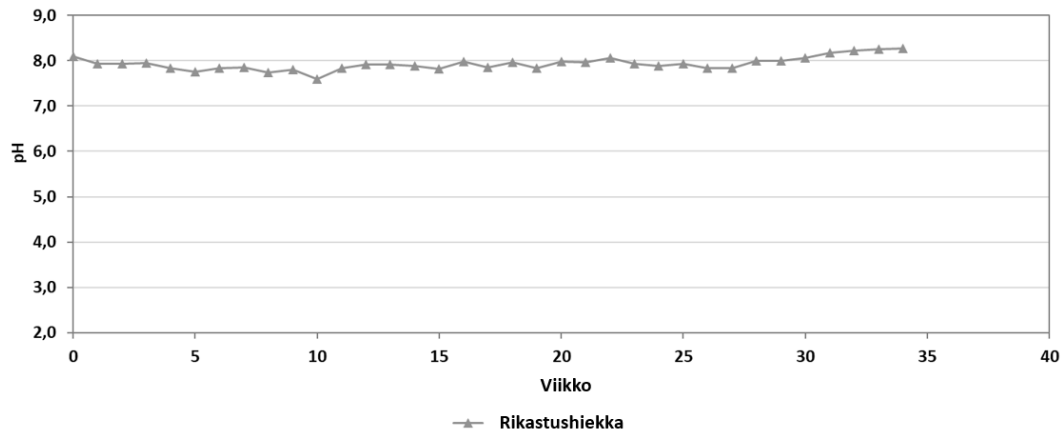
Suure	Yksikkö	Pitoisuus	Suure	Yksikkö	Pitoisuus
pH		9,2	Mg	mg/l	5,2
Ag	µg/l	1	Mn	µg/l	520
Al	µg/l	290	Na	mg/l	50
As	µg/l	28	Ni	µg/l	7,8
Ca	mg/l	310	P	µg/l	610
Cd	µg/l	0,74	Pb	µg/l	8
Cl	mg/l	69	Sb	µg/l	220
Co	µg/l	4,6	Th	µg/l	0,54
Cr	µg/l	0,5	U	µg/l	0,74



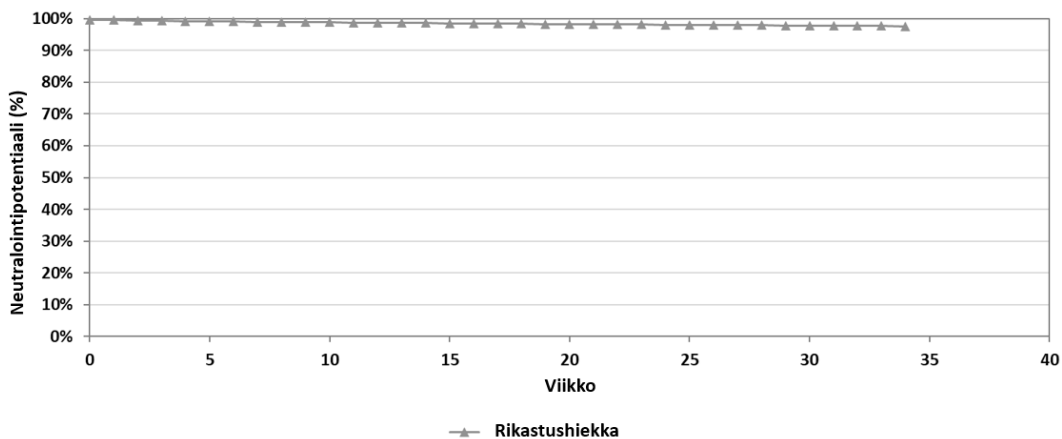
Suure	Yksikkö	Pitoisuus	Suure	Yksikkö	Pitoisuus
Cu	µg/l	3	Zn	µg/l	320
Fe	µg/l	290	SO ₄	mg/l	730
Hg	µg/l	0,08	NO ₃ +NO ₂ (N)	mg/l	30
K	mg/l	110	NH ₄ (N)	mg/l	13

2.2.2 Kosteuskammiokokeen tulokset

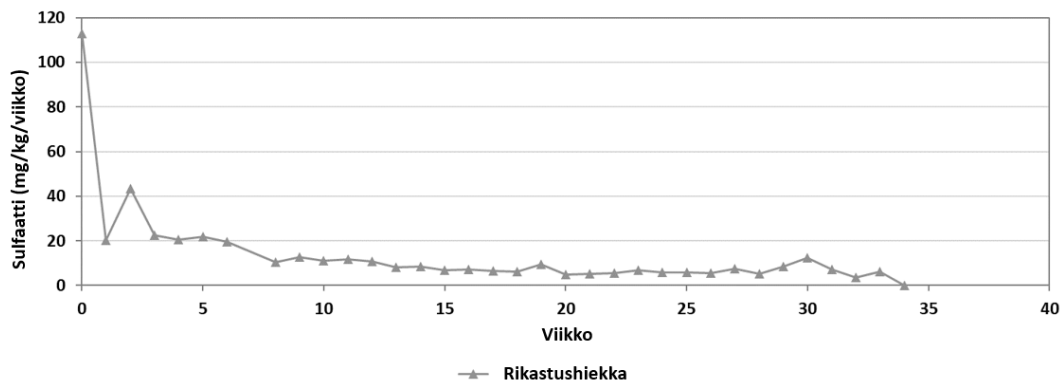
Kosteuskammiokokeet on aloitettu maaliskuussa 2023 ja tuloksia oli mallinnuksen aikaan saatavilla 34 viikon ajalta kemiallisten parametrien ja anionien osalta ja 28 viikon ajalta hivenaineiden osalta. Sulkemisen jälkeisen rikastushiekka-altaan vedenlaatuja mallinnuksessa käytettiin viikkojen 5–28 tuloksia. Kosteuskammiokokeissa rikastushiekkanäytteen viikkoliuoksen pH on pysynyt neutraalina (pH 7,6–8,1) kokeen ensimmäisen 34 viikon ajan (Kuva 2-2) ja neutralointipotentiaalia on 34 viikon kohdalla jäljellä 98 % (Kuva 2-3). Myös sulfaatin muodostus on ollut ensimmäisten viikkojen hapettumispiikin jälkeen vähäistä (Kuva 2-4).



Kuva 2-2. pH:n kehittyminen rikastushiekkanäytteen viikkoliuoksessa (Geochemic Ltd 2023).



Kuva 2-3. Jäljellä oleva neutralointipotentiaali rikastushiekkanäytteen viikkoliuoksessa (Geochemic Ltd 2023).



Kuva 2-4. Sulfaatin muodostus rikastushiekan kosteuskammiokokeissa (Geochemic Ltd 2023).

2.3 Rikastushiekka-altaiden konseptualisointi

Rikastushiekka-altaan vedenlaatu mallinnettiin nykyiselle rikastushiekka-altaalle ja rikastushiekka-altaan laajennukselle. Rikastushiekka-altaan laajennukselle on YVA-menettelyssä tarkasteltu kahta vaihtoehtoista sijaintia, jotka on esitetty kuvassa 1-1. Mallinnus toteutettiin vaihtoehdolle VE1 eli laajennuksen sijoittuessa Hanhipetäikön pohjoispuolelle. Hankevaihtoehdon VE2 mukaista tilannetta, jossa rikastushiekka-allas sijoittuu Hanhipetäikön eteläpuolelle, ei ole mallinnettu erikseen, koska vedenlaatuun keskeisesti vaikuttavat tekijät eivät eroa merkittävästi toisistaan. Hankevaihtoehdon VE2 vedenlaatuun liittyviä epävarmuuksia on avattu kappaleessa 6.2.1.

Mallinnetussa skenaariossa rikastushiekka-altaat ovat lopullisessa lakikorkeudessaan (+ 234 m mpy). Rikastushiekassa on vain vähän sulfidimineraaleja, mutta vähäistä sulfidien hapettumista tapahtuu pääasiassa rikastushiekka-altaan vedellä kyllästymättömissä osissa altaan pintakerroksissa. Reaktiivisen massan määritelmä on erilainen eri yhdisteille. Sulfidisidonnaisille aineille pintaosan hapettumiselle altis kerros on reaktiivinen massa, ja muille aineille pintaosan hapettumiselle altis kerros ja sen alapuolinen vuorovaikutuskerros yhdessä muodostavat reaktiivisen massan.

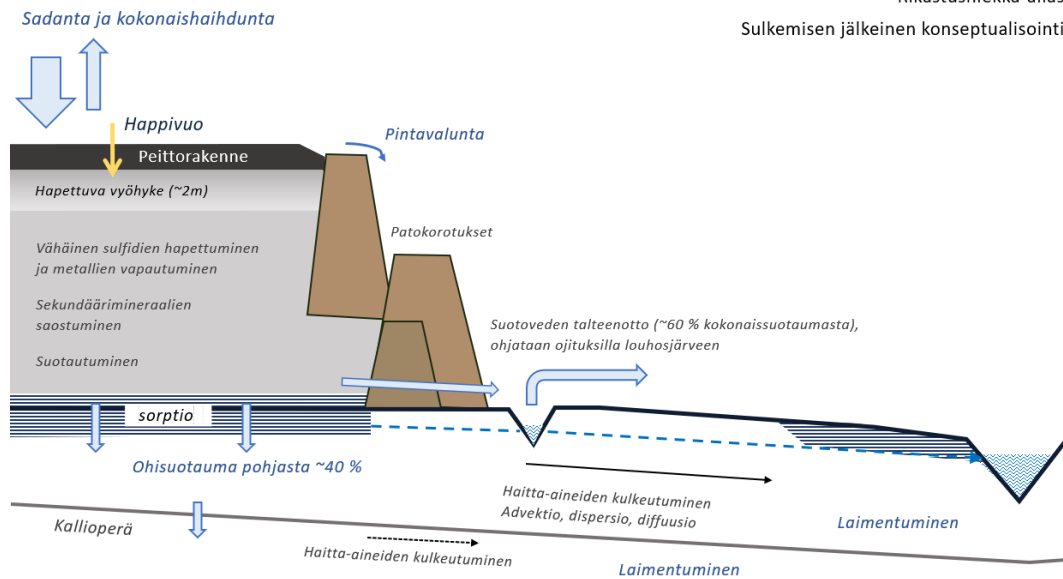
Rikastushiekka-altaalle on tuotettu kaksi erillistä sulkemisen jälkeistä suotovedenlaatua. Vaihe 1 eli rikastushiekka-altaan lyhyen aikavälin suotovedenlaadun malli kuvaa tilannetta, jossa dekanttiveden pumppaus altaalta on lopetettu, mutta prosessivesi ei ole vielä korvautunut sadevedellä. Rikastushiekka-altaan huokosveden laatu ko. tilanteessa perustuu prosessiveden jäänteisiin, sadeveteen ja rikastushiekan rapautumistuotteisiin.

Vaihe 2 eli rikastushiekka-altaan pitkän aikavälin suotovedenlaadun malli kuvaa sulkemisen jälkeistä suotovedenlaatua, kun prosessivesi on täysin korvautunut sadevedellä. Rikastushiekka-altaan huokosveden laatu ko. tilanteessa perustuu sadeveteen ja rikastushiekan rapautumistuotteisiin.

Altaan eri osissa veteen liuenneista ja liukenevista aineista saostuu sekundäärimineraaleja ja liuenneita aineita myös pidättyy altaalle sorption kautta. Rikastushiekkaan pidättyneitä aineita myös uudelleenliukenee. Yksinkertaistettu malli olettaa, että aineita vapautuu rikastushiekassa vuosittain saman verran kuin aineita poistuu altaalta suotovesien mukana.

Sulkemisen jälkeisen tilanteen konseptualisointi on esitetty kuvassa 2-5. Konseptualisointi kuvaa sekä nykyistä rikastushiekka-allasta, että rikastushiekka-altaan laajennusta. Mallinnukseen keskeisesti vaikuttavat tekijät ovat periaatteeltaan samoja molemmilla rikastushiekka-altailla, ainoastaan sijainti ja altaiden dimensiot ovat erilaisia.

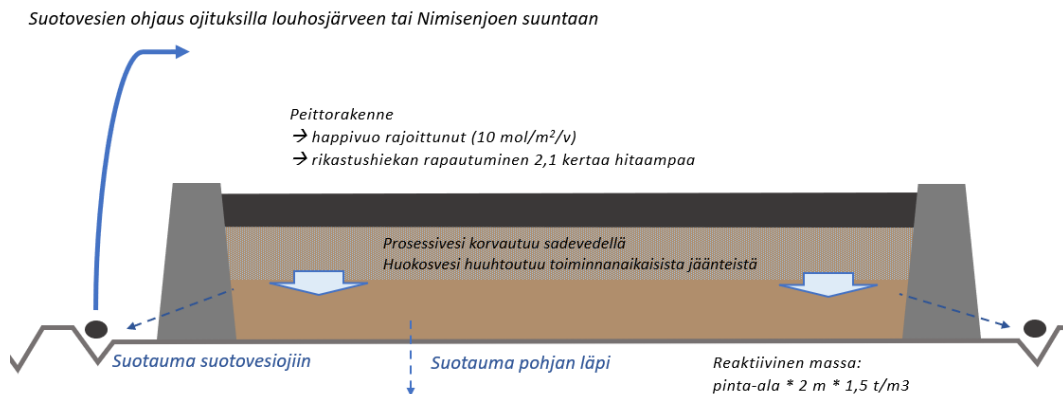
Rikastushiekka-allas
Sulkemisen jälkeinen konseptualisointi



Kuva 2-5. Rikastushiekka-aldaiden vesien sulkemisen jälkeinen konseptualisointi.

Rikastushiekka-aldaiden vesien laadut arvioitiin vesi/kiintoaine-suhteen skaalauksen sekä geokemiallisen tasapainomallituksen avulla sulkemisen jälkeiselle suotovedelle sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä (prosessiveden korvautuessa sadevedellä). Suotovedenlaadun mallinnuksen konseptualisointi on esitetty kuvassa 2-6.

Rikastushiekka-allas
Sulkemisen jälkeinen konseptualisointi



Kuva 2-6. Rikastushiekka-aldaiden suotovedenlaadun mallinnuksen konseptualisointi.

2.4 Rikastushiekka-aldaiden vedenlaadut

Mallinnetut suotovedenlaadut on esitetty taulukossa 2-4. Taulukoissa on lisäksi esitetty vertailuarvoja pohjaveden ympäristölaatuunormin (VNA 341/2009) ja talousvesiasetuksen (STM 1352/2015) mukaisesti. On tärkeä huomata, että tässä yhteydessä näitä ei voida käyttää raja-arvoina vaan vertailuarvoina; raja-arvot on määritetty kuvaamaan pohjaveden ja talousveden laatua, eivätkä siten ole suoraan sovellettavissa rikastushiekka-aldaan vesiin. Rikastushiekka-aldaan suotovesi ei ole myöskään sama asia kuin pitoisuus pohjavedessä. Rikastushiekkan ominaisuuksien ja korkean pH:n takia rikastushiekka-aldaan vedet ovat yleisesti ottaen laadultaan hyviä ympäristön näkökulmasta.



Mallinnuksen perusteella rikastushiekka-altaan sulkemisenjälkeiset suotovedenlaadut ovat emäksisiä (pH 8,3–9,1). Vaiheen 1 suotovedenlaaduissa on huomattavissa vielä prosessiveden jätteitä erityisesti hopean, sinkin, sulfaatin ja typpiyhdisteiden osalta. Prosessiveden korvautuessa sadevedellä ko. aineiden pitoisuudet hiljalleen pienenevät ja suotovedessä korostuu nimenomaan rikastushiekasta mobilisoituvat aineet.

Taulukko 2-4. Rikastushiekka-altaan geokemiallisen tasapainomallinnuksen tulokset. Vaihe 1 = suotovesi juuri peittorakenteen asentamisen jälkeen, kun pääosa huokosvedestä on vielä prosessivettä. Vaihe 2 = suotovesi pitkällä aikavälillä, huokosvedestä on poistunut tuotannonaikaisen prosessiveden vaikutus. Suuruusluokan hahmottamisen tueksi vertailuarvoina esitetään pohjaveden ympäristölaatusnormin (341/2009) ja talousvesiasetuksen (STM 1352/2015) raja-arvoja, vaikka pitoisuus rikastushiekka-altaalla tai altaan suotovedessä ei ole pitoisuus pohjavedessä tai juomavedessä.

		Nykyinen rikastushiekka-allas		Rikastushiekka-altaan laajennus		Vertailuarvoja	
		Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 1	Vaihe 2	STM 1352/2015	PV YLN 341/2009
pH		9,1	9,1	8,3	9,1		
Ag	mg/l	0,001	0,0001	0,001	0,0001		
Al	mg/l	3,3	3	3,3	3	0,2	
As	mg/l	0,3	0,3	0,3	0,3	0,01	0,005
B	mg/l	0,1	0,1	0,1	0,1	1	
Ba	mg/l	0,08	0,08	0,08	0,08		
Be	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001		
Ca	mg/l	665	371	659	371		
Cd	mg/l	0,004	0,003	0,004	0,003	0,005	0,0004
Cl	mg/l	69	4,9	68	4,9	250	25
Co	mg/l	0,005	0,001	0,005	0,001		0,002
Cr	mg/l	0,004	0,005	0,004	0,005	0,05	0,01
Cu	mg/l	0,002	0,004	0,001	0,004	2	0,02
F	mg/l	1,4	1,4	1,4	1,4	1,5	
Fe	mg/l	0,6	0,1	0,6	0,1	0,2	
Alk. as HCO ₃ ⁻	mg/l	1760	838	1740	838		
Hg	mg/l	0	0	0	0		
K	mg/l	262	157	260	157		
Li	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01		
Mg	mg/l	43	38	43	38		
Mn	mg/l	2,2	1,7	2,2	1,7	0,05	
Mo	mg/l	0,008	0,008	0,008	0,008		
Na	mg/l	51	4,8	50	4,8	200	
Ni	mg/l	0,01	0,005	0,01	0,005	0,02	0,01
P	mg/l	1,1	0,5	1,1	0,5		
Pb	mg/l	0,02	0,08	0,02	0,08	0,01	0,005
Rb	mg/l	0,2	0,2	0,2	0,2		
Sb	mg/l	1,9	1,7	1,9	1,7	0,005	0,0025
Se	mg/l	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	
Si	mg/l	55	55	55	55		
Sn	mg/l	0,002	0,002	0,002	0,002		
Sr	mg/l	0,4	0,4	0,4	0,4		
Th	mg/l	0,001	0,001	0,001	0,001		
Ti	mg/l	0,003	0,003	0,003	0,003		
U	mg/l	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	
V	mg/l	0,005	0,005	0,005	0,005		



		Nykyinen rikastushiekka-allas		Rikastushiekka-altaan laajennus		Vertailuarvoja	
		Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 1	Vaihe 2	STM 1352/2015	PV YLN 341/2009
W	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,01		
Zn	mg/l	0,4	0,06	0,4	0,06		0,06
SO ₄	mg/l	1250	509	1240	509	250	150
NO ₃ -N	mg/l	28	0,05	28	0,05	50	50
NH ₄ -N	mg/l	12	0,06	12	0,06	0,5	0,2

2.5 Suotoveden määrä rikastushiekka-alueella

Rikastushiekka-altaiden suotovesiojiin saadaan pääsääntöisesti talteenotettua patoalueilta ja niiden läheisyydestä suotautuvat vedet, kun taas rikastushiekka-altaan keskiosissa suotauma painuu osittain niin syvälle maa- ja kallioperään, ettei talteenotto suotovesiojien avulla ole mahdollista. Suotovesiojiin oletetaan olevan kiinniotettavissa noin 60 % rikastushiekka-altaan kokonaissuotaumasta. Nykyisen rikastushiekka-altaan ollessa lakikorkeudessaan (+ 234 m mpy) suotovesiä muodostuu yhteensä n. 163 m³/d, josta noin 98 m³/d saadaan suotovesiojilla talteenotettua. Rikastushiekka-altaan laajennuksen ollessa lakikorkeudessaan (+234 m mpy) suotovesiä muodostuu yhteensä n. 244 m³/d, josta vastaavasti n. 146 m³/d saadaan suotovesiojilla talteenotettua.

Sulkemisen jälkeen rikastushiekka-altailla muodostuvat suotovedet johdetaan mahdollisuuksien mukaan louhosjärveen. Nykyiseltä rikastushiekka-altaalta on johdettavissa n. 70 % suotovesiojiin talteenotetusta suotovedestä louhosjärveen, mikä vastaa n. 73 m³/d. Rikastushiekka-altaan laajennuksen alueelta, mikäli rikastushiekka-allas toteutetaan Hanhipetäikön pohjoispuolelle, kaikki suotovesiojiin tuleva vesi on ohjattavissa louhosjärveen. Arviot perustuvat sulkemisen jälkeiseen mikrovaluma-aluejakoon. Sulkemisen jälkeinen vesienjohtaminen on esitetty kappaleessa 5.

3 Pyriittiallas

3.1 Pyriittirikasteen ominaisuudet

Pyriitin mineralogia

Pyriitin päämineraalit ovat nimensä mukaisesti pyriitti sekä vähäisemmin kvartsi ja pyrrotiitti eli magneetikiisu (Taulukko 3-1).

Taulukko 3-1. Pyriittirikasteen mineraloginen koostumus.

Mineraali	Kemiallinen kaava	2020 Pyriittirikaste	2022 Pyriittirikaste
		(m-%)	(m-%)
Kvartsi	SiO ₂	10	7,9
Muskoviitti	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	4,5	2,7
Ankeriitti	CaFe(CO ₃) ₂	4	
Pyriitti	FeS ₂	72	82
Kalkopyriitti	CuFeS ₂	0,9	
Pyrrotiitti	Fe _(1-x) S	5,5	7,3
Arsenopyriitti	FeAsS	2,4	
Molybdeniitti	MoS ₂	0,6	
Yhteensä		100	100

Pyriitin geokemiallinen koostumus

Pyriittirikasteen v. 2020–2023 määritetyt kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet on esitetty taulukossa 3-2. Useat metallit ja metalloidit ylittävät PIMA-asetuksen (214/2007) kynnysarvon, minkä vuoksi pyriittirikaste luokitellaan ei-pysyväksi kaivannaisjätteeksi. Useat metallit ylittävät myös PIMA-asetuksen ylemmän ohjearvon. Vuoden 2023 näytteessä metalli- ja metalloidipitoisuudet ovat hieman laskeneet aiemmilta vuosilta, mutta luokitus on pysynyt samana.

Taulukko 3-2. Vuoden 2020–2022 pyriittirikastenäytteiden kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet sekä PIMA-asetuksen (VNa 214/2007) mukaiset kynnys- ja ohjearvot

Vuosi/näytteiden määrä	Metallit										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
Yksikkö	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Määrittäysraja	1	0,01	0,1	1	0,5	0,01	1	0,2	0,05	1	1
Taustapitoisuus	0	0	4,7	20	13	0	13	0	0	19	17
Kynnysarvo	5	1	20	100	100	0,5	50	60	2	100	200
Alempi ohjearvo	50	10	100	200	150	2	100	200	10	150	250
Ylempi ohjearvo	100	20	250	300	200	5	150	750	50	250	400
2020 (n=2)	6100	39	63	26	220	0,41	75	1600	140	24	7500
2021 (n=2)	5900	46	81	30	310	0,33	110	2600	200	1	8800
2022 (n=3)	5700	84	69	24	250	0,43	98	2200	230	1	16000
2023 (n=1)	650	34	32	41	160	0,36	66	960	75	0,65	7400

Pyriitin haponmuodostus- ja liukoisuusominaisuudet

ABA-testin ja NAG-testin loppuliuksen pH:n perusteella pyriitti on mahdollisesti happoa muodostavaa. Pyriittirikasteen rikkipitoisuus on tarkoituksellisesti korkea eikä sillä ole neutralointipotentiaalia (Taulukko 3-3).

Taulukko 3-3. Pyriittirikasteiden 2020–2023 vuoden ABA-testien tulosten keskiarvot, minimi ja maksimit. Näytteitä yhteensä 18 kpl.

Pyriittirikaste	S kok	S sulfidi	sulfidi S/ kok S	AP	NP	NPR
Määrittäysraja	0,005	0,01			0,5	
Vuosi/kk	%	%		kg CaCO ₃ /tn	kg CaCO ₃ /tn	
Maksimi	50	51	1,1	2000	25	0,02
Minimi	39	39	0,89	1200	-6,5	0
2020, yksittäinen näyte	45	45	1	1400	23	0,02
2021, keskiarvo, n=6	47	45	0,96	1400	19	0,02
2022 keskiarvo, n=10	45	45	1	1500	8,7	0,01
2023, yksittäinen näyte	45	45	1	1400	1,9	<0,1

3.2 Pyriittirikasteen määrä

Pyriittirikastetta muodostuu vuodessa n. 15 000 t/v nykytilassa ja n. 25 000 t/v tuotannon mahdollisen laajennuksen jälkeen. Kuva 3-1 esittää pyriittirikasteen määrän vuosina 2021–2023. Vuonna 2023 rikastetta myytiin aikaisempia vuosia enemmän, joten myös läjitettävä määrä oli pienempi.



Kuva 3-1. Pyriittirikasteen kokonaistuotantomäärä vuosina 2021–2023, sekä myyntiin ja läjitykseen menneet osuudet.

3.3 Pyriittialtaan mallinnuksessa käytetyt kemialliset syötetiedot

3.3.1 Pyriittinäytteen kosteuskammiokokeen tulokset

Kosteuskammiokoeket on aloitettu maaliskuussa 2023 ja tuloksia oli mallinnuksen aikaan saatavilla 34 viikon ajalta kemiallisten parametrien ja anionien osalta ja 28 viikon ajalta hivenaineiden osalta. Toiminnanaikaisen pyriittialtaan vedenlaadun mallinnuksessa käytettiin viikkojen 5–28 tuloksia.

Pyriittinäytteen pH laski jo kosteuskammiokokeen alkuvaiheessa selvästi happamaksi (<4) ja on viikon 13 jälkeen pysytellyt alle pH 3. Kosteuskammiokokeen tuloksia esitetään kuvissa 3-2...3-5.

Kuvassa 3-1 nähdään raudan ja sulfaattiin sitoutuneen rikin vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa. Viikolla 9 raudan vapautuminen lisääntyy selkeästi. Noin viikoilla 20–24 Fe/S suhde on lähellä puhtaan pyriitin (FeS₂) hapettumista. Raudan määrällä 800 mg/kg/viikko rikkiä vapautuisi pyriitistä noin 920 mg/kg/vko. Muut kuin rautasulfidit ja toisaalta magneettikiisu (FeS) siirtävät suhdetta pois päin tästä.

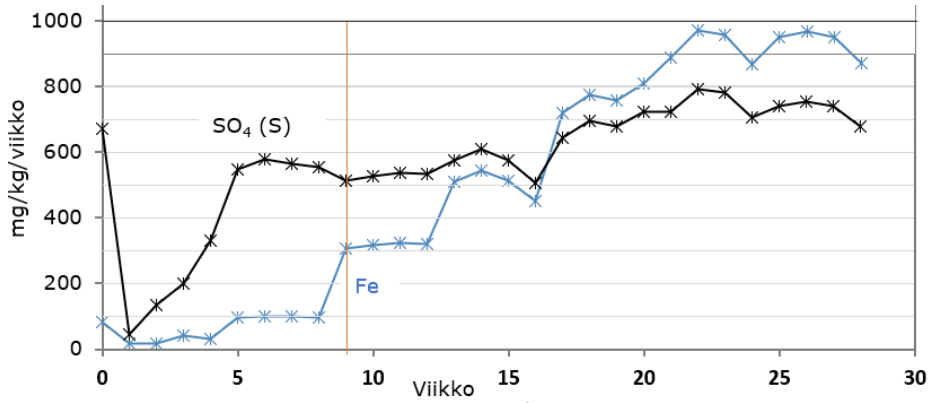
Sinkkivälke lienee muista kuin rautasulfideista tärkein sulfidimineraali pyriittirikasteessa. Kuvassa 3-3 esitetään sinkin vapautuminen näytteestä. Viikoilla 21–24 sinkin vapautuminen näytteestä on noin 200 mg/kg/vko, joka on selkeästi vähemmän kuin huipun aikoihin (700 mg/kg/vko). Sinkkivälkkeen hapettuminen aikaisin selittää osaltaan alun alhaista Fe/S suhdetta, jolloin pyriitin hapettuminen ei vielä ole täysin käynnistynyt. Kadmium seuraa sinkin käyrää ja on yleinen hivenaine sinkkivälkkeessä, joten kadmiumin voidaan tulkita olevan pääsääntöisesti sitoutuneena tässä mineraalissa.

Lyijyä on näytteessä suhteellisen paljon (~0,2 %), mutta sitä irtoaa näytteestä melko vähän (Kuva 3-3, aina <1 mg/kg/vko). Lyijyllä on (sinkin tavoin) alun nopean hapettumisen jälkeen laskeva käyrä.

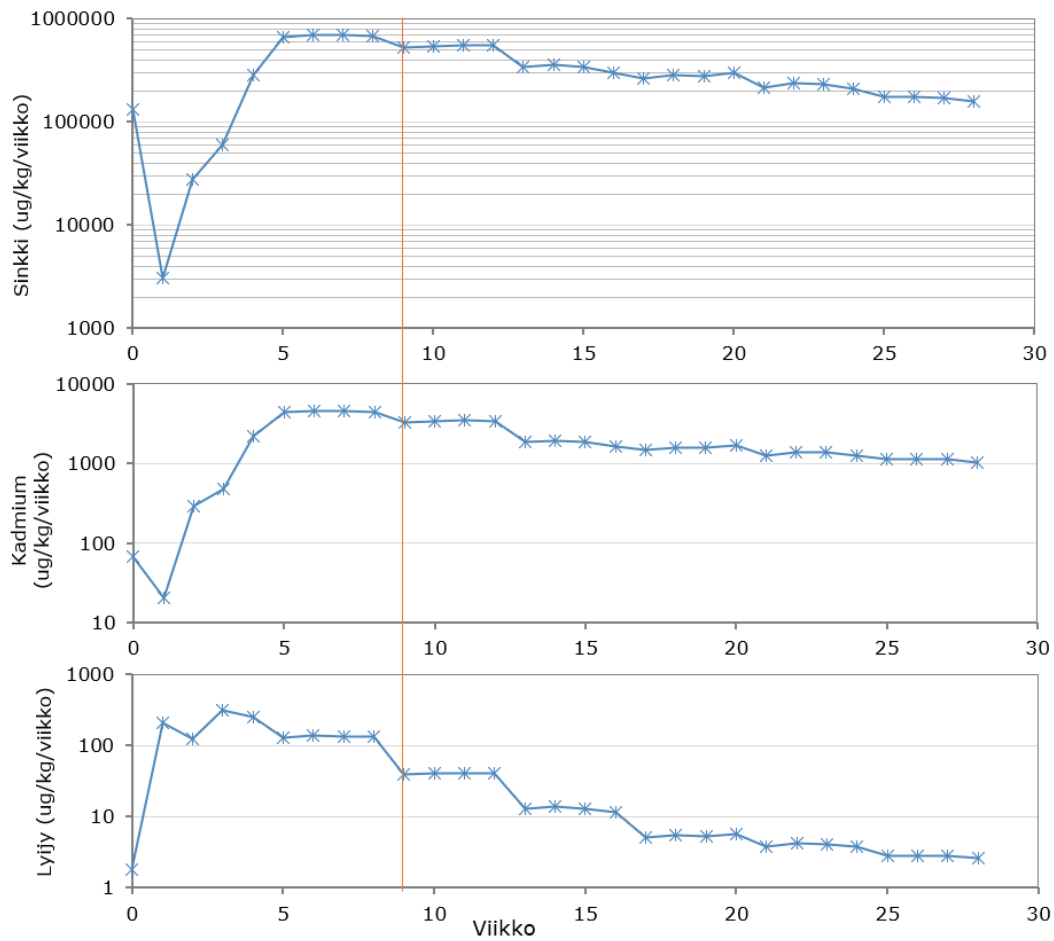
Kuvassa 3-4 esitetään nikkelin ja koboltin liukeneminen pyriittirikasteesta. Nämä alkunaineet seuraavat samaa trendiä eli ovat luultavimmin sitoutuneena samaan mineraaliin, luultavasti pentlandiittiin, jossa on tyypillisesti kobolttia mineraalihilassa. Nikkelin ja koboltin kokonaispitoisuudet näytteessä ovat pieniä (<100 ppm), mutta niiden vapautumisnopeudet näytteestä ovat suuremmat kuin lyijyllä. Raudan vapautumisen lisääntyessä viikolla 9, näidenkin alkuaineiden vapautuminen vähenee.

Kuvassa 3-5 esitetään arseenin ja kuparin vapautuminen pyriittirikasteesta. Kuparia on näytteessä suhteellisen vähän (230 ppm), mutta sillä on suhteellisen suuri vapautumisnopeus (maksimissaan noin 6,5 mg/kg/vko). On oletettavaa, että kupari on sitoutuneena kuparikiisuun, jonka hapettumishuippu nähdään tuloksissa.

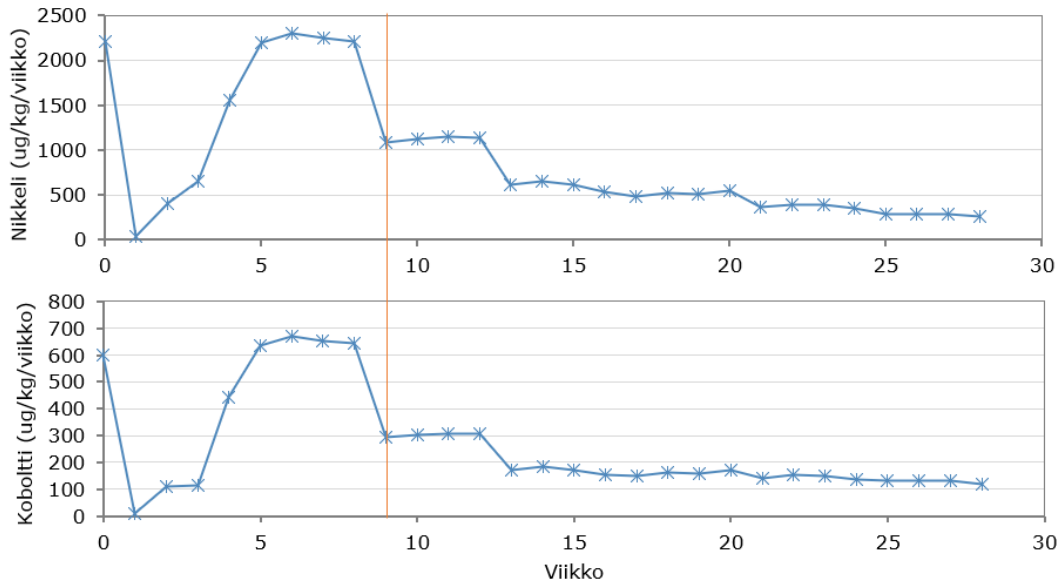
Arseenia on näytteessä paljon (~0,57 %), mutta sen vapautumisnopeus pyriittirikasteesta on alhainen (maksimi noin 1,6 mg/kg/vko). Arseenin käyttäytyminen poikkeaa selkeästi muiden tärkeimpien ei-rautametallien käyttäytymisestä. Sen vapautuminen käynnistyy kunnolla vasta viikon 20 jälkeen. Arseeni on hyvin yleinen hivenaine pyriitissä. Onkin oletettavaa, että arseenin vapautuminen seurailee jokseenkin pyriittiä. Käytöksen voisi tulkita tarkoittavan, että magneettikiisun hapettumisen merkitys suhteessa pyriitin hapettumiseen vähenee selkeästi viikon 20–25 aikoihin, kun taas pyriitin hapettuminen on vasta kunnolla alkamassa siinä vaiheessa.



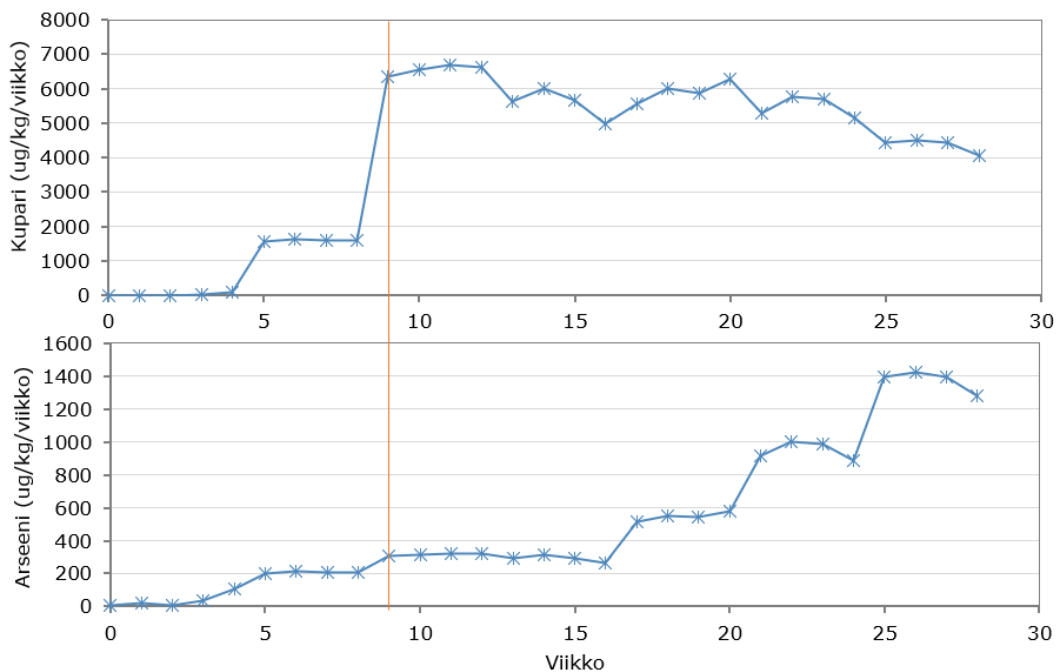
Kuva 3-2. Sulfaatin ja raudan vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa (mg/kg/viikko). Viikolla 9 raudan vapautuminen lisääntyy ja viikoilla 13–16 suhde on hyvin lähellä teoreettista vain pyriitin hapettumisesta muodostuvan liuoksen Fe/S suhdetta.



Kuva 3-3. Sinkin, kadmiumin ja lyijyn vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa (mg/kg/viikko). Viikolla 9 raudan vapautuminen lisääntyy selkeästi, mikä nähdään muiden aineiden määrän laskemisena. Huomaa logaritmiset asteikot.



Kuva 3-4. Nikkelin ja kobolttin vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa (mg/kg/viikko). Viikolla 9 raudan vapautuminen lisääntyy selkeästi, mikä nähdään muiden aineiden määrän laskemisena.



Kuva 3-5. Kuparin ja arseenin vapautuminen pyriittirikasteesta kosteuskammiokokeessa (mg/kg/viikko). Kuparia vapautuu hyvin paljon suhteessa sen kokonaismäärään näytteessä (jopa ~3 %/viikko), arseenia taas todella vähän (viikolla 26 <0,03 %/viikko). Arseenin voidaan tulkita indikoivan pyriitin hapettumisen käynnistymistä.

Taulukossa 3-4 esitetään pyriittialtaan sulkemisen jälkeisen suotoveden koostumuksen mallinnuksessa käytetty kosteuskammiosyöte. Koska näytteen koostumus on poikkeuksellinen, laboratorioissa on tulosten perusteella jouduttu käyttämään epätavallisen suuria laimennoksia ja siten raportoidut määrittärajat ovat epätavallisen korkeita. Yleisen käytännön mukaan alle määrittärajien pitoisuudelle annetaan luvuksi määrittärajien puolikas. Kuitenkin tämä johtaisi epärealistisen korkeisiin arvoihin joillekin alkuaineille pyriittirikasteen osalta. Siksi tehtiin vertailu kokonaispitoisuuksien avulla rikastushiekkanäytteen (GCL0201-009) ja pyriittirikasteen välillä. Siten tuotettiin realistisempia, mutta konservatiivisia pitoisuuksia seuraavalla metodilla.



1. Onko suureessa useita alle määritysrajan olevia tuloksia ja määritysraja on normaalia selkeästi korkeampi? Mikäli kyllä, suure menee jatkoon.

2. Onko kokonaispitoisuus pyriittirikasteessa korkeampi kuin rikastushiekassa? Mikäli kyllä ja havaintorajan ylittäviä lukuja on joitain, oletetaan, että arvioi on luultavasti pitoisuuksia liioitteleva, mutta lukuja ei muuteta. Näitä alkuaineita ovat: Ag, Be, Cr, Mo, Sb, Si ja Th.

2. Kokonaispitoisuutta ei ole mitattu, mutta ei ole syytä olettaa, että pyriittirikaste sisältäisi tätä ainetta huomattavan korkeita pitoisuuksia. Näille aineille määritetään alle määritysrajan oleville pitoisuuksille pitoisuudeksi "normaali" määritysraja. Ei käytetä määritysrajan puolikasta, mutta ei myöskään huomattavan suuria määritysrajoja. Näitä aineita ovat Cl, F, Hg ja Li, taulukossa 3-4 ne on merkitty tähdellä (*).

3. Kokonaispitoisuus pyriittirikasteessa on matalampi kuin rikastushiekassa eli ei ole syytä olettaa selkeästi korkeampia pitoisuuksia kosteuskammiokeeseen viikkoliuoksissa. Näissä tapauksissa alle määritysrajan oleville tuloksille kopioitiin tulokset rikastushiekanäytteen tuloksista. Näitä aineita ovat K, Na, P, Sn, Ti, V ja W, taulukossa 3-4 ne on merkitty kahdella tähdellä (**).

Taulukko 3-4. Pyriittialtaan sulkemisen jälkeisen suotoveden koostumuksen mallinnuksessa käytetyt kosteuskammiosyötteet. Luku on viikkojen 5–28 keskiarvo, mutta näytteen epätavallisen koostumuksen takia ICP analyysin määritysrajat olivat toisinaan hyvin korkeita ja lukuja oli manipuloitava järkevien tulosten luomiseksi, tekstissä selitetään tehdyt laskennalliset toimenpiteet tarkemmin alkuaineryhmittäin (ja **). Luvut ovat suoraan kosteuskammiokeeseen tuloksia ilman muunnoskertoimia eli ne eivät edusta mitään todellista suotoveden koostumusta.*

Suure	Yksikkö	Pitoisuus	Suure	Yksikkö	Pitoisuus
Ag	mg/kg/w	0,0011	Mo	mg/kg/w	0,0054
Al	mg/kg/w	8,9	Na**	mg/kg/w	0,092
As	mg/kg/w	0,61	Ni	mg/kg/w	0,86
B	mg/kg/w	1,1	P**	mg/kg/w	0,019
Ba	mg/kg/w	0,022	Pb	mg/kg/w	0,033
Be	mg/kg/w	0,0052	Sb	mg/kg/w	0,0054
Ca	mg/kg/w	61	Se	mg/kg/w	0,022
Cd	mg/kg/w	2,3	Si	mg/kg/w	7,7
Cl*	mg/kg/w	0,19	Sn**	mg/kg/w	0,000052
Co	mg/kg/w	0,26	Sr	mg/kg/w	0,047
Cr	mg/kg/w	0,038	Th	mg/kg/w	0,018
Cu	mg/kg/w	4,9	Ti**	mg/kg/w	0,00011
F*	mg/kg/w	0,0076	U	mg/kg/w	0,033
Fe	mg/kg/w	590	V**	mg/kg/w	0,00019
HCO ₃ ⁻	mg/kg/w	0 ^a	W**	mg/kg/w	0,00027
Hg*	mg/kg/w	<0,00001	Zn	mg/kg/w	370
K**	mg/kg/w	3,0	SO ₄	mg/kg/w	2200
Li*	mg/kg/w	0,00038	NO ₃ (N)	mg/kg/w	0,095
Mg	mg/kg/w	16	NH ₄ (N)	mg/kg/w	0,042
Mn	mg/kg/w	14			

^a Alkaliniteettiä ei ole viikon 0 jälkeen, joten kaikki alkaliniteetti katsotaan liittyvän alkuhuuhdeltuun (prosessivesi) eli jätetään huomiotta (prosessivesi huomioidaan eri syötteenä).

3.4 Pyriittialtaan konseptualisointi

Pyriittirikaste läjitetään kuivana, joka antaa jätealueelle joitain tyypillisistä märkäläjitystä hyödyntävästä rikastushiekka-altaasta poikkeavia piirteitä. Näitä käsitellään lyhyesti alla. Mallissa on myös selkeitä eroja verrattuna toiminnan aikaiseen malliin. Toiminnan aikana arvion perustana on hapen tunkeutumissyvyys ja pinta-ala ja

näiden perusteella määritetty "reaktiivinen massa". Sulkemisen jälkeen tärkein tekijä on peittorakenteelle määritetty happivuoto ($1 \text{ mol(O}_2\text{)}/\text{m}^2\text{/vuosi}$) sekä peiton pinta-ala. Näiden perusteella määritetään, kuinka paljon sulfidia voi hapettua eli sulfaattia muodostua ja lasketaan muiden aineiden määrä olettaen suhteen olevan sama kuin kosteuskammiokoekokeiden tuloksissa.

Kuivaläjitetyksen fysikaaliset ominaisuudet

Verrattuna märkäläjitukseen, kuivaläjitetty rikastushiekka ei lajitu eikä leviä ympäristöön rakeiden laadun ja koheesion vaikutuksesta eli ei muodostu "beach"-vyöhykkeitä, jotka lisäävät hapontuottopotentiaalia. Materiaali myös saavuttaa tavoitte tiheyden heti läjityksen jälkeen. Nämä tekijät auttavat minimoimaan huokostilavuuden ja lisäämään tortuositeettia eli rakeiden väliin jäävien nesteiden kulkeutumisreittien mutkaisuutta. Nämä ovat suosiollisia haitta-aineiden vapautumisen vähentämiseksi.

Märkäläjitetyssä materiaalissa tapahtuvaa rikastushiekkapatjan paksuuden lisääntymisen ja hautautumisen johdosta tapahtuvaa tiivistymistä ei juuri nähdä kuivaläjitetyssä rikastushiekassa. Sulkemisen jälkeisessä mallissa pyriittirikaste on peitetty rakenteella, joka rajoittaa happivuon $1 \text{ mol}/\text{m}^2\text{/vuosi}$. Hapen oletetaan reagoivan huuhtoutumiskertoimen salliman kontaktimäärän mukaan eli jätteen muilla fysikaalisilla ominaisuuksilla, kuten myös kaasun ja veden kulkeutumisella, on pieni merkitys. Vuosittain muodostuvan kuorman oletetaan poistuvan vuosittain.

Lämmön kulkeutuminen

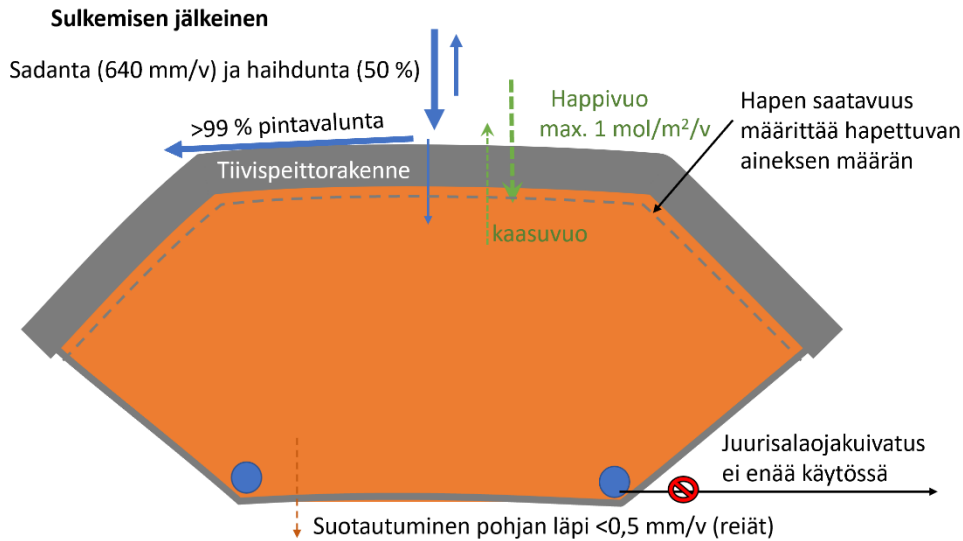
Lämpötila konseptualisoidaan vuosittaisen keskiarvolämpötilan mukaan. On oletettavaa, että talvella kasan pinta jäätyy, ja toisaalta kesällä lämpötilat ovat keskiarvoa korkeampia. Muutaman asteen lämpötilan nousulla ei ole suurta vaikutusta keskimääräisiin hapettumisnopeuksiin, joten laskemalla vuotuinen kuorma pitkän ajan keskimääräisellä lämpötilalla saadaan konservatiivinen arvio kuormituksesta. Pyriitin hapettuminen on eksoterminen eli lämpöä tuottava reaktio, joten paikalliseen keskilämpötilaan perustuva lämpötilakerroin korjataan ylöspäin (0,21 sijaan käytetään 0,3 lämpötilakertoimena).

Veden kulkeutuminen

Kuivaläjitetyksessä läjitettävän materiaalin kosteus on alhaisempi kuin märkäläjitetyksessä ja muodostuvan suotoveden määrä on pienempi. Veden liikkuminen huokostilassa vaikuttaa haitta-aineiden mobilisoitumiseen. Pyriittiallas tullaan sulkemaan hyvin tiiviillä peittorakenteella, jonka läpi imeytyvän veden määrä on pieni. Veden vähäinen määrä läjityksessä rajoittavaa edelleen reaktionopeuksia ja vähentää haitta-aineiden mobilisoitumista.

Vesimäärät

Sulkemisen jälkeen sadannasta >99 % valuu peittorakennetta pitkin pintavaluntana pois imeytymättä altaalle (Kuva 3-6). Altaalla on erittäin tiivis pohjarakenne. Reikien määrä konseptualisoidaan perustuen kaatopaikoilla ja tämän tyyppisistä kalvorakenteista tutkittuun tietoon reikien määrän toteumasta. Pohjarakenteessa on kalvotuksen lisäksi bentoniitti-kerros, joka vähentää entisestään läpisuotaumaa. Tässä kuitenkin oletetaan konservatiivisesti bentoniittikerroksen puuttuvan. Kalvossa olevien reikien määräksi oletetaan noin 5/ha (Rowe ym. 2017) ja tästä johtuva veden läpisuotautuminen vastaa 0,5 mm/vuosi vesipatsasta, eli yhteensä $5 \text{ m}^3\text{/vuosi}$ (tai $8,8 \text{ m}^3\text{/vuosi}$ tuotannon laajennuksen jälkeen).



Kuva 3-6. Pyriittialtaan konseptualisointi sulkemisvaiheelle.

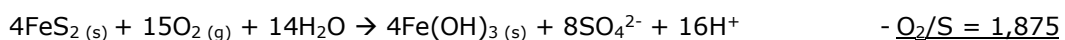
3.5 Pyriittialtaan suotoveden laatu

3.5.1 Hapenkulutus pyriittirikasteessa

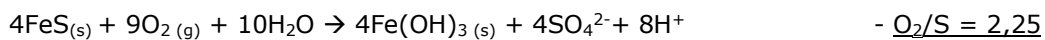
Hapenkulutus määritetään perustuen kosteuskammiokokeen sulfaatinmuodostumiseen (Taulukko 3-4). Tämä luku kuvastaa sulfaatin muodostumista laboratorio-olosuhteissa, joten luku korjataan lämpötilan suhteen vastaamaan paikallista lämpötilaa. Käyttöön ei oteta muille jätealueille käytettyä kerrointa 0,21 perustuen suoraan paikallisiin vuotuisiin lämpötiloihin. Pyriitin hapettuminen on eksotermisen prosessi eli tuottaa lämpöä, joten lämpötilakertoimena käytettiin lukua 0,3.

Kuinka paljon sulfidien hapettuminen kuluttaa happea riippuu mineraalista ja käytetystä reaktiosta. Price (2009) listaa pyriitin ja magneettikiisun hapettumisreaktiot pH:ssa >3,5.

Pyriitti + Happi + Vesi → Ferrihydriitti + Sulfaatti + happamuutta

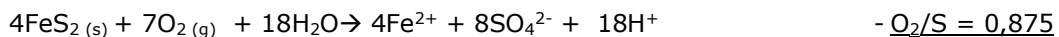


Magneettikiisu + Happi + Vesi → Ferrihydriitti + Sulfaatti + happamuutta



Pyriitin täydellinen hapettuminen kuluttaa vähemmän happea yhtä rikki-moolia kohden kuin magneettikiisun hapettuminen, koska pyriittinen rikki on hapetusluvultaan 1- kun magneettikiisussa rikin hapetusluku 2-. Mikäli Fe(II) ei täydellisesti hapetu Fe(III):ksi, pyriitin hapettuminen kuluttaa selkeästi vähemmän happea kuin magneettikiisun hapettuminen.

Pyriitti + Happi + Vesi → Fe(II) + Sulfaatti + happamuutta



Magneettikiisu + Happi → Fe(II) + Sulfaatti



Pyriittirikasteessa magneettikiisua on paljon vähemmän kuin pyriittiä, joten mallinnuksessa lasketaan hapenkulutus pyriitin mukaan (1.875). On oletettavaa, että

magneettikiisu reagoi pyriittiä nopeammin ja siksi suurempi osa siitä ehtii hapettua ennen kuin materiaali peittyy uuden läjityksen alle ja muuttuu inertiksi.

Sulkemisen jälkeinen malli on periaatteeltaan paljon yksinkertaisempi kuin toiminnan aikainen vedenlaatumalli. Sulkemisen jälkeisessä geokemiallisessa mallissa kuorma muodostuu perustuen peittorakenteen läpäisemään hapen määrään ($1 \text{ mol O}_2/\text{m}^2/\text{vuosi}$ eli koko altaalla $10\,000 \text{ mol O}_2$ vuodessa tai $17\,500 \text{ mol}$ tuotannon laajennuksen jälkeen). Peittorakenteen läpäissyt happi reagoi muodostaen sulfaattia olettaen pyriitin täydellinen hapettuminen, eli sulfaattia muodostuu O_2 mol määrä kerrottuna $1/1,875$ eli $0,53$:lla. Tämä tarkoittaa $985 \text{ mg (SO}_4\text{)}/\text{m}^2/\text{viikko}$. Kosteuskammiokokeen tuloksista saatava syöte (viikkojen 5-28 keskiarvo) skaalataan tämän oletuksen mukaan eli aineita vapautuu samassa suhteessa sulfaattiin kuin kosteuskammiokokeessa.

Vettä tarvitaan 14 moolia jokaista 15 mol happea kohden, joten happi pysyy rajoittavana tekijänä verrattuna veden määrään. Kuitenkin oletetaan, että osa hapettumisen aiheuttamasta kuormasta pidättyy kiintoaineksessa tai ei muuten pääse kontaktiin vapaan veden kanssa esimerkiksi virtausuomien muodostumisen johdosta, tässä käytetään kertoimena $0,25$ eli 25% koko kuormasta liukenee vuosittain poistuvaan veteen.

3.5.2 Geokemiallinen malli

Geokemiallisessa mallinnuksessa hyödynnetään perussyötteenä kosteuskammiokokeen viikkoliuoksiin perustuvia haitta-aineiden liukenemisnopeuksia ($\text{mg}/\text{kg}/\text{viikko}$). ($\text{mg}/\text{kg}/\text{viikko}$; Taulukko 3-4). Sulkemisvaiheen kokonaiskuorma saadaan skaalaamalla hapettuminen sulfaatin muodostumisen avulla. Sulfaatin muodostuminen perustuu peiton läpi pääsevään hapen määrään (ks. kappale 3.5.1). Lisäksi matalan kosteuden pyriittirikasteessa oletetaan tapahtuvan kanavoitumista, joka pienentää vedelle alttiin materiaalin määrää ja siten hapettumista ja hapettumistuotteiden määrää suotovedessä. Suotoveden koostumus muuttuu vain vähän geokemiallisessa tasapainomallinnuksessa verrattuna tasapainotusta edeltävään tilanteeseen, sillä alhaisen pH:n vuoksi ferrihydraation muodostuminen on vähäistä. Mallinnuksessa ei oteta huomioon mahdollisia muita rautayhdisteitä, esim. jarosiittia. Muodostumisen reaktiot eivät ole tarkoin tunnettuja ja otettu huomioon mallissa. Tulokset ovat siis konservatiivisia haitta-aineiden määrien suhteen.

Konseptualisoinnin perustaksi on otettu vuosi, jolloin prosessivesi on poistunut huokosvedestä ja hapettumisvaiheessa muodostuneen varastokuorman määrä on vähäinen. Peittorakenteen läpi pääsevän hapen määrä on arvioitu konservatiivisesti.

Tuloksena saatu vedenlaatu (Taulukko 3-5) on selkeästi väkevämpi kuin pyriittialtaasta mitattu suotovesi. Koostumus on sama huolimatta altaan koosta (hapettuvan aineen määrä ja veden määrä ovat molemmat suoraan pinta-alan suhteen muuttuvia tekijöitä), mutta kuormitus kasvavaa altaan koon kasvaessa. Tasapainotettu vedenlaadun arvio perustuu hieman keinotekoisesti oletukseen, että koko vuotuinen kuorma liukenee hyvin pieneen vuotuisen vesimäärään. Toisaalta veden määrä on pieni eli vuotuiset kuormat pysyvät maltillisina. Jarosiitin mahdollinen kiteytyminen voi aiheuttaa sulfaatin ja metallien pidättymistä läjitetyssä materiaalissa. Pääsääntöisesti pyriittirikasteesta hapettumisen seurauksena liukenevat ionit ovat mallinnetussa vedessä siinä suhteessa kuin ne liukenevat kosteuskammiokokeissa.



Taulukko 3-5. Pyriittialtaan sulkemisen jälkeinen suotoveden koostumus ja pyriittialtaan veden mitattu koostumus (vuodet 2022–2023). Lisäksi on annettu mallinnettuihin pitoisuuksiin perustuvat vuotuiset kuormat nykyisessä tilanteessa ja tuotannon laajentamisen jälkeen. Rikasteen epätavallisen koostumuksen takia kosteuskammiokokeen ICP analyysin määrittäysrajat olivat toisinaan hyvin korkeita ja lukuja oli muokattava järkevien tulosten luomiseksi, tekstissä selitetään tehdyt laskennalliset toimenpiteet tarkemmin alkuaineryhmittäin (* ja **).

Aine	Yksikkö	Pyriittialtaan suotovesi (mallinnettu)	Mitattu suotovesi	Aine	Yksikkö	Kuorma (nykyinen laajuus, 1 ha)	Kuorma (1,75 ha)
pH		2,9					
Ag	mg/l	0,012	0,0015	Ag	kg/v	<0,001	<0,001
Al	mg/l	100	10	Al	kg/v	0,51	0,9
As	mg/l	0,11	0,25	As	kg/v	<0,001	<0,001
B	mg/l	12		B	kg/v	0,062	0,11
Ba	mg/l	0,25		Ba	kg/v	0,0012	0,0022
Be	mg/l	0,06		Be	kg/v	<0,001	<0,001
Ca	mg/l	710	170	Ca	kg/v	3,5	6,2
Cd	mg/l	26	0,24	Cd	kg/v	0,13	0,23
Cl*	mg/l	2,2	2,5	Cl*	kg/v	0,011	0,019
Co	mg/l	3,0	0,078	Co	kg/v	0,015	0,026
Cr	mg/l	0,39	0,037	Cr	kg/v	0,002	0,0034
Cu	mg/l	57	0,40	Cu	kg/v	0,28	0,5
F*	mg/l	0,088		F*	kg/v	<0,001	<0,001
Fe	mg/l	6 800	300	Fe	kg/v	34	60
HCO ₃ ⁻	mg/l	0		HCO ₃ ⁻	kg/v	0	0
Hg*	mg/l	<0,000001	0,00008	Hg*	kg/v	<0,001	<0,001
K**	mg/l	35	25	K**	kg/v	0,18	0,31
Li*	mg/l	0,0044		Li*	kg/v	<0,001	<0,001
Mg	mg/l	180	150	Mg	kg/v	0,92	1,6
Mn	mg/l	160	53	Mn	kg/v	0,81	1,4
Mo	mg/l	0,014		Mo	kg/v	<0,001	<0,001
Na**	mg/l	1,1	7,0	Na**	kg/v	0,0053	0,0094
Ni	mg/l	9,9	0,41	Ni	kg/v	0,049	0,087
P**	mg/l	0,00051	0,81	P**	kg/v	<0,001	<0,001
Pb	mg/l	0,34	0,20	Pb	kg/v	0,0017	0,0029
Sb	mg/l	0,054	0,0046	Sb	kg/v	<0,001	<0,001
Se	mg/l	0,24		Se	kg/v	0,0012	0,0021
Si	mg/l	89		Si	kg/v	0,45	0,78
Sn**	mg/l	0,0000013		Sn**	kg/v	<0,001	<0,001
Sr	mg/l	0,55		Sr	kg/v	0,0027	0,0048
Th	mg/l	0,21	0,013	Th	kg/v	0,0010	0,0018
Ti**	mg/l	0,0013		Ti**	kg/v	<0,001	<0,001
U	mg/l	0,37	0,013	U	kg/v	0,0018	0,0032
V**	mg/l	0,0022		V**	kg/v	<0,001	<0,001
W**	mg/l	0,0031		W**	kg/v	<0,001	<0,001
Zn	mg/l	4 300	88	Zn	kg/v	22	38
SO ₄	mg/l	25 000	1800	SO ₄	kg/v	120	220
NO ₃ (N)	mg/l	1,1	0,73	NO ₃ (N)	kg/v	0,0055	0,0097
NH ₄ (N)	mg/l	0,49	0,69	NH ₄ (N)	kg/v	0,0024	0,0043



3.5.3 Pyriittialtaan suotoveden mitattu koostumus

Taulukossa 3-6 annetaan pyriittirikasteen läjitysalueelta mitattujen vesien pitoisuudet. Suoto-oja on oja S1 ja mittaukset ovat epäsäännöllisesti ajalta 2020–2023. Mittauksista on poistettu 2 arvoa selkeästi anomaalisten tulosten takia, esimerkiksi hyvin korkea alumiini- tai kiintoainespitoisuus. Suoto-ojan vedenlaatu annetaan taulukossa vain vertailun tueksi.

Pyriittialtaan veden mittauksia on tehty kuukausittain 5.2022–9.2023, tosin allas oli jäässä joulukuusta huhtikuuhun. Sarjasta poistettiin yksi mittaus anomaalisten tulosten takia, useat arvot olivat jopa 10 kertaa suurempia kuin muiden mittausten keskiarvo. Altaalta mitattuja pitoisuuksia käytetään mallinnustulosten tarkasteluun. Näiden suotovesien vertailu antaa alustaa tietoa hapettumisen, laimenemisen ja/tai pH:n nousun vaikutuksesta veden koostumukseen. Altaan alhaisen pH:n (keskiarvo laskettu ilman vety-ioneiksi muuttamista, arvot 2,7-3,3) vesi pystyy pitämään liukoissa muodossa kymmeniä jopa satakertaisia määriä haitta-aineita verrattuna suoto-ojaan. Ennen suoto-ojaan päätymistä aineita poistuu kiteytymisen (erityisesti Fe) ja pidättymisen (esimerkiksi sorptio) kautta. Typen yhdisteiden määrä on melko sama, ne pysyvät liukoissa konservatiivisesti, joten laimenemisen vaikutus ei liene suuri altaan veden ja suoto-ojan välissä.

Taulukko 3-6. Pyriittialtaalta suotoveden keskimääräinen koostumus 2020-2023.

Suure	Yksikkö	Suoto-oja S1	Pyriitti-allas	Suure	Yksikkö	Suoto-oja S1	Pyriitti-allas
pH		5,3	2,8	Mg	mg/l	11	150
Ag	µg/l	1,0	1,5	Mn	µg/l	2 000	53 000
Al	µg/l	1 800	10 000	Na	mg/l	17	7,0
As	µg/l	1,2	250	Ni	µg/l	54	410
Ca	mg/l	62	170	P	µg/l	45	810
Cd	µg/l	26	240	Pb	µg/l	2,6	200
Cl	mg/l	16	2,5	Sb	µg/l	0,63	4,6
Co	µg/l	50	78	Th	µg/l	0,12	13
Cr	µg/l	0,19	37	U	µg/l	5,8	13
Cu	µg/l	10	400	Zn	µg/l	1 300	88 000
Fe	µg/l	320	300 000	SO ₄	mg/l	110	1 800
Hg	µg/l	0,030	0,080	NO ₃ +NO ₂ (N)	mg/l	1,0	0,73
K	mg/l	8,4	25	NH ₄ (N)	mg/l	0,76	0,69

4 Louhosjärvi

Tässä kappaleessa esitetään avolouhokseen muodostuvan louhosjärven konseptualisointi sekä louhosjärveen muodostuvan veden laatu siinä vaiheessa, kun louhosjärvi on täyttynyt vedellä.

Maanalaisen kaivoksen vedenlaatua ei ole mallinnettu sulkemisen jälkeiselle ajalle, koska numeerisen pohjavesimallinnuksen (AFRY Finland Oy 2024a) perusteella maanalaisen kaivoksen täyttyttyä vedellä pohjaveden liike syvällä kallioperässä on hidasta. Lisäksi maanalaisen kaivoksen täyttyminen kestää huomattavasti kauemmin kuin avolouhoksen, kun louhosten välinen hydrologinen yhteys on suljettu. Maanalaisen kaivoksen vedenlaadun arvioidaan pitkällä aikavälillä muistuttavan kalliopohjaveden laatua.

4.1 Seinämien karakterisointi

Avolouhoksen seinämien oletetaan vastaavan ominaisuuksiltaan kaivostoiminnassa muodostuvia sivukivityyppejä. Sivukivien karakterisointitiedot esitetään alla.

Taulukossa 4-1 on esitetty vuosien 2018, 2020 ja 2022 avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen näytteistä määritetyt kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet ja niiden vertailu PIMA-asetuksen kynnys- ja ohjearvoihin. Näytteiden (yhteensä 16 kpl) mediaanipitoisuuksista kynnysarvon ylittäviä ovat arseeni-, kadmium- ja antimonipitoisuudet, alemman ohjearvon ylittää lyijypitoisuus ja ylemmän ohjearvon sinkkipitoisuus. Kynnysarvojen ylityksen vuoksi sivukivi luokitellaan ei-pysyväksi kaivannaisjätteeksi.

Avolouhoksen sivukivissä pitoisuudet ovat maanalaisen kaivoksen pitoisuuksia alhaisempia. Minimi- ja maksimipitoisuuksista on nähtävissä kohtuullisen suuri vaihtelu geokemiallisissa ominaisuuksissa, mutta mediaanipitoisuudet kuvastavat kohtuullisen hyvin keskimääräistä sivukiveä.

Taulukko 4-1. Vuosien 2018, 2020 JA 2022 kuningasvesiliukoiset metalli- ja metalloidipitoisuudet ja vertailu paikalliseen taustapitoisuuteen sekä PIMA-asetuksen (VNa 214/2007) kynnys- ja ohjearvoihin. Näytemäärät: avolouhos n=10, maanalainen kaivos n=6.

Tunnus	Metallit										
	As	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	V	Zn
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Määrittäysraja	1	0,01	0,1	1	0,5	0,01	1	0,2	0,05	1	1
Taustapitoisuus			4,7	20	13		13	0	0	19	17
Kynnysarvo	5	1	20	100	100	0,5	50	60	2	100	200
Alempi ohjearvo	50	10	100	200	150	2	100	200	10	150	250
Ylempi ohjearvo	100	20	250	300	200	5	150	750	50	250	400
Avolouhos, med.	7,7	2,9	1,4	5	24	0,01	3,4	326	1,4	5	695
Maanalainen kaivos, med.	37	11	5,4	6,1	50	0,09	7,6	590	7,5	11	2060
Kaikki näytteet, min.	2,2	0,06	0,5	5	11	0,01	2,3	12	0,3	1	69
Kaikki näytteet, maks.	380	16	16	9,5	96	0,29	21	1340	14	38	3310
Kaikki näytteet, med.	19	3,9	1,5	5	24	0,01	3,8	326	2	5	985



Sivukiven hapontuottopotentiaalia on tutkittu ABA-testeillä vuosina 2018, 2020 ja 2022 (Taulukko 4-2). Sivukivi luokituu ABA-testin keskiarvotulosten perusteella mahdollisesti happoa tuottavaksi, sillä rikkipitoisuus on alle 1 % ja hapontuottokyvyn ja neutralointipotentiaalin suhde (NPR) on alle kolme.

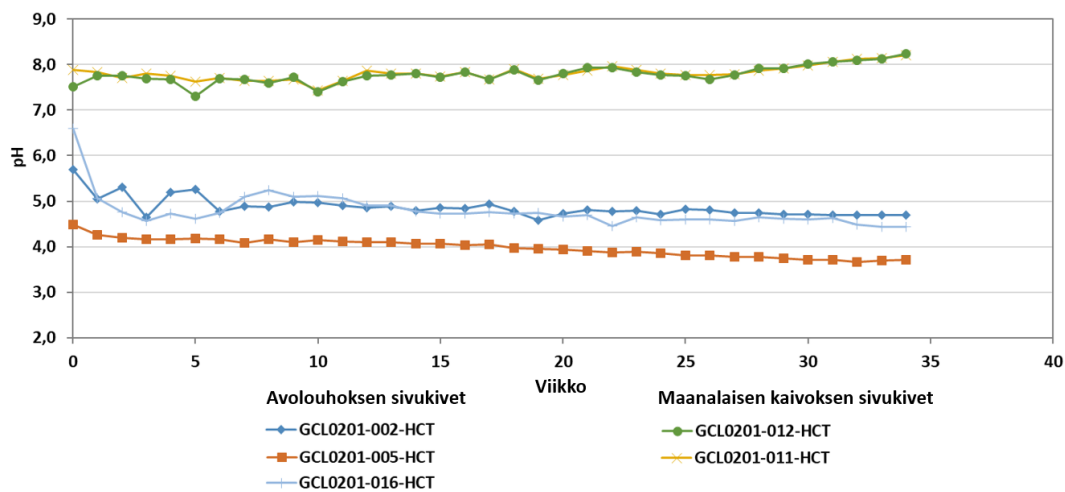
Taulukko 4-2 Sivukivinäytteiden kokonaispitoisuudet, orgaanisen ja epäorgaanisen hiilen osuus, nettohapontuottokapasiteetti (AP), neutralointipotentiaali (NP) ja hapontuottokapasiteetin ja neutralointipotentiaalin suhde (NPR).

Näyte	S (kok)	S (sulf.)	S(sulf.)/S(kok)	AP	NP	NPR
Määrittäysraja	0,005	0,01			0,5	
	%	%	%	kg CaCO ₃ /tn	kg CaCO ₃ /tn	
Sivukivi, maanalainen (n=15)	0,95	0,86	85	27,5	28,7	1,5
Sivukivi, avolouhos (n=6)	0,91	0,86	96	29,3	6,3	0,3
minimi (n=21)	0,23	0,18	69	5,6	-0,6	-0,1
maksimi (n=21)	2,00	1,82	100	64,6	81,4	6,4
keskiarvo (n=21)	0,94	0,86	89	28,0	22,3	1,2

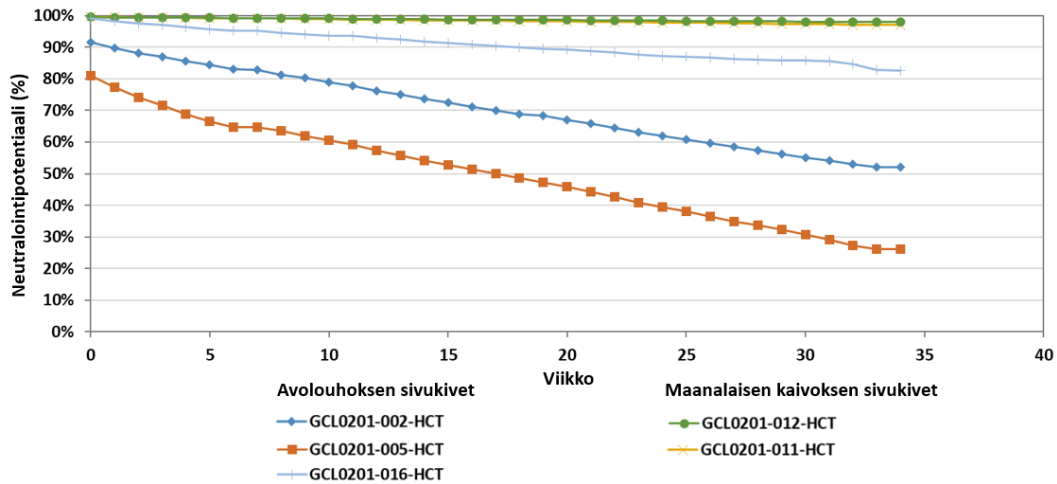
4.2 Kosteuskammiokokeiden tulokset

Mallinnuksen aikaan sivukivien kosteuskammiokokeiden tuloksia oli saatavilla 34 viikon ajalta kemiallisten parametrien ja anionien osalta ja 28 viikon ajalta hivenaineiden osalta.

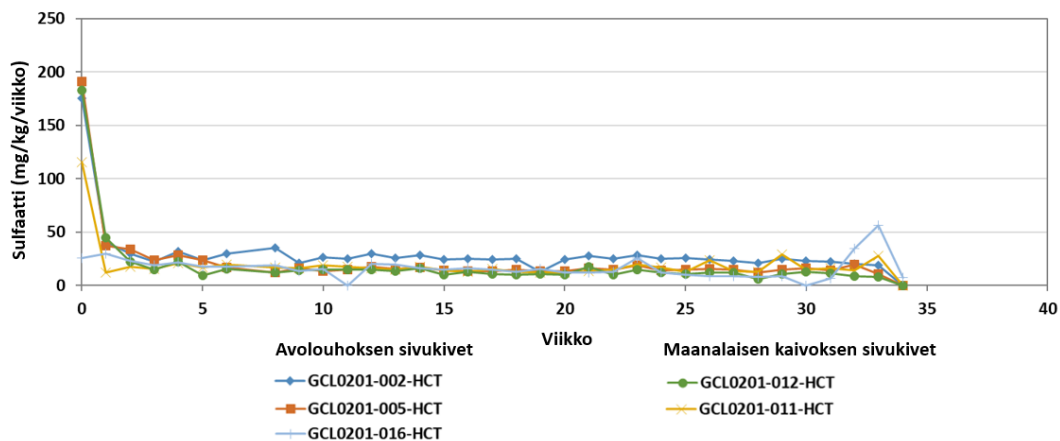
Kosteuskammiokokeissa avolouhoksen sivukivinäytteiden viikkoliuoksen pH laski heti ensimmäisten viikkojen aikana alle pH 5. Yhden sivukivinäytteen pH laski jakson loppupäässä hieman alle pH 4. Sivukivien neutralointipotentiaalista oli viimeisellä viikolla jäljellä 86 %, 55 % ja 31 %. Metalleja on mobilisoitunut kaikista sivukivistä, mutta varsinaisia vapautumiskiikkejä ei ole vielä havaittavissa ja vapautumisnopeudet (mg/kg/vko) ovat varsin maltillisia. Myös sulfaatin muodostumisnopeutta kaikissa sivukivinäytteissä voidaan pitää alhaisena.



Kuva 4-1. pH kehittyminen sivukivien kosteuskammiokokeissa (Geochemic Ltd 2023).



Kuva 4-2. Jäljellä oleva neutralointipotentiaali sivukivien kosteuskammiokeissa (Geochemic Ltd 2023).



Kuva 4-3. Sulfaatin muodostus sivukivien kosteuskammiokeissa (Geochemic Ltd 2023).

4.3 Pohjaveden laatu

Louhosjärven vedenlaadun mallinnus käyttää syötteenä maaperän pohjaveden sekä kalliopohjaveden laatua. Maaperän pohjaveden laatuna on käytetty vuosien 2019–2023 aikana otettujen pohjavesinäytteiden keskiarvoa. Näytteet on otettu pohjavesiputkista 301...307. Kalliopohjaveden laatuna on käytetty maanalaisen kaivoksen kuivatusveden laatua v. 2020–2022, koska kalliopohjaveden laatua ei ole erikseen tutkittu. Mallinnuksen syötteenä käytetty pohjaveden laatu on esitetty taulukossa 4-3.



Taulukko 4-3. Kuivatusvedenlaadun mallinnuksessa käytetyt pohjavesisyötteen.

		Kalliopohjavesi	Maaperän pohjavesi
Ag	mg/l	0,03	
Al	mg/l	0,4	0,2
As	mg/l	0,005	0,0005
Ca	mg/l	110	8,5
Cd	mg/l	0,03	0,00002
Cl	mg/l	8	
Co	mg/l	0,02	0,002
Cr	mg/l	0,001	0,001
Cu	mg/l	0,003	0,002
F	mg/l		0,00007
Fe	mg/l	0,5	6,4
Alk. as HCO ₃ ⁻	mg/l	410	
Hg	mg/l		0,00007
K	mg/l	15	1,6
Mg	mg/l	14	2,5
Mn	mg/l	2,6	0,3
Na	mg/l	12	2,6
Ni	mg/l	0,03	0,008
P	mg/l	0,01	0,09
Pb	mg/l	0,01	0,0002
Sb	mg/l	0,06	0,0001
Th	mg/l		0,0003
U	mg/l	0,002	0,0002
Zn	mg/l	3,1	4,4
SO ₄	mg/l	260	8,9
NO ₃ -N	mg/l		0,09
NH ₄ -N	mg/l		0,7

4.4 Konseptualisointi

Mallinnetussa skenaariossa avolouhos on laajimmillaan. Louhoksen dimensiot on esitetty kappaleessa 7.2. Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen hydrologinen yhteys esitetään toiminnan loputtua niin, että avolouhos pääsee täyttymään vedellä. Vaikka maanalaisen kaivoksen ja avolouhoksen yhteys tukittaisiin hyvin tiiviisti, hydrologinen yhteys säilyy vähintään kallioperän luontaisen rakoilun kautta. Maanalaiseen kaivokseen muodostuva syvä kalliopohjavesi on suolaisempaa kuin avolouhokseen muodostuva vesi tai sinne johdettava vesijakeet, ja on oletettavaa, että avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen täyttyessä maanalaisen kaivoksen yläosaan syntyy luontainen halokliini.

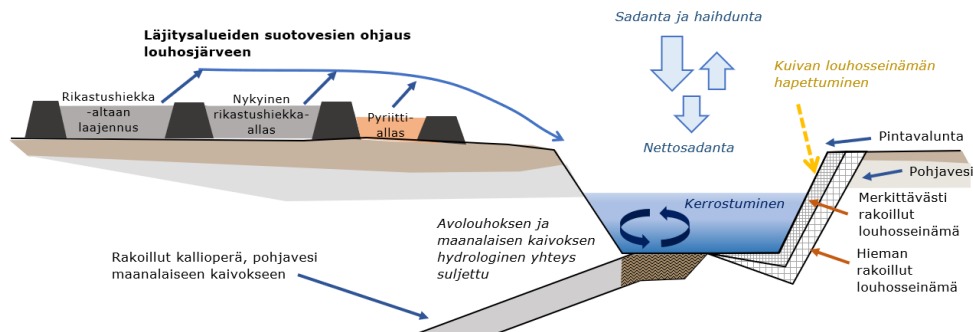
Louhosjärven vedenlaatu muodostuu pohjaveden ja sadeveden ominaisuuksien perusteella. Vedenlaatuun vaikuttaa lisäksi louhokseen johdettavat rikastusjäännösten allasalueelta johdettavat vedet sekä kontakti louhosseinämien rakoilleen ja osin hienoainespitoisen kivimateriaalin kanssa. Seinämille oletetaan kaksi vyöhykettä; räjäytystyön seurauksena voimakkaasti rakoillut, osin hienoainespitoinen vyöhyke sekä ulompi vähemmän rakoillut vyöhyke. Nämä vyöhykkeet huomioidaan louhokseen tulevan veden kanssa reagoivana.

Pohjaveden laatu perustuu vuosien 2019–2023 tarkkailutuloksiin alueella. Avolouhokseen valuvan pohjaveden pitoisuudet huomioitiin siinä suhteessa, jossa kalli-

ja maaperäpohjavettä tulee louhokseen. Kalliopohjaveden osuudeksi arvioitiin 95 % kokonaispohjavedestä ja maaperän osuudeksi 5 %.

Avolouhoksen kiviaines hapettuu ja rapautuu. Osa rapautumistuotteista jää kaivosveteen ja osa saostuu sekundäärimineraaleina ja/tai pidättyy louhoksessa sorption kautta. Pidättyneitä aineita myös uudelleenliukenee. Yksinkertaistettu malli olettaa, että rapautumisessa vapautuvia aineita tulee kuivatusveteen vuosittain saman verran kuin vastaavia aineita poistuu kuivatusveden mukana. Kuvassa 4-4 on esitetty louhosjärven muodostumisen konseptualisointi.

Sulkemisen jälkeinen konseptualisointi - Louhosjärvi



Kuva 4-4. Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen kuivatusvesien konseptualisointi.

Maanalaisen kaivoksen täyttyessä vedellä kaivostäyttöihin varastoituneet rapautumistuotteet purkautuvat louhosveteen. Toiminnanaikaisen kuivatusveden vedenlaatumallinnuksen perusteella käytettävien kaivostäyttövaihtoehtojen (sivukivi tai sivukivi ja rikastushiekka) välillä ei ole suuria eroja muodostuvan veden kokonaispitoisuuksissa, mutta rikastushiekassa olevat maa-alkalimetallit vaikuttavat kuivatusveden tasapainomallinnettuun vedenlaatuun tehden vedestä emäksistä, mikä johtaa myös eroihin liuenneiden aineiden pitoisuuksissa. Täyttymisvaiheessa kaivostäytöstä liukenevat päästöt vähenevät vedellä kyllästymisen jälkeen melko nopeasti ja rapautumisreaktiot loppuvat kokonaan hapettomissa olosuhteissa. Maanalaisen kaivoksen täyttyttyä pohjaveden virtaus on kohti koillista ja Tipasjärveä, mutta virtaus syvällä kallioperässä on pohjavesimallinnuksen (AFRY Finland Oy 2024a) tulosten perusteella hyvin hidasta. Maanlaisessa kaivoksessa muodostuvan veden laatua ei ole tästä syystä mallinnettu.

4.5 Louhosjärven vedenlaatu

Avolouhoksen seinämille syötetietona on käytetty avolouhoksen sivukivinäytteiden kosteuskammiokoekiden tuloksia. Näytteistä laskettiin painotettu keskiarvo niin, että kaksi näytettä (GCL0201-002-HCT ja GCL0201-005-HCT) muodostivat samassa suhteessa pääosan keskiarvosta (90 %). Kolmas näyte (GCL0201-016-HCT), joka muodosti 10 % keskiarvosta, on otettu malmin läheisyydestä. Mallinnetussa skenaariossa avolouhosta on laajennettu kaivoksen täyttökiviä varten ja siksi malmin läheisyydestä otetun näytteen oletettiin edustavan vain pientä osaa seinämissä esiintyvien kivien koostumuksesta. Louhosjärveen johdetaan myös 75 % nykyisen rikastushiekka-altaan suotovesistä sekä kaikki rikastushiekka-altaan laajennuksen (Hanhipeäikön pohjoispuolisen) ja pyriittialtaan suotovedet.

Louhosjärven pintaveden mallinnettu vedenlaatu on esitetty taulukossa 4-4.



Taulukko 4-4. Louhosjärven pintaveden mallinnettu vedenlaatu.

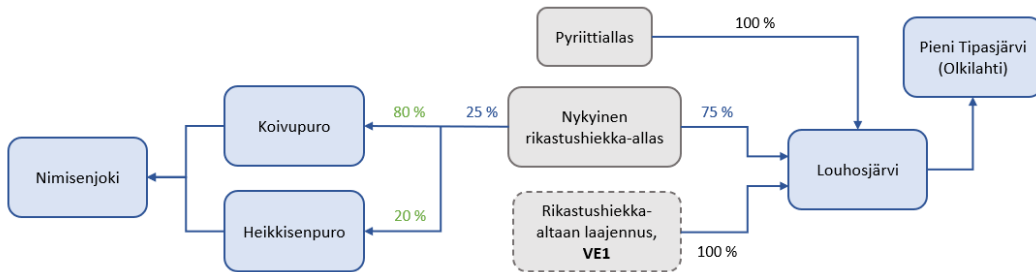
Louhosjärvi täynnä, pintavesi					
pH		8,9	Mo	µg/l	4
Ag	µg/l	0,05	Na	µg/l	2300
Al	µg/l	1400	Ni	µg/l	10
As	µg/l	100	P	µg/l	200
B	µg/l	50	Pb	µg/l	200
Ba	µg/l	40	Rb	µg/l	90
Be	µg/l	0,5	Sb	µg/l	800
Ca	µg/l	170000	Se	µg/l	50
Cd	µg/l	5	Si	µg/l	26000
Cl	µg/l	2300	Sn	µg/l	0,9
Co	µg/l	4	Sr	µg/l	200
Cr	µg/l	2	Th	µg/l	0,5
Cu	µg/l	7	Ti	µg/l	1
F	µg/l	700	U	µg/l	10
Fe	µg/l	500	V	µg/l	2
Alk. as HCO ₃ ⁻	µg/l	380000	W	µg/l	6
Hg	µg/l	0,0003	Zn	µg/l	800
K	µg/l	72000	SO ₄	µg/l	240000
Li	µg/l	6	NO ₃ -N	µg/l	30
Mg	µg/l	18000	NH ₄ -N	µg/l	30
Mn	µg/l	1100			

5 Sulkemisen jälkeinen kuormitus

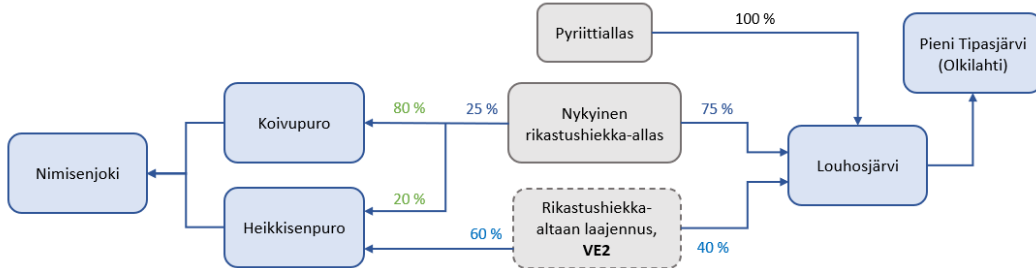
Kaivostoiminnan päättyessä louhosten kuivattaminen lopetetaan ja louhokset alkavat täyttyä vedellä. Avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen hydrologinen yhteys minimoidaan. Kaivannaisjätteiden läjitysalueilta johdetaan vedet mahdollisuuksien mukaan ensisijaisesti louhosjärveen. Vesien johtaminen ja kuormituksen jakautuminen on esitetty kuvassa 5-1. Jako pohjautuu sulkemisen jälkeisiin mikrovaluma-alueisiin, jotka on esitetty kuvassa 1-1.

Pyriittialtaan vedenlaatuana kuormituslaskennassa on käytetty nykyisen toiminnan maksimitilanteen vedenlaatua (Taulukko 3-5). Nykyisen toiminnan mukainen pyriittiallas on kooltaan 1 ha. Tuotannon noston seurauksena, mikäli pyriittiä ei saada myytyä, pyriittialtaan tarvittava maksimilaajuus on 1,75 ha. Laajennetulle pyriittialtaalle on laskettu kuormitus erikseen (Taulukko 3-5). Pyriittialtaalta louhosjärveen menevä kuorma on pieni suhteessa rikastushiekka-altaalta tuleviin kuormiin, eikä laajennus näin ollen vaikuta merkittävästi louhosjärvestä muodostuvaan vedenlaatuun.

Rikastushiekka-altaan laajennus Hanhipetäikön pohjoispuolella (VE1)



Rikastushiekka-altaan laajennus Hanhipetäikön eteläpuolella (VE2)



Kuva 5-1. Vesien johtaminen kaivannaisjätteiden läjitysalueilta sulkemisen jälkeen.

Avolouhoksen täyttyminen ylivuoto-ojan korkeudelle kestää noin 6 vuotta (AFRY Finland Oy 2024b). Pohjaveden virtaus on täyttymisen ajan louhokseen päin, eli kuormaa ympäristöön ei tältä ajalta muodostu. Louhosjärven täyttymisen jälkeen ylivuoto-ojan kautta Pieni Tipasjärveen poistuu louhoksesta keskimäärin 52 m³/d, ajoittuen pääosin touko-elokuulle (AFRY Finland Oy 2024b). Ylivuoto-ojan kautta Pieni Tipasjärveen ohjautuva kuorma on esitetty taulukossa 5-1.

Louhosjärven vedenlaatu on mallinnettu rikastushiekka-altaan sijoituessa Hanhipetäikön pohjoispuolelle (VE1), jolloin kaikki altaalta talteenotettavissa olevat vedet on mahdollista johtaa louhosjärveen. Hankevaihtoehdon VE2 mukaista tilannetta ei ole mallinnettu louhosjärvestä poistuvalla kuormalle erikseen. Hankevaihtoehdossa 2 rikastushiekka-altaalta johdetaan vähemmän vesiä louhosjärveen kuin vaihtoehdossa VE1. Vedenlaadun oletetaan olevan sama. Pääosa suotovesistä (60 %) ohjataan Nimisenjoen suuntaan. Nimisenjoen suuntaa ohjattavat kuormat on laskettu erikseen vaihtoehdoille VE1 ja VE2.



Taulukko 5-1. Louhosjärvestä Pieni Tipasjärveen poistuva kuorma (VE1).

Pieni Tipasjärvi					
pH		8,9	Mo	kg/v	0,07
Ag	kg/v	0,001	Na	kg/v	44
Al	kg/v	27	Ni	kg/v	0,2
As	kg/v	2,3	P	kg/v	4,6
B	kg/v	0,9	Pb	kg/v	1,7
Ba	kg/v	0,8	Rb	kg/v	1,8
Be	kg/v	0,01	Sb	kg/v	15
Ca	kg/v	3300	Se	kg/v	0,9
Cd	kg/v	0,1	Si	kg/v	490
Cl	kg/v	44	Sn	kg/v	0,02
Co	kg/v	0,08	Sr	kg/v	3,8
Cr	kg/v	0,02	Th	kg/v	0,009
Cu	kg/v	0,04	Ti	kg/v	0,03
F	kg/v	13	U	kg/v	0,2
Fe	kg/v	10	V	kg/v	0,05
Alk. as HCO ₃	kg/v	7400	W	kg/v	0,1
Hg	kg/v	0	Zn	kg/v	16
K	kg/v	1400	SO ₄	kg/v	4600
Li	kg/v	0,1	NO ₃ -N	kg/v	0,5
Mg	kg/v	340	NH ₄ -N	kg/v	0,5
Mn	kg/v	22			

Kuormitus Heikkisenpuroon ja Koivupuroon on arvioitu rikastushiekka-altaan lyhyen aikavälin suotovedenlaadun mukaisesti, jossa suotovedessä on vielä havaittavissa prosessiveden vaikutus (Vaihe 1) sekä pitkän aikavälin suotovedenlaadun mukaan, kun prosessivesi on korvautunut sadevedellä (Vaihe 2). Kuormitus on lisäksi laskettu erikseen tilanteille, jossa rikastushiekka-altaan laajennus sijoittuu Hanhipetäikön pohjoispuolelle (VE1, Taulukko 5-2) ja Hanhipetäikön eteläpuolelle (VE2, Taulukko 5-3).

Taulukko 5-2. Kuormitus Heikkisenpuroon ja Koivupuroon vaiheissa 1 ja 2, rikastushiekka-altaan laajennuksen sijoituessa Hanhipetäikön pohjoispuolelle (VE1).

		Heikkisenpuro (VE1)		Koivupuro (VE1)	
		Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 1	Vaihe 2
pH		9,1	9,1	9,1	9,1
Ag	kg/v	0,002	0,0002	0,007	0,0007
Al	kg/v	5,9	5,4	24	22
As	kg/v	0,6	0,5	2,2	2,1
B	kg/v	0,2	0,2	0,7	0,7
Ba	kg/v	0,1	0,1	0,6	0,6
Be	kg/v	0,002	0,002	0,007	0,007
Ca	kg/v	1200	660	4700	2600
Cd	kg/v	0,007	0,006	0,03	0,02
Cl	kg/v	120	8,8	490	35
Co	kg/v	0,009	0,002	0,04	0,007
Cr	kg/v	0,007	0,008	0,03	0,03
Cu	kg/v	0,003	0,007	0,01	0,03
F	kg/v	2,6	2,6	10	10
Fe	kg/v	1	0,2	4	0,7
Alk. as HCO ₃ ⁻	kg/v	3100	1500	13000	6000
Hg	kg/v	0	0	0	0
K	kg/v	470	280	1900	1100
Li	kg/v	0,02	0,02	0,09	0,09
Mg	kg/v	77	68	310	270
Mn	kg/v	3,9	3,1	16	12
Mo	kg/v	0,01	0,01	0,06	0,06
Na	kg/v	91	8,6	370	34
Ni	kg/v	0,02	0,009	0,09	0,04
P	kg/v	1,9	0,9	7,6	3,5
Pb	kg/v	0,04	0,1	0,1	0,6
Rb	kg/v	0,4	0,4	1,4	1,4
Sb	kg/v	3,4	3	14	12
Se	kg/v	0,2	0,2	0,7	0,7
Si	kg/v	97	97	390	390
Sn	kg/v	0,003	0,003	0,01	0,01
Sr	kg/v	0,8	0,8	3	3
Th	kg/v	0,003	0,002	0,01	0,007
Ti	kg/v	0,005	0,005	0,02	0,02
U	kg/v	0,05	0,05	0,2	0,2
V	kg/v	0,009	0,009	0,04	0,04
W	kg/v	0,02	0,02	0,1	0,1
Zn	kg/v	0,6	0,1	2,6	0,5
SO ₄	kg/v	2200	910	8900	3600
NO ₃ -N	kg/v	50	0,09	200	0,4
NH ₄ -N	kg/a	21	0,1	85	0,4



Taulukko 5-3. Kuormitus Heikkisenpuroon ja Koivupuroon vaiheissa 1 ja 2, rikastushiekka-altaan laajennuksen sijoituessa Hanhipetäikön eteläpuolelle (VE2).

		Heikkisenpuro		Koivupuro	
		Vaihe 1	Vaihe 2	Vaihe 1	Vaihe 2
pH		8,3–9,1	9,1	9,1	9,1
Ag	kg/v	0,02	0,002	0,007	0,0007
Al	kg/v	77	70	24	22
As	kg/v	7,2	7	2,2	2,1
B	kg/v	2,3	2,3	0,7	0,7
Ba	kg/v	1,8	1,8	0,6	0,6
Be	kg/v	0,02	0,02	0,007	0,007
Ca	kg/v	15000	8600	4700	2600
Cd	kg/v	0,09	0,08	0,03	0,02
Cl	kg/v	1600	110	490	35
Co	kg/v	0,1	0,02	0,04	0,007
Cr	kg/v	0,09	0,1	0,03	0,03
Cu	kg/v	0,02	0,1	0,01	0,03
F	kg/v	33	33	10	10
Fe	kg/v	13	2,3	4	0,7
Alk. as HCO_3^-	kg/v	40000	19000	13000	6000
Hg	kg/v	0	0	0	0
K	kg/v	6000	3600	1900	1100
Li	kg/v	0,3	0,3	0,09	0,09
Mg	kg/v	1000	890	310	270
Mn	kg/v	51	40	16	12
Mo	kg/v	0,2	0,2	0,06	0,06
Na	kg/v	1200	110	370	34
Ni	kg/v	0,3	0,1	0,09	0,04
P	kg/v	24	11	7,6	3,5
Pb	kg/v	0,5	1,8	0,1	0,6
Rb	kg/v	4,6	4,6	1,4	1,4
Sb	kg/v	44	39	14	12
Se	kg/v	2,3	2,3	0,7	0,7
Si	kg/v	1300	1300	390	390
Sn	kg/v	0,04	0,04	0,01	0,01
Sr	kg/v	9,8	9,8	3	3
Th	kg/v	0,03	0,02	0,01	0,007
Ti	kg/v	0,07	0,07	0,02	0,02
U	kg/v	0,6	0,6	0,2	0,2
V	kg/v	0,1	0,1	0,04	0,04
W	kg/v	0,3	0,3	0,1	0,1
Zn	kg/v	8,2	1,5	2,6	0,5
SO_4	kg/v	29000	12000	8900	3600
$\text{NO}_3\text{-N}$	kg/v	640	1,1	200	0,4
$\text{NH}_4\text{-N}$	kg/v	270	1,3	85	0,4

6 Herkkydet ja epävarmuudet

6.1 Herkkydet

Käytetty mallinnustapa on pitkälle yksinkertaistettu ja käsittelee mallinnettavat skenaariot tasapainotiloina, joissa vuoden aikana hapettumistuotteita muodostuu ja poistuu läjityksestä yhtä paljon.

Jotta tasapainomallinnusta voidaan hyödyntää, on ensin tunnistettava mallinnettavan kohteen pääasialliset saostumisreaktiot. Kaivannaisjätteille käytetään tyypillisesti raudan saostumistuotteita. Tasapainomallinnuksessa sorptio on määriteltä yksinkertaistetusti käyttäen rikastushiekka-alueella saostuvaa ferrihydriittiä pääasiallisena pintareaktioalustana, ja sekundäärisinä sorboivina pintoina götiittiä ja hematitiittiä. Mallinnuksessa myös oletetaan, että kaikki liuoksessa oleva rauta on vaihdettavissa vastaavaan mineraaliin eli ferrihydriittiin.

Mallien herkkyyksistä mainittakoon keskeisimpänä reaktiivinen massa eli hapettumiselle altistuvan massan suuruus. Suotoveden laatumalli on aina herkkä hapettumiselle altistuvan vyöhykkeen tai mineraalimäärän määritelmän suhteen. Mikäli rikastushiekka-altaan arvioinnissa hapen kulkeutuminen sallitaan merkittävästi syvemmälle, reaktiivinen massa kasvaa. Tällöin myös suotoveden laatu heikkenee eli pitoisuudet kasvavat. Päinvastaisena nämä herkkydet eivät olisi relevantteja: rikastushiekan raekoko on hyvin tunnettu ja sivukiviläjityksessä vedellä kyllästyneen kiven määrä on niin pieni, että mallinnuksessa kaikki kivi käsitellään ei-kyllästyneenä.

Sulfidien hapettumiseen liittyy myös muita tekijöitä (esimerkiksi lämpötila), jotka myös osaltaan vaikuttavat mallin tulokseen. Vaikka lämpötilan merkitys hapettumisnopeuteen on kiistaton, toisaalta vuoden keskilämpötilamuutosten täytyisi olla erittäin suuria vaikuttaakseen mallinnustuloksiin suuruusluokkatasolla. Louhoksissa epävarmuuksia ja herkkyyksiä liittyy erityisesti louhosseinämien (räjäytystyön seurauksena) rakoilleen ja hienontuneen kerroksen mineraalipinta-alan käsittelyyn mallissa. Rakoilu on keskeinen osa reaktiivisen massan määrittelyä louhoksissa, ja kuten jo yllä todettiin, geokemiallisen mallinnuksen tulokset ovat aina herkkiä reaktiivisen massan määrälle.

6.2 Epävarmuudet

6.2.1 Rikastushiekka-altaan suotovesiin liittyvät epävarmuudet

Vedenlaadun kannalta tärkeitä tekijöitä ovat mm. rikastushiekka-altaalla muodostuvan veden pH sekä rautapitoisuus. Näillä on suora vaikutus sorptio-kykyisten sekundäärimineraalien muodostumiseen ja metallien pidättymiseen. Tulokset viittaavat siihen, että rikastushiekan suotoveden pH on emäksinen. Raudan määrä on eräs sorptiota rajoittavista tekijöistä. Raudan määrää voidaan arvioida useilla eri menetelmillä, joista jokainen sisältää epävarmuuksia. Tässä työssä raudan määrä oletettiin vastaamaan kosteuskammiokokeiden viikkoliuoksessa esiintyvää rautaa. Todellisuudessa suurin osa raudasta saostuu testisynteriin eikä ole mitattavissa liukoisena huuhteluviedessä. Kyseinen tarkastelutapa aliarvioi raudan määrän ja johtaa korkeampiin haitta-ainepitoisuuksiin. Geokemiallisissa tarkasteluissa on kuitenkin muistettava, että jotkut metallit pysyvät neutraalissa tai lievästi emäksisessä vedessä suhteellisen hyvin liukoisina, vaikka rautaa olisikin enemmän käytettävissä kuin mallissa on nyt arvioitu.

Kosteuskammiokoe ja edustavan koejakson valinta kullekin kaivoksen vaiheelle tuovat tuloksiin epävarmuutta. Kosteuskammiokoe on paras mahdollinen analyysimenetelmä, jolla rikastushiekan hapettumista pitkällä aikavälillä voidaan tutkia. Kosteuskammiokokeet on aloitettu maaliskuussa 2023 ja tuloksia oli mallinnuksen

aikaan saatavilla 34 viikon ajalta kemiallisten parametrien ja anionien osalta ja 28 viikon ajalta hivenaineiden osalta. Kosteuskammiokokeissa rikastushiekkänäytteen viikkoliuoksen pH on pysynyt neutraalina (pH 7,6–8,1) kokeen ensimmäisen 34 viikon ajan. Neutralointipotentiaalia on 34 viikon kohdalla jäljellä 98 %. Sulkemisen jälkeisten vedenlaatuojen mallinnuksessa käytettiin syötteenä viikkojen 5–28 tuloksia. On huomioitava, että 28 viikon aikajakso pitkäaikaistestauksessa on suhteellisen lyhyt kuvaamaan rikastushiekan käyttäytymistä altaalla sulkemisen jälkeen pitkällä aikavälillä, sillä kaikki keskeiset pitkän ajan kuluessa tapahtuvat hapettumis- ja rapautumisreaktiot eivät ole välttämättä vielä käynnistyneet.

Laboratoriossa analyysit tehdään $25 \pm 2^\circ\text{C}$ lämpötilassa. Kemialliset reaktiot ovat hitaampia mitä alhaisempi lämpötila on, joten tulokset pitää muuttaa vastaamaan paikallisia olosuhteita. Vuoden keskilämpötilaksi on määritetty $2,6^\circ\text{C}$, jonka perusteella lämpötilakertoimeksi määritettiin 0,21. Tällä on suora vaikutus kosteuskammiokokeista tulevaan syötteeseen.

Reaktiivisen massan määrä lisää jokseenkin lineaarisesti rikastushiekasta vuosittain irtoavien aineiden määrää. Reaktiivisen massan määrään vaikuttavat sekä pinta-ala että merkittävän osan vuodesta kuivana olevan kerroksen paksuus. Merkittävän osan vuodesta kuivana olevan kerroksen paksuus perustuu oletukseen, että vedellä kyllästymättömän rikastushiekan pintakerroksen paksuus edustaa jokseenkin suljettujen rikastushiekka-alueiden keskitasoa (kokemusperäinen näkemys). Erityisen alas vajoavaa vedellä kyllästyneen kerroksen pintaa ei voida pitää kohteessa todennäköisenä, huomioiden rikastushiekka-alueen laajuuden, pohjan rakenteen ja rikastushiekan raekoon.

Rikastushiekka-altaan vedenlaatumallinnus toteutettiin hankevaihtoehdolle VE1 eli laajennuksen sijoittuessa Hanhipetäikön pohjoispuolelle. Hankevaihtoehdon VE2 mukaista tilannetta ei ole mallinnettu erikseen. Hankevaihtoehdojen mukaisten rikastushiekka-alden suunnitelmien eroavaisuus, joka vaikuttaa muodostuvaan vedenlaatuun, on pinta-ala. Rikastushiekka-altaan pinta-ala vaihtoehdossa VE1 on noin 30 hehtaaria, ja vaihtoehdossa VE2 noin 28 hehtaaria. Pinta-ala vaikuttaa suoraan rikastushiekan reaktiiviseen massaun. Rikastushiekka-altaalla muodostuva kuorma on suoraan verrannollinen rikastushiekan reaktiiviseen massaun. Koska vaihtoehdossa VE2 rikastushiekka-altaan pinta-ala on hieman pienempi kuin vaihtoehdossa VE1, on myös muodostuva kuorma pienempi.

6.2.2 Pyriittialtaan vedenlaadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet

Pyriittialtaan suotovedenlaatuun sulkemisen jälkeen liittyy pääsääntöisesti samoja epävarmuuksia kuin rikastushiekka-altaan mallintamiseen, tosin olosuhteiden hyvinkin radikaalit erot (esim. pH) ja läjitystavan ero (märkä-/kuivaläjitys) tuovat eroja epävarmuuksiin.

Pyriittialtaan suotovedessä on hyvin matala pH (2–3). Näissä olosuhteissa rautaoksihydroksidien muodostuminen ei ole tasapainotilassa mahdollista ja siten myös sorption osuus on hyvin pieni. Kuitenkin empiirisesti on havaittu rautasakkakerrosten vaikuttavan korkearikkisten kaivannaisjätteiden läjitysalueiden geokemiallisiin prosesseihin ja vuorovaikutussuhteisiin. Tässä pH:ssa voi myös muodostua jarosiittia, jonka mukana suotovedestä poistuu sulfaattia ja metalleja, erityisesti rautaa. Näitä prosesseja ei olla huomioitu täysimääräisesti mallissa, mikä johtaa pitoisuuksien yliarvioimiseen. Tällä hetkellä kosteuskammiokokeet ovat käynnissä, joten testisynteriin jäävästä materiaalista ei ole tarkkaa tietoa. Kokeiden loputtua ”jäävän faasin” epävarmuuksia voidaan pienentää todentamalla testisynteriin jääneen materiaalin koostumus testein.

Mallinnuksen tärkeimpänä lähtötietona toimii kosteuskammiokeesta saatu viikkoliuoksien keskiarvoinen koostumus. Kaikki tähän liittyvä epävarmuus heijastuu suoraan mallinnustuloksiin, joiden perustana on kuinka paljon peiton läpikäsevä happi voi tuottaa sulfaattia. Esimerkiksi sinkin pitoisuudet suhteessa sulfaattiin ovat huomattavasti suurempia kosteuskammiokeessa kuin kalibrointiin käytetyssä suotovedessä. Tämä johtunee kosteuskammiokeesta olleen näytteen korkeasti sinkkipitoisuudesta verrattuna keskimääräiseen pyriittirikasteeseen.

Peittorakenteen läpi pääsevän hapen määrän arvio ($1 \text{ mol/m}^2/\text{vuosi}$) on yksi mallin tärkeimmistä parametreista. Siihen liittyvä epävarmuus vaikuttaa suoraan vuosittaisiin kuormiin. Tiiviillä peittorakenteilla päästään usein huomattavasti tätä arviota pienempiin arvoihin, mutta tyypillistä on myös, että kaikkiin rakenteisiin voi muodostua rakoilua tai muita suorituskykyä heikentäviä ominaisuuksia. Epävarmuuden määrää on vaikea arvioida, mutta suunnitelmien mukaiselle peitolle arvio on konservatiivinen eli toteuman oletetaan olevan hyvin todennäköisesti vähemmän kuin $1 \text{ mol/m}^2/\text{vuosi}$.

Lämpötila vaikuttaa pyriitin hapettumiseen merkittävästi. Laboratoriotestaus tehdään $25 \pm 2^\circ\text{C}$ lämpötilassa, mutta paikalliset olosuhteet ovat kylmemmät ja siksi hapettuminen hitaampaa. Sotkamo Silverin kaivoksella vuotuinen keskilämpötila on $2,6^\circ\text{C}$, josta on johdettu lämpötilakerroin 0,21, mutta pyriitin hapettumisen seurauksena muodostuvan lämmön takia kertoimena käytetään konservatiivisesti 0,3. Näihin reaktionopeutta mittaaviin kokeellisiin tuloksiin perustuviin skaalaukskerroimiin liittyy episteemistä epävarmuutta. Kertoimien perusteena on pyriitin hapettuminen, joten tässä mallinnuksessa mineralogiaan liittyvä epävarmuus on yleisintä eli sekalaisten sulfidien tapausta pienempi.

Eniten epävarmuutta suotovesimallinnuksessa liittyy niin sanottuun huuhtoutumiskertoimeen eli arvioon kuinka suuri osa läjityksestä on kontaktissa altaalle tulevaan veteen ja tämän mahdollinen kuormien muodostumista rajoittava vaikutus. Huuhtoutumiskerointia ei yleensä käytetä hienorakeiselle ainekselle, mutta tässä se katsottiin tarpeelliseksi, koska peiton läpi imeytyvän veden määrä on hyvin pieni. Huuhtoutumiskertoimena käytettiin arvoa 0,25. Tämä on suoraan verrannollinen kuormiin eli kertoimen käyttö pienentää kuormat neljännekseen.

Veden määrän arvioon katsotaan liittyvän suhteellisen vähän epävarmuutta eikä sillä ole vaikutusta kuormiin. Mikäli peiton läpi suotautuu oletettu maksimimäärä vettä (5 % nettosadannasta), ja alueelta poistuu vettä vain oletettujen pohjan kalvon reikien läpi, altaan huokosveden pinta nousee peittämisen jälkeen pikkuhiljaa ylöspäin. Tätä ei ole huomioitu mallissa.

6.2.3 Louhosjärven vedenlaadun arvioimiseen liittyvät epävarmuudet

Louhosjärven vedenlaatumallinnuksen tarkkuuteen vaikuttavat useat tekijät. Näistä mainittakoon mm. lähtötiedot (esim. näytteiden valinta ja valittujen menetelmien optimaalisuus), mallinnukseen liittyvät yksinkertaistukset sekä tulevaisuuden ennustamiseen liittyvät puutteet.

Louhosjärvimallinnus on toteutettu erillisinä geokemian mallina ja louhosjärven kerrostumismallina. Ensin mainitussa tuotettuja syötteitä on muunnettu suolaisuudeksi ja louhosjärven kerrostumismallista suolaisuudet on muunnettu takaisinpäin pitoisuuksiksi. Tällainen lähestymistapa tuottaa luonnollisesti suuruusluokkatarkastelun mieluummin kuin yksityiskohtaista veden laatuarviota. Louhosjärvimalli eli kerrostumismalli on raportoitu erikseen (AFRY Finland Oy 2024b).

Louhosjärven vedenlaadun mallinnuksessa hyödynnettiin samaa kosteuskammiokeiden aineistoa kuin sivukivialueen mallinnuksessa. Näytteiden

valinnan lisäksi mallinnuksen tuloksiin vaikuttaa erityisesti reaktiivinen massa. Reaktiivinen massa muodostuu räjäytysten seurauksena rakoilleesta kallioperästä sekä hienoaineksen määrästä (mm. raoissa ja louhoksen penkereillä) ja huuhtoutuvasta osuudesta. Louhosseinämään syntyvän rikkonaisuusvyöhykkeen laajuus ja muodostuvan hienoaineksen määrä riippuu pääosin räjäytyssuunnitelmasta (mm. porattujen räjäytysreikien geometria, räjähdysaine ja sen määrä) ja kiven ominaisuuksista (Gazdek et al. 2017). Huuhtoutuvan aineksen määrään puolestaan vaikuttaa louhoksen seinämien kaltevuus, rakoilun geometria ja louhoksen ympäristön hydrogeologiset olosuhteet. Reaktiivisen massan määrittämiseen käytettiin kertoimia, jotka on verifioitu toteutuneissa kohteissa ja joita pyrittiin hienosäätämään kohdealueeseen sopivaksi, mutta mainittujen massaan vaikuttavien tekijöiden määrä huomioon ottaen kertoimien valintaan liittyy väistämättä epävarmuuksia.

6.3 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutoksen myötä ilman lämpötilojen ja keskimääraisten vuotuisten sademäärien odotetaan kasvavan Sotkamo Silverin kaivosalueella. Lämpötila vaikuttaa erityisesti sulfidimineraalien hapettumiseen, mutta myös silikaattien ja karbonaattien liukenemiseen, sekundääristen mineraalien liukoisuuteen ja liuenneiden aineiden saostumiseen. Sadevesi vuorostaan huuhtoo rapautuneen aineksen kiven pinnalta ja toimii haitta-aineiden kuljettajana.

Nousevan lämpötilan myötä sulfidimineraalien hapettuminen nopeutuu. Toisaalta kasvavan sadannan seurauksena haitta-aineet liukenevat suurempaan määrään vettä, jolloin liuos laimenee. Sadannan merkitys suotoveden muodostumiselle ei kuitenkaan ole yksiselitteinen, sillä se riippuu haihdunnan lisäksi sadetapahtumien intensiteetistä ja ajoittumisesta. Pitkien kuivien jaksojen aikana peittorakenne pääsee kuivumaan, jolloin hapen läpäisy nopeutuu ja rikastushiekka alkaa hapettua nopeammin. Samalla vedellä kyllästynyt osa altaasta pienenee ja reaktiivinen massa lisääntyy eli hapettuvaa materiaalia on enemmän. Rikastushiekka-altaan peittorakenne on kuitenkin suunniteltu pienentämään sadantaan liittyviä huippuarvoja (märkyys ja kuivuus). Peittorakenteiden takia pyrittiin ja rikastushiekan kanssa kosketuksissa olevan veden määrä pienenee hieman, kun peittoon varastoituu vettä, joka haihtuu pidemmällä aikavälillä. On kuitenkin huomioitavaa, että ilmastonmuutokseen liittyvät ääriolosuhteet ovat kaivannaisjätealueiden toimivuuden kannalta merkittävämpiä kuin keskilämpötilan nousu.



7 Syötetiedot ja oletukset

7.1 Rikastushiekka-altaan syötetiedot ja oletukset

Rikastushiekka-altaan dekantti- ja suotoveden geokemiallisessa mallinnuksessa käytetyt lähtötiedot ja oletukset annetaan taulukossa 7-1. Tasapainomallinnuksen oletukset esitetään kappaleessa 7.4

Taulukko 7-1. Rikastushiekka-altaiden suotovedenlaatuojen mallinnuksessa käytetyt oletukset ja lähtötiedot.

Muuttujat	Lähtötiedot, oletukset
Kosteuskammiokokeet	Rikastushiekkanäyte, viikot 5–28
Hapettuvan pintaosan paksuus	2 m
Nettosadanta	331 mm/a
Suotauma peittorakenteesta altaaseen	297 mm/a
Vuotuinen keskilämpötila	2,6°C
Raekokomuunnoskerroin	1
Lämpötilamuunnoskerroin	0,21 (Arrheniuksen yhtälö)
Peittorakenteen happivuo	10 mol/m ² /v
Läjitetyn rikastushiekan kosteus	20 %
Prosessiveden koostumus (Taulukko 2-3)	S2-altaan tarkkailutulokset (prosessivesiallas)
Nykyinen rikastushiekka-allas	
Pinta-ala	20 ha
Prosessiveden korvautuminen sadevedellä	3,3 vuotta
Talteenottamattomissa oleva suotovesi	65 m ³ /pv
Prosessivettä huokosvedestä, Vaihe 1	94 %
Rikastushiekka-altaan laajennus	
Pinta-ala	30 ha
Prosessiveden korvautuminen sadevedellä	12 vuotta
Talteenottamattomissa oleva suotovesi	98 m ³ /pv
Prosessivettä huokosvedestä, Vaihe 1	92 %

7.2 Pyriittialtaan syötetiedot ja oletukset

Taulukossa 7-2 esitetään pyriittialtaan mallinnuksessa käytetyt oletukset ja lähtötiedot. Mahdollisen tuotannon lisäyksen aiheuttamat muutokset ja mallissa käytetyt lähtötiedot annetaan hakasulkeissa []. Lämpötila- ja sadantatietona on käytetty havaintoaseman Sotkamo Kuolaniemi keskimääräisiä arvoja vuosina 2010–2022 (Ilmatieteenlaitos 2023).

Taulukko 7-2. Pyriittialtaan suotovedenlaatumallinnuksessa käytetyt lähtötiedot ja oletukset.

Muuttujat	Lähtötiedot, oletukset
Pyriittirikasteen-allas	
Kosteuskammiokokeet	Pyriittirikasteenäyte, ka viikolta 5–28
Peiton läpäisevän hapen määrä	1 mol (O ₂)/m ² /vuosi
Hapen reaktio pyriitin kanssa (O ₂ /S)	1,875
Pinta-ala	1 ha [1,75 ha]
Nettosadanta	311 mm/a



Muuttujat	Lähtötiedot, oletukset
Haihdunta	50 %
Vuotuinen keskilämpötila	2,6 °C
Raekokomuunnoskerroin	1
Lämpötilamuunnoskerroin	0,3 (Arrheniuksen yhtälö, lisälämpöä pyrittiin hapettumisesta)
Karkaava suotoveden määrä	0,5 mm/vuosi eli 5,0 m ³ /vuosi [8,8 m ³ /v]
Huuhtoutumiskerroin	0,25

7.3 Louhosjärven syötetiedot ja oletukset

Louhosjärven vedenlaadun mallinnuksessa käytetyt syötetiedot ja oletukset on esitetty taulukossa 7-3.

Taulukko 7-3. Louhosjärven vedenlaatumallinnuksessa käytetyt syötetiedot ja skaalausoletuks.

Parametri	Syötetieto tai oletus
Säätietojen vuotuiset keskiarvot	
Nettosadanta	331 mm/a
Vuotuinen keskilämpötila	2,6 °C
Skaalaus	
Lämpötilakerroin	0,21 (Arrheniuksen yhtälön mukaan)
Raekokokerroin	0,2
Erittäin rakoillut vyöhyke	0,9
Raekokokerroin	0,2
Huuhtoutumiskerroin	0,75
Rakoillut vyöhyke	2,9
Raekokokerroin	0,05
Huuhtoutumiskerroin	0,5
Louhoksen pinta-ala	10,95 ha
Ylivuoto-ojan kautta lähtevä vesimäärä keskimäärin	52 m ³ /pv
Hapettuvan seinämän 3D pinta-ala, louhos täyttynyt	8 400 m ²
Reaktiivinen massa	4 700 000 kg

7.4 Geokemiallinen tasapainomallinnus

Geokemiallisessa tasapainomallinnuksessa kuvataan tutkittavan liuoksen koostumusta aineiden tasapainovakioiden eli liukenemisen ja saostumisen sekä sorption avulla. Mallinnustulokseen vaikuttaa merkittävästi käytettävän termodynaamisen ja kineettisen vertailukirjaston laajuus, johon tutkittavan liuoksen komponentteja verrataan.

Tässä työssä käytettiin Geochemist's Workbench -mallinnusohjelman versiota 15.0. Mallinnuksessa käytettiin seuraavia oletuksia:

- 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, $C=2,0 \text{ F/m}^2$.
- 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.
- HCO_3 :n pitoisuuden sallitaan muuttua ionitasapainon ylläpitämiseksi. Lähtötietojen ionitasapainovirhe oli korkeimmillaan n. 5 % ennen tasapainomallinnusta.

8 Viitteet

- AFRY Finland Oy 2024a. Sotkamo Silver Oy - Sotkamon kaivoksen numeerinen pohjavesimalli. Luonnosversio. 8.1.2024.
- AFRY Finland Oy 2024b. Sotkamo Silver Oy - Sotkamon hopeakaivoksen avolouhoksen kehitys louhosjärveksi kaivostoiminnan lopetuksen jälkeen. Luonnosversio. 19.1.2024.
- Armstrong, W. 1979. Aeration in higher plants. *Advances in Botanical Research* 7. 325.
- Aubertin, M., Bussière, B. Monzon, M., Joanes, A.-M., Gagnon, D., Barbera, J.-M., Aachib, M., Bédard, C. Chapuis, R.P., and Bernier, L. 1999. Étude sur les barrières sèches construites à partir des résidus miniers. – Phase II : Essais en place. Rapport de recherche Projet CDT P1899. Rapport NEDEM/MEND 2.22.2c, 331 pages.
- Aubertin, M., Aachib M, and Authier, K. 2000b. Evaluation of diffusive gas flux through covers with a GCL. *Geotextiles and Geomebranes*, 18: 1-19.
- 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.
- Geochemic Ltd 2023. ASTM D 5744-18 Humidity Cell Testing. Sotkamo Silver Static and Kinetic Testing. Issue 4. 1.11.2023.
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of Soils Physics*. Academic Press, New York.
- Ilmatieteenlaitos 2023. Havaintojen lataus. Sivulla vierailtu syyskuu 2023. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>
- MacKay, P.L. 1997. Evaluation of Oxygen Diffusion In Unsaturated Soils. Masters Thesis. University of Western Ontario, London, Ontario, Canada.
- Mbonimpa, M., Aubertin, M, Aachib, M., and Bussière, B. 2002. Oxygen Diffusion and Consumption in Unsaturated Cover Materials. Report EPM-RT-2002-04 prepared by the École Polytechnique de Montréal
- MEND 1997. Short course for prediction models for acid rock drainage. 4th International conference on acid rock drainage. Vancouver 1997.
- MEND 2006. Update on Cold Temperature Effects on Geochemical Weathering. Report prepared by SRK Consulting. MEND Report 1.61.6
- Price, W. 2009. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geological Materials. MEND Report 1.20.1
- Rowe, K, Joshi, P, Brachman, M & McLeod, H, 2017. Leakage through Holes in Geomembranes below Saturated Tailings
- Sanchidrian J. ja Singh A. (Ed.) 2012. Measurement and Analysis of Blast Fragmentation. CRC Press 2012.
- Sjölund G. 1997. Kväveläckage från sprängtesmassor. Examensarbete. Luleå Tekniska Universitet. Institutionen för Samhällsbyggnadsteknik.



Sotkamon hopeakaivoksen avolouhoksen kehitys louhosjärveksi kaivostoiminnan lopettamisen jälkeen

Sotkamo Silver Oy

25.3.2024



Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
1 Johdanto	3
2 Konseptuaalinen malli	5
3 Laskentamalli	7
4 Lähtötiedot	8
4.1 Säättiedot	8
4.2 Topografia, hydrologia ja louhosgeometriatiedot	8
5 Louhosjärven mallinnus	9
5.1 Tulo- ja lähtövirtaamat	12
6 Laskennan tulokset	15
7 Johtopäätökset	18
8 Suositukset jatkotoimenpiteiksi	19
Lähdeluettelo	20

Kartta-aineistot:

Pohjakartat © MML 02/2024

Kaivospiiri © TUKES 10/2021

Valuma-alueet © SYKE 10/2023



Tiivistelmä

Sotkamo Silver Oy:n hopeakaivos sijaitsee Kainuussa, Sotkamossa noin 40 km Sotkamon kuntakeskuksesta kaakkoon Pienen Tipasjärven eteläpuolella. Kaivos tuottaa hopean lisäksi myös kultaa, sinkkiä ja lyijyä. Hopeakaivoksen tuotanto on aloitettu maaliskuussa 2019. Avolouhinta on aloitettu malmin pintapuhkeamasta. Avolouhinnan lisäksi malmia louhitaan maanalaisena louhintana, joka ulottuu tällä hetkellä noin 440 metrin syvyyteen ja laajimman suunnitelman mukaisena vuonna 2035 noin 1 km syvyyteen.

Tässä raportissa esitetään avolouhoksen sulkemisen jälkeinen kehitys louhosjärveksi perustuen numeeriseen mallinnukseen. Mallinnuksen tavoitteena on selvittää Sotkamo Silverin hopeakaivoksen sulkemisen jälkeinen avolouhoksen täyttymisnopeus sekä simuloida kaivoksen sulkemisen jälkeistä tilannetta niin vesitaseen kuin veden laadunkin suhteen.

Konseptuaalista mallia ja numeerista mallinnusta varten käytiin läpi saatavilla oleva hydrologinen ja geometrinen aineisto Sotkamo Silverin kaivoksen alueelta. Aineistoa saatiin Sotkamo Silver Oy:ltä ja ladattiin julkisista tietokannoista (Ilmatieteen laitos (FMI), Maanmittauslaitos (MML) ja Suomen ympäristökeskus (SYKE)). Lisäksi käytettiin AFRY Finlandin Sotkamo Silverille tuottaman pohjavesimallinnuksen aineistoa.

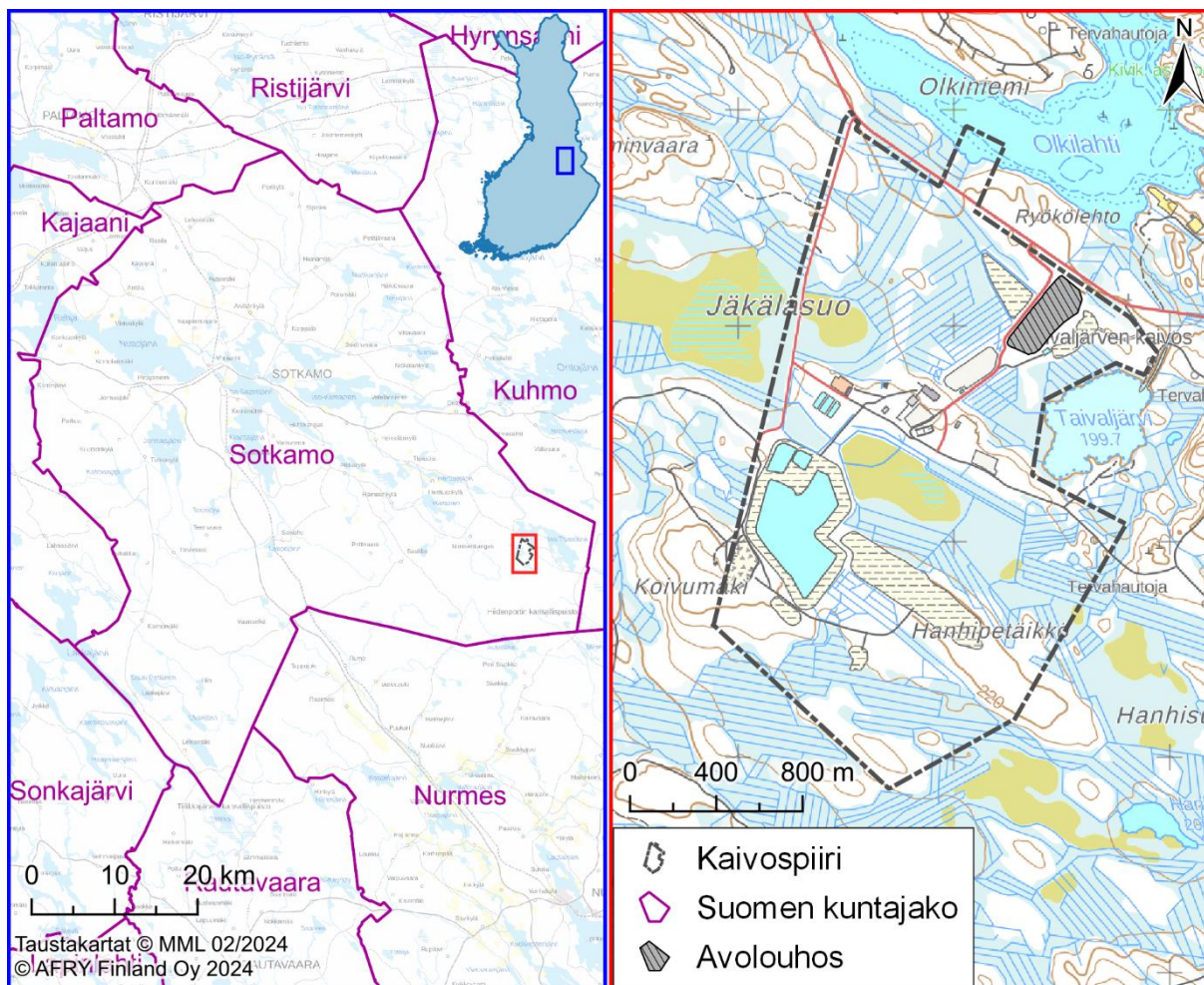
Tulosten perusteella Sotkamo Silverin kaivoksen alueesta laadittiin hydrologinen konseptuaalinen malli. Konseptuaalinen malli esittää rakenteet ja prosessit, jotka huomioidaan numeerisessa mallinnuksessa. Numeerinen louhosjärvimallinnus tehtiin General Lake Model (GLM)-ohjelmalla. Mallinnus aloitettiin tyhjästä louhoksesta, jonka annettiin täyttyä, ja mallinnusta jatkettiin täyttymisen jälkeen tasapainotilan saavuttamiseen asti.

Mallinnuksen mukaan avolouhos täyttyy sulkemisen jälkeen noin 7 vuodessa. Tämän jälkeen keskimääräinen vedenpinnan korkeus on mallinnuksissa noin 201,5 m mpy eli 0,5 m louhoksen reunan alapuolella. Pinnankorkeudessa havaitaan kaiken kaikkiaan jonkin verran vaihtelua, joka liittyy sadannan vaihteluun, vuodenaikaisvaihteluun ja kevään sulamisvesiin. Louhosjärveen ei mallinnuksessa muodostunut kerroksellisuutta sen enempää suolaisuuden kuin lämpötilankaan suhteen. Kerrostumattomuuden vuoksi louhosjärvestä tapahtuu vuotuinen täyskierto, mikä osaltaan edelleen tasoittaa suolaisuus- ja lämpötilaeroja.

Louhosjärvimallin mukainen arvio louhoksen täyttymisajasta (7 vuotta) on huomattavasti lyhyempi kuin pohjavesimallin mukainen täyttymisaika, joka on 25–30 vuotta (AFRY Finland Oy 2024b). Pohjavesimallissa ei ole huomioitu pintavesiä muutoin kuin suoraan louhokseen sateena tulevan veden osalta. Louhosjärvimallissa louhokseen tulevista vesimäärissä on huomioitu pintavedet, jotka johdetaan avolouhokseen. Louhosjärvimallissa ei kuitenkaan ole mukana maanalaista louhosta, jonka täyttyminen kestää pitkään ja hidastaa avolouhoksen täyttymistä.

1 Johdanto

Sotkamo Silver Oy:n hopeakaivos sijaitsee Sotkamossa noin 40 km Sotkamon kuntakeskuksesta kaakkoon Pienen Tipasjärven eteläpuolella (Kuva 1-1). Kaivos tuottaa hopean lisäksi myös kultaa, sinkkiä ja lyijyä. Hopeakaivoksen tuotanto on aloitettu maaliskuussa 2019. Kaivoksen on arvioitu toimivan vuoteen 2035 asti.



Kuva 1-1. Sotkamon hopeakaivoksen sijainti.

Avolouhinta on aloitettu malmin pintapuhkeamasta vuonna 2019. Louhinta avolouhoksesta on lopetettu kesäkuussa vuonna 2022. Louhos on nykytilassa kooltaan noin 400 × 150 metriä ja syvyydeltään noin 30 metriä. Avolouhoksen lisäksi alueella on tehty ja tehdään maanalaista louhintaa. Maanalainen kaivos ja siihen liittyvät rakenteet ovat osittain avolouhoksen alla. Malminlouhinta painottuu tulevaisuudessa maanalaiseen kaivokseen, mutta avolouhoksessa louhintaa tullaan jatkamaan myöhemmin uudelleen, jos maanalaisen kaivoksen täyttömateriaalina tarvitaan



avolouhoksesta louhittavaa täyttökiveä. Tällöin avolouhosta laajennetaan itään päin niin, että louhoksen koko olisi noin 350 × 400 metriä ja suurin syvyys noin 30 metriä. Avolouhoksen pinta-ala olisi laajimmillaan noin 10,9 hehtaaria.

Sotkamo Silver Oy on tilannut AFRY Finland Oy:ltä mallinnuksen kuvaamaan hopeakaivoksen sulkemisen jälkeistä kehitystä. Tässä raportissa on arvioitu avolouhoksen täyttymistä (louhosjärven muodostumista) ja mahdollisen suolaisuuskerrostumisen muodostumista järveen. Arviointi on tehty General Lake Model (GLM)-ohjelmalla. Lähtötietoina mallinnuksessa on käytetty laajennetun avolouhoksen geometriatietoja sekä alueen topografisia, hydrologisia, meteorologisia ja geokemiallisia tietoja. Mallinnuksen perusteella on arvioitu louhosjärven täyttymisnopeutta sekä veden lämpötila- ja suolaisuuskerrostumista.

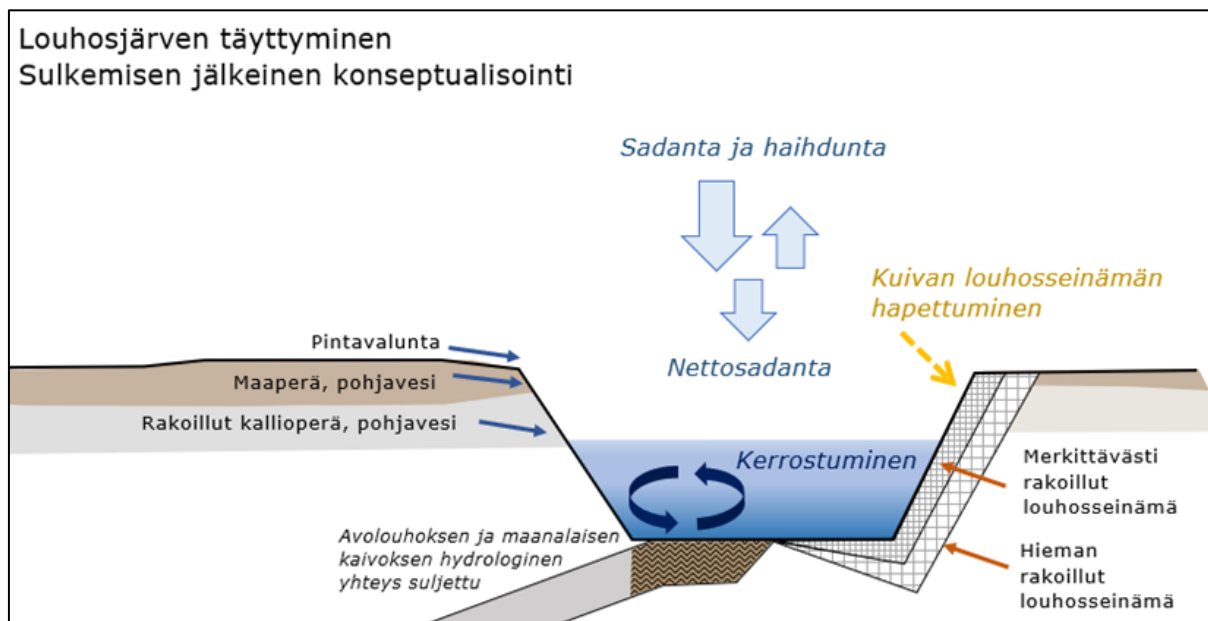
Kerrostumisen perusteella voidaan arvioida, pysyykö louhosjärven pohja hapettomassa tilassa, mikä on olennaista sulfaatin pelkistymiselle, sekä järven täyttymisen jälkeen ulos valuvan veden laatua. Saatavilla olevien lähtötietojen tarkkuustason vuoksi arviointi on alustava, mutta sitä voidaan tarkentaa lähtötietojen tarkentuessa.

Olennaiset louhosjärven tilaan vaikuttavat tiedot liittyvät järveen valuvan pinta- ja pohjaveden määrään ja laatuun sekä kaivosalueelta esimerkiksi läjitysalueiden kautta järviin suotautuvan veden laatuun ja määriin. Tulovesien määrä ja laatu on nyt arvioitu geologisten, topografisten ja säätietojen perusteella sekä mallinnuksilla (rikastushiekka-altaan ja kalliopohjaveden geokemiallinen ja hydrologinen mallinnus). Kun kaivoksella tehdään louhinnan edistyessä hydrologisia, esimerkiksi kallion vedenläpäisevyydestä tarkentavia mittauksia, voidaan näiden mittausten perusteella jatkossa tarkentaa koko mallinnusketjua.

Tämän raportin alussa esitellään lyhyesti louhosjärviin ja niiden mallinnukseen yleisesti liittyviä ilmiöitä ja mallinnukseen käytettyä ohjelmistoa. Sen jälkeen perehdytään nimenomaan Sotkamon hopeakaivoksen avolouhokseen ja sen louhosjärvikehitykseen liittyviin asioihin.

2 Konseptuaalinen malli

Louhosjärvien vesitasetta voidaan kuvata yleisellä, konseptuaalisella mallilla. Tällaisella mallilla järveen tulevat ja siitä lähtevät vedet on helppo tunnistaa. Sotkamon hopeakaivoksen avolouhoksen sulkemisen jälkeinen konseptuaalinen malli on esitetty alla (Kuva 2-1).



Kuva 2-1. Louhosjärven konseptuaalinen malli.

Louhosjärviin päätyy vettä sadannasta, pintavalunnasta ja pohjaveden suotautumisesta. Kun louhos on osittain tyhjä, sadannasta osa osuu louhoksen seinämiin ja valuu tätä kautta järveen tai haihtuu. Pintavalunta voi päätyä järveen joko louhoksen seinämää pitkin valumalla tai suotautumalla louhosta ympäröivän kallion rikkonaisuusvyöhykkeen kautta. Pohjavesivalunta päätyy louhokseen maaperän ja kallion rikkonaisten vyöhykkeiden kautta ja voi sekä valua rikkonaisuusvyöhykkeessä louhoksen seinää pitkin että valua järven vedenpinnan tason alle. Pohjavesivaluman määrä ja laatu vaihtelevat louhosjärven pinnankorkeuden mukaan. Läjitysalueilta suotautuva vesi ohjataan usein louhosjärveen, jossa sen ajatellaan osittain puhdistuvan metalleista ja sulfaatista järvessä sopivissa olosuhteissa tapahtuvan sedimentaation ja pelkistymisreaktioiden sekä sorption seurauksena tai vaihtoehtoisesti metallipitoinen vesi kerrostuu louhosjärven suolaisempiin osiin.

Louhosjärivistä voi poistua vettä haihdunnan ja pohjavesivalunnan kautta sekä ulosvirtaamana poistouomaa pitkin ja louhoksen reunan yli tapahtuvan ylivaluntana. Järvestä poistuva pohjavesivalunta riippuu järven pinnantasosta, ja se alkaa yleensä vasta, kun järvi on lähes täyttynyt. Ulosvirtausta tapahtuu vasta, kun järvi on täyttynyt kynnystasolle asti ja ylivaluntaa tapahtuu, jos järvi on täyttynyt ääriään myöten. Haihdunta, ulosvirtaama ja ylivalunta tapahtuvat aina järven pintakerroksesta.



Louhosjärvissä tapahtuu sääolosuhteista johtuvaa vuosittaista lämpötilakerrostumista. Talvella järvi jäätyy. Järveen voi pohjan kautta kulkeutua kalliosta ja kalliopohjavedestä lämpöä, joka voi joissain tilanteissa vaikuttaa kerrostumiseen jonkin verran.

Louhosjärvissä voi tapahtua joidenkin tulovesien korkeasta suolapitoisuudesta tai itse louhosseinämän vaikutuksesta johtuen suolakerrostumista, ts. järviin muodostuu veden tiheyserosta aiheutuva vähäsuolaisemman ja suolaisemman veden kerrosraja, halokliini. Halokliini voi olla ajoittainen tai pysyvä. Pysyvä halokliini estää louhosjärven täyskierron (pystysuuntaisen sekoittumisen) keväällä ja syksyllä. Tällöin halokliinin alapuolella oleva vesi ei sekoitu pintaveden kanssa ja ajautuu yleensä ennen pitkää hapettomaan tilaan. Pysyvän halokliinin muodostuminen voi olla tavoiteltu tila etenkin rikkipitoisia mineraaleja sisältävillä alueilla, sillä halokliinin alapuolella vesi pysyy hapettomana, jolloin esimerkiksi louhosseinämän sulfidimineraalien liukeneminen jää vähäiseksi veden hapettomuuden takia. Edelleen louhosjärven pohjalla voi hapettomissa oloissa tapahtua metallien ja sulfaatin pelkistymistä, joka poistaa näitä aineita louhosjärven vedestä.



3 Laskentamalli

Louhosjärven kerrostumista arvioitiin käyttäen vapaasti saatavilla olevaa avoimen lähdekoodin GLM-järvimallia (General Lake Model, versio 3.05). Malli on UWA:ssa (University of Western Australia) kehitetty ja ylläpidetty (GLM 2021, Hipsey et al. 2019).

GLM-malli on yksidimensioiden, jolloin mallissa vaakasuunta oletetaan homogeeniseksi pitoisuuksien ja lämpötilan suhteen, mutta korkeussuunnassa lämpötila ja pitoisuudet voivat vaihdella. Louhosjärvet ovat usein pieniä ja syviä, ja tällainen laskentamalli soveltuu niiden mallintamiseen hyvin. Malli sisältää myös veden pinnankorkeuden sekä jään ja lumen laskennan, joten se soveltuu täyttyvän louhosjärven laskentaan myös Suomen ilmasto-olosuhteissa hyvin.

Lähtötietoina malliin tarvitaan säätiedot (sadanta, lämpötila, säteily, tuuli), tulevien vesien määrä-, lämpötila- ja pitoisuustiedot, poistuvan pohjaveden määrä ja mallinnettavan järven pinta-ala/syvyyskäyrä. Lähtötietojen avulla malli laskee järven vesitaseen sekä lämpötila- ja suolaisuuskerrostumisen. Tulokset 1D-malleista esitetään yleensä aikariippuvaisena profiilidatana, eli esim. järven lämpötila esitetään pystyakselilla värin avulla, ja aika etenee vaakasuunnassa vaaka-akselilla. Myös lähtevän virtaaman sekä eri tasojen lämpötila- ja pitoisuustietoja voidaan tulostaa mallista aikasarjakuvina.

4 Lähtötiedot

4.1 Sää tiedot

Mallin sää tiedot poimittiin ECMWF:n ERA-interim reanalysis -datasta (Berrisford et al. 2011). ERA-Interim -datan lämpötila- ja tuulitiedot vastaavat aikaisemman kokemuksen mukaan hyvällä tarkkuudella paikallisten sääasemien mittaamia tietoja. Lisäksi datasta löytyvät malliin tarvittavat lyhyt- ja pitkäaaltosen säteilyn tiedot. Sadantatiedot poimittiin Ilmatieteen laitoksen Sotkamon Kuolaniemen mittausaseman tiedoista (Ilmatieteen laitos 2021).

4.2 Topografia, hydrologia ja louhosgeometriatiedot

Louhosjärveen laskevat pienvaluma-alueet määritettiin korkeusmallin perusteella. Lähtötietoina mallinnuksessa käytettiin Maanmittauslaitoksen Avoimien aineistojen tiedostopalvelusta saatua maastokarttaa ja korkeusmallia. Korkeusmalli 2 m on maanpinnan korkeutta kuvaava malli, jonka ruutukoko on 2 m x 2 m. Aineisto on tuotettu laserkeilausaineistosta, jonka pistetiheys on vähintään 0,5 pistettä neliömetrille. Korkeusmallin lähtötietojen laserkeilausaineisto on peräisin pääosin vuodelta 2015 ja osaksi vuodelta 2018. Aineisto on ERTS89-TM35FIN -koordinaatistossa. (Maanmittauslaitos, 2024)

Työssä käytettiin ESRI ArcGIS Pro 2.9.0 -karttaohjelmaa sekä tanskalaisen Århusin ja yhdysvaltalaisen Duken yliopiston kehittämää SCALGO Live -ohjelmaa. Pienvaluma-alue mallinnuksessa luotiin ensin mallinnettu uomaverkosto korkeusmallin ja laskettujen virtaussuuntien avulla. Uomaverkoston ja maastonmuotojen perusteella laskettiin määritellylle purkupisteelle valuma-alue. (ESRI, 2023; SCALGO Live, 2023)

ArcGIS Pro:n ja SCALGO Liven avulla tehdyn valuma-aluejaon jälkeen virtaussuuntia verrattiin maasto- ja ortokarttatietoihin, ja tuloksia korjattiin tarpeen mukaan käsin. Tyypillisesti tierummut sekä puroja ja jokia ylittävät sillat, jotka eivät korkeusmallissa näy, joudutaan korjaamaan laskentaan manuaalisesti. Myös matalat ja pienet ojaot saattavat jäädä 2 m resoluutiossa havaitsematta, jolloin virtaussuuntia korjataan käsin.

Louhosgeometria määritettiin laajennetun avolouhoksen louhossuunnittelun aineistoista. Louhosgeometrialla on vaikutusta järven täyttymisnopeuden lisäksi myös veden laatuun, koska geometriset tekijät vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti vedenpinta järvessä nousee ja käänteisesti, kuinka kauan louhosseinämät ovat alttiina hapettumiselle.

5 Louhosjärven mallinnus

Alueella on yksi tarkasteltava louhosjärvi, joka kehittyy Sotkamon hopeakaivoksen avolouhokseen toiminnan ja kuivatusvesien pumppauksen lopetuksen jälkeen. Järven keskeiset mitat on esitetty alla,

Taulukko 5-1. Järven sijoittuminen rikastushiekka- ja pyriittialtaiden suhteen on esitetty kuvassa (**Error! Reference source not found.**) ja pintavesien pienvaluma-alueiden suhteen kuvassa (Kuva 5-2). Mallinnuksessa oletetaan, että yhteys avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen välillä on suljettu toiminnan päätyttyä.

Taulukko 5-1. Avolouhoksen mitat louhosjärven muodostumisaikana.

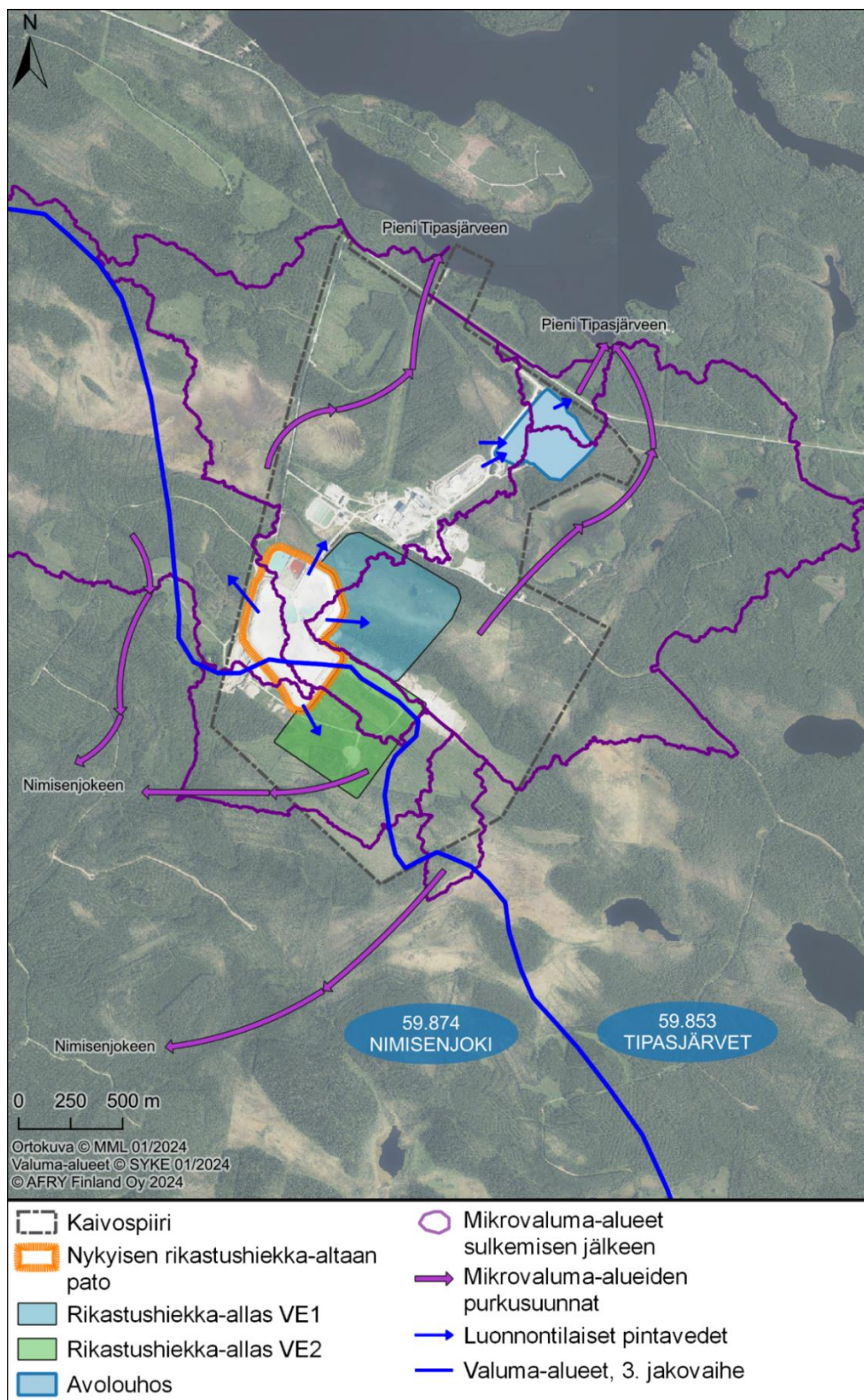
Louhos	Avolouhos
Tilavuus m ³	2 154 000
Pinta-ala m ²	109 000
Pituus m	400
Leveys m	350
Syvyys m	28
Poistouoma m mpy	200
Pohja m mpy	174
Reuna m mpy	202

Louhosjärvi muodostuu avolouhokseen, joka on syvimmillään 28 m syvä. Avolouhoksen ja siten louhosjärven pohja on tasolla 174 m mpy ja yläreuna tasolla 202 m mpy. Ulosvirtausuoman pohja on mallinnusta varten asetettu tasolle 200 m mpy. Louhosreunan alin kohta on louhoksen pohjoisosassa, Kissanimentien alittavan ojan tienoilla.

Louhoksen ympäristössä Taivaljärven pinta on tasolla 199,7 m mpy ja Pienen Tipasjärven pinta tasolla 193,1 m mpy. Louhosjärvi purkaa vettä Pieneen Tipasjärveen. Louhosjärven purkutaso asetettiin mallinnuksessa tasolle 200 m mpy, jotta louhosjärvestä purkautuva vesi voitiin ohjata suoraan Pienen Tipasjärven suuntaan.



Kuva 5-1. Avolouhoksen ja sen laajennuksen sijainti suhteessa muihin toimintoihin kaivospiirin alueella.



Kuva 5-2. Avolouhokseenmuodostuvan louhosjärven sijainti suhteessa pintavesien pienvaluma-alueisiin.

5.1 Tulo- ja lähtövirtaamat

Sotkamon hopeakaivoksen louhosjärveen tuleva vesi jakautuu sadantaan, pintavaluntaan lähialueelta, rikastushiekka-altaalta ja pyriittialtaasta suotautuvaan veteen, louhosseinämiä pitkin tapahtuvaan valuntaan ja pohjaveteen. Pintavedet ja sadanta päätyvät louhosjärveen täyttymisvaiheessa vähintään osittain louhoksen seinämiä tai seinämän rikkonaisuusvyöhykettä pitkin. Louhoksen täytyttyä pintavalunta voi valua louhokseen suoraan. Sulkemisvaiheessa louhosjärven valuma-alueella on nykyistä suurempi rikastushiekka-allas, jota on käsitelty mallinnuksessa kahtena erillisenä altaana. YVA-vaihtoehdossa VE1 rikastushiekka-altaan nykyiseltä osalta 75 % ja laajennusosalta 100 % vesistä johdetaan louhosjärveen. Vaihtoehdossa VE2 vain 40 % uuden rikastushiekka-altaan vesistä johdetaan louhosjärveen. Pyriittiallas on suunniteltu täysin tiiviiksi sekä peitto- että pohjarakenteen osalta, jolloin sieltä ei tule lainkaan valuntaa. Varmuuden vuoksi on kuitenkin laskettu, millainen läpisuotauma voisi aiheutua, mikäli peitto- ja pohjarakenteisiin tulisi pienialaisia vaurioita asennusvaiheessa. Tähän mallinnukseen on kuitenkin valittu varovaisuusperiaatteen mukaisesti skenaario, jossa pyriittialtaan pohjasta tihkuu vettä, joka ohjataan louhosjärveen. Pohjaveden virtaama riippuu louhosjärven pinnankorkeudesta. Louhosjärvimalliin pohjaveden virtaama saatiin pohjavesimallista. Tässä oletettiin riippuvuuden olevan lineaarinen veden pinnan korkeustason suhteen. Vesimäärät riippuvat kullekin valuman osalle vettä tuottavan valuma-alueen koosta, vedenläpäisevyydestä, sadannasta ja haihdunnasta. Alueiden pinta-alat on esitetty alla, Taulukko 5-2.

Taulukko 5-2. Louhosjärven valuma-alueiden pinta-alat.

Alue	Pinta-ala m ²	Pinta-ala km ²
Yläpuolinen valuma-alue	153 000	0,153
Louhosseinämäalue	7 000	0,007
Rikastushiekka-allas, nykyinen	200 000	0,2
Rikastushiekka-allas, laajennus	300 000	0,3
Pyriittiallas	9 000	0,009
Avolouhos	109 000	0,109

Louhoksen pintavaluma-alue on jaettu kahteen osaan, louhosseinämäalueeseen ja yläpuoliseen valuma-alueeseen. Louhosseinämäalueen koko on laskettu siten, että louhoksen reunasta on otettu 5 m leveä vyöhyke, josta vesien on arvioitu valuvan louhosseinämän rikkonaista vyöhykettä pitkin suoraan louhokseen. Yläpuolinen valuma-alue on arvioitu korkeusmallista lasketun valumaverkon perusteella, eli mukana on alue, joka viettää louhokseen päin ja jonka vedet on suunniteltu ohjattavaksi louhokseen ojituksilla. Yläpuolisesta valuma-alueesta on vähennetty louhosseinämäalue, louhos, rikastushiekka- ja pyriittialtaat.



Pintavesivirtaamien määrinä on käytetty SYKE:n fysikaalisen vesistömallin laskettua valumaa kymmenen vuoden jaksolta (2010–2020) (SYKE, 2022). Pidemmille mallinnusjaksoille laskettaessa valuma on toistettu siten, että vuoden 2021 tietoina on käytetty vuoden 2011 tietoja ja niin edelleen. Pintavesivirtaamien määrät on arvioitu eri valuma-alueiden pinta-alan perusteella. Keskimääräinen valuma alueella oli 13,48 l/s/km². Pintavalunnan suolaisuusarvona käytettiin laskennassa maaperäpohjavesiputkien mittaustulosten keskiarvoa, 37 mg/kg.

Sulkemisvaiheessa louhosjärven valuma-alueella on nykyistä suurempi rikastushiekka-allas, jota on käsitelty mallinnuksessa kahtena erillisenä altaana. Rikastushiekka-altaan nykyiseltä osalta 75 % ja laajennusosalta 100 % vesistä johdetaan louhosjärveen. Louhosjärvimallinnus on toteutettu rikastushiekka-altaan sijoittuessa Hanhipetäikön pohjoispuolelle (VE1), jolloin kaikki altaalta talteenotettavissa olevat vedet on mahdollista johtaa louhosjärveen. Hankevaihtoehdon VE2 mukaista tilannetta ei ole mallinnettu erikseen. Hankevaihtoehdossa 2 rikastushiekka-altaalta johdetaan vähemmän vesiä louhosjärveen kuin vaihtoehdossa VE1.

Pyriittiallas on suunniteltu täysin tiiviiksi, jolloin sieltä ei tule lainkaan valuntaa. Tähän mallinnukseen on kuitenkin valittu varovaisuusperiaatteen mukaisesti skenaario, jossa pyriittialtaan pohjasta tihkuu vettä, joka ohjataan kokonaisuudessaan louhosjärveen. Rikastushiekka-altaan suotauma on laskettu HYDRUS 1D-mallilla, jonka laskentaperusteet ja tulokset on esitetty raportissa Rikastushiekka-altaan ja pyriittialtaan peittokerroksen mallinnus (AFRY Finland Oy, 2022). Pyriittialtaan pohjarakenteen läpi suotautuvan veden määrä on laskettu pohjarakenteen teoreettisen käyttäytymisen perusteella (AFRY Finland Oy, 2024a).

Mallilaskennassa ei ole pystytty erottamaan suoraan louhosjärveen satavan ja seinämille satavan veden suolapitoisuuksia, joten molempien suolaisuus on asetettu nolaksi. Täällä menetelmällä sadeveden seinämiin osuvan veden pitoisuus tulee arvioitua liian pieneksi. Seinämiin osuvan sadannan osuus louhosjärveen päätyvästä kokonaisvesimäärästä on kuitenkin pieni, eikä tästä aiheutuvan virheen katsottu olevan merkityksellinen.

Louhosseinämäalueen vesien on arvioitu valuvan louhosjärveen kokonaan irtomaakerrosten tai kallion rikkonaisuusvyöhykkeen läpi hapellisissa olosuhteissa. Näiden vesien suolaisuus on saatu geokemiallisesta mallinnuksesta, joka on esitetty raportissa Sotkamo Silver Oy - Sulkemisen jälkeiset vesilaadut Sotkamo Silverin kaivannaisjätteiden läjitysalueilla ja louhosjärvestä (AFRY Finland Oy, 2024a). Mallinnuksessa on huomioitu louhosseinämävesien määrän ja koostumuksen muutokset louhosjärven vedenpinnan kohotessa.

Pohjavesien on arvioitu päätyvän louhosjärveen pääasiassa järven pinnan alapuolelle, ja niiden pitoisuus on huomioitu osana louhosseinämävesien koostumusta (AFRY Finland Oy, 2024a). Kalliopohjavesimäärät on sisällytetty louhosreunavesiin. Eri kalliovyöhykkeiden kautta tulevia pohjavesiosuuksia ei ole mallinnuksessa eroteltu,

mutta eri korkeustasojen vaikutus on huomioitu. On mahdollista, että arvio on pohjavesien pitoisuuden osalta liian pieni, sillä osa pohjavesistä valuu ainakin täyttymisvaiheessa kaivoksen rikkonaisuusvyöhykkeessä ja kerää mukaansa siitä liukenevia aineita. Maanalaisen louhoksen mahdollista vaikutusta ei ole huomioitu mallinnuksessa, koska vaikutuksen on arvioitu olevan vähäinen sulkemistoimista johtuen (suora hydraulinen yhteys avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen välillä suljetaan).

Tulevien virtaamien suolapitoisuus koostuu pääasiassa alkalimetalleista, bikarbonaatista ja sulfaatista. Liukoisten aineiden pitoisuus riippuu veden reitistä ja etenkin reitin kahdesta pääominaisuudesta: reitillä olevien hapettuvien mineraalien määrästä ja hapen saatavuudesta. Pitoisuudet on esitetty alla, Taulukko 5-3. Pitoisuudet pohjautuvat geokemiallisen tasapainomallinnuksen tuloksena saatuihin kaivannaisjätealueiden suotovesien suolapitoisuuksiin sekä vastaavasti mallinnettuun louhoksen seinämiä pitkin hapellisissa olosuhteissa valuvan louhosseinämävaluman suolapitoisuuteen (AFRY Finland Oy, 2024a).

Taulukko 5-3. Avolouhokseen valuvien vesien määrä ja suolapitoisuus.

Alue	Valuma (keskiarvo) l/s	Pitoisuus mg/l
Yläpuolinen valuma-alue	2,1	37
Louhosseinämä, vesisyvyys 0–16 m	2,9	540
Louhosseinämä, vesisyvyys 16–25 m	3,2	468
Louhosseinämä, vesisyvyys yli 25 m	0,07	858
Rikastushiekka-allas, nykyinen, 0–4,5 vuotta sulkemisen jälkeen	1,4	3 430
Rikastushiekka-allas, nykyinen, yli 4,5 vuotta sulkemisen jälkeen	1,4	2 000
Rikastushiekka-altaan laajennus, 0–12 vuotta sulkemisen jälkeen	2,8	2 420
Rikastushiekka-altaan laajennus, yli 12 vuotta sulkemisen jälkeen	2,8	2 000
Pyriittiallas	0,0002	35 300

Louhoksesta poistuu vettä ulosvirtaamana poistouomaa pitkin, haihduntana ja suotautumalla louhosseinämän läpi louhoksesta pohjaveteen, ja näiden ollessa riittämättömiä myös ylivuotona. Ylivuoto on hallitsematon ja vältettävä tilanne. Mallinnuksessa on huomioitu veden erilaiset poistumisreitit louhoksesta.

Laskennassa ei huomioida louhosjärvässä vedenpinnan alapuolella tapahtuvaa mineraalien hapettumista tai pelkistymistä, koska happipitoisuuden ollessa vedessä selvästi ilmaa pienempi, tapahtuu mineraalien hapettuminen pääosin kosteissa olosuhteissa vedenpinnan yläpuolella.

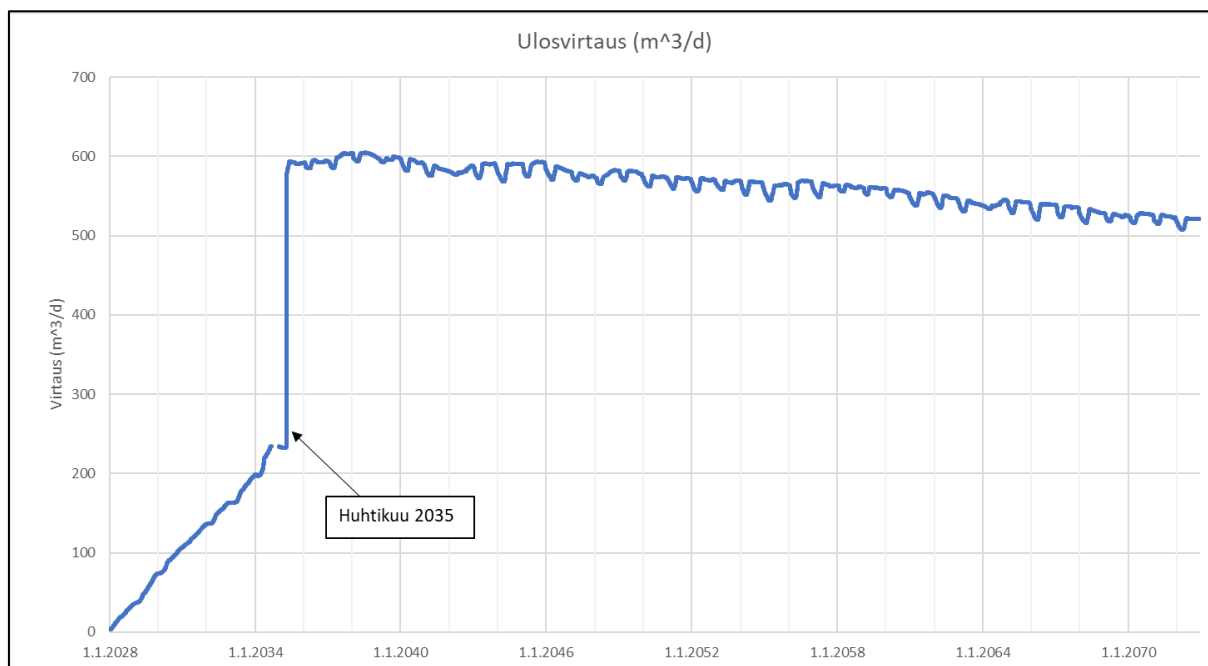


6 Laskennan tulokset

Laskennassa louhosjärveen ohjattiin vettä avolouhoksen lähiympäristöstä (mikrovaluma-alueilta), kaikki vesi pyriittialtaalta ja 75–100 % vedestä rikastushiekka-altailta. Nykyiseltä rikastushiekka-altaalta louhosjärveen ohjattiin 75 % vedestä ja vaihtoehtoon VE1 mukaisen rikastushiekka-altaan laajennuksen vedet kokonaisuudessaan. Lisäksi huomioitiin louhokseen tuleva pohjavesi sekä sadanta.

Laskenta tehtiin 80 vuoden jaksolle, jonka aikana louhosjärvi ehti täyttyä ja järven kemiallinen koostumus vakiintua. Järven täyttymiseen 26 m tasolle meni noin 7 vuotta, minkä jälkeen järvestä alkoi poistua vettä pääasiassa ulosvirtaamana. Tätä ennen vettä poistui ainoastaan haihtumalla ja suotautumalla pohjaveteen. Suotautuminen pohjaveteen on melko vähäistä, mitä tukevat louhoksen kuivatuspumppausten ja pohjavesimallinnusten (AFRY Finland, 2022) tulokset ja havainnot alueen pohjavesiputkista. On kuitenkin huomattava, että kallioperän hydraulisella johtavuudella on merkittävä vaikutus järven täyttymiseen ja että hydrauliseen johtavuuteen liittyvät myös mallinnuksen suurimmat epävarmuudet. Pienet muutokset hydraulisessa johtavuudessa muuttavat vesitasetta ja avolouhoksen täyttymisastetta huomattavasti.

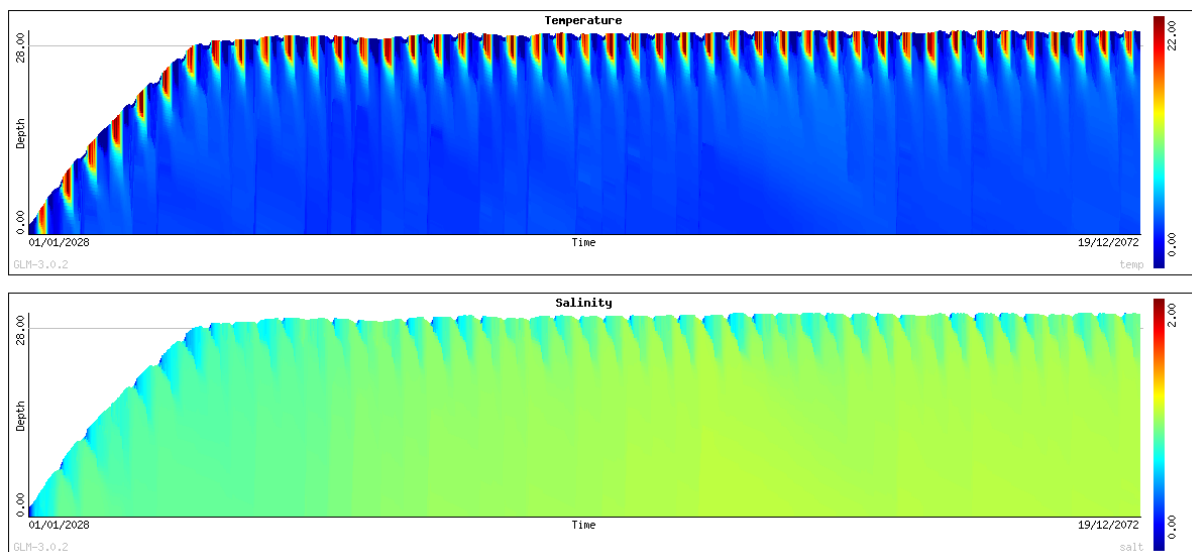
Alla olevassa kuvassa (Kuva 6-1) on esitetty avolouhoksesta sulkemisen jälkeen poistuvan veden kokonaismäärää. Louhoksen täyttymisaikana vettä poistuu ainoastaan haihtumalla ja suotautumalla pohjaveteen, ja louhoksen vedenpinnan noustua ulosvirtaustasolle alkaa veden ulosvirtaus pitkin mallinnettua virtauskanavaa. Suotautuminen pohjaveteen on sitä suurempaa, mitä korkeammalla vedenpinta louhosjärvestä on, mutta poistouoman ulosvirtaus on hallitsevassa asemassa. Veden suotautuminen louhosjärvestä kalliopohjaveteen on mallinnuksen mukaan enintään noin 250 m³/vrk.



Kuva 6-1. Veden virtaus louhosjärvestä ulos. Louhosjärven pinta nousi mallinnuksessa ulosvirtaustasolle huhtikuussa 2035, minkä jälkeen ulosvirtaus alkoi. Sitä ennen louhoksesta poistui vettä ainoastaan suotautumalla pohjaveteen ja haihtumalla.

Järven täytyttyä ulosvirtaustasolle (26 m vesisyvyys, 200 m mpy) pinnan tasossa on jonkin verran vaihtelua, ja ulosvirtausta tapahtuu uomaan pitkin keskeytyksellä. Vedenpinta nousee ajoittain lähelle avolouhoksen yläreunaa. Pinnan korkeuden vaihtelu liittyy sadannan vaihteluun ja sadeveden tulon järveen sekä suorana sadantana että lähialueiden pintavaluntana. Sadannalla ja keväisellä sulannalla on hallitseva vaikutus järven vesitaseeseen.

Mallinnuksessa ei havaittu syntyvän lämpötila- ja suolaisuuskerrostuneisuutta. Pinnan läheisessä osassa vesimassaa lämpötila vaihteli vuodenaikojen mukaan. Järven suolapitoisuus oli alhainen, eikä halokliiniä muodostunut. Alhainen suolaisuus johtuu sadannan hallitsevasta vaikutuksesta vesitaseeseen. Kerrostumattomuuden vuoksi louhosjärvestä tapahtuu vuotuinen täyskierto, mikä osaltaan tasoittaa suolaisuus- ja lämpötilaeroja. Lämpötilan ja suolaisuuden kehitys on esitetty alla, Kuva 6-2. Kuvasta näkyy myös, kuinka pintaveden lämpenemisvaikutus ja vähäsuolaisuus ulottuvat järven syvempiin osiin ja vesi pääsee sekoittumaan kauttaaltaan.



Kuva 6-2. Sotkamo Silver Oy:n hopeakaivoksen avolouhos: lämpötila ja suolaisuus 80 vuoden simulaatiossa. Vaaka-akselilla on aika (0–80 vuotta) ja pystyakselilla vedenpinnan taso (m). Väreillä on kuvattu lämpötilaa ja suolaisuutta, yläkuvassa on veden lämpötilan vaihtelu (0–22°C) ja alakuvassa suolaisuuden vaihtelu 0–2 g/l TDS).

7 Johtopäätökset

Louhosjärven täyttymisen ja jälkihoidon osalta keskeisenä tavoitteena on saavuttaa aikanaan järvestä ulos valuvan veden mahdollisimman hyvä laatu sekä järvestä alapuoliseen vesistöön tai pohjaveteen aiheutuvan kuormituksen minimointi. Veden laatuun vaikuttaa olennaisesti louhosjärven suolapitoisuus, suolakerrostuneisuuden muodostuminen ja sen pysyvyys. Tehtyjen mallinnusten perusteella Sotkamo Silver Oy:n hopeakaivokseen muodostuvaan louhosjärveen ei muodostu selkeää halokliinia, ja järven veden voidaan katsoa sekoittuvan kokonaisuudessaan. Louhosjärvestä ulos virtaavan veden saliniteetti on noin 970 mg/l.

Laskennan mukaan louhosjärvi täyttyy ulosvirtaustasolle (200 m mpy) noin 7 vuodessa. Arviossa tulee kuitenkin huomioida, että malli ei huomioi mahdollista avolouhoksen ja maanalaisen kaivoksen välistä yhteyttä joko rakoilun tai maanalaisen kaivoksen ja avolouhoksen välisen tiivistyksen tai täytön kautta. Laskennassa ei myöskään huomioida ympäröivää pohjavedenpainetta, johon alla oleva maanalainen kaivos täyttymisvaiheessa vaikuttaa. Täyttymisen jälkeen vedenpinta vaihtelee sateiden ja sulannan vaikutuksesta. Pinnankorkeus on ulosvirtauksen alettua keskimäärin 201,50 m mpy, ja ajoittain vedenpinta nousee lähelle avolouhoksen reunaa. Valtaosa louhosjärvestä poistuvasta vedestä poistuu valuntana poistouomaa pitkin Pieneen Tipasjärveen ja osa vedestä poistuu suotautumalla pohjaveteen. Lisäksi vettä haihtuu louhosjärvestä.

Mallitarkastelu on alustava, ja riippuu paljon esimerkiksi järveen tulevan ja sieltä lähtevän pohjavesivirtaaman määrästä ja laadusta, joita ei tässä vaiheessa tunneta tarkasti. Mallia voidaan jatkossa tarkentaa erilaisten vedenhallintamallien sekä toiminnanaikaisten mittausten perusteella.

8 Suositukset jatkotoimenpiteiksi

Louhosjärven täyttymisen ja kerrostumisen laskentatuloksiin vaikuttavat tulevat ja lähtevät virtaamat, niiden pitoisuudet ja mallinnuksessa käytetyt parametrit. Mallinnuksen tarkkuus on riippuvainen lähtöaineiston tarkkuudesta.

Tulevien virtaamien pitoisuudet perustuvat tässä geokemiallisen laskennan tuottamiin arvioihin ja alueelta tehtyyn näytteenottoon. Niitä voidaan tarkentaa mittaamalla louhokseen tulevien ja louhoksesta poistettavien vesien laatua ja määriä.

Louhosjärven vesimäärät on laskettu säätietojen, pohjavesimittausten, louhoksen vuotovesimäärien ja alueen geologisten ominaisuuksien perusteella. Arvoja voidaan tarkentaa tekemällä vedenjohtavuusmittauksia maaperässä ja mittaamalla kallioperän ja ruhjeiden vedenjohtavuutta hydrologisin kairareikämittauksin. Koska suurimmat epävarmuudet mallinnuksessa liittyvät kallioperän hydrauliseen johtavuuteen, parantaisivat vedenjohtavuusmittaukset mallinnuksen tarkkuutta ja luotettavuutta tehokkaimmin. Suositeltavaa olisi määrittää kallion hydraulinen johtavuus nykyistä tarkemmin, jolloin voisi mahdollistua louhosjärven poistouoman syventäminen ilman että se vaikuttaisi Taivaljärven pinnankorkeuteen. Poistouoman syventäminen kasvattaisi louhosjärven tulvavaraa.

Tyypillisesti voimakkaimmin vaikuttavat parametrit järven kerrostumisen laskennassa ovat tulevien vesien sekoittumista määräävät parametrit. Sekoittumista lisäämällä kerrostuminen vähenee tai jopa loppuu kokonaan, koska kerrostumista ei synny, ellei pinta- ja pohjakerroksen välillä ei ole riittävää tiheyseroa. Tässä on oletettu seinämiä pitkin valuvan veden sekoittuvan louhosjärvestä huonosti, sillä valumaveden nopeus on todennäköisesti pieni, eikä tiheysero ole riittävä aikaansaamaan kerrostumista.

Merkittävässä osassa kerrostumisen muodostumisessa ja pidemmän ajan pitoisuustasoissa on, mitkä ovat seinämiä pitkin valuvan veden pitoisuudet, ja mikä on näiden vesien määrä. Näistä vesistä saadaan parhaiten tietoja mittaamalla kaivoksen kuivatusvesien laatua ja määriä.

Pintavalunnan koostumusta voidaan selvittää tutkimalla maanpinnan läheltä otettavia vesinäytteitä. Mittausten perusteella pintavalunnan koostumus voidaan huomioida laskennassa, ja sillä voi olla merkitystä järven suolaisuuden kehitykselle.

Tarkemmat mittaukset eri vesijakeiden määristä ja laaduista ovat suositeltavia. Lisäksi seinämävesien pitoisuuden laskentaa voitaisiin tarkentaa yksityiskohtaisen geologisen (mineralogisen) kartoituksen tuloksilla, ja koska seinämävesien vaikutus on yleensä suuri, se olisi suositeltavaa.



Lähdeluettelo

AFRY Finland Oy, 2022. Sotkamo Silver Oy, Rikastushiekka-altaan ja pyriittialtaan peittokerroksen mallinnus.

AFRY Finland Oy, 2024a. Sotkamo Silver Oy - Sulkemisen jälkeiset vesilaadut Sotkamo Silverin kaivannaisjätteiden läjitysalueilla ja louhosjärvessä.

AFRY Finland Oy, 2024b. Sotkamon hopeakaivoksen numeerinen pohjavesimalli.

Berrisford P., Dee D., Poli P., Brugge R., Fielding K., Fuentes M., Kallberg P., Kobayashi S., Uppala S. and Simmons A., 2011. The ERA-Interim archive Version 2.0, ERA report series no 1, November 2011, ECMWF.

GLM 2021. The General Lake Model home page, <http://aed.see.uwa.edu.au/research/models/GLM/index.html>, accessed 02/2021.

Hipsey, M. R. and Bruce, L. C. and Boon, C. and Busch, B. and Carey, C. C. and Hamilton, D. P. and Hanson, P. C. and Read, J. S. and de Sousa, E. and Weber, M. and Winslow, L. A., 2019. "A General Lake Model (GLM 3.0) for linking with high-frequency sensor data from the Global Lake Ecological Observatory Network (GLEON)", Geoscientific Model Development, 12(1), pp 473--523, <https://www.geosci-model-dev.net/12/473/2019/>.

Ilmatieteenlaitos, 2021. Ilmatieteen laitoksen avoin data, haettu 12/2021, <https://ilmatieteenlaitos.fi/avoin-data>.

SYKE, 2022. Vesistömallijärjestelmä WSFS-VEMALA, valunta- ja kuormitustiedot, haettu 1/2022, <https://vmalli.ymparisto.fi/vuok/html/main.shtml>