

Liite 12a

Rikastushiekka-alueen geokemiallisen mallinnuksen raportti

## Suomennos Kevitsa Mine: Tailings Storage Facility Geochemical Modelling Report 2025 / Rikastushiekka- alueen geokemiallisen mallinnuksen raportti 2025

### Yhteenveto

Mine Environment Management (MEM) on saanut toimeksiannon Boliden Kevitsa Mining Oy:ltä suorittaa yksityiskohtainen geokemiallinen mallinnus, jonka tavoitteena on ennustaa pitkän aikavälin suotoveden laatua eri rikastushiekka-altaiden suunnitteluvaihtoehdoille Kevitsan kaivosalueella. Tämä työ on osa ympäristövaikutusten arvioinnin (YVA) ja lupaprosessin päivitystä sekä kaivoksen sulkemissuunnittelua. Suotovesien laatuarviot toimivat lähtötietoina muiden osapuolten tekemille teknisille selvityksille mukaan lukien haitta-aineiden kulkeutumismallille (WSP:n toteuttama) sekä vesi- ja kuormataseelle (SRK:n toteuttama).

Rikastushiekka-allasvaihtoehdot, joita arvioidaan ovat TSFA, TSFB, TSFA2 ja TSFB2. Näistä TSFA on suurin, ja sen lopulliset korkeudet ovat 65 m ja 95 m. Rikastushiekka-altaat TSFB, TSFA2 ja TSFB2 ovat pienempiä, korkeudeltaan alle 10 metristä 20 metriin. Rikastushiekka-altaiden A ja B hallinta eroaa toisistaan, sillä rikastushiekka-allas B sisältää enemmän sulfideja. TSFB ja TSFB2 on suunniteltu pohjalle asennetulla teknisellä tiiviillä pohjarakenteella.

Mallinnuksessa arvioidut vaihtoehdot olivat VE0, VE0+, VE1.1 ja VE1.3. Kaikissa vaihtoehdoissa geokemiallista mallinnusta käytettiin arvioimaan mahdollisen suotoveden laatua (veden kemialla) yli 200 vuoden ajanjaksolla rikastushiekka-altaissa. Tämä arvio on laadittu määrittämään mahdollisen tulevan lähdetermin (source term) kemian rikastushiekka-altaalle, ja se perustuu rikastushiekan ja tarvekivimateriaalin sekä mahdollisesti suotautuvan veden (sateen tai prosessiveden) vuorovaikutukseen. Lähdetermi siis tässä yhteydessä kuvaa rikastushiekka-altaasta tulevan suotoveden laatua. Lähdetermin tuotettiin erikseen jokaiselle laitokselle (TSFA, TSFA2, TSFB ja TSFB2). Arviointi toteutettiin käyttämällä:

- Numeerinen reaktiivinen kulkeutumismalli, jonka avulla arvioidaan rikastushiekka-altaan läpi suotautuvan veden laatua sen kulkeutuessa pystysuunnassa pohjaveteen (pystysuuntainen kulkeutumisreitti) sekä suotovesien keräysjärjestelmään (vaakasuuntainen kulkeutumisreitti), joka on asennettu rikastushiekka-altaan juureen (ulompaan pengerrakenteeseen).
- Excel-pohjainen numeerinen malli, joka antaa erillisen arvion veden laadusta suotautumisessa (vaakasuuntainen virtausreitti) pengeralueen tarvekivitäytön läpi (alue, joka sisältää tarvekiveä) suotovesien keräysjärjestelmään, joka on asennettu rikastushiekka-altaan juureen.

Mallinnuksen yleinen laajuus sisälsi päivityksiä MEM:n vuonna 2019 tekemään malliin TSFA:lle, mukaan lukien:

- Sisällyttäen keskilinjaankorotuksen rakentamistavan TSFA:lle
- Nykyisen TSFA-mallin päivitys 270 metrin korkeuteen (VE0)
- Mallin lisäpäivityksiä TSFA:n vaihtoehtoihin korkeuksille 280 m (VE0+) ja 310 m (VE1.1)
- Mallin mukauttaminen tuottamaan tuloksia TSFA2:lle (VE1.3), olettaen rikastushiekan maksimikorkeus noin 47 m

- Mallin mukauttaminen tuottamaan tuloksia TSFB:lle ja TSFB2:lle
- Uudelleen luokitellun tarvekivi materiaalin, jota tässä raportissa kutsutaan ympäristötarvekiveksi (EW, environmental waste rock) ja nykyisen tarvekiven (USW) huomioiminen TSFA:n keskilinjaankorotuksen rakentamisessa (penkereissä)
- Erilaisten peittorakenteiden suunnitteluvaihtoehtojen tarkastelu TSFA:n osalta

USGS:n ohjelmistoa PHREEQC (versio 3.8.6-17100) käytettiin reaktiivisen kulkeutumis- ja tasapainomallinnuksen suorittamiseen yksisuuntaiselle profiilille, joka edustaa rikastushiekka-aluetta (suurin osa sijaitsee lakialueen alla). Tällä määritettiin geokemialliset lähdeterminit (mahdollinen suotoveden kemia) käyttäen Minteq.v4-terminodynaamista tietokantaa, jota oli täydennetty julkaistun kirjallisuustiedon perusteella, mallissa tarvittavien lisäyhdisteiden osalta.

Reaktiivinen kulkeutumismalli rakennettiin yksisuuntaisena pystysuorana pylväänä, joka edustaa rikastushiekkaprofiilin koko paksuutta annetuissa vaihtoehdossa. Tässä raportissa kuvattuja reaktiivisen kuljetusmallin (PHREEQC-pylväs) tuloksia voidaan käyttää kahden lähdetermin määrittämiseen. Ensimmäinen ennen tasapainotusta kaasumaisten aineiden kanssa, joka edustaa suoraa suotautumisreittiä rikastushiekka-alueen alla olevaan pohjaveteen ja jota käytetään syötteenä pohjaveden haitta-aineiden kulkeutumismalliin (WSP:n toteuttama). Toinen kaasujen kanssa tasapainotuksen jälkeen, mikä edustaa vaakasuuraa suotautumisreittiä suotovesien keräysjärjestelmiin, jotka on asennettu rikastushiekka-alueiden juureen (ja jota käytetään syötteenä SRK:n vesi- ja kuormatase mallissa).

Pylvään läpi tapahtuva suotautumisnopeus (infiltraationopeus) asetettiin Okane-yhtiön (OKC 2025) rikastushiekka-allas A:lle suorittamien suotautumismallien tulosten mukaisesti. Muiden rakenteiden osalta suotautumisnopeus määritettiin rakenteen läpi suotautuvan veden määrän (nettoperkolaation) arvioiden perusteella (koska yksityiskohtaista pitkän aikavälin suotautumismallinnusta ei ole tehty sulkemisvaiheelle). Mallissa suotautumisnopeus liittyy olennaisesti rikastushiekka-altailta raportoituun suotovirtaukseen. Merkittäviä kemiallisia prosesseja, jotka sisältyvät malliin, ovat liukoisten aineiden liukeneminen rikastushiekan huokosveteen, sulfidimineraalien hapettuminen, liuenneen hiilidioksidin reaktiot, joidenkin karbonaattien ja silikaattien kinetiikkaan perustuva liukeneminen, liuenneiden aineiden adsorptio rautaoksidimineraalien pinnoille sekä tiettyjen sekundaaristen mineraalifaasien tasapaino ja saostuminen. Malliin sisällytettiin useita kohdekohtaisia mineraalifaaseja yksityiskohtaisen mineralogisen analyysin perusteella.

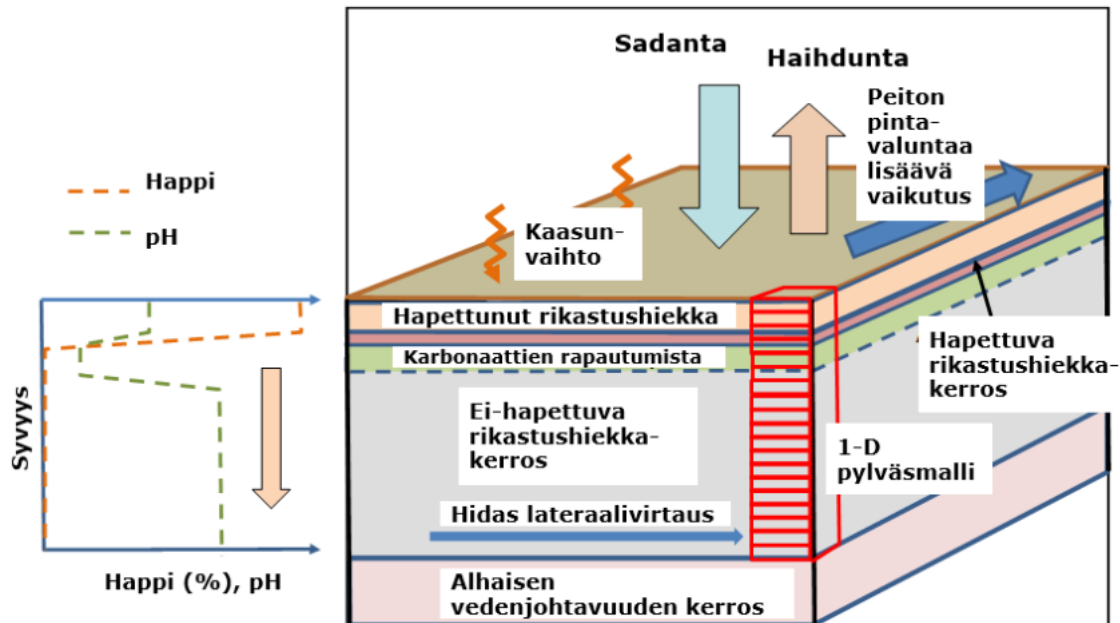


Figure 1 Reaktiivisen kulkeutumisen konseptuaalinen malli.

Mallien keskeiset syötteet perustuvat Kevitsassa vuodesta 2019 lähtien toteutetun kattavan karakterisoinnin ja kineettistestien yhteydessä kerättyyn aineistoon. Tämä on dokumentoitu ja tulkittu viimeksi kineettisten testien raportissa (MEM, 2025a). Reaktiivinen kulkeutumismalli olettaa, että rikastushiekka-alue on täysin rakennettu mallijakson alussa, mutta on olemassa ajanjakso, jolloin peittorakenne ei ole vielä valmis (OKC, 2025). Tämän vuoksi pylvään yläosaan suotautuva vesi oletetaan sadeveden kaltaiseksi vaihtoehdoissa, joissa on moreeni- tai ei-peitettyä. Herkkyystarkastelu tehtiin arvioimaan, kuinka rikastushiekan yläpuolelle sijoittuva osa tarvekivipenkereestä vaikuttaa rikastushiekkaan. Suotautuvaan liuokseen sisällytettiin myös hapen virtauksen vaikutus, joka on mallinnettu rikastushiekka-allas A:lle OKC:n toimesta (OKC 2025). Kohdissa, joissa ei ole vielä peittorakennetta (odotetaan lopullista moreeni- tai ei-peitettyä) hapen virtaus on 5–10 mol/m<sup>2</sup>/vuosi, ja lopullisella moreeni- tai ei-peitteellä se on 1–3 mol/m<sup>2</sup>/vuosi.

Lakialueelle käytettiin reaktiivista kulkeutumis-/tasapainomallia, joka toteutettiin PHREEQC-ohjelmalla. Tulokset (reaktiivinen kulkeutumismalli) käsiteltiin Excelissä. Erillinen Excel-pohjainen malli laadittiin geokemiallisten lähdetermien mallintamiseen rikastushiekka-alueen penkereiden (rinteiden) osalta. Penkereen alueella, jossa suuri osa profiilin paksuudesta on tarvekiveä (pengeri on osittain rikastushiekan päällä). Tähän mennessä rikastushiekka-alueiden rakentamisessa on käytetty USW-tarvekiveä, mutta mallinnuksessa tarvekivi oletettiin ympäristötarvekiveksi (EW) konservatiivisen arviointitavan varmistamiseksi. Malli perustui samoihin keskeisiin syötteisiin ja oletuksiin, joita käytettiin myös osana sivukivialueen lähdetermimallinnusta (MEM, 2025b), jotta eri mallien välillä vallitsi johdonmukaisuus. Malli oletti peittorakenteen toimivuuden olevan linjassa OKC:n suorittaman suotoveden ja hapen kulkeutumismallinnuksen kanssa (OKC, 2025). Huomionarvoista on, että pohjoispenkereellä on erittäin matalan suotautumisen peittorakenne (keskimääräinen suotautuminen eli netto perkolaatio ~ 25

mm/vuosi) ja eteläpenkereellä on samankaltainen peittorakenne kuin sivukivialueella, jossa netto perkolaatio ~ 140 mm/vuosi.

Reaktiivisen kulkeutumismallin ja Excel-mallien yhdistelmää käytettiin geokemiallisten lähdetermin laatimiseen rikastushiekka-altaan B rakenteelle. Rikastushiekka-allas B:n osalta suotovesivirtaaman suurimmaksi mahdolliseksi määräksi oletettiin jopa 180 mm/vuosi operatiivisen ajanjakson aikana, WSP:n (WSP, 2025) toimittamien tietojen perusteella, ja pitkän aikavälin hapen kulkeutumisen enimmäismääräksi oletettiin 3–5 mol/m<sup>2</sup>/vuosi (huomioiden, että rikastushiekka-allas B:lle ei ole tehty hapen kulkeutumisen mallinnusta, joten rikastushiekka-allas A:n peittorakenteen mallinnustuloksia käytettiin konservatiivisena arviona). Kenttä- ja laboratoriotestien tietoja käytettiin lähdetermin säätämiseen rikastushiekka-allas B materiaalin erilaisten geokemiallisten ominaisuuksien mukaisesti.

Mallin oletukset:

- Mallinnuksessa on oletettu, että rikastushiekka-aldaiden lopullinen rakennuskorkeus on jo saavutettu, rakentamismvaihetta (eli käyttöaikaa) ei ole mallinnettu erikseen.
- Varovaisuuden vuoksi mallinnuksessa on oletettu, että tulevien rikastushiekka-aldaiden padot koostuvat tarvekivestä, jolla on ympäristötarvekiven (EW) ominaisuudet. On huomioitava, että tähän mennessä rikastushiekka-aldaiden pengerryksissä on käytetty USW-materiaalia, ja koska ympäristötarvekivi on osa UNW-materiaalia, malli on siten konservatiivinen tulevien rakentamismvaihtoehtojen suhteen (verrattuna nykytilanteeseen, jossa käytetään vain USW-materiaalia rakentamiseen).
- Hiilidioksidin virtaus rikastushiekka-alueelle on verrannollinen ilmahan happipitoisuuteen, jossa hapen saatavuutta on rajoitettu hapenkulkeutumismallinnuksen perusteella.
- Metallien/metalloiden liukenemisnopeudet keskeisille yhdisteille on määritetty tähän mennessä kerättyjen empiiristen testitulosten perusteella (peräkkäiset liuotustestit ja pH-liukoisuus sekä kineettiset testit).
- Rikastushiekka on oletettu homogeeniseksi sekä pystysuunnassa että vaakasuunnassa koko rakenteen alueella. Tavanomaisessa rikastushiekan levityksessä, jota kohteessa on käytetty tähän asti, muodostuu ranta-alueita, joihin karkeammat ja tiheimmät partikkelit laskeutuvat, ja kosteampia rikastushiekka vyöhykkeitä, joihin hienommat ja vähiten tiheet partikkelit laskeutuvat. Tämän oletuksen paikkansapitävyyden arvioimiseksi on tehty kineettisiä testejä rannalta ja suoraan jakoputkesta kerätylle rikastushiekalle. Tulokset viittaavat siihen, että rannan rikastushiekalla on samanlainen tai pienempi metallien liikkuvuusriski.
- Malli olettaa, ettei syöttöparametreissa ole kausivaihtelua, erityisesti kaasun tai kosteuden virtaamisissa. Todellisuudessa talvikuukausina mahdollinen sademäärä tulee lumena, ja rikastushiekan pinta voi jäätymä tiettyyn syvyyteen asti. Keväällä sulamisen aikana voi tapahtua lumen sulamisveden nopeaa poistumista ja odotettua vähäisempää imeytymistä rakenteeseen. Malli olettaa, että imeytyminen on vakio, ja mahdollinen kausivaihtelu tasoittuu suurelta osin rikastushiekka-alueen läpivirtausajan kuluessa.
- Kulkeutumis aika rikastushiekka-altaan läpi oletetaan vakioksi, ja myös pohjalta tapahtuva suotautuminen on suhteellisen tasaista johtuen pylvään tulppavirtauksesta.
- Penkereen herkkyysanalyysin reaktiivisessa kulkeutumismallissa rikastushiekkaa peittävä tarvekivi materiaali kuluttaisi suurimman osan tai kaiken peittorakenteen läpi kulkeutuvasta hapesta, joten hapen kulkeutuminen ei sisälly näihin vaihtoehtoihin. Sillä tässä oletetaan, että kaikki happi kulutetaan ennen kuin se saavuttaa rikastushiekka-aineksen.

- Rinteiden peittorakenteiden veden läpäisevyyden oletetaan olevan (NP, net percolation) NP=25 mm/v pohjoisrinteellä ja NP=140 mm/v etelärinteellä.
- Rikastushiekka-allas B:n suotautumisen määräksi pohjalta oletettiin enintään 180 mm/vuosi WSP:n (2025) toimittamien tietojen perusteella, ja hapen kulkeutumiseksi oletettiin 3–5 mol/m<sup>2</sup>/vuosi. Kenttä- ja laboratoriotestien tuloksia käytettiin keskeisten lähtöarvojen säätämiseen rikastushiekka-allas B materiaalin erilaiset geokemialliset ominaisuudet huomioiden.

Mallin rajoitukset sisältävät seuraavat:

- Malli ei sisällä liuenneita rikkiyhdisteitä muita kuin S-2 ja SO<sub>4</sub>.
- Malli ei suoraan simuloi kaasujen kulkeutumista rikastushiekan pinnan läpi, vaan siinä oletetaan hapen kulkeutuminen vakioksi. Happi kulkeutuu pylvään yläosaan OKC:n tuottaman hapen kulkeutumismallinnuksen perusteella.
- Malli ei simuloi vuodenaikaisvaihteluita veden läpäisevyydessä; imeytyminen oletetaan vakioksi, ja näin ollen sisäisen suotoveden virtauksen oletetaan tapahtuvan tulppavirtauksena.
- Koska virtauksen oletetaan olevan tulppavirtausta, diffuusio- tai dispersioprosesseja ei ole mukana.
- Tuloksia on verrattu kenttähavaintoihin ja laboratoriotestaukseen tulosten vahvistamiseksi. Malleihin kuitenkin sisältyy epävarmuutta. Rajoitukset liittyvät käytettävissä olevaan dataan, käsitteellisen mallin perustaan sekä mallinnusohjelmiston kykyyn kuvata kyseistä mallia. Kuten kaikissa luonnonjärjestelmissä, kaikkia muuttujia ei voida sisällyttää, mutta tämänhetkisen ymmärryksen ja saatavilla olevan tiedon perusteella on käytetty tarkoituksenmukaisimpia prosesseja ja tietoja.
- Suotautumisen vuorovaikutusta pohjalla olevien kerrosten, kuten turvekerroksen, kanssa ei ole huomioitu lähtöarvojen määrittelyssä (eli mallin tuottaman suotoveden geokemiallinen koostumus on rikastushiekan pohjalla).

Keskeisten johtopäätösten suomennos löytyy kappaleesta 10.1.

## 1. Tausta ja laajuus

### 1.1 Tausta

Mine Environment Management (MEM) sai toimeksiannon Boliden Kevitsa Mining Oy:ltä suorittaa geokemiallista mallinnusta, jonka tarkoituksena on tuottaa pitkäaikaisia arvioita suotoveden laadusta Kevitsan kaivosalueelle ehdotettujen rikastushiekka-altaiden vaihtoehtojen osalta. Tämä työ on osa ympäristövaikutusten arvioinnin (YVA) ja lupaprosessin päivitystä sekä kaivoksen sulkemissuunnittelua. Tämä raportti kuvaa rikastushiekka-altaiden mallinnukseen liittyvän työn laajuuden.

MEM on aiemmin suorittanut geokemiallista mallinnusta ja pitkän aikavälin vedenlaadun ennustamiseksi Kevitsan nykyiselle rikastushiekka-altaalle (MEM 2019a). Vuoden 2025 tutkimus ja tässä raportissa esitetty mallinnus tulee nähdä alkuperäisen mallin (MEM 2019) päivityksenä, ei täysin erillisenä mallina. Raportti kuvaa mallinnuksen päivityksiin liittyvän työn laajuuden, mutta suuri osa mallinnuksessa käytetystä aineistosta on peräisin MEM:n erillisistä teknisistä projekteista. Siksi tämä raportti tulisi lukea yhdessä seuraavien raporttien kanssa:

- Tailings Storage Facility Geochemical Predictive Modelling (MEM 2019a)

- Kevitsa mine; detailed geochemical and waste characterisation technical assessment (MEM 2019b)
- Kinetic testing of Kevitsa waste rock and tailings materials Q3–4 2024 (MEM 2025a)
- Waste rock storage facility geochemical modelling (MEM 2025b)
- Kinetic testing of EW rock to inform refinement of cut-off criteria for Kevitsa (MEM 2025c)
- Kinetic testing of Kevitsa waste rock and tailings materials Q1–2 2025 (MEM 2025d)

Bolidenin pyynnöstä mallinnettiin kolme (3) vaihtoehtoa: VE0+, VE1.1 ja VE1.3.

## 1.2 Työn laajuus

MEM:n suorittaman työn laajuus on lyhyesti esitetty alla:

- Päivitettiin olemassa oleva geokemiallinen malli ja parametrisointi suunnitteluvaatimusten sekä rikastushiekan koostumuksen muutosten perusteella
- Sisällytettiin muutos keskilinjaan korotuksesta ja suuremman tukipenkereen lisääminen
- Päivitettiin olemassa oleva TSFA-malli korkeuteen 270 m (VE0)
- Tehtiin lisäpäivityksiä malliin korkeusversioille 280 m (VE0+) ja 310 m (VE1.1) TSFA-vaihtoehdossa
- Mukautettiin malli tuottamaan tuloksia TSFA2:lle (VE1.3), oletettu maksimikorkeus noin 47 m
- Mukautettiin malli tuottamaan tuloksia TSFB:lle ja TSFB2:lle
- Ympäristötarvekivimateriaalin käyttö otettiin konservatiivisesti huomioon mallinnusvaihtoehdoissa osana TSFA:n keskilinjaan korotusta (penkereissä)
- Tarkasteltiin vaihtoehtoisia luiskankorotuksia peittorakenteiden ratkaisuja TSFA:lle
- Tarkasteltiin vaihtoehtoisia peittorakenteiden ratkaisuja TSFA:n lakialueella.

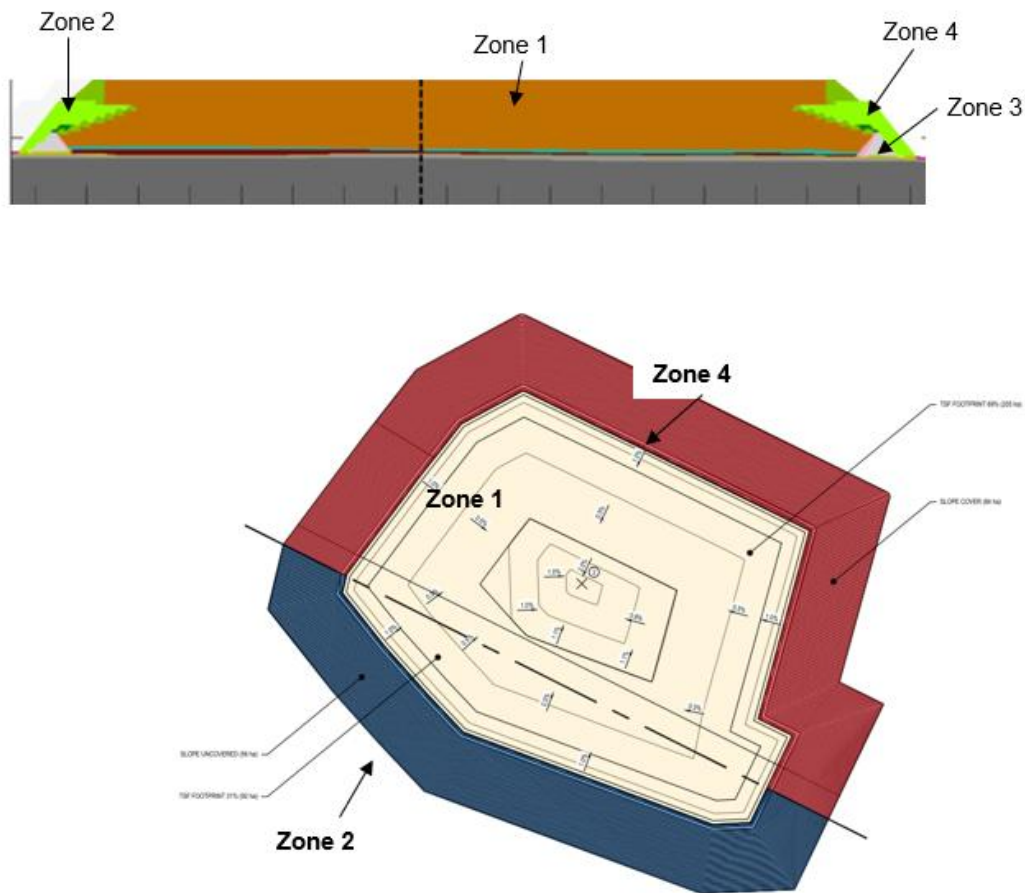
## 5.1 Mallin soveltaminen TSF:n keskeisiin vyöhykkeisiin

MEM 2019 -konseptimallin pohjalta TSFA on jaettu neljään päävyöhykkeeseen sekä lisäksi TSFB- ja TSFB2-rakenteisiin (kuva 12):

- Vyöhyke 1: Lakialueen peittorakenteiden alainen alue
- Vyöhyke 2: Louhepenkereiden eteläpuolisten rinteiden alainen alue
- Vyöhyke 3: Alkuperäisen penkereen alue (ei mallinnettu erikseen, koska sisältyy penkereisiin)
- Vyöhyke 4: Louhepenkereiden pohjoispuolisten rinteiden alainen alue
- TSFB1 (VE0, VE0+)
- TSFB2 (VE1.1)

TSFA2 on jaettu kahteen päävyöhykkeeseen:

- Vyöhyke 1: Lakialueen peittorakenteiden alainen alue
- Vyöhyke 2: Louhepenkereiden alainen alue (kuin TSFA:n vyöhyke 2)



Kuva 12 TSFA-altaan poikkileikkaus ja pohjapiirros, joissa näkyvät mallinnuksen kannalta keskeiset vyöhykkeet (Zone) (OKC 2025 ja MEM 2019).

Vyöhyke 1 sisältää paksuimman osan rikastushiekasta, joka sijaitsee lakialueen alla (paksuus vaihtoehdosta riippuen 40–95 m), ja kattaa suurimman pinta-alan verrattuna vyöhykkeisiin 2–4. Tälle alueelle suunnitellaan moreenipeittorakennetta, joka vähentää veden läpäisyä ja -ja hapen kulkeutumista vyöhykkeeseen 2 verrattuna, mutta ei yhtä tehokkaasti kuin vyöhykkeellä 4. Merkittävän paksuuden vuoksi tämä vyöhyke valittiin yksityiskohtaisen reaktiivisen kulkeutumismallin pääkohteeksi.

Vyöhykkeitä 2 ja 4 ei sisällytetty reaktiiviseen kulkeutumismalliin, koska ne koostuvat pääosin tarvekivistä, ja niihin sovellettiin samaa mallinnuslähestymistapaa kuin sivukivialueelle (Kevitsa Mine: Waste Rock Storage Facility Geochemical Predictive Modelling 2025). Vyöhykkeelle 1 tehtiin lisäksi herkkyysanalyysijä, joissa arvioitiin EW/USW-tarvekivi materiaalin sijoittamista rikastushiekan päälle, mikä voi olla tilanne louhepenkerealueilla. Näin voitiin arvioida myös louhepenkerealueen pieni osa, jossa tarvekiveä on rikastushiekan päällä (on huomioitu, että osa reaktiivisen kulkeutumisen mallinnuksesta tehtiin ennen arviota mahdollisesta sivukivimateriaalin (UNW) uudelleen luokittelusta ympäristötarvekiveksi (EW), joten mallin nimissä käytetään USW-termiä. Mallin syötteet kuitenkin soveltuvat sekä EW- että USW-oletuksiin).

## 10. Johtopäätökset

### 10.1 Yleiset johtopäätökset mallinnuksesta

Mallinnusarvioinnin perusteella on tehty seuraavat yleiset johtopäätökset:

- Rikastushiekkaan sitoutuneen huokosveden (prosessista rikastushiekkaan tuleva vesi) huuhtoutuminen on osoittautunut hallitsevaksi tekijäksi suotoveden laadulle mallijakson ensimmäisten 80+ vuoden aikana vyöhykkeellä 1 TSFA:ssa ja TSFA2:ssa kaikissa mallinnetuissa vaihtoehdoissa (eli VE0+, VE1.1, VE1.3).
- Koska huokosveden huuhtoutumisen on arvioitu kestävän pitkään, suotoveden laadun ei ennusteta muuttuvan merkittävästi vähintään 80 vuoteen vyöhykkeellä 1 TSFA:ssa ja TSFA2:ssa kaikissa mallinnetuissa vaihtoehdoissa (eli VE0+, VE1.1, VE1.3).
- Koska vyöhykkeen 1 pinta-ala on huomattavasti suurempi kuin vyöhykkeiden 2 tai 4 TSFA:ssa ja vyöhykkeen 2 TSFA2:ssa, vyöhyke 1 todennäköisesti hallitsee pohjalla tapahtuvan suotoveden laatua kaikissa mallinnetuissa vaihtoehdoissa (eli VE0+, VE1.1, VE1.3).
- Koska suotautumismallinnuksen (OKC 2025) mukaan vyöhykkeen 1 kautta suotovesiojaan kulkevan suotoveden osuus on kaikissa TSFA-vaihtoehdoissa huomattavasti suurempi kuin vyöhykkeiden 2 tai 4 kautta kulkeutuvan suotoveden osuus, eikä keskeisten metallien ja metalloidien pitoisuudet ole merkittävästi korkeampia vyöhykkeiden 2 ja 4 suotovedessä verrattuna vyöhykkeeseen 1, vyöhykkeen 1 suotovesi todennäköisesti hallitsee sekä suotovesiojan että rikastushiekka-altaan pohjan läpi virtaavan suotoveden laatua koko mallinnusjakson ajan kaikissa TSFA-vaihtoehdoissa.
- Mallinnustulokset viittaavat siihen, että kun rikastushiekkaan sitoutunut huokosvesi on huuhtoutunut pois TSFA- ja TSFA2-altaissa olevasta rikastushiekasta pitkän aikavälin suotoveden laatu osoittautuu olevan melko riippumaton rikastushiekan pintakerroksessa tapahtuvista prosesseista (kuten sulfidien hapettuminen), johtuen sisäisistä tasapainoprosesseista (rakenteen sisäiset geokemialliset reaktiot), jotka sisältävät silikaattien ja karbonaattien liukenemisen, sulfidien saostumisen, metallien sitoutumisen, pH:n puskuroinnin (>pH10) sekä metallien vapautumisen silikaattilähteistä kaikissa mallinnetuissa skenaarioissa (eli VE0+, VE1.1, VE1.3).
- Mallinnukset ennustavat, että pitkän aikavälin suotoveden pitoisuudet keskeisten metallien, kuten nikkelin ja koboltin, osalta ovat suunnilleen samat kuin ne pitoisuudet, jotka määritellään huokosveden huuhtoutumisvaiheen aikana. Tämän seurauksena kaikissa mallinnetuissa vaihtoehdoissa (VE0+, VE1.1, VE1.3) muodostuu suhteellisen vakaa pitkän aikavälin vedenlaatu, joka ei muutu merkittävästi 200 vuoden mallinnusjakson aikana.
- Mallinnuksen mukaan rikastushiekka-alueen sisäosien suotoveden pH pysyy hieman emäksisellä alueella koko mallinnusjakson ajan (200 vuotta), ja kun vesi on tasapainossa ilmakehän CO<sub>2</sub>:n ja O<sub>2</sub>:n kanssa, pH:n ennustetaan olevan puskurointikyvyn ansiosta neutraalin tuntumassa (>7,5) kaikissa mallinnetuissa vaihtoehdoissa (eli VE0+, VE1.1, VE1.3).
- Metallien liukenemisen lähde tarvekivi penkereiltä vyöhykkeillä 2 ja 4 TSFA:ssa kaikissa mallinnetuissa vaihtoehdoissa (VE0+, VE1.1) on ennustettu olevan suhteellisen vähäinen verrattuna vyöhykkeen 1 rikastushiekasta vapautuvaan määrään; lisäksi tarkevivestä (arvioitu ympäristötarvekiveksi) sulfidien hapettumisesta johtuva metallien vapautuminen on ennustettu olevan suhteellisen lyhytkestoista verrattuna rikastushiekasta vapautuvaan metallimäärään. Näin ollen vyöhykkeellä 2 keskeisten metallilajien/metalloidien pitoisuudet ovat ennusteen mukaan jo alle, tai laskevat alle, vyöhykkeeltä 1 raportoituun pitoisuuteen alle 30 vuodessa. On huomioitava, että vyöhykkeellä 4 keskeisten metalliyhdytteiden pitoisuudet pysyvät ennusteen mukaan korkeampina kuin vyöhykkeellä 2, mutta samantasoisina kuin vyöhykkeellä 1 vähintään 200 vuoden ajan, koska tiivispeittorakenne pidentää huokosveden huuhtoutumisaikaa tässä vyöhykkeessä.

- TSFA-mallissa VE1.1-vaihtoehdossa pitoisuudet ovat hieman korkeampia kuin VE0+ -vaihtoehdossa ja pitoisuudet laskevat hitaammin, johtuen pienemmästä kulkeutumisnopeudesta materiaalissa. Peittorakenteiden vaihtoehdot vaikuttavat myös kokonaispitoisuuksiin VE0- ja VE0+ -vaihtoehdoissa: pienempi hapen kulkeutuminen vähentää alkuvaiheen sulfidien hapettumista ja sitä kautta nikkelin kertymistä lähelle pintaa.
- TSFA2-mallista saadut tulokset ovat melko samanlaisia (nikkeli- ja sulfaattipitoisuudet) kuin TSFA-mallista saadut tulokset, mikä viittaa siihen, ettei vedenlaadussa ole merkittävää eroa näiden vaihtoehtojen välillä.
- TSFB-mallin tuloksissa nikkelin pitoisuudet ovat joissain vaihtoehdossa korkeampia, mikä johtuu siitä, että rikastushiekka-altaan B materiaalissa nikkelin ja sulfaatin suhde ( $\text{Ni}:\text{SO}_4$ ) on suurempi kuin rikastushiekka-altaan A materiaalissa silloin, kun sulfideja altistuu hapelle ja ne hapettuvat. Vaihtoehdossa, jossa matalarikkistä rikastushiekkaa rikastushiekka-altaalta A käytetään TSFB1:n peiterakenteessa, nikkelin liukeneminen on pienempää.

## 10.1.1 PHREEQC-mallinnuksen tulokset

- Magnesiumsilikaattimineraaleista forsteriitin ja enstatiitin liukeneminen kaikissa mallinnetuissa rikastushiekka-allasskenaarioissa nostaa pH:n emäksiseksi välille 10–11.
- Brusiitin saostumisen ennustetaan tapahtuvan koko rikastushiekka-altaan syvyydellä seurauksena magnesiumsilikaattien liukenemisesta, korkeasta pH:sta ja liunneen  $\text{CO}_2$ :n puuttumisesta tietyn syvyyden alapuolella rikastushiekassa.
- Magnesiitin saostuminen tapahtuu pinnan lähellä, missä  $\text{CO}_2$  on läsnä. Brusiitti liukenee ja muuttuu magnesiitiksi.
- Ennustetut nikkelin (Ni) pitoisuudet rikastushiekka-altaan pohjalla eivät ole herkkiä mallin lähtötietojen muutoksille, ja pitoisuudet pysyvät  $\pm 150$  %:n sisällä perusarvosta.
- Mallin eri syvyydet eivät yleensä muuta suotoveden kemialla, mutta veden kulkeutumisnopeuden muutokset voivat vaikuttaa hapettumisrintaman syvyyteen ja joidenkin yhdisteiden osalta suotoveden laatuun.