

Liite 12b

Sivukivialueen geokemiallisen mallinnuksen raportti

Suomennos Kevitsa Mine: Waste Rock Storage Facility Geochemical Predictive Modelling 2025

Suomennos raportin yhteenvedosta, johdannosta ja johtopäätöksistä.

Yhteenveto

Mine Environment Management Ltd (MEM) sai toimeksiannon Boliden Kevitsa Mining Oy:ltä toteuttaa tekninen työkokonaisuus, joka sisältää päivityksiä MEM:n vuonna 2019 tekemään geokemialliseen mallinnukseen. Tavoitteena on ennustaa pitkän aikavälin suotoveden laatua Kevitsan sivukivialueella (WRSF). Osana tätä työkokonaisuutta MEM:lle toimitettiin suunnitteluolettamuksia ja vaihtoehtoja sivukivialueen tulevaa rakentamista varten. Ne liittyivät kaivossuunnitelmien päivityksiin ja materiaalien saatavuuteen, ja ne sisällytettiin mallinnukseen. Kyseinen työ tukee meneillään olevia selvityksiä, jotka liittyvät sulkemissuunnitteluun ja lupaprosesseihin. Tämä raportti sisältää teknistä tietoa mallinnustyön laajuudesta, mukaan lukien mallinnuksen perustana käytetyn konseptuaalisen mallin kehitys, mallinnuksen oletukset ja lähtötiedot sekä työn tulokset. Ennustavan mallinnuksen tulokset esitetään noin 200 vuoden ajanjaksolle ja ne on raportoitu kolmelle (3) eri sivukivialue vaihtoehdoille.

Johdonmukaisuuden varmistamiseksi mallinnuksen perustana käytettiin aiempaa sivukivialueen konseptuaalista mallia, joka kehitettiin osana MEM:n vuonna 2019 tekemää mallinnustyötä geokemiallisen aineiston pohjalta (MEM, 2019). Koska vuoden 2019 jälkeen on tehty merkittäviä teknisiä lisätutkimuksia, mukaan lukien jätteiden luokittelujärjestelmän muutokset (MEM, 2025b) ja kinetiikkatestauksen tulokset (MEM, 2025a), näiden tutkimusten havainnot on hyödynnetty mallin keskeisten oletusten ja lähtöarvojen päivittämisessä. Tämän vuoksi raportti tulee lukea yhdessä näiden teknisten raporttien kanssa (tai viitaten niihin).

Yksityiskohtainen mallinnustyö on tehty Excel-pohjaisella ja koodatulla mallinnusohjelmalla (Waste Rock Simulator), jonka MEM kehitti vuonna 2019 sivukivialueen arviointia varten. Mallin keskeiset syötteet ja tulokset on varmistettu vertaamalla niitä kenttäaineistoon ja kineettisten laboratoriotestien tuloksiin, jotka on saatu Kevitsan sivukivimateriaalista. Bolidenin pyynnöstä on mallinnettu kolme (3) vaihtoehtota: VE0+, VE1.1 ja VE1.3.

Nykyinen sivukivialue on rakennettu viidessä (5) vaiheessa (1A, 1B, 2A, 2B, 3A). Tuleva rakentaminen sisältää näiden olemassa olevien vaiheiden laajentamisen sekä enintään kolmen (3) uuden vaiheen (4, 5A, 5B) rakentamisen riippuen tarkasteltavasta vaihtoehdosta.

Mallinnustulosten perusteella on päädytty seuraaviin johtopäätöksiin:

- Kaikissa sivukivialueen vaihtoehtoissa karbonaattipuskurointikyvyn ennustetaan olevan riittävä neutraloimaan happamuus, joka syntyy sivukivialueen läjityssuunnitelman vaiheissa (katso kohta 2.6), ja ylläpitämään huokosveden pH neutraalin alueella (>pH 7.5) koko mallinnusjakson ajan. Tämän seurauksena keskeisten pH:lle herkkien metalloidi- ja metallipitoisuuksien ennustetaan pysyvän pitkällä aikavälillä hallinnassa (verrattuna tilanteeseen, jossa pH olisi hapan).

- Malli olettaa, että suurin osa happamuuden puskuroinnista tapahtuu primaaristen karbonaattien avulla, eikä muita lähteitä huomioida. Kineettisten testien tulokset kuitenkin viittaavat siihen, että kaliumia sisältävien reaktiivisten silikaattien (tulkittu olevan kiillemineraaleja) liukeneminen tarjoaa merkittävää lisäpuskurointi kykyä. Lisäksi MEM:n aiemmat tutkimukset ja kineettiset testaukset viittaavat siihen, että silikaattien karbonatisoitumista (CO₂:n reaktio silikaattien kanssa) saattaa tapahtua, mikä voi johtaa sekundääristen karbonaattien muodostumiseen kaivoksen ainutlaatuisen kiviaineksen mineralogian vuoksi. Näin ollen malli todennäköisesti aliarvioi happamuuden puskurointikyvyn mallinnusjakson aikana.
- Lopullisen moreenipeittorakenteen rakentamisen ennustetaan vähentävän merkittävästi pitkän aikavälin hapen-/sulfaatin muodostumista eri vaiheissa (sivukivialueen läjityssuunnitelmasta) kaikissa kolmessa sivukivialue vaihtoehdossa.
- Keskeisten metalloidi- ja metalliyhdisteiden pitoisuuksien ennustetaan laskevan merkittävästi mallinnusjakson loppuun mennessä. Esimerkiksi nikkelin ja koboltin pitoisuudet vähenevät >85 % huippuarvoista (ennen sulkemista) vuoteen 2200 mennessä kaikissa kolmessa vaihtoehdossa.
- Sulfaatin ja siihen liittyvien keskeisten metallien (Ni, Co) pitoisuuksien ennustetaan olevan samankaltaisia kaikissa vaihtoehdoissa peittorakenteiden rakentamisen jälkeen. Ennen kuin sivukivialue on täysin peitetty, korkeimmat pitoisuudet esiintyvät vaihtoehdossa VE1.1.
- Happamuuden muodostumisen on ennustettu olevan suurempaa alkuvuosina vuosina nykyisissä sivukivialueen läjityksen vaiheissa (1A–3A, joissa sivukiveä on läjitetty ennen vuotta 2025, katso kohta 2.6), sivukivialueen läjityssuunnitelman mukaisesti, koska nämä vuodet/vaiheet ovat avoinna pidempään ennen lopullista peittoa. Tällöin mallissa on pidempi ajanjakso, jolloin hapen kulkeutuminen on rajoittamatonta.
- Koska sivukiven läjityksen eri vaiheita (katso kohta 2.6) ei suljeta peittorakenteiden toteuttamista varten (eli lopullinen peittorakenne ei valmistu kokonaisuudessaan) tarkassa järjestyksessä ennen viereiseen vaiheeseen siirtymistä (eli läjitys vaiheeseen 1A tapahtuu samanaikaisesti kuin vaiheeseen 1B), mallia on päivitetty huomioimaan jatkuva sulfidien hapettuminen ja varastoituneen kuormituksen muodostumisen (sulfidien hapettumisesta syntyvät sekundääriset mineraalit) jatkuminen kussakin vaiheessa, kunnes kyseinen vaihe on täysin suljettu.
- Hapen kulkeutumisen hallinnan tehokkuudella on merkittävä vaikutus sekä toiminnan aikana että sulkemisen jälkeen (peittorakenteen toimivuus).
- Mallin tulosten vahvistaminen kenttäaineiston (pintavesitarkkailu) ja kinetiikkatestauksen avulla osoittaa, että malli tuottaa järkeviä tuloksia, jotka vastaavat laskennallisia (teoreettisia) liukoisuusrajoja, mineraalien kyllästysindeksejä sekä empiiristä aineistoa.
- Mallin tulosten vertailu tarkkailusta saatuihin tuloksiin osoittaa, että mallin tuottamat arvot vastaavat melko hyvin tarkkailusta saatujen arvojen vaihteluväliä ja niiden suhteita (esim. seuraavat suhteet typpi/sulfaatti, magnesium/kalsium, nikkeli/mangaani). Tämä osoittaa, että malli tuottaa realistisia ja edustavia tuloksia suhteessa nykyisiin kenttäolosuhteisiin.

1. Tausta ja laajuus

1.1 Tausta

Mine Environment Management Ltd (MEM) sai toimeksiannon Boliden Kevitsa Mining Oy:ltä toteuttaa tekninen työkokonaisuus, joka sisältää päivityksiä MEM:n vuonna 2019 tekemään geokemialliseen mallinnusarvioon. Tavoitteena oli tuottaa pitkäaikaisia ennusteita suotoveden laadusta sivukivialueelle

(WRSF). Vuonna 2024 Bolidenilla katsottiin olevan tarve tarkistaa ja päivittää olemassa oleva sulkemissuunnitelma, jotta suunnitelmaa voitaisiin muokata ja siihen liittyvä taloudellinen vakuus arvioida uudelleen. Tämä tehtiin elinkaarisuunnitelman, Bolidenin standardien, alan parhaiden käytäntöjen sekä suomalaisviranomaisten kanssa sovitun mukaisesti.

Työkokonaisuuden osana MEM:lle toimitettiin suunnitteluolettamuksia ja vaihtoehtoja sivukivialueen tulevaa rakentamista varten, jotka perustuivat sekä materiaalien saatavuuteen että kaivossuunnitelman päivityksiin ja ne sisällytettiin mallinnukseen. Osana tätä työvaihetta MEM:lle toimitettiin suunnitteluoletukset ja vaihtoehdot sivukivialueen tulevaa rakentamista varten. Näihin vaikuttivat sekä materiaalien saatavuus että kaivossuunnitelman päivitykset, jotka otettiin huomioon mallinnuksessa. MEM ymmärtää, että tämä työ tukee meneillään olevia selvityksiä, jotka liittyvät sulkemissuunnitteluun ja lupaprosesseihin.

Sivukivialueen geokemiallinen malli on tarkastettu ja päivitetty MEM:n toimesta vuodesta 2019 lähtien, jotta voidaan arvioida muutoksia sivukiven sijoittamisessa ja alueen peittojärjestyksessä, jotka oli laadittu sen hetkisten kenttäolosuhteiden mukaisesti. Tämä raportti kuvaa sivukivialueen mallinnuksen päivityksiin liittyvän työn laajuuden. Suuri osa mallinnuksessa käytetystä aineistosta on peräisin MEM:n tekemistä teknisistä projekteista, ja siksi tämä raportti tulee lukea yhdessä seuraavien raporttien kanssa:

- Kevitsa mine; detailed geochemical and waste characterisation technical assessment, 2019
- Waste Rock Storage Facility Geochemical Predictive Modelling, 2019
- Kinetic testing of Kevitsa waste rock and tailings materials (Q3-4 2024), 2025
- Kinetic testing of Kevitsa waste rock and tailings materials (Q1-2 2025). 2025
- Material characterisation summary – EW column mix rock and USW-weathered, 2025
- Kinetic testing of EW rock to inform refinement of cut off criteria for Kevitsa, 2025

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

1.2 Työn laajuus

MEM:n käsityksen mukaan sivukivialueen geokemiallisen mallinnuksen päivityksen työpaketti sisältää:

- Katsaus nykytilanteesta ja suunnitelmista sivukiven sijoitusaikataulun ja tähän mennessä toteutuneen sijoittelun osalta.
- Olettamusten päivittäminen peittorakenteiden suunnitteluun liittyen ja vaihtoehtoisten ratkaisujen huomioiminen nykyisten suunnitelmien mukaisesti.
- Syöttöparametrien päivittäminen, sisältäen huokosveden ja suotoveden päivitykset, hapen kulkeutumisnopeudet ja päivitettyt alkuainepitoisuudet, perustuen teknisiin lisätutkimuksiin ja empiiriseen aineistoon, jota on kerätty vuoden 2019 jälkeen (esim. kinetiikkatestaus) sekä O’Kane Consultantsin toimittamaan aineistoon, joka liittyy erilliseen mallinnustyöhön peittorakenteen toimivuuden (hapen kulkeutuminen ja suotoveden virtaus) arvioimiseksi mallinnusjakson aikana
- Muutetaan malliin syötettävän sivukiven tyyppi vastaamaan sivukiviluokittelujärjestelmän päivityksiä sekä teknisestä arvioinnista (esim. kineettisistä testauksista) saatuja tietoja.
- Mallinnuksen suorittaminen kaikille vaihtoehdoille (VE0+, VE1.1 ja VE1.3) ja tulosten esittäminen yhteenvetona taulukoiden ja kaavioiden avulla havainnollistamaan mallinnuksen keskeisiä tuloksia.
- Työn dokumentointi teknisessä raportissa (tämä raportti)

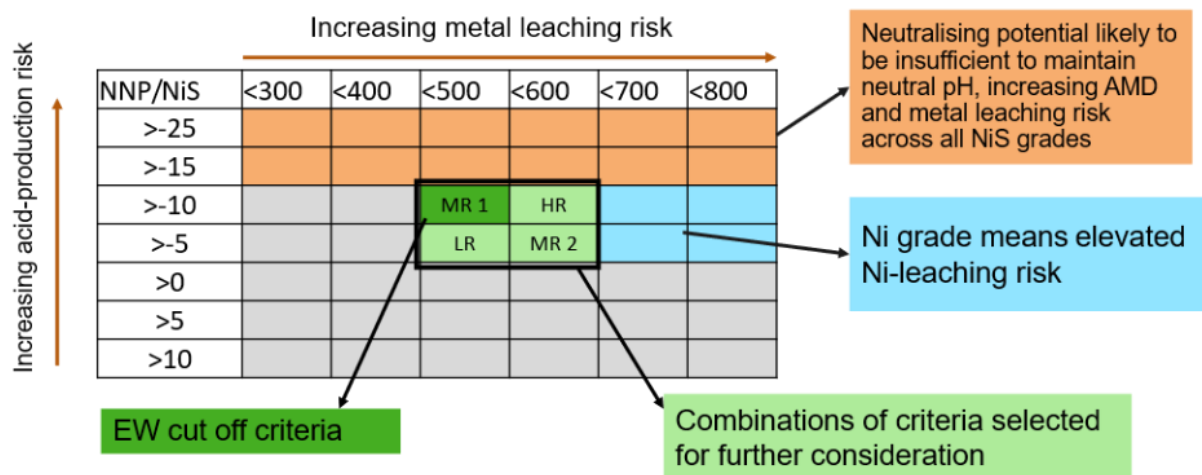
1.3 Sivukiven luokittelu

Vuosina 2024 ja 2025 MEM (Bolidenin toimeksiannosta) tarkasteli nykyistä sivukiven luokittelujärjestelmää. Viimeisin tekninen arviointi on raportoitu vuonna 2025 ja nimetty seuraavasti: Kinetic testing of EW rock to inform refinement of cut off criteria for Kevitsa (lähde: MEM, 2025). MEM toteutti luokittelujärjestelmän tarkastelun tavoitteena tunnistaa, löytyykö avolouhoksen varannosta mahdollisesti lisää sivukivimateriaaleja, joiden liukoisuus- ja ympäristöriskit ovat verrattavissa nykyiseen USW-luokan (tarvekivi) materiaaliin. Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää näille materiaaleille luokittelukriteerit, jotta ne voidaan sisällyttää sivukiven lohkomalliin ja siten mahdollistaa materiaalmäärien tunnistaminen kaivossuunnitelmassa (aikataulussa). Näin nämä materiaalit voidaan ottaa huomioon kaivoksen suunnittelussa ja koko elinkaaren aikaisessa sivukivien hallinnassa sekä hyödyntää niitä rakentamisessa ja kaivoksen sulkemisessa.

Alkuperäinen luokittelujärjestelmä Kevitsassa perustui pääasiassa rikkipitoisuuteen (S-pitoisuus), jolla eroteltiin tarvekivi (USW), normaali sivukivi (UNW) ja kapseloitava sivukivi (CW). Aiemmat rikkipitoisuuden raja-arvot olivat:

- USW-tarvekivi – S <0,3 %
- UNW-sivukivi – S 0,3–0,8 %
- CW-sivukivi – S >0,8 %

MEM:n tekemän geokemiallisen arvioinnin ja sivukiven mallinnuksen perusteella metallien liukenemisriski liittyy nikkelisulfidin (NiS), rautasulfidien (FeS) ja käytettävissä olevan puskurikyvyn (karbonaatit) määrään, eikä pelkästään rikkipitoisuuteen. Tämän vuoksi ehdotettiin, johdettiin, mallinnettiin ja testattiin uudet raja-arvot, jotka perustuvat moniparametriseen järjestelmään, jossa käytetään nikkelisulfidia, kokonaisriikkiä ja nettoneutralointipotentiaalia (NAPP). Arvioinnissa tarkasteltiin useita mahdollisia raja-arvoyhdistelmiä, ja MR1-luokka valittiin (kuva 1) optimaaliseksi, koska se mahdollistaa ympäristötarvekivi luokan (EW, environmental waste rock, joka on UNW-luokan alaryhmä) määrän kasvattamisen siten, että liukoisuusominaisuudet eivät ole huonommat kuin nykyisellä USW-luokalla.



Kuva 1. Yhteenveto mahdollisista NNP- ja NiS-raja-arvoyhdistelmistä materiaalin saatavuuden ja liukenemisriskin perusteella (lähde: MEM, 2025). Valitut liukenemiskriteerit on esitetty vihreissä laatikoissa (liittyen NNP-NiS-yhdistelmän suhteelliseen liukenemisriskiin). MR1 vastaa EW-luokan uudelleen luokitellun tarvekiven valittuja kriteerejä.

Kuva suomeksi: Metallien liukenemisriski kasvaa (yläreunan nuoli), Happomuodostumisriski kasvaa (vasemman reunan nuoli), Neutralointipotentiaali ei todennäköisesti riitä ylläpitämään neutraalia pH:ta, mikä lisää AMD- ja metallien liukenemisriskiä kaikilla NiS-pitoisuuksilla (oranssi laatikko), Ni-pitoisuus tarkoittaa kohonnutta nikkelin liukenemisriskiä (sininen laatikko), EW:n raja-arvo-kriteerit (tummanvihreä laatikko vasemmalla), Kriteerien yhdistelmät, jotka on valittu jatkotarkasteluun (vaaleanvihreä laatikko oikealla)

Näiden kriteerimuutosten seurauksena aiemmin UNW-luokkaan kuulunut materiaali jaettiin kahteen luokkaan AMD-riskin perusteella. Pienemmän riskin UNW-alaluokka nimettiin EW:ksi, jossa käytetään seuraavia raja-arvoja: EW-luokkaan kuuluu kivi, jonka NiS-pitoisuus on alle annetun rajan, NNP on yli annetun rajan ja FeS-pitoisuus alle annetun rajan (taulukko 1). Ehdotetut raja-arvot ovat:

- NiS <500 ppm
- Nettoneutralointipotentiaali (NNP) > -10 kg CaCO₃/t, laskettuna karbonaattien puskurikyvyn (XRD-tiedon perusteella) ja rautasulfidien tuottaman potentiaalisen happamuuden erotuksena (analyysieihin perustuen)
- Kokonaisrikkipitoisuus (S) <0,55 %, jotta voidaan rajoittaa korkeiden sulfaattipitoisuuksien muodostumista, kun materiaalissa on korkea rikki (S) ja korkea puskurikyky

Alla oleva taulukko 1 tiivistää luokittelujärjestelmän muutokset.

Taulukko 1 Yhteenveto raja-arvojen muutoksista luokittelujärjestelmään

Sivukiviluokka	Rikkipitoisuus	Muut parametrit
USW	<0.30%	Ni <0.1% NiS
EW	>0.3%<0.55%	<0.05 % NiS, NNP>-10
UNW	>0.3<0.8%	NA
CW	>0.8%	NA

12. Johtopäätökset

Mallinnustulosten arvioinnin perusteella eri sivukivialue vaihtoehtoista on tehty seuraavat johtopäätökset:

- Kaikissa sivukivialueen vaihtoehtoisissa karbonaattipuskurointikyky arvioidaan riittäväksi neutraloimaan kaikissa sivukiven läjitysvaiheissa syntyvän happamuuden ja ylläpitämään huokosveden pH neutraalin tuntumassa (>pH 7.5) koko mallinnusjakson ajan. Tämä havainto on erittäin tärkeä, sillä malli osoittaa, että keskeisten metalloidi- ja metallilajien, kuten nikkelin ja koboltin, pitoisuudet ovat erittäin herkkiä pH:n muutoksille. Jos pH laskisi karbonaattipuskurointikyvyn tuoman alueen (pH 6–8.5) alapuolelle, pitoisuudet nousisivat merkittävästi.
- Malli olettaa, että suurin osa happamuuden puskuroinnista tapahtuu primaaristen karbonaattien avulla, eikä muita lähteitä huomioida. Kineettisten testien tulokset kuitenkin viittaavat siihen, että kaliumia sisältävien reaktiivisten silikaattien (tulkittu olevan kiillemineraaleja) liukeneminen tarjoaa merkittävää lisäpuskurointi kykyä. Lisäksi MEM:n aiemmat tutkimukset ja kineettiset testaukset viittaavat siihen, että silikaattien karbonatisoitumista (CO₂:n reaktio silikaattien kanssa) saattaa tapahtua, mikä voi johtaa sekundääristen karbonaattien muodostumiseen kaivoksen ainutlaatuisen

kiviaineksen mineralogian vuoksi. Näin ollen malli todennäköisesti aliarvioi happamuuden puskurointikyvyn mallinnusjakson aikana.

- Happamuuden muodostumisen on ennustettu olevan suurempaa alkuvuosina vuosina nykyisissä sivukivialueen läjityksen vaiheissa (1A–3A, jolloin sivukivi sijoitettiin näihin vaiheisiin ennen vuotta 2025), koska nämä vuodet/vaiheet ovat avoinna pidempään ennen lopullista peittoa. Tällöin mallissa on pidempi ajanjakso, jolloin hapen kulkeutuminen on rajoittamatonta.
- Lopullisen moreenipeittorakenteen rakentamisen ennustetaan vähentävän merkittävästi pitkän aikavälin hapen-/sulfaatin muodostumista sivukivialueen läjityksen eri vaiheissa kaikissa kolmessa vaihtoehdossa. Tämä johtaa siihen, että liukoisten sulfaattimineraalien nettovarastoituminen muuttuu mallinnusjakson aikana nettovapautumiseksi, jonka seurauksena sulfaatti- ja metalloidi-/metallipitoisuudet laskevat merkittävästi sulkemisen jälkeisenä ajanjaksona.
- Keskeisten metalloidi- ja metalliyhdisteiden pitoisuuksien ennustetaan laskevan merkittävästi mallinnusjakson loppuun mennessä. Esimerkiksi nikkelin ja koboltin pitoisuudet vähenevät >85 % huippuarvoista (ennen sulkemista) vuoteen 2200 mennessä.
- Sulfaatin ja siihen liittyvien keskeisten metallien (Ni, Co) pitoisuuksien ennustetaan olevan samankaltaisia kaikissa vaihtoehdoissa peittorakenteiden rakentamisen jälkeen. Ennen kuin sivukivialue on täysin peitetty, korkeimmat pitoisuudet esiintyvät vaiheessa 5 avolouhoksen vaihtoehdossa VE1.1.
- Liukoisten suolojen ja typpiyhdisteiden pitoisuuksien ennustetaan laskevan erittäin matalalle tasolle, ja näiden yhdisteiden huuhtoutuminen alkaa noin vuonna 2070.
- Koska sivukiven läjityksen eri vaiheita ei suljeta lopullisia peittorakenteita varten (eli lopullisen peittorakenteen täydellinen asennus) tarkassa järjestyksessä ennen viereisen vaiheen läjityksen aloitusta, mallia on päivitetty huomioimaan jatkuva sulfidien hapettuminen ja varastoituneen kuormituksen (sulfidien hapettumisesta syntyvät sekundääriset mineraalit) muodostuminen kussakin vaiheessa, kunnes vaihe on täysin suljettu.
- Hapen kulkeutumisen hallinnan tehokkuudella on merkittävä vaikutus sekä toiminnan aikana että sulkemisen jälkeen (peittorakenteen toimivuus).
- Mallin tulosten validointi kenttäaineiston (pintavesitarkkailu) ja kineettisten testien avulla osoittaa, että malli tuottaa järkeviä tuloksia, jotka vastaavat laskennallisia (teoreettisia) liukoisuusrajoja, mineraalien kyllästysindeksejä sekä empiiristä aineistoa.
- Mallin tulosten vertailu tarkkailusta saatuihin tuloksiin osoittaa, että mallin tuottamat arvot vastaavat melko hyvin tarkkailusta saatujen arvojen vaihteluväliä ja niiden suhteita (esim. seuraavat suhteet typpi/sulfaatti, magnesium/kalsium, nikkeli/mangaani). Tämä osoittaa, että malli tuottaa realistisia ja edustavia tuloksia suhteessa nykyisiin kenttäolosuhteisiin.
- Koska sivukivialueen toiminnan aikana syntyy varastoitunutta kuormitusta (sulfidien hapettumisesta syntyvät sekundääriset mineraalit), mallituksen perusteella oletetaan, että kestää yli 100 vuotta ennen kuin sulfaattipitoisuus laskee alle 2 000 mg/l.