LIITE 14: TIIVISTYS- JA TUENTAMENETELMÄT SAKATIN MAANALAISESSA KAIVOKSESSA, AA SAKATTI MINING OY & MITTA ENGINEERING OY 2022

Tiivistys- ja tuentamenetelmät Sakatin maanalaisessa kaivoksessa

AA Sakatti Mining Oy
Mitta Engineering Oy

18.10.2022 (tarkistettu 13.2.2023)

Sisällys

1. JOHDANTO ... 3
2. SAKATIN POHJAVEDENVIRTAUSMALLINNUKSEN SKENAARIOT ... 4
3. KALLIOTILAN TIIVISTYS ... 6
3.1 Tiivistystarpeen määrittely ... 6
3.2 Injektointimenetelmät ... 6
3.2.1 Esi-injektointi ... 7
3.2.2 Jälki-injektointi ... 8
3.2.3 Injektointiaineet ... 8
3.3 Alustava suunnitelma injektoinnin käytöstä Sakatin kaivoksessa ... 9
3.3.1 Mahdollisesti injektointia vaativat tilat ... 12
3.3.2 Menetelmien toteutettavuus ja laadunvarmistus ... 17
4. KALLION TUENTAAN KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT ... 18
4.1 Kaivostäyttö ... 19
4.1.1 Sivukivitäyttö ... 19
4.1.2 Kovettuva sivukivitäyttö ... 19
4.1.3 Hydraulinen täyttö ... 20
4.1.4 Pastatäyttö ... 20
4.1.5 Pasta-kivimursketäyttö ... 21
4.2 Alustava suunnitelma kaivostäytön käytöstä Sakatin kaivoksessa ... 22
4.2.1 Pastatäyttö ... 23
4.2.2 Pasta-kivimursketäyttö (eng. Paste aggregate fill) ... 24
4.2.3 Menetelmien toteutettavuus ja laadunvarmistus ... 24
4.3 Muut Sakatin kaivoksessa käytettävät kalliotilojen tuentamenetelmät ... 25
4.3.1 Kalliopultit ja vaijeripultit ... 25
4.3.2 Ruiskubetonointi ... 25
4.3.3 Esivalmisteiset tuenta- ja verhouselementit ... 26
5. YHTEENVETO ... 28
LÄHTEET ... 29

1. JOHDANTO

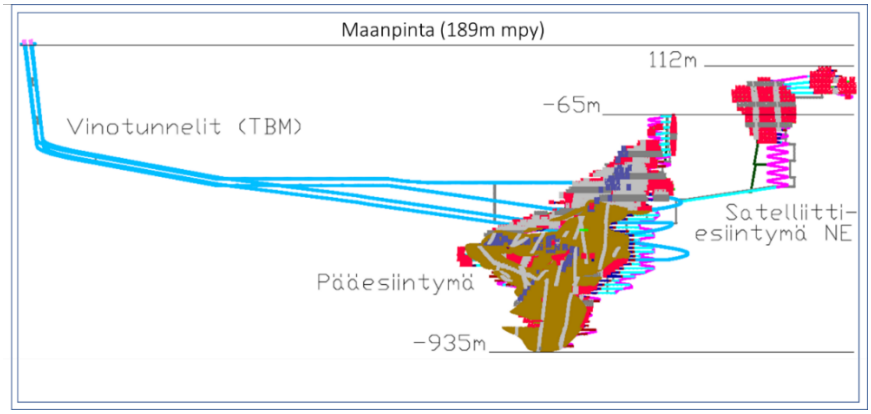
Anglo American -konserniin kuuluva AA Sakatti Mining Oy selvittää mahdollisuuksia Sodankylässä sijaitsevan Sakatin monimetalliesiintymän hyödyntämiseen. Sakatin esiintymä sijoittuu Natura 2000-verkostoon kuuluvalle ja soidensuojeluohjelmalla suojellun Viiankiaavan suon länsilaidalle. Sakatin esiintymä sijaitsee maanalla Natura-alueen alapuolella ja kaivoksen maanpäällinen tehdasalue sijoittuu Natura-alueen ulkopuolella sijaitsevalle Kuusivaaran alueelle. Sakatin YVA-prosessissa on arvioitavan kolme päävaihtoehtoa (VE1, VE2 ja VE3), joihin jokaiseen sisältyy kaksi eri alavaihtoehtoa. Hankevaihtoehtoja on käsitelty yksityiskohtaisesti Sakatin monimetalliesiintymän kaivoshankkeelle tehdyssä ympäristövaikutusten arviointiselostuksessa (YVA-selostus).

Sakatin maanalaisen kaivoksen muodostavat maanpinnalta kaivokseen johtava kulkuyhteys, pääesiintymä ja satelliittiesiintymä NE. Sakatin pääesiintymä alkaa noin 250 metriä maanpinnantason alapuolelta jatkuen aina 1 200 metrin syvyyteen. Pääesiintymästä koilliseen on pienempi, lähempänä maanpintaa sijaitseva satelliittiesiintymä NE, jossa ylimmät louhokset sijoittuvat lähimmillään noin 80 metriä maanpinnasta. Kulkuyhteyden toteutustapa vaihtelee YVA-selostuksessa kuvattujen hankevaihtoehtojen välillä, kulkuyhteys voidaan muodostaa vinotunneleilla tai vinotunnelilla ja nostokuilulla. Kuva 1 on havainnollistettu tunneliporalla toteutetun hankevaihtoehdon VE1a mukaista maanalaista kaivosta.

Sakatin maanalainen kaivos tulee sijoittumaan suurelta osin Viiankiaavan suon alapuolelle, jonka vuoksi maanalaisiin kaivostiloihin tulevaa vedenmäärää on tarpeen rajoittaa louhintateknisin menetelmin. Rajoittamalla kaivokseen tulevaa veden määrää voidaan vähentää Viiankiaavan suoalueelle kohdistuvia kuivatusvaikutuksia ja siten ei merkittävästi heikennetä niitä luontoarvoja, joiden Viiankiaapa on sisällytetty osaksi Natura 2000 -verkostoa.

Tässä raportissa kuvataan tarkemmin louhintatekniset menetelmät, joilla Sakatin kaivoksen toteuttamisen aikana pyritään lieventämään kaivoksesta Viiankiaavan suoalueelle mahdollisesti aiheutuvia kuivattavia vaikutuksia. Keskeisin menetelmä, jolla kaivostiloihin tulevaa vesimäärää voidaan rajoittaa, on kalliotilan tiivistäminen. Tiivistysmenetelmiä kuvataan tarkemmin luvussa 3 ja alustava suunnitelma tiivistyksen käytöstä Sakatin kaivoksessa on kuvattu luvussa 3.6. Tiivistämisen ohella vedentuloa kaivostiloihin voidaan vähentää tukemalla kalliotiloja. Tuennalla pyritään ehkäisemään kallion muodonmuutosta kuten sortumia ja uusien rakojen syntymistä. Kalliotuennalla voidaan siten epäsuorasti vähentää uusien vettä johtavien rakenteiden syntyä ja kalliotiloihin tulevan veden määrää. Kalliontuentamenetelmiä on kuvattu luvussa 4.

Tiivistyksen tarkoituksena on vähentää merkittävästi tunneliin tulevaa vesimäärää, mikä parantaa merkittävästi työturvallisuutta ja työskentelyolosuhteita. Kaivoksen systemaattinen tiivistäminen ei olisi taloudellisesti kannattavaa. Toteuttamalla kalliotilojen tiivistys ja tuenta suunnitelmien mukaisesti Sakatin kaivokseen tulevan vedenmäärä voidaan vähentää ja saavuttaa pohjaveden virtausmallinnuksen mukainen taso kaivokseen tulevan vesimäärän suhteen. Kalliotilojen tiivistämisellä ei kuitenkaan pyritä tekemään maanalaisesta kaivoksesta vesitiivistä kuten esimerkiksi kalliorakentamisessa vaan tiivistysvaatimukset määritetään ympäristövaikutusten arvioinnin pohjalta.



Kuva 1. Pituusleikkauskuva Sakatin maanalaisesta. Sakatin pääesiintymän ylin louhintataso sijoittuu 65 metriä merenpinnan alapuolelle, eli noin 250 metriä maanpinnan tasosta. Satelliittiesiintymän NE ylin louhintataso (louhoksen katto) sijaitsee noin 112 metriä merenpinnan yläpuolella, eli noin 80 metriä maanpinnan tasosta.

2. SAKATIN POHJAVEDENVIRTAUSMALLINNUKSEN SKENAARIOT

Rakennus- ja tuotantovaiheen aikana Sakatin maanalaiseen kaivokseen tulevaa vesimäärää pyritään rajoittamaan teknisin ratkaisuin ja siten lieventämään pohjavesiin kohdistuvia vaikutuksia (erityisesti pohjavesipinnan alenemaa). Kalliopohjaveden pääsyä maanalaiseen kaivokseen voidaan vähentää tiivistämällä tunnelin seinä- ja kattorakenteita. Tämän lisäksi tukemalla kalliotiloja voidaan vähentää kallioperässä tapahtuvia muutoksia kuten uusien vettä johtavien rakenteiden muodostumista. Estämällä vedentulo kaivokseen pystytään ehkäisemään louhinnasta aiheutuvia pohjavesivaikutuksia sekä parantamaan turvallisuutta kaivoksessa. Vedentulon rajoittaminen on ollut periaatteena suunniteltaessa Sakatin kaivoksen pohjaveden virtausmallia.

Pohjavesimallinnuksella on pyritty tunnistamaan kaivoksen veden tuloon vaikuttavat geologiset rakenteet ja kaivostilat. Merkittävimmin veden tuloon vaikuttaa vinotunnelin yläosa ja maanalaisen kaivoksen lävistävät vettä johtavat geologiset rakenteet. Rakenteiden ja vinotunnelin vaikutusta vedentuloon on tutkittu tiivistyksen näkökulmasta. Lisäksi mallin avulla on tarkasteltu miten kaivokseen tulevan veden määrään vaikuttavat kaivostäyttö sekä maanpintaa lähimpänä olevien louhintatasojen louhimatta jättäminen. Näiden tarkastelujen pohjalta on rakennettu kaksi mallinnusskenaariota, jotka vastaavat nykytiedon perustella todenmukaisinta ja teknisesti toteutettavissa olevaa maanalaista kaivosta.

Pohjavesimallinnuksen näkökulmasta yksi merkittävimmistä maanalaisen kaivoksen tiloista on maanpäältä kaivokseen vievä vinotunnelilinjaus (eli yhdystunneli, joka yhdistää rikastamon ja malmiesiintymän välittömään läheisyyteen sijoittuvat kaivosrakenteet). Kaivostoiminnassa vinotunnelit on pyrittävä pitämään mahdollisimman kuivana tuotannollisista- ja turvallisuussyistä, minkä vuoksi pohjaveden virtausmallinnuksen lähtökohdaksi on asetettu, että maanpinnalta lähtevät vinotunnelit tullaan injektoimaan tarvittavilta osin. Vinotunnelilinjauksen lisäksi pohjavesimallinnuksen näkökulmasta toinen oleellinen tekijä on maanalaisen kaivoksen lävistävät vettä johtavat geologiset rakenteet. Maanalaisen kaivoksen alueella tunnetaan 7 geologista rakennetta, joista pohjaruhje on merkittävin. Pohjavesimallinnuksessa nämä geologiset rakenteet on oletettu injektoitavan.

Mallinnuksessa on tarkasteltu vinotunnelilinjojen injektoinnin laajuuden vaikutusta kaivokseen tulevan veden määrään ja pohjavedenpinnan alenemaan. Maanpäältä lähtevät vinotunnelilinjaukset mallinnettiin ensin siten, että tunneleiden injektointialue ulotettiin 100 m syvyyteen maanpinnan tasosta katsottuna. Tämän jälkeen vinotunneleiden injektointialuetta kasvatettiin mallissa 150 m syvyyteen saakka. Injektointisyvyyden lisäksi mallin avulla testattiin sekä vinotunneleiden että vettä johtavien geologisten rakenteiden injektointitehokkuuden vaikutusta pohjavedenpinnan alenemaan muuttamalla tehokkuutta 100 % - 65 % välillä. Injektointitehokkuuden ollessa 100 % oletuksena on, että vettä johtava rakenne onnistutaan tiivistämään täydellisesti. Todellisuudessa injektoinnilla päästään erittäin harvoin täydelliseen tiiveyteen, jonka vuoksi realistissa mallinnusskenaarioissa tiiveysasteen ei oleteta olevan 100 %: a. Toisaalta taas Sakatin maanalaista kaivosta ei ole mahdollista toteuttaa turvallisesti ilman tiivistystä, jonka vuoksi injektointitehokkuutta 0 % ei ole mallinnettu.

Pohjaveden virtausmallinnuksessa kaikki tyhjät louhostilat on oletettu täytettävän kovettuvalla kaivostäytöllä. Mallissa on käytetty pastatäyttöä, vaikka nykyisen kaivossuunnitelman mukaan Sakatin kaivoksessa on tarkoitus ensisijaisesti käyttää pasta-kivimursketäyttöä. Mallinnuksessa päädyttiin tähän, koska pastan vedenjohtavuudesta on olemassa tutkimustietoa. Mallinnuksessa testattiin pastatäytölle eri vedenjohtavuusarvoja sekä ns. suljettua louhosta. Mallinnettaessa suljettua louhosta oletuksena oli, että veden virtaus louhoksen läpi loppuu kuukauden kuluttua siitä, kun louhos on täytetty. Näillä mallinnuksilla pyrittiin selvittämään, miten täytön vedenjohtavuus ja täytetystä louhoksesta vuotava vesimäärä vaikuttavat maanalaiseen kaivokseen tulevaan kokonaisvesimäärään. Mallinnusten mukaan kaivostäytön vedenjohtavuudella on vain vähäinen vaikutus kaivoksen vesimäärään pitkällä aikavälillä, sillä suurin osa vedestä päätyy kaivokseen louhoksia ympäröivien kaivostilojen kautta eikä niinkään louhoksien kautta.

Sakatin kaivoshankkeen YVA-selostusta koskevaan täydennykseen valittiin kaksi mallinnusskenaariota, joiden valinnan perusteena oli niiden realistinen toteuttavuus. Vettä johtavien geologisten rakenteiden ja kalliotilojen täydellinen tiivistäminen ns. ”pulloksi” ei ole käytännössä mahdollista, mistä johtuen kalliotilojen 100 %:sta onnistunutta tiivistämistä ei voida pitää realistisena vaihtoehtona. Sakatin kaivoshankkeen YVA:n täydennyksessä käsiteltävät pohjavedenvirtausmallinnusskenaariot ovat:

1. **80 % tiivistysskenaario (80% injektointitehokkuus)**
   Skenaariossa oletetaan, että vinotunnelit injektoidaan 150 m syvyyteen maanpinnan tasosta ja kaikki merkittävästi vettä johtavat geologiset rakenneteet injektoidaan. Injektointitehokkuuden on oletettu olevan 80 %. Kaivostäytön vedenjohtavuutena on käytetty maltillista vedenjohtavuusarvoa (5,0 x 10^{-8} m/s).

2. **65 % tiivistysskenaario (65 % injektointitehokkuus)**
   Skenaariossa oletetaan, että vinotunnelit injektoidaan 150 m syvyyteen maanpinnan tasosta ja kaikki merkittävästi vettä johtavat geologiset rakenneteet injektoidaan. Injektointitehokkuuden on oletettu olevan 65 %. Kaivostäytön vedenjohtavuutena on käytetty korkeaa vedenjohtavuusarvoa (1,0 x 10^{-7} m/s).

Molemmissa skenaariossa kaivostäytön on oletettu kutistuvan täytön kovettuessa. Kutistumisen seurauksena kallion ja täytön väliin jää vettä johtava kanava, mikä on huomioitu mallinnuksessa.

Pohjavedenvirtausmallissa injektointitehokkuudella (%) tarkoitetaan tunnelilinjalle vuotamaan jäävien laskentasolujen suhteellista osuutta. Injektointitehokkuus ei siis suoraan kuvaa injektoinnin suunnittelussa käytettävien olennaisten muuttujien ominaisuuksia, joita ovat esimerkiksi tunnelia ympäröivä injektoitu alue, sen paksuus ja vedenjohtavuus sekä injektointimassan tyyppi ja tunkeuma. Hankesuunnittelun seuraavissa vaiheissa pohjavesimallin oletuksista tullaan luomaan tekniset tavoitteet vuotovesien hallinnalle.

3. KALLIOTILAN TIIVISTYS

Kalliorakentamisessa ja kaivostoiminnassa tiivistämismenetelmiä käytetään vähentämään louhittavaan tilaan tulevan veden määrää ja ehkäisemään louhinnasta aiheutuvia vaikutuksia pohjavesiolosuhteisiin (Väylä 2019). Runsas vedentulo kaivostunneliin voi aiheuttaa vaurioita vinotunnelin tierakenteisiin tai heikentää kallion tuentaa kuten ruiskubetonointia tai pulttauksia sekä kasvattaa merkittävästi kuivatusvesien pumppausmääriä (Melbye ym. 2003). Tiivistysmenetelmien käytöllä saadaan parannettua louhintatöiden työturvallisuutta sekä vähennettyä louhinnasta aiheutuvia ympäristövaikutuksia (Väylä, 2019).

Kalliotilojen tiivistäminen lähtee liikkeelle tiivistystarpeen määrittelystä, joka edellyttää tutkimustietoa alueella vallitsevista kallio-olosuhteista. Tämän pohjalta luodaan tiivistysstrategia sekä määritellään tiivistämiseen käytettävä toteutustapa, joita voivat olla kalliotilan injektointi tai vesitiiviin rakenteen tekeminen kuten kalliota vasten valettu betonirakenne tai ruiskutettava rakenne esim. membraani. (Väylä, 2019) Seuraavissa luvuissa käsitellään injektoimalla tapahtuvaa tiivistystä, koska se on Suomessa yleisin kaivostoiminnassa käytetty tiivistysmenetelmä sekä todennäköisin tiivistysmenetelmä, jota tullaan käyttämään Sakatin maanalaisessa kaivoksessa.

3.1 Tiivistystarpeen määrittely

Tiivistysmenetelmän määrittämiseksi luodaan yleensä tiivistysstrategia, joka pohjautuu odotettavissa oleviin kallio-olosuhteisiin, vuotovesimääriin sekä lopulliseen tiiviystavoitteeseen. Tiivistysstrategia voi vaihdella kohteittain ja jopa hankkeen sisäisesti alueen kallio-olosuhteiden vaihtelun seurauksena. Taulukko 1. Esimerkinomaisia tiivistysstrategioita (Väylä 2019)on esitelty Suomessa yleisesti kalliorakentamisessa ja kaivostoiminnassa käytössä olevia tiivistysstrategioita.

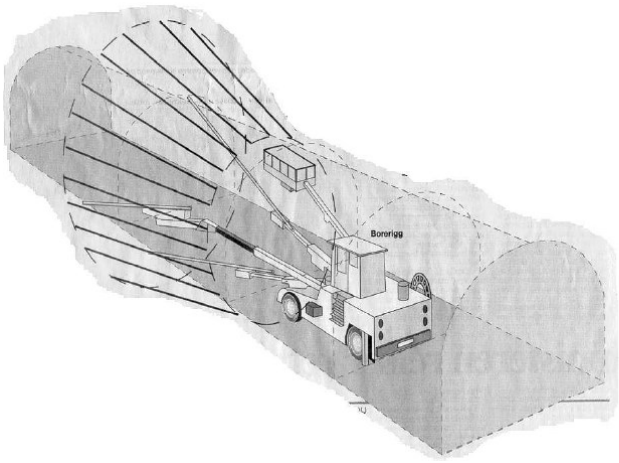
Taulukko 1. Esimerkinomaisia tiivistysstrategioita (Väylä 2019)

Tiivistysmenetelmä	Käytäntö	Yleistetty soveltuvuus
Esi-injektointi, kriteeripohjainen	Systemaattisesti aina ennen tunneliosuuden louhintaa suoritetaan tunnusteluporaus. Injektointi käynnistyy ja sitä jatketaan, kunnes asetettu kriteeri on saavutettu.	Normaalit kallio-olosuhteet ja käyttötarkoitus
Esi-injektointi, systemaattinen	Ennen tunneliosuuden louhintaa porataan ja injektoidaan injektointiviuhkat kaikissa tapauksissa; injektointia jatketaan, kunnes annettu kriteeri on saavutettu.	Poikkeuksellisen vaativat vuotovesivaatimukset (esimerkiksi ympäristövaatimukset tai yleisötila, jossa ei mahdollisuutta eristerakenteeseen)
Jälki-injektointi	Louhinnan jälkeen suoritetaan vuotokohtien jälki-injektointi.	Oletettavissa olevien vesivuotojen ja tiivistystavoitteiden välinen ero on pieni tai oletettavissa olevat vuodot ovat pistemäisiä. Esi-injektoinnin jäännösvuotojen tiivistys. Ei suositella ainoaksi menetelmäksi.
Membraani	Ruiskutettava tai siveltävä vesitiivismembraani asennetaan louhinnan jälkeen lujittamattomalle tai lujitetulle kalliopinnalle.	Aina tapauskohtainen. Laskettava pohjaveden paineen aiheuttama kuormitus ja huomioitava mahdollinen jäätyminen. Palosuojauksen huomioiminen.
Vesipainerakenne	Käytetään, kun oletetaan vesipaineen aikaansaaman rasituksen olevan liian suuri kalliolujitukselle.	Poikkeuksellisen suuri vesipaine. Huomioitava tilavarauksessa. Rakenteen suunnittelee rakennesuunnittelija.

3.2 Injektointimenetelmät

Injektointi on yleisesti kalliorakentamisessa ja kaivostoiminnassa käytetty menetelmä, jossa louhittavan alueen kalliorakoja tiivistetään injektointimassalla vedenjohtavuuden pienentämiseksi. Injektointi voidaan toteuttaa esi-injektointina ennen tilan louhimista tai tila voidaan injektoida louhinnan jälkeen, jolloin menetelmää kutsutaan jälki-injektoinniksi. (Väylä 2019) Esi- ja jälki-injektointimenetelmiä on kuvattu tarkemmin luvuissa 3.3 ja 3.4.

Injektoinnissa tiivistettävälle alueelle porataan reikä tai reikäviuhka (Kuva 2). Reikiin syötetään paineella sementtipohjaista tai kemiallista injektointiainetta kallion tiivistämiseksi. Paineen ansiosta injektioaine tunkeutuu kallion rakoihin tukkien ne ja kovettuen paikalleen. (Väylä 2019) Kalliosta ja injektointiaineesta tulee tällöin yhtenäinen vettä huonosti johtava massa (Ritola ym. 2002).



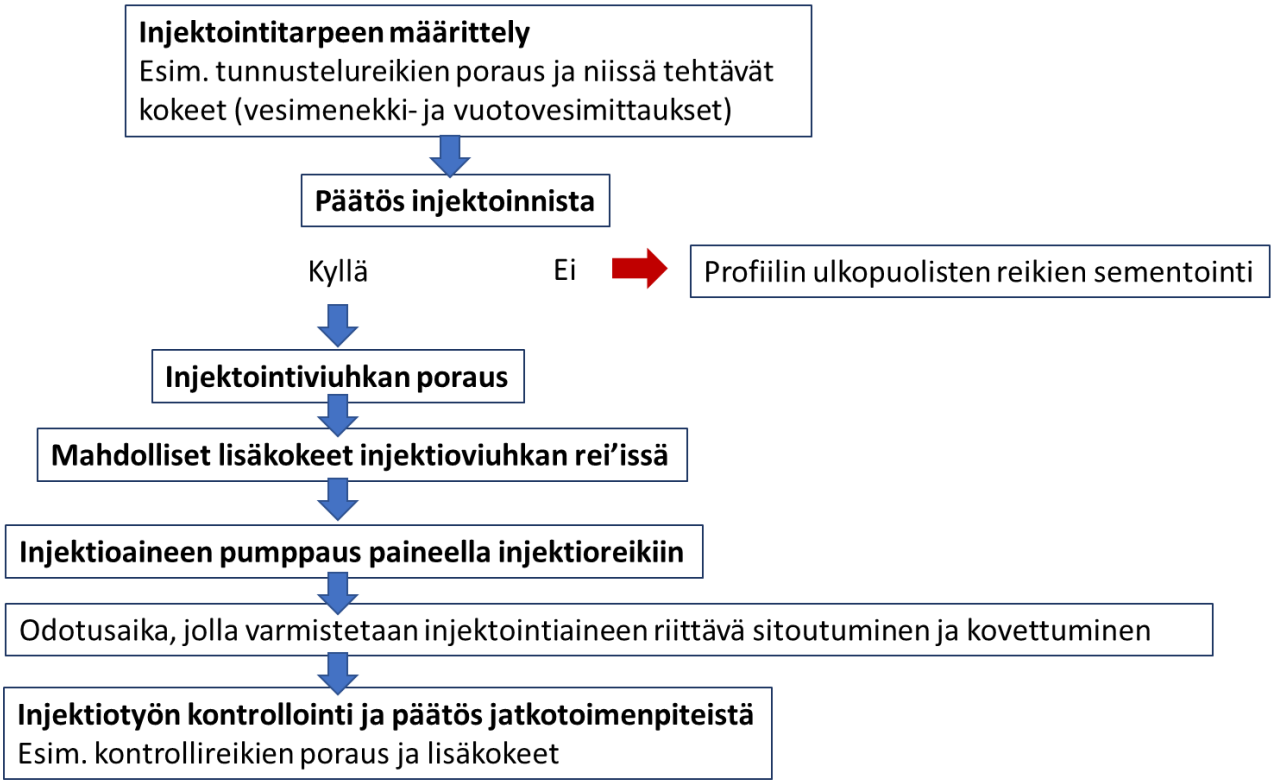
Kuva 2. Esi-injektointiviuhka (Melbye ym. 2003)

Injektointitarve määritetään tiivistettävän kohteen kallion vedenjohtavuuden ja tiiviystavoitteiden erotuksena. Tyypillisesti alustava injektointitarve voidaan arvioida suunnittelun yhteydessä tehtyjen geologisten ja kalliomekaanisten tutkimusten sekä pohjavedenvirtausmallinnuksen perusteella, mutta lopullinen varmuus injektointitarpeesta saadaan vesimenekkikokeilla ennen mahdollista injektointia tehtävistä tunnustelurei'istä. Injektoinnin jälkeen jatkoinjektointitarve voidaan tarkistaa kontrollirei'istä. Pelkkä vuotovesien mittaus ei yleensä riitä injektointitarpeen määrittelyyn, sillä vuotovesimäärä on riippuvainen pohjaveden hetkellisestä saatavuudesta virtauslähteestä. (Väylä 2019)

3.3 Esi-injektointi

Esi-injektointi on menetelmä, jossa kallion vedenjohtavuutta pienennetään tiivistämällä kalliota ennen louhinnan aloitusta. Pääsäätöisesti esi-injektointia käytetään vesivuotovaatimuksiltaan haastavammissa kohteissa, joissa vesivuotojen ja tiivistystavoitteiden välinen ero on ennakkoarvioiden perusteella suhteellisen suuri kuten hyvin vettä johtavien rakenteiden kohdalla tai ympäristövaatimuksiltaan haastavissa kohteissa. (Väylä 2019) On kuitenkin tärkeä muistaa, että esi-injektoinnilla ei voida saavuttaa täysin vesitiiviitä rakenteita. Esi-injektoinnin tarkoituksena on pienentää kallion vedenjohtavuutta sekä vähentää kalliotiloihin tulevaa veden määrää. Esi-injektoinnin lopputulemaa on vaikea arvioida tarkasti etukäteen, mutta sen avulla on kuitenkin mahdollista vähentää kalliotiloihin tulevaa vesimäärää muutamiin prosentteihin alkuperäisestä vesimäärästä. (Melbye ym. 2003)

Esi-injektointia voidaan toteuttaa joko kriteeripohjaisesti tai systemaattisesti. Kriteeripohjaisessa lähestymistavassa injektointipäätös tehdään tunnusteluporausten ja tunnustelurei'istä tehtävien vesimenekkikokeiden perusteella. Systemaattisessa lähestymistavassa louhittavalle alueelle porataan systemaattisesti injektointiviuhka, jonka reiät täytetään paineellisesti injektointiaineella aina ennen louhintaa. Injektointipäätöksen jälkeen molemmat menetelmät noudattavat samaa prosessin kulkua (Kuva 3). Injektioviuhkan rei'istä tehdään tarvittaessa lisämittauksia tai vaihtoehtoisesti ne täytetään ilman lisätestausta paineellisesti injektointiaineella. Injektointiaineen kuivuttua alueella voidaan tehdä jatkotutkimuksia, joiden pohjalta tehdään päätös jatkotoimenpiteistä tai injektoinnin lopettamisesta. Esi-injektointi tehdään lähtökohtaisesti sementtipohjaisilla injektioaineilla, mutta voidaan käyttää myös muita injektointiaineita kuten polyuretaania sekä kolloidista silikaa. (Väylä, 2019). Kuva 3. on havainnollistettu esi-injektoinnin päätöksentekoprosessia.



Kuva 3. Esi-injektointiprosessin kulku (Väylä 2019)

Esi-injektointi on menetelmänä jälki-injektointia monimutkaisempi ja aikaa vievämpi prosessi, mutta oikein tehtynä se parantaa kalliotilan käytettävyyttä ja turvallisuutta sekä saattaa osoittautua jälki-injektointiin verrattuna taloudellisesti kannattavammaksi menetelmäksi. Joissakin tapauksissa jälki-injektointi saattaa osoittautua hankalaksi tai jopa mahdottomaksi, jonka vuoksi ennalta tiedossa olevat hyvin vettä johtavat rakenteet ovat usein kannattavampaa esi-injektoida. (Melbye ym. 2003)

Kohteissa, joissa tiivistysvaatimukset ovat korkeat, jäännösvesivuotojen minimoimiseksi käytetään kehittyneempiä menetelmiä yhdistäen sekä esi- että jälki-injektointia. Näissä kohteissa injektointiaineena voidaan käyttää mikrosementtiä sekä kemiallisia injektointiaineita. Käytettäessä mikrosementtiä kallion vedenjohtavuusarvoksi voidaan keskimäärin saavuttaa $1x10^{-7}$ m/s. Kemiallisilla injektointiaineilla päästään teoriassa vedenjohtavuusarvoihin $1x10^{-8}$ – $1x10^{-9}$ m/s, mutta näiden arvojen saavuttaminen on hyvin aikaan vievää ja kallista. Yleensä viimeisten 10-15 % vesivuotojen injektointi on suhteessa kalliimpaa kuin ensimmäisten 80-85 % vuotovesien injektointi. (Melbye ym. 2003)

3.4 Jälki-injektointi

Jälki-injektointi on menetelmä, jossa injektointi suoritetaan louhinnan jälkeen. Jälki-injektointi soveltuu käytettäväksi kohteissa, joissa vesivuotojen ja tiiviysvaatimuksen ero ei ole suuri tai vesivuotojen voidaan olettaa olevan pistemäisiä. Jälki-injektoinnilla voidaan myös tiivistää epäonnistuneita esi-injektoituja alueita. (Väylä 2019) Menetelmän heikkoutena voidaan pitää sitä, ettei se usein tuki vuotoa täysin vaan se saattaa siirtää vuotokohdan toiseen paikkaan (Ritola ym. 2002). Esi-injektointiin verrattuna jälki-injektointi ei ole yhtä aikakriittinen louhinnan etenemisen kannalta, minkä vuoksi sitä on perinteisesti suosittu kaivosteollisuudessa.

3.5 Injektointiaineet

Injektointiaineen koostumus vaihtelee hyvin paljon eri työkohteiden välillä. Joissakin työkohteissa injektointiaineelle ei ole merkittäviä suunnitteluvaatimuksia, kun taas toisissa kohteissa vaatimustaso voi olla hyvin korkea. Injektointiaineen suunnittelu toteutetaan aluekohtaisesti ja suunnittelussa otetaan huomioon seuraavat parametrit (Melbye ym. 2003):

A) Materiaalin vesi-sementtisuhde ja ominaispaino; liian suuri vesisuhde pilaa injektointiaineen, vesimäärän ollessa liian vähäinen injektointiaine ei tunkeudu kallion rakoihin.

B) Injektointiaineen vuodon minimointi; vuotokanavat, stabiili injektointi
C) Viskositeetti; viskositeetin tulee olla riittävä, jotta aine tunkeutuu kalliorakoihin ja tukkii vedenvirtauskanavat.
D) Kovettumisaika; liian pitkä kovettumisaika pidentää injektoinnin kestoa, mikäli aika on liian lyhyt, injektointiainetta ei ehditä pumpata tiivistettäviin kallionrakoihin.
E) Sementin raekoko ja partikkelikokojakauma; liian karkea aines ei pääse tunkeutumaan kalliorakoihin.

Sementtipohjaiset injektointiaineet

Injektoinnissa voidaan käyttää käytännössä mitä tahansa sementtiä, mutta karkearakeista sementtiä voidaan käyttää vain kohteissa, joissa tiivistettävät ruhjeet ja raot ovat suuria. Sementin käytettävyyden kannalta kaksi sen tärkeintä ominaisuutta ovat raekoko ja raekokojakauma. Mitä hienompirakeista sementti on, sitä paremmin se tunkeutuu kallion rakoihin. Perussementtiä voidaan käyttää noin 0,3 mm rakojen tiivistämiseen, mutta mikrosementtejä voidaan käyttää jopa 0,06 mm rakoihin. Hienommaksi jaetulla sementillä on korkeampi ominaispinta-ala eli korkeampi Blaine -arvo m^2/kg. Injektointiaineena käytettävien sementtityyppien Blaine-arvoja on esitetty Taulukko 2. (Melbye ym. 2003)

Taulukko 2. Injektointiaineina käytettäviä sementtityyppejä (Melbye ym. 2003)

Sementtityyppi / Käyttökohde	**Blaine -arvo (m^2/kg)**
Matalan lämmöntuoton sementti suuriin rakenteisiin	250
Normaali Portland-sementti	300-350
Nopeasti kovettuva Portland-sementti	400-450
Mikrosementti	650-1000

Sementin sekaan voidaan lisätä kiihdytysaineita, joilla voidaan hallita ja nopeuttaa injektioaineen kovettumista. Viime vuosina markkinoille on tullut ruiskubetonoinnissa aiemmin käytettyjä alkalivapaita kiihdytysaineita. Oikein käytettynä kiihdytysaineet ovat hyvä tapa parantaa sementin ominaisuuksia injektointiaineena. Kiihdytysaineiden käytöllä voidaan esimerkiksi estää injektointiaineen valumista liian kauas injektointikohteesta sekä pysäyttää injektointiainevuodot. (Melbye ym. 2003)

Kemialliset injektointiaineet

Injektoinnissa voidaan käyttää myös kemiallisesti valmistettuja injektointiaineita kuten polyuretaanipohjaisia massoja, jotka paisuvat kohteessa moninkertaisesti täyttäen tiivistettävän tilan (Väylä 2019). Kemiallisilla injektointiaineilla on erittäin hyvä tunkeutuvuus, parhaimmillaan jopa veden luokkaa. Kemiallisia injektointiaineita käytetään usein olosuhteiltaan vaikeissa kohteissa tai tiivistysvaatimusten ollessa erittäin korkeat kuten kohteissa, joissa pohjaveden virtausnopeus on suuri. (Paalumäki ym. 2015) Parhaiten kemialliset injektointiaineet soveltuvat käytettäväksi jälki-injektoinnissa (Väylä 2019).

Kolloidinen silika

Kolloidinen silika (silika sooli) koostuu mikroskooppisen pienistä amorfisista piioksidipartikkeleista ja sen viskositeetti on 5 mPa, mahdollistaen injektointiaineen tunkeutumisen kallion pieniin rakoihin ja hienoon hiekkaan. Kiihdytysaineena kolloidisessa silikassa toimii suola. Kohteissa, joissa pohjavesi on luontaisesti suolaista, tulee pohjaveden vaikutus kiihdytysaineeseen selvittää ennen injektointityön aloitusta. (Melbye ym. 2003, Väylä 2019)

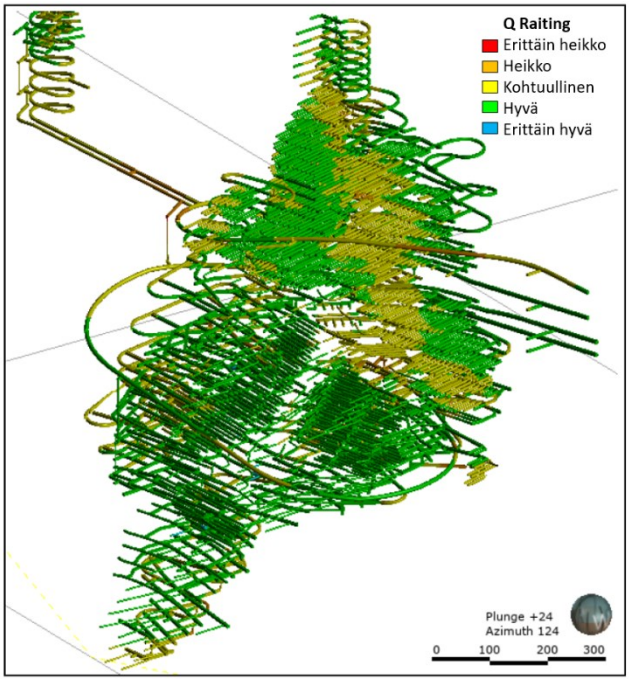
Kolloidinen silika soveltuu käytettäväksi kohteissa, joissa tiivistettävät kallionraot ovat hyvin pieniä 10-100 µm ja perinteiset tai mikrosementtipohjaiset injektointiaineet eivät toimi. Tällainen kohde voi olla esimerkiksi paksu savikerros. Kolloidinen silika koostuu pääasiassa piidioksidista ja suolavedestä. Näin ollen se on huomattavasti ympäristöystävällisempi vaihtoehto kuin aiemmin käytetyt akryyliamidipohjaiset geelit, jotka ovatkin nykypäivänä kiellettyjä monissa maissa. (Melbye ym. 2003)

3.6 Alustava suunnitelma injektoinnin käytöstä Sakatin kaivoksessa

Sakatin kaivoksen hankesuunnittelun aikana toteutettavien tutkimusten avulla saadaan tietoa kallioperässä esiintyvistä merkittävistä vettä johtavista rakenteista sekä niiden sijoittumisesta alueella, jonne maanalainen kaivos on suunniteltu toteutettavan. Näiden rakenteiden paikallistaminen on kaivoksen toteuttamisen kannalta erittäin tärkeää, jotta ne pystytään huomioimaan etukäteen kaivoksen sijoittumista ja louhintoja

suunniteltaessa. Maanalaisen kaivoksen louhinnassa pyritään ensisijaisesti välttämään alueita ja rakenteita, joissa kallion laatu tiedetään heikoksi ja rakenne on hyvin vettä johtava. Sakatin esiintymää on tutkittu geofysikaalisin mittauksin, kairauksin sekä hydrogeologisin tutkimuksin ja kairauksin. Hydrogeologiset tutkimukset ovat sisältäneet mm. vesihävikkimittauksia, vedenjohtavuustestauksia sekä pumppauskokeita kallioperän vedenjohtavuuden selvittämiseksi. Geologisen ja rakennegeologisen mallin lisäksi maanalaiselle kaivokselle on laadittu pohjavedenvirtausmalli. Geologisia-, hydrogeologisia- ja geoteknisiä tutkimuksia tullaan jatkamaan hankkeen jatkosuunnittelun, rakennus- ja tuotantovaiheen aikana.

Sakatin kaivoksen tiivistystarpeen määrittelyssä ja tiivistyksen suunnittelussa keskeisin lähtötieto on kallioperän rakenne sekä kivenlaatu alueella, jonne maanalainen kaivos sijoittuu. Sakatin esiintymän tutkimuskairausten perusteella on tuotettu arvio kallioperän kivenlaadusta maanalaista kaivoksen alueella (
Kuva 4). Tämänhetkisten tutkimusten mukaan maanalaisen kaivoksen rakenteet ja louhinta-alueet sijoittuvat pääasiassa alueille, jossa kiven laatu on hyvää tai kohtuullista. Näillä alueilla kivenlaatu on siten pääasiassa eheää eikä suuria ruhjevyöhykkeitä tai rakoja esiinny. Paikoitellen kaivoksessa esiintyy alueita, joissa kivenlaatu on heikko tai erittäin heikko, mikä puolestaan indikoi vettä johtavien rakenteiden mahdollisesta esiintymisestä kyseisillä alueilla.



Kuva 4. Kallioperän kivenlaatu Sakatin maanalaisen kaivoksen alueella. Laatuluokittelu (Q Raiting) perustuu alueella toteutettuihin malminetsintäkairauksen tietoihin (SRK Consulting, 2018).

Sakatin esiintymän läpi tiedetään kulkevan ruhjevyöhykkeitä, minkä seurauksena esiintymä on jaettu osa-alueisiin. Tunnistetut vettä johtavat rakenteet on otettu huomioon nykyisessä Sakatin kaivossuunnitelmassa ja näin tulee olemaan myös varsinaisen kaivostoiminnan aikana. Koska merkittäviä vettä johtavia rakenteita ei kuitenkaan pystytä louhinnassa täysin kiertämään tai muilla keinoin välttämään, Sakatin kaivoksen toteuttamisessa on varauduttu kalliotilojen tiivistämiseen. Tässä vaiheessa hankesuunnittelua kaivokselle ei ole vielä laadittu tiivistyssuunnitelmia, vaan tiivistyssuunnitelmat vinotunnelilinjaukselle sekä maanalaiselle kaivokselle tullaan laatimaan jatkosuunnittelun yhteydessä. Suunnitelmien laatiminen edellyttää riskipohjaisen tarkastelun, tiivistysvaatimusten määrittelyn ja tiivistysstrategian valinnan sekä tiivistyksessä käyttävien aineiden soveltuvuuden testaamisen. Sakatin kaivoksen pohjavedenvirtausmalli ja sen pohjalta tehtävät ympäristövaikutusten arvioinnit määrittelevät tiivistysvaatimuksille asetettavan tason ja alueittaiset tiivistysstrategiat valitaan rakennegeologisen tiedon perusteella. Todennäköisesti alueittaiset tiivistysstrategiat tulevat koostumaan systemaattisesta ja kriteeripohjaisesta esi-injektoinnista sekä jälki-injektoinnista. Tiivistyssuunnitelman laadintaa varten tarvittavia selvityksiä sekä suunnitelman kehittymistä Sakatin kaivoshankkeen eri vaiheissa on kuvattu Taulukko 3. Suunnitelmien kehittyminen eri suunnitteluvaiheissa mukailee Väyläviraston ohjeistusta (Väyläviraston ohjeita 28/2019, Kalliotunnelin kallioteknisen suunnitteluohje) vuotovesien hallinnan vaatimuksista.

Taulukko 3. Tiivistyssuunnitelman kehittyminen osana hankesuunnittelua mukaillen Väyläviraston suunnitteluopasta (Väyläviraston ohjeita 28/2019, Kalliotunnelin kallioteknineen suunnitteluohje). Taulukossa on merkitty selvitysvaihesarakkeeseen kursiivilla, mitä Sakatin kaivoshankkeen vaihetta se vastaa.

Selvitysvaihe	**Selvitys**	**Saatava tieto**
Esiselvitysvaihe *Sakatin hankkeen alustava arviointi (Concept study)*	Lähtötietojen selvitys; kairaukset, geofysikaaliset mittaukset (mm. reikägeofysiikka), hydrogeologiset tutkimukset, perustilaselvitykset (pohjavedet, luonto)	Alueen maaperä- ja kallioperäolosuhteet (maalajit, kivilajit, geologiset rakenteet), ympäristön ja pohjavesien perustila
Yleissuunnitteluvaihe *Sakatin hankkeen kannattavuuden esiselvitysvaihe A (PFS-A ja YVA)*	Lähtötietojen selvitystyö jatkuu, geologinen ja rakennegeologinen mallinnus, tekniset suunnitelmat (kaivossuunnitelma, aluesuunnittelu), pohjavedenvirtausmallinnus ja ympäristövaikutusten arviointi	Rakennegeologisesta mallista saadaan kallion rakenteet, pohjavedenvirtausmallinuksella saadaan selville kaivoksen vaikutus pohjavesiolosuhteisiin ja ympäristövaikutusten arvioinnista saadaan tiivistystavoitteet
Tekninen suunnitteluvaihe *Kannattavuuden esiselvitysvaihe B (PFS-B /Ympäristölupa)*	Lähtötietojen selvitystyö jatkuu, vinotunnelin toteuttamiskelpoisuusselvitys, päivitetty kaivossuunnitelma, jossa on huomioitu ympäristövaikutusten arviointi (sis. Alustava tiivistyssuunnitelman maanalaiselle kaivokselle)	Vinotunnelin toteuttamiskelpoisuusselvityksestä saadaan tieto tunneliporan soveltuvuudesta tunnelin louhintamenetelmäksi, alustava tieto tiivistämistä vaativista alueista (vinotunneli ja maanalainen kaivos)
Rakennussuunnitteluvaihe *Kannattavuustarkastelu (FS)*	Lähtötietojen selvitystyö jatkuu, tarkentunut geologinen ja rakennegeologinen malli, tarkentunut pohjavedenvirtausmallinnus, tarkennettu kaivos- ja louhintasuunnitelma, osa-aluekohtaisten tiivistyssuunnitelmien laatiminen	Tiivistyssuunnitelmista saadaan alueittaiset tiivistysvaatimukset ja tiivistysstrategiat
Rakennusvaihe	Lähtötietojen selvitystyö jatkuu, rakennusvaiheessa tehtävät testaukset (injektointiaine ja tunnusteluporaukset sekä vesimenekkikokeet), lopullisen tiivistyssuunnitelman laatiminen vinotunnelille ja pysyville kalliotiloille, injektoinnin jälkeinen laaduntarkkailu	Tiivistyssuunnitelmien yksityiskohtainen mitoitus varmistetaan todellisiin kallio-olosuhteisiin, laaduntarkkailulla varmistetaan injektoinnin onnistuminen sekä määritellään lisäinjektointitarve
Tuotantovaihe	Lähtötietojen selvitystyö jatkuu, tuotantovaiheessa tehtävät testaukset (injektointiaine ja tunnusteluporaukset sekä vesimenekkikokeet), tarvittaessa kohdekohtainen tiivistyssuunnitelma, injektoinnin jälkeinen laaduntarkkailu (vuotovesien seuranta)	Tiivistyssuunnitelmien yksityiskohtainen mitoitus varmistetaan todellisiin kallio-olosuhteisiin, laaduntarkkailulla varmistetaan injektoinnin onnistuminen sekä määritellään lisäinjektointitarve

Kallioperän hydrogeologisiin ominaisuuksiin perustuen seuraavassa hankkeen kannattavuuden esiselvitysvaiheessa (PFS-B) tiivistyksen suunnittelussa sovelletaan Eurokoodi 7 mukaista seurantamenetelmää (SFS-EN 1997-1:2004):

1. *Kun geoteknisen käyttäytymisen ennustaminen on vaikeaa, on joissakin tapauksissa tarkoituksenmukaista soveltaa lähestymistapaa, joka tunnetaan ”seurantamenetelmänä” ja jossa suunnittelua tarkastellaan uudelleen rakennusaikana.*
2. *Seuraavien vaatimusten tulee täyttyä ennen kuin rakentaminen aloitetaan:*
   - *Rakenteen sallitun käyttäytymisen rajat on määritettävä*
   - *Mahdollisen käyttäytymisen vaihtelualue on arvioitava ja on osoitettava, että todellinen käyttäytyminen on hyväksyttävällä todennäköisyydellä hyväksytyissä rajoissa*
   - *On laadittava seurantasuunnitelma, jonka avulla voidaan todeta, onko todellinen käyttäytyminen hyväksyttävissä rajoissa. Seurannan tulee osoittaa se selvästi riittävän aikaisessa vaiheessa ja riittävän lyhyin väliajoin, jotta mahdolliset varatoimenpiteet voidaan toteuttaa onnistuneesti*

- *Laitteiden ja tulosten analysointimenetelmien vasteajan tulee olla riittävän nopea suhteessa systeemin mahdolliseen kehittymiseen*
- *Mahdollisia toimenpiteitä varten on laadittava suunnitelma, jota voidaan soveltaa, jos tarkkailu paljastaa hyväksyttävät rajat ylittävää käyttäytymistä.*

3. *Rakennusaikana seuranta tulee tehdä suunnitelmien mukaisesti.*
4. *Seurannan tulokset tulee arvioida tarkoituksenmukaisissa vaiheissa ja suunniteltuihin toimenpiteisiin on ryhdyttävä, jos käyttäytymiselle asetetut rajat ylitetään.*
5. *Seurantalaitteisto tulee joko vaihtaa tai laajentaa, jos sillä ei saada tarvittavan tyyppisiä luotettavia tietoja tai riittävää määrää tietoja.*

Pohjavedenvirtausmallinnuksessa käytetyt tiivistysskenaariot luovat hyvän lähtökohdan Eurokoodi 7 mukaisen seurantamenetelmän soveltamiselle. Mallinnusten perusteella merkittävimmin kaivoksen kokonaisvuotovesimäärään vaikuttavat vinotunnelin yläosa ja maanalaisen kaivoksen lävistävät vettä johtavat geologiset rakenteet. Hankesuunnittelun seuraavissa vaiheissa pohjavedenvirtausmallissa käytetyistä oletuksista ja mallinnuksista saaduista tuloksista määritetään tekniset tavoitteet vuotovesien hallinnalle vinotunneleiden ja kaivoksen rakentamisen sekä elinkaaren ajalle.

Sakatin kaivoksen ja vinotunneleiden suunnittelulähtökohtana on geologisesti ja kalliomekaanisesti tunnistaa ja määritellä kriteeriperusteisesti ja systemaattisesti esi-injektoitavat alueet. Standardissa SFS-EN 1997-1:2004 kuvatun seurantamenetelmän mukaisesti tekniset tavoitteet määrittelevät rakenteiden alueittain sallitut käyttäytymisen rajat, toisin sanoen vuotovesimäärät tunneliosuuksittain. Tiivistämisen ja kuivatuksen aluekohtaisessa suunnittelussa on rakenteiden käyttäytymisen rajojen lisäksi arvioitava mahdollisen käyttäytymisen vaihtelualue ja osoitettava, että todellinen käyttäytyminen on hyväksyttävällä todennäköisyydellä hyväksytyissä rajoissa. Sakatin tiivistys- ja kuivatusrakenteiden sallittu käyttäytyminen määritetään tunneliosuuksittain tiivistystavoitteina eli vuotovesimääränä per 100 m tunnelia (l/min/100 tunnelimetri).

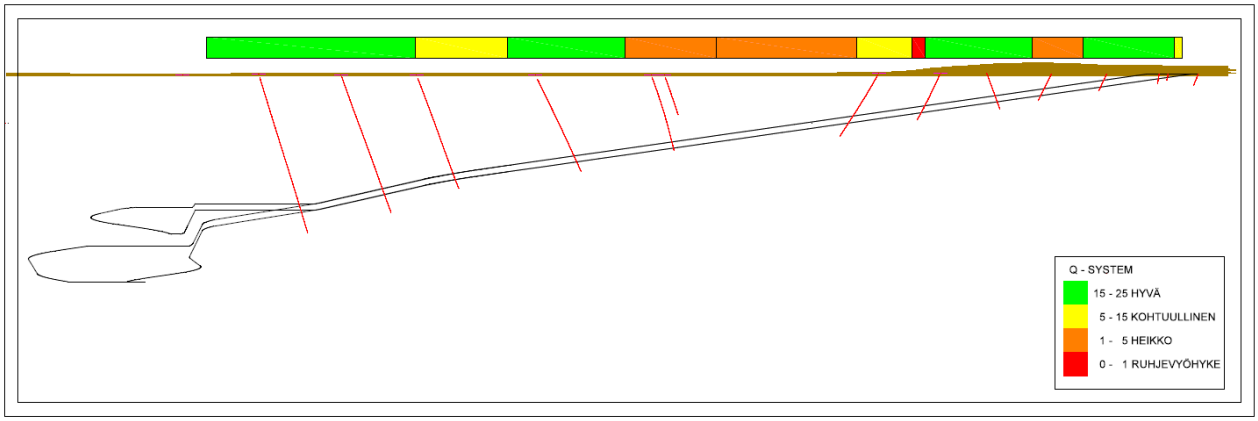
3.6.1 Mahdollisesti injektointia vaativat tilat

Tämänhetkisten tutkimusten sekä nykyisen kaivossuunnitelman perusteella, injektointia tullaan käyttämään maanalaiseen kaivoksen sisäänkäynnin ja maanalaiseen kaivokseen vievän vinotunnelin alueella, sekä kohdissa, jossa tunneli joudutaan louhimaan kallioperässä olevien isompien vettä johtavien rakenteiden läpi. Näiden lisäksi vaihtoehdoissa VE2a, VE2b, VE3a ja VE3b mahdollisesti toteutettavat pystykuilut tullaan injektoimaan. Seuraavissa kappaleissa on kuvattu, miten injektointi voitaisiin toteuttaa kaivoksen sisäänkäynnin ja vinotunnelin alueella, tunneleiden ja louhosalueiden läheisyydessä sekä kaivoksen pysyvissä tiloissa.

<u>Kaivoksen sisäänkäynti ja vinotunneli</u>

Tiivistämistarpeen näkökulmasta yksi merkittävimmistä maanalaisen kaivoksen rakenteista on maanpäältä kaivokseen vievä vinotunnelilinjaus. Vinotunnelit pyritään pitämään mahdollisimman kuivana sekä tuotannollisista että turvallisuuden näkökulmasta. Vinotunnelit toimivat koko kaivoksen elinkaaren ajan henkilöliikenteen, tuuletusilman ja materiaalin kuljetusreittinä, mistä johtuen tunnelirakenteiden ja tiestön on oltava jatkuvasti hyvässä kunnossa. Tunnelissa virtaava vesi aiheuttaa vaurioita tierakenteisiin, mikä lisää teiden kunnossapidon tarvetta.

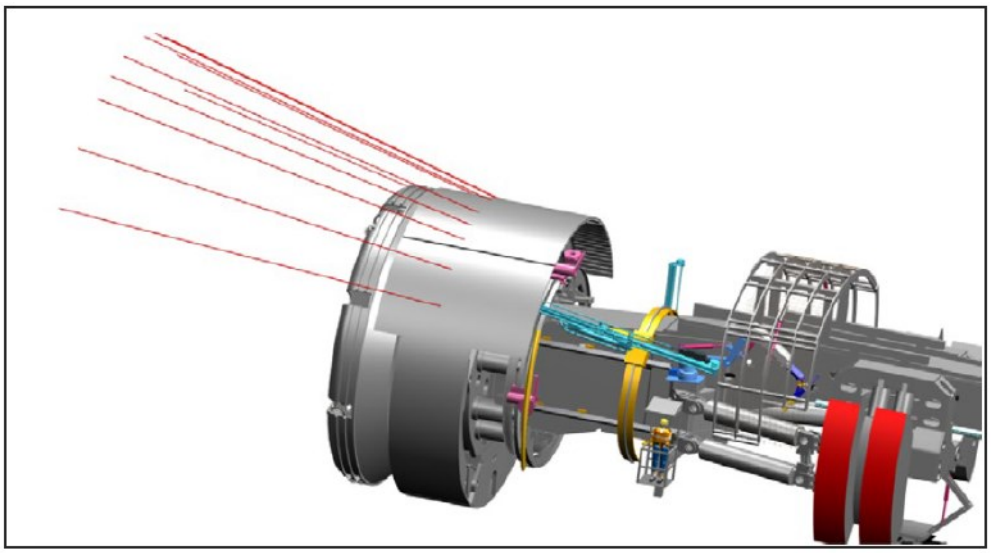
Vinotunnelilinjalla tehtyjen tutkimusten avulla on pystytty tunnistamaan alueet, joissa kallioperä on hyvälaatuista tai rikkonaista sekä paikallistamaan vettä johtavat rakenteet. Näiden tietojen perusteella vinotunnelilinjaus on jaoteltu osa-alueisiin, joille kullekin tullaan määrittämään kalliotilojen tuenta- sekä tiivistysvaatimukset. Tämänhetkisen tiedon perusteella, vinotunnelilinjaukset sijoittuvat osittain hyvälaatuisen sekä osittain rikkonaisen kallion alueelle. Esimerkiksi vaihtoehdon VE1a mukaisella vinotunnelilinjauksella kallioperän laadun ja tuentavaatimusten perusteella vinotunneli on jaettu 11 eri osa-alueeseen. Vinotunnelin jakoa 11 osa-alueeseen on havainnollistettu Kuva 5. Tarkentavia tutkimuksia vinotunnelilinjauksille tullaan jatkamaan ja hankesuunnittelun seuraavassa vaiheessa käynnistetään valitun vinotunnelilinjauksen toteuttamista koskeva kannattavuus ja teknistaloudellinen tarkastelu.



Kuva 5. Havainnekuva kallioperän laadusta vaihtoehdon VE1a mukaisella vinotunnelilinjauksella. Kallioperän ja sen tuentavaatimusten perusteella vinotunneli on jaettu 11 eri osa-alueeseen.

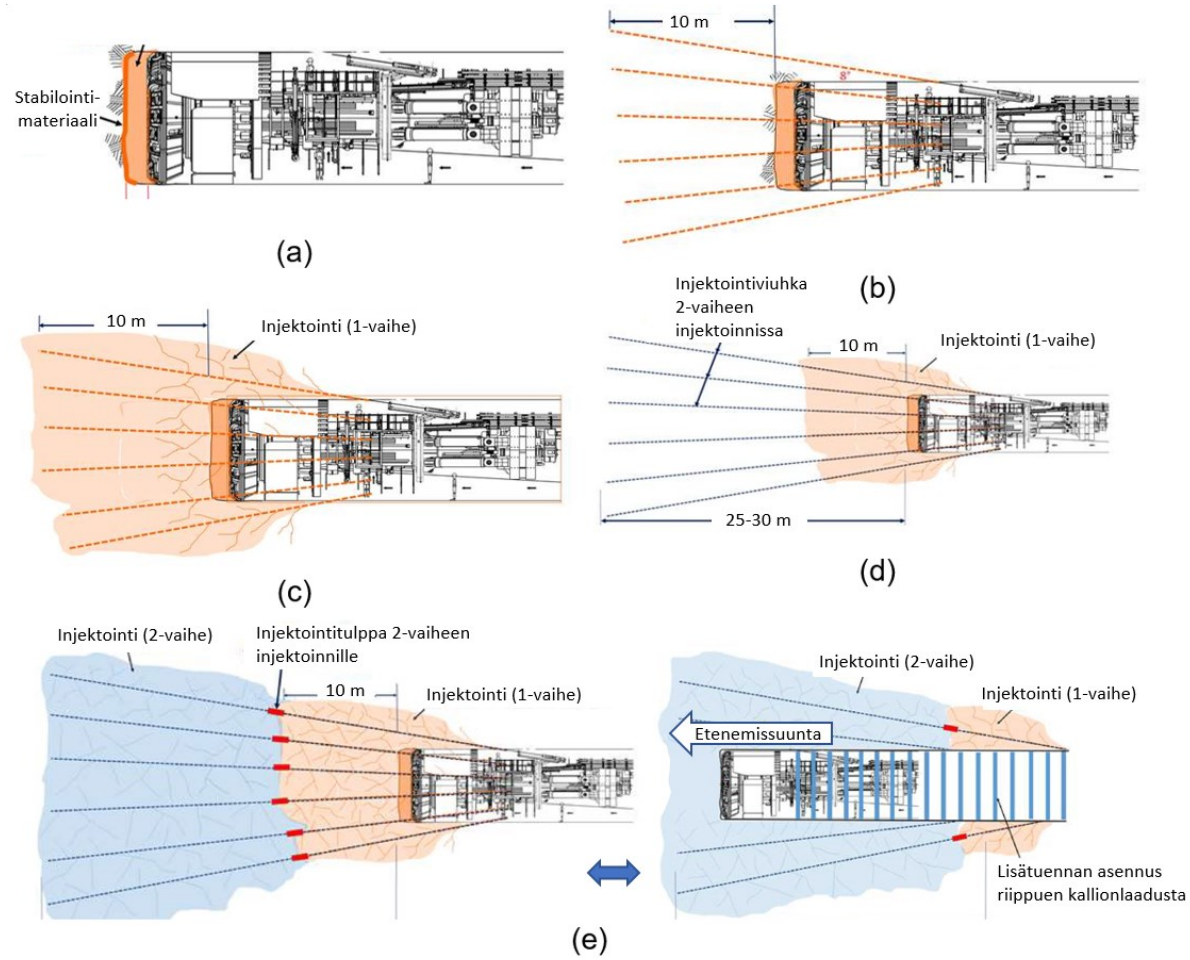
Sakatin kaivoshankkeessa vinotunneli voidaan toteuttaa joko tunneliporalla tai perinteisesti poraus/panostus menetelmällä. Vinotunnelin louhintamenetelmällä ei ole suurta merkitystä tiivistyksen näkökulmasta, louhintamenetelmästä riippumatta tiivistyssuunnitelma laadinnassa tullaan noudattamaan samoja periaatteita. Vinotunnelien kalliotilan tiivistys ja tuenta ovat louhinnan työvaiheita ja ne toteutetaan osana louhintasykliä ennen seuraavan katkon louhintaa.

Tiivistyssuunnitelmassa määritellään osa-aluekohtaiset tiivistysstrategiat ja -menetelmät sekä käytettävät injektointiaineet. Suunnitelmassa tullaan kuvaamaan myös rakentamisenaikainen esi-injektointia koskeva päätöksentekoprosessi, joka mukailee Väyläviraston ohjetta 28/2019 (Kalliotunnelin kallioteknинen suunnitteluohje). Tiivistyssuunnitelmaa joudutaan todennäköisesti vielä tarkentamaan vinotunneleiden rakentamisen aikana, sillä lopulliset kallio-olosuhteet tulevat selviämään vasta louhinnan yhteydessä. Lisäksi injektoinnin yhteydessä tehtävillä tunnusteluporauksilla saadaan tarkempaa tietoa kallioperästä sekä sen vedenjohtavuudesta. Tunnustelureistä tehtävillä vesimenekkikokeilla saadaan selvitettyä injektoitavan kalliotilan vedentuotto ja määritettyä lopullinen tiivistysvaatimus. Tämänhetkisen tiedon valossa, vinotunnelia ei todennäköisesti ole tarve esi-injektoida systemaattisesti koko sen matkalta, vaan tiivistys tulisi pääasiassa kohdistumaan ruhjevyöhykkeiden alueelle. Ruhjevyöhykkeiden alueella tullaan todennäköisesti soveltamaan systemaattista esi-injektointia ja vinotunnelilinjauksen muissa osissa kriteeripohjaista esi-injektointia ja jälki-injektointia. Injektointi- ja tunnustelureikien poraus tunneliporauskalustolla on havainnollistettu Kuva 6. Tunneliporauksessa injektointityöhön tarvittava kalusto voidaan asentaa porauslaitteistoon, jolloin injektointi- ja tunnustelureikien poraus tapahtuu poralaitteen jyrsinpään läpi.



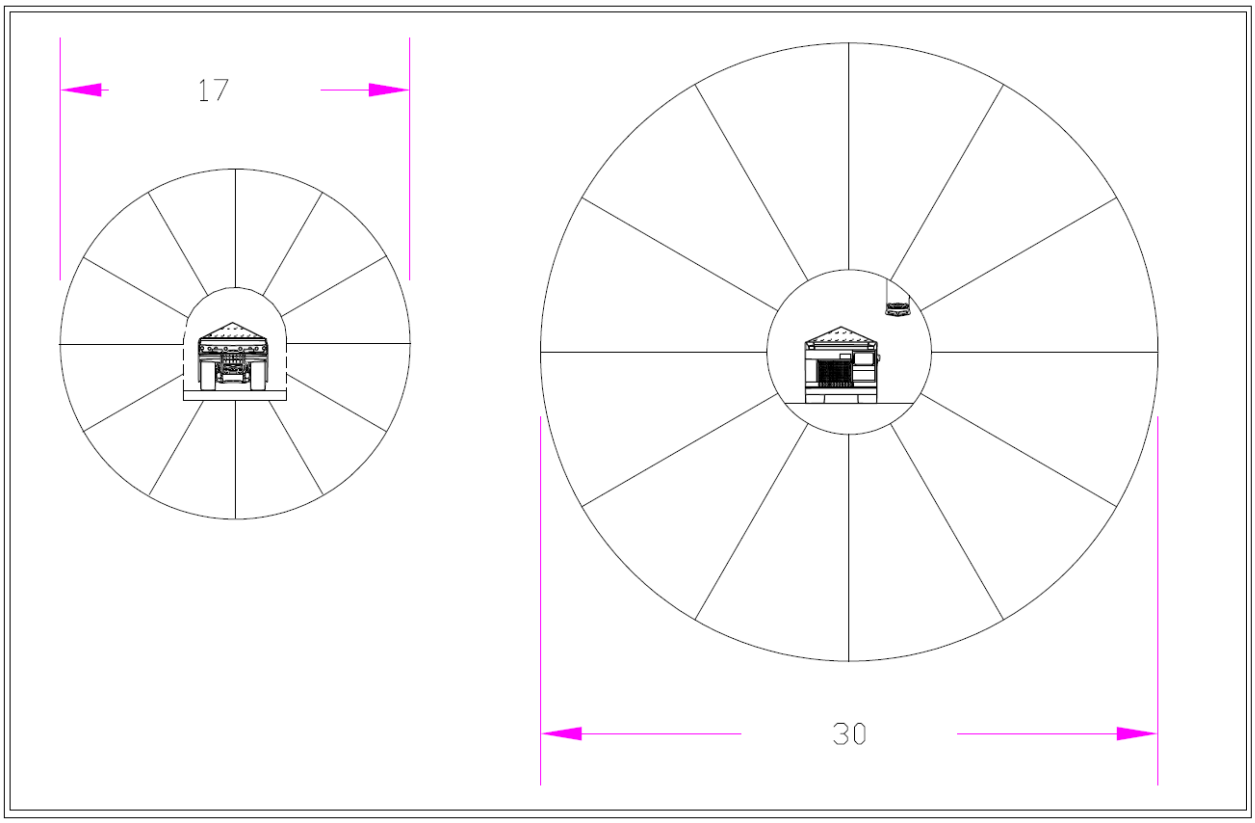
Kuva 6. Havainnekuva injektointi- ja tunnustelureikien poraamisesta tunneliporalaitteistolla. Reikien poraus tapahtuu poran jyrsinpään läpi. (SRK Consulting, 2019)

Mikäli vinotunneli tullaan toteuttamaan tunneliporalla, käytettävä poralaitteisto tullaan suunnittelemaan siten, että se pitää sisällään tunneliporauskaluston lisäksi injektointi- ja kalliotuentakaluston. Tunneliporauksen yhteydessä tehtävän injektoinnin yleisiä periaatteita on havainnollistettu Kuva 7. Lähestyttäessä ruhjevyöhykettä louhinta pysäytetään hyvälaatuiseen kiveen ja ruhjevyöhykkeen sijainti varmistetaan tunnustelukairauksin. Tunnelipora peruutetaan pois louhitun tunnelin peräseinästä jättäen tilaa kalliopinnan ja tunneliporan väliin asennettavalle stabilointimateriaalille (Kuva 7a). Tunnelin peräseinän stabiloinnin jälkeen kallioon porataan injektointiviuhka (Kuva 7b) ja suoritetaan ensimmäisen vaiheen injektointi (Kuva 7c). Ensimmäisen vaiheen injektoinnissa voidaan käyttää sementtiä tai ympäristöystävällisiä kemiallisia injektointiaineita. Toisessa injektointivaiheessa injektointiviuhkan pituutta kasvatetaan. Tämän tarkoituksena on laajentaa injektointialuetta siten, että se ulottuu ruhjevyöhykkeen läpi aina hyvälaatuiseen kiveen (Kuva 7d). Injektointiviuhkan reikiin asennetaan tulpat ja sementtipohjainen injektointiaine pumpataan reikiin. Sementin kuivuttua tunnelipora voidaan louhia injektoidun ruhjevyöhykkeen läpi (Kuva 7e). Ruhjevyöhykkeen alueelle tarvittava lisätuenta suunnitellaan kohdekohtaisesti. Todennäköisiä tuentamenetelmiä voivat olla esimerkiksi teräskaarien asennus, pultitus ja ruiskubetonointi.



Kuva 7. a) Stabilointimateriaalin asennus tunnelin peräseinän ja tunneliporan väliin, b) ensimmäisen vaiheen injektointiviuhkan poraus, c) ensimmäisen vaiheen injektointi, d) injektointiviuhkan uudelleen poraus toisen vaiheen injektointia varten, e) injektointitulppien asennus ja toisen vaiheen injektointi sementtipohjaisella injektointiaineella, injektoidun alueen läpi louhinta.

Pitkäaikaiseen käyttöön tarkoitetun vinotunnelin ympärille tehtävä injektointialue tulee todennäköisesti olemaan laajempi kuin esiintymän läheisyyteen tehtävien tavanomaisten tunnelien. Injektointialueen sädettä voidaan tarpeen mukaan laajennetaan jopa 30 metriin. Vinotunnelissa sekä tavanomaisessa tunnelissa tehtävän injektointialueen laajuutta on havainnollistettu Kuva 8.

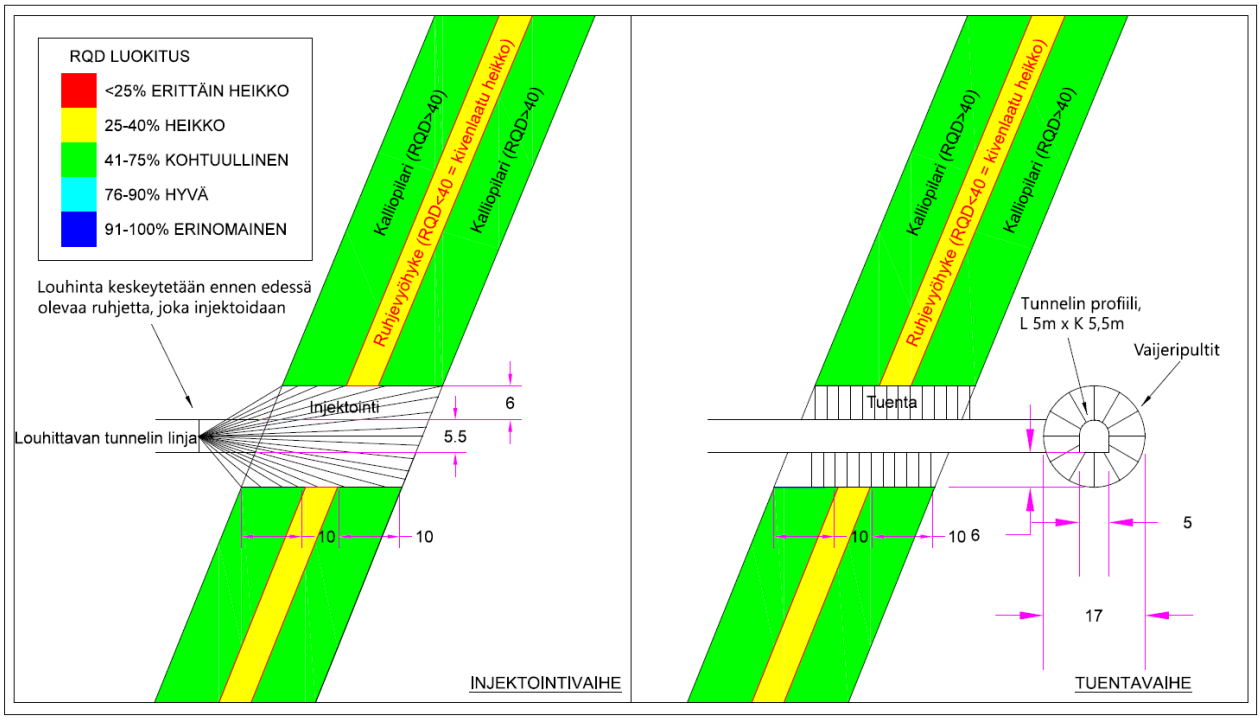


Kuva 8. Alustava suunnitelma tavanomaisen tunnelin (kuvassa vasemmalla) ja vinotunnelin (kuvassa oikealla) injektointi-alue.

Vettä johtavien rakenteiden huomioiminen louhinnassa

Sakatin kaivossuunnitelmassa on huomioitu merkittävien vettä johtavien rakenteiden sijoittuminen tuotanto-alueiden ja louhosten suunnittelussa. Louhoksien ja ruhjevyöhykkeiden väliin on jätetty 10 metriä leveä ”ehjän” kallion alue, ns. pilari, jota ei tulla louhimaan. Tarvittaessa ehjän kalliovyöhykkeen leveyttä kasvatetaan, mikäli paikalliset olosuhteet tunnusteluporauksista saadun tiedon ja louhintakokemuksen perusteella näin edellyttävät. Pilarilla pyritään estämään suoran vettä johtavan yhteyden muodostuminen louhoksen ja ruhjevyöhykkeen välille. Tarvittaessa pilaria voidaan tiivistää jälkikäteen, jos räjäytysten seurauksena pilariin on muodostunut merkittäviä vettä johtavia rakenteita.

Tunnelinajossa ruhjeita ei kuitenkaan pysytä aina kiertämään siirryttäessä louhinta-alueelta toiselle, vaan osa tunneleista joudutaan louhimaan ruhjevyöhykkeen läpi. Ennen louhintatöiden käynnistämistä tunnettujen ruhjevyöhykkeiden läheisyydessä laaditaan aluekohtainen injektointisuunnitelma. Siinä kuvataan, miten ruhjevyöhyke tiivistetään, jotta sen läpi voidaan turvallisesti louhia tunneli. Ensisijaisesti tiivistysmenetelmänä käytetään kriteeripohjaista esi-injektointia mukaillen seuraavanlaista lähestymistapaa. Lähestyttäessä tunnettua ruhjevyöhykettä, aloitetaan tunneliin tulevan vesimäärän silmämääräinen tarkkailu ja tunnustelukairaukset. Esi-injektointi aloitetaan noin 10 metrin etäisyydellä ruhjevyöhykkeestä, mikäli tunnustelukairauksista saadut tulokset eivät ylitä injektointikynnystä. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että injektoitavan alueen säde on tunnelin halkaisijan mitta. Esimerkiksi 5,5 metriä korkean tunnelin tiivistys ulottuu 5,5 metrin säteelle tunnelin seinämistä. Kun tiivistyksen tavoitteena on kaivoksen rakenteiden tukeminen, tunnelin louhinnassa tiivistys yleensä kohdennetaan tunnelin katon ja seinämien alueelle. Sakatin maanalaisessa kaivoksessa tullaan tiivistämään myös tunnelin lattia, koska tavoitteena on tuennan ohella vähentää tunneliin tulevaa veden määrää. Kuva 9 on havainnollistettu Sakatin kaivoksen injektointi- ja tuentaperiaatetta louhittaessa tunnelia vettä johtavan ruhjeen.



Kuva 9. Sakatin maanalaisessa kaivoksessa joudutaan paikoitellen louhimaan tunneli vettä johtavan ruhjevyöhykkeen läpi. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on havainnollistettu esi-injektoinnin periaatteita ruhjevyöhykkeen kohdalla. Oikeanpuoleisessa kuvassa on havainnollistettu kalliotilan tuentaperiaatteita sen jälkeen, kun tunneli on louhittu ruhjeen läpi.

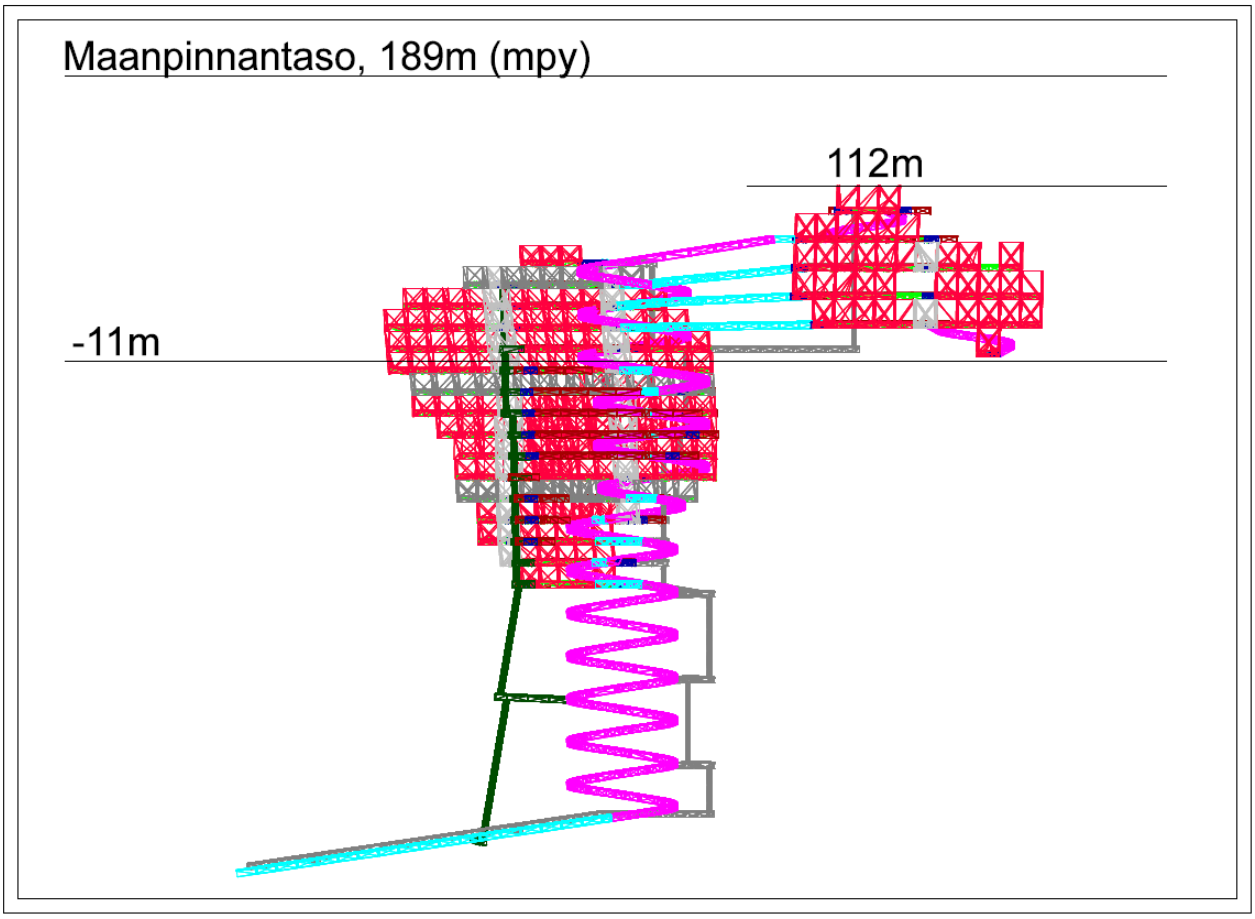
Tunnelin esi-injektointi voidaan aloittaa tarvittaessa suunniteltua aiemmin, mikäli tunnustelukairausten perusteella havaitaan vesimäärän kasvavan merkittävästi suuremmaksi kuin mitä injektointisuunnitelmassa on asetettu injektointityön aloitukselle. Tunneliin tulevaa vesimäärä voidaan mitata usein eri menetelmin kuten esimerkiksi vesimenekkikokein tai pietsometri-mittauksilla.

Tunnettujen vettä johtavien ruhjevyöhykkeiden lisäksi on mahdollista, että maanalaisen kaivoksen alueella esiintyy myös muita pienempiä vettä johtavia rakenteita, joita ei vielä tähän mennessä ole pystytty paikallistamaan maanpäältä tehdyillä malminetsintäkairauksilla. Kairauksia tullaan jatkamaan kaivoksen tuotantovaiheen aikana. Maanalla tehtävillä tuotanto- ja malminetsintäkairauksilla tutkitaan esiintymän pitoisuuksia, rajoja sekä syvyysjatkeita. Kairanreikiä hyödynnetään lisäksi hydrogeologisiin tutkimuksiin, joita ovat esimerkiksi vesihävikki- ja reikägeofysiikan mittaukset. Tutkimusten lopuksi vettä johtavia alueita lävistävät kairanreiät suljetaan tulppaussuunnitelman mukaisesti.

Kairauksilla saadaan tarkempaa tietoa kallion laadusta ja rikkonaisuudesta (RQD-arvosta). Kallion rikkonaisuus ei ole suoraan verrannollinen kallion vedenjohtavuuteen, mutta se antaa hyvän käsityksen, millä alueilla vettä johtavia rakenteita voisi sijaita. Tuotantovaiheen kairaukset tuottavat siis arvokasta tietoa tiivistys- ja louhintasuunnitteluun, minkä avulla uusiin vettä johtaviin rakenteisiin pystytään varautumaan ajoissa.

Tämänhetkisessä kaivossuunnitemassa on jo varauduttu siihen, että kallio-olosuhteet voivat olla paikoitellen huonoja jopa 200 metriä maanpinnan alapuolella. Tunnelin louhinnassa vettä johtavien rakenteiden tiivistämisessä noudatetaan edellä kuvattua tunnelin louhinnassa käytettyä injektointiprosessia. Louhosten alueella toimenpiteet valitaan louhoskohtaisesti, tarvittaessa louhos voidaan jättää jopa kokonaan louhimatta.

Sakatin satelliittiesiintymä NE sijoittuu lähemmäs maanpintaa kuin Sakatin pääesiintymä. Satelliittiesiintymän NE tunnelit sijaitsevat ylimmillään noin 90 metriä maanpinnan alapuolella ja louhokset noin 80 metriä maanpinnan alapuolella. Kuva 10 on havainnollistettu satelliittiesiintymän NE sijoittuminen suhteessa maanpinnan tasoon.



Kuva 10. Satelliittiesiintymän NE sijoittuminen maanpinnantason alapuolella.

Maanalaisen kaivoksen pysyvät tilat

Lähtökohtaisesti maanalaisen kaivoksen pysyvät tilat kuten pumppaamot, huolto-, varasto- ja toimistotilat rakennetaan alueelle, jossa kallionlaatu on hyvä ja kallion vedenjohtavuus matala. Koska tilat on tarkoitettu pitkäaikaisiksi työskentelytiloiksi, niiden tuennan vaatimustaso on korkeampi kuin väliaikaisten tilojen kuten louhosten ja tuotantotasojen. Tilojen tulee pysyä myös mahdollisimman kuivina, jotta tiloihin ei pääse muodostumaan kosteutta ja sen myötä työterveydelle aiheutuvia haittoja kuten homeen muodostumista. Pysyviä kalliotiloja tullaan tarpeen mukaan tiivistämään vesivuotojen estämiseksi.

Mikäli Sakatin kaivokseen rakennetaan maanpäältä lähteviä pystykuiluja malmin siirtoa sekä kaivoksen ilmanvaihtoa varten, pystykuilujen ympäröivä kallio tullaan tiivistämään. Alustavan suunnitelman mukaan tiivistysmenetelmänä käytetään systemaattista esi-injektointia.

3.6.2 Menetelmien toteutettavuus ja laadunvarmistus

Jotta kalliotilojen tiivistäminen toteutetaan onnistuneesti, edellyttää se huolellista etukäteen tehtävää sekä työn suorittamisen aikana tehtävää suunnittelua sekä varsinaisen tiivistystyön laadukkaan toteutuksen. Onnistuneen lopputuloksen saavuttamiseksi on ennen työn aloittamista tiedettävä tiivistettävän kohteen vedenjohtavuus, oikea tiivistysstrategia sekä tiivistämiseen käytettävät aineet ovat kohteeseen soveltuvat.

Sakatin kaivoksen tiivistyksen toteutettavuuden kannalta on oleellista tuntea riittävällä tarkkuudella esiintymän alueella sijaitsevat vettä johtavat rakenteet, jotta niille voidaan määrittää alustava tiivistysvaatimus, päättää tiivistysstrategia ja laatia osa-aluekohtaiset tiivistyssuunnitelmat. Tiivistyssuunnitelman toteutettavuus varmistetaan ennen injektointia tehtävillä tunnustelukairauksilla. Tunnustelukairausten ja kairanrei'istä tehtävien vesimenekkikokeiden perusteella tehdään päätös missä ja miten tiivistys tullaan toteuttamaan. Tunnustelukairauksilla voidaan varmistaa, että kohteelle ennakkoon asetettu tiivistysvaatimus on riittävä. Tarvittaessa tiivistysvaatimusta voidaan joko kasvattaa tai pienentää kallion todellisen laadun ja vedenjohtavuuden perusteella. Kun injektointivaiheen jälkeen louhintaa jatketaan eteenpäin, louhinta injektoidun alueen läpi on

toteutettava huolellisesti, jotta injektoitualue ei vaurioituisi. Mahdolliset vauriot voidaan korjata käyttäen jälki-injektointia.

Sakatin maanalaisessa kaivoksessa käytettävien injektointiaineiden soveltuvuutta ja toimivuutta tullaan testaamaan ennen niiden käyttöä. Valittujen injektointiaineiden ominaisuuksia kuten koostumusta ja toimivuutta tullaan testaamaan toiminnan aikana säännöllisin väliajoin. Injektointityön aikana pidetään pöytäkirjaa esimerkiksi porauspaineesta, käytettyjen injektointiaineiden määrästä ja injektoinnin kovettumisajoista.

Tiivistyksen onnistumista sekä laaduntarkkailuun liittyy keskeisenä osana kaivostiloihin tulevan veden seuranta. Tiivistettävien kohteiden alueella tarkkaillaan tunneliin tulevaa vesimäärää, kunnes kalliotilan tiivistys ja tuenta on saatu valmiiksi. Mikäli esi-injektoidulla alueella havaitaan vesivuotoja, voidaan näitä kohteita tiivistää jälki-injektoimalla. Myös kaivoksen toiminnan aikana seurataan maanalaisesta kaivoksesta poistettavaa vesimäärää. Kaikki kaivokseen kertyvät vedet kerätään ja ohjataan ojituksilla, kallioreikiä ja putkilinjoja pitkin maanalaisen kaivoksen pääpumppaamoille, joilta vesi ohjataan maanpinnalle kaivoksen vesikiertoon. Pääpumppaamoilla on jatkuvatoimiset virtausmittarit, joilla seurataan pumppaamoilta lähtevää vesimäärää.

Suomessa injektointia on käytetty kalliotilojen tiivistämiseen useita kymmeniä vuosia erityisesti yhdyskuntarakentamisessa. Sitä käytetään kallioon rakennettavien pysyvien ja pitkäikäisten tunneleiden ja maanalle rakennettavien kalliotilojen tiivistämiseen. Viimeaikaisin kohteita, joissa on käytetty injektointia ovat Länsimetro ja ydinjätteen loppusijoituspaikka Onkalo, josta on olemassa paljon tutkimustietoa. Lisäksi Pohjoismaissa injektointia on käytetty tunneliporalla rakennetuissa tunneleissa esimerkiksi Nygårdin tunneliprojektissa Ruotsissa ja Ulriken tunneliprojektissa Norjassa. Kaivosteollisuudessa kalliotilojen injektointia käytetään yhdyskuntarakentamiseen nähden vähemmän ja tiivistystä käytetäänkin kohteissa, joissa on erityisvaatimuksia kuten erittäin huono kallion laatu, kohde sijaitsee vesistön alapuolella tai suojelualueen välittömässä läheisyydessä. Tällaisista kohteista esimerkkinä on Anglo Americanin rakenteilla oleva Woodsmith:in kaivos Englannissa, jossa injektointia käytetään kaivoksen rakentamisessa.

Hankesuunnittelun aikana AASM on hakenut kalliotilojen tiivistykseen oppia mm. Posivan Onkalosta. Onkalon rakentamisessa on käytetty erilaisia tiivistysmenetelmiä, joiden myötä on saavutettu huomattavan kuivat olosuhteet maanalle louhittuihin tiloihin. Onkalo onkin hyvä osoitus siitä, että kalliotilojen tiivistämisellä pystytään rajoittamaan vedentuloa maanalaisiin tiloihin. Onnistuneen tiiveystason edellytyksenä on hyvä suunnittelu, käytettävien injektointiaineiden ja työtapojen testaus, huolellinen työskentely sekä laadunvarmistus.

On kuitenkin tärkeä muistaa, että esi-injektoinnilla ei voida saavuttaa täysin vesitiiviitä rakenteita. Esi-injektoinnin tarkoituksena on pienentää kallion vedenjohtavuutta sekä vähentää kalliotiloihin tulevaa veden määrää. Esi-injektoinnin lopputulemaa on hankala arvioida tarkkaan, mutta sen avulla on kuitenkin mahdollista vähentää kalliotiloihin tulevaa vesimäärää muutamiin prosentteihin alkuperäisestä. (Melbye ym. 2003)

Korkean tiivistysvaatimuksen kohteissa käytetään kehittyneitä teknikoita kuten mikrosementti ja kemialliset injektointiaineita sekä jälki-injektointia minimoimaan jäljelle jääviä vuotovesimääriä. Viimeisten 10–15 % vuotojen injektointi on yleensä kalliimpaa suhteessa ensimmäisten 80–85 % vuotovesien injektointiin. Käytettäessä mikrosementtiä injektointiaineena voidaan kallion vedenjohtavuus arvoksi saada keskimäärin $1x10^{-7}$ m/s. Teoreettisesti kemiallisilla injektointiaineilla on päästy vedenjohtavuuksiin $1x10^{-8}$ – $1x10^{-9}$ m/s, mutta on hyvin aikaan vievää sekä kallista. (Melbye ym. 2003)

4. KALLION TUENTAAN KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT

Maan alle louhittavia kalliotiloja joudutaan usein tukemaan, jotta louhitun tilan pysyvyys voidaan varmistaa ja luoda turvallinen ympäristö alueella liikkumista ja työskentelyä varten sekä minimoida ympäristöön kohdistuvia haitallisia vaikutuksia kuten maanpinnan vajoamista. Kalliotuennassa on kyse ympäröivän kalliomassan vahvistamisesta esimerkiksi kalliopulteilla raudoittamalla tai tukemalla kalliotilan pintaa ruiskubetonoinnilla. Tuentavaatimus ja käytettävät tuentamenetelmät ovat riippuvaisia louhitun tilan tuentatarpeesta. Esimerkiksi pysyvät tilat, kuten vinotunnelit, varasto- ja korjaamotilat, ovat käytössä koko kaivoksen elinkaaren ajan ja sen vuoksi näissä kohteissa tuentakäytännöt ovat samankaltaiset kuin kalliorakentamisessa.

Syvissä maanalaisissa metallikaivoksissa kallion rikkoutumista tunneleiden tai louhostilojen ympärillä ei voida estää johtuen suurista kalliojännityksistä. Tuolloin tavoitteena on purkaa jännityksiä vähitellen ja kalliotuennalla särkyneestä kalliosta saadaan myötäävä liittorakenne, joka pysyy paikallaan ja ottaa riittävästi kuormaa vastaan. Maanalaisessa kaivostoiminnassa käytetään kaivostäyttöä kalliota tukevana rakenteena. Useimmissa kaivoksissa tyhjien louhostilojen täyttäminen kaivostäytöllä on louhinnan ja ympäristöolosuhteiden kannalta

oleellinen tekijä, jotta voidaan ehkäistä kallioräiskeiden muodostumista, maanpinnan vajoamista ja sortumia. (Paalumäki ym. 2015).

Sakatin kaivoksessa kalliotuennan ensisijainen tarkoitus on vahvistaa ja tukea kalliorakenteita, jotta esiintymän louhinta voidaan toteuttaa turvallisesti niin ihmisten, ympäristön kuin tuotannon näkökulmasta. Tuennalla ja erityisesti tyhjien louhostilojen täytöllä voidaan ehkäistä uusien rakojen ja ruhjeiden syntymistä ja niissä mahdollisesti kulkevan pohjaveden pääsyä maanalaiseen kaivokseen. Seuraavissa luvuissa on käsitelty tarkemmin kalliotuentamenetelmiä. Koska kaivostäyttö on Sakatin kaivoksessa yksi merkittävimmistä kalliontukemisrakenteista, käsitellään se muita tuentamenetelmiä tarkemmin. Alustava suunnitelma täyttömenetelmien käytöstä Sakatin kaivoksessa on kuvattu luvussa 0.

4.1 Kaivostäyttö

Maanalaisessa louhinnassa muodostuvat tyhjät louhostilat, tunneliperät ja muut tyhjät tilat pyritään yleensä täyttämään kaivostoiminnassa syntyvällä hyödyntämättömällä materiaalilla. Kaivostäyttöihin käytettävät materiaalit valitaan tapauskohtaisesti. Riippuen louhintamenetelmästä ja muista tekijöistä, täytöissä käytettävä materiaali voi vaihdella hyvin hienojakeisesta materiaalista (mm. rikastushiekka) aina karkeaan louheeseen asti. (Paalumäki ym. 2015)

Suomessa käytössä olevia kaivostäyttömenetelmiä ovat sivukivitäyttö, kovettuva sivukivitäyttö, hydraulinen täyttö ja pastatäyttö sekä näiden yhdistelmiä. Näiden lisäksi maailmalla on käytössä myös pasta-kivimursketäyttöä. Seuraavissa kohdissa on esitetty edellä mainitut kaivostäyttömenetelmät yleisellä tasolla.

4.1.1 Sivukivitäyttö

Sivukivitäyttö on perinteikäs ja Suomessakin yleisesti käytetty kaivostäyttömenetelmä. Sivukivitäytössä täyttömateriaalina hyödynnetään karkeaa kiviaineista, jota saadaan esimerkiksi kaivoksen valmistelevista töistä sekä maanpäällisisitä avolouhoksista. Sivukiveä voidaan hyödyntää louheena tai murskata pienempään palakokoon. Sivukiven koko on riippuvainen täytteen kuljetustavasta esim. hihnakuljettimien suurin raekoko on noin 300 mm kun taas lastauskoneilla voidaan kuljettaa louhetta ilman raekoon ylärajaa. (Paalumäki ym. 2015)

Sivukivitäyttöä käytetään yleensä kohteissa, joissa rikastamon rikastushiekka ei riitä tai sitä ei ole saatavilla, sekä kohteissa, joissa lujuusvaatimukset ovat korkeat (Paalumäki ym. 2015). Sivukivitäyttö on täyttömenetelmistä kustannuksiltaan edullisin. Ilman sidosainetta sivukivitäyttöä voidaan käyttää passiivisena tukena esimerkiksi toisen vaiheen louhoksissa (Paalumäki ym. 2015). Näin ollen täytön ja louhosten väliin joudutaan jättämään pilari ennen louhintaa tai kyseinen louhos on louhintajärjestyksessä viimeiseksi jätetty louhos. Hyödyntämällä sivukiviä kaivostäytössä pystytään pienentämään maanpäälle rakennettavien sivukivien sijoitusalueiden kokoa ja jopa poistamaan ne kokonaan kaivostoiminnan päätyttyä.

4.1.2 Kovettuva sivukivitäyttö

Sivukivitäytössä voidaan käyttää myös sideainetta, jolloin täytteestä käytetään nimitystä kovettua sivukivitäyttö. Kun sivukivitäytössä käytetään sideainetta, täytteellä saavutetaan korkeampi lujuusarvo kuin pelkällä sivukivitäytöllä (Paalumäki ym. 2015). Kovettuvaa sivukivitäyttöä voidaan käyttää ensimmäisen vaiheen louhosten täyttämiseen, koska pitää sideaineen vuoksi muotonsa ja lujuusominaisuuksien puolesta mahdollistaa viereisen louhoksen louhinnan. Sideaineen käytön vuoksi kovettuva sivukivitäyttö on menetelmänä kalliimpi kuin tavanomainen sivukivitäyttö. Kovettuvaa sivukivitäyttöä hyödynnetään yleisesti kaivoksilla, kun kaivostäytöltä vaaditaan korkeaa lujuutta. Mikäli kaivostäytöltä vaaditaan jatkuvasti korkeaa lujuutta, voi olla kannattavampaa hyödyntää kovettuvan kaivostäytön sijaan muita kovettuvia kaivostäyttöjä kuten hydraulista täyttöä, pastatäyttöä tai pasta-kivimursketäyttöä.

Valmistettaessa kovettuvaa sivukivitäytettä sideaine voidaan ohjata louhokseen samanaikaisesti sivukivitäytteen kanssa tai sekoittaa sivukivitäytteeseen ennen louhokseen johtamista. Joskus sideaine voidaan johtaa louhokseen vasta sen jälkeen, kun sivukivitäyttö on tehty. Tuolloin sivukiven raekokojakauman on oltava sellainen, että sideaine pystyy tunkeutumaan louheen tai murskeen väliin. (Paalumäki ym. 2015) Kovettuvan sivukivitäytön koostumusta sideaineen eri pitoisuuksilla on havainnollistettu Kuva 11.



Kuva 11. Kovettuvan sivukivitäytön kenttäkoe Dundee Precious Metals Cleopechin kaivoksella Bulgariassa. Kokeessa on tutkittu kovettuvaa sivukivitäyttöä eri sideainepitoisuuksilla. Kuvassa (a) valmistetun kovettuvan sivukivinäytteen ympäriltä on irrotettu muotti. Kuvassa (b) on havaittavissa eri sideainepitoisuuden vaikutus kovettuvan sivukivitäytön koostumukseen. (Liston, 2014)

4.1.3 Hydraulinen täyttö

Hydraulinen täyttö on maailmalla eniten käytetty kaivostäyttömenetelmä. Suomessa hydraulista täyttöä käyttää Pyhäsalmen kaivos. Hydraulinen täyte on lietettä, jonka kiintoainepitoisuus vaihtelee välillä 35-75 %, pääsääntöisesti pitoisuus on 60-70 % luokkaa. Hydraulinen täyte valmistetaan yleensä rikastushiekasta, mutta täytteen valmistukseen voidaan käyttää myös luonnonhiekkaa ja soraa. Hydraulinen täyte voidaan tarpeen vaatiessa kovettaa tai käyttää sellaisenaan. Mikäli täytteen halutaan kovettuvan, lisätään siihen sideainetta. Sideaineen lisäys kuitenkin huonontaa täytteen suotoarvoa eli heikentää veden poistumista täytteestä, mikä on otettava huomioon suunnittelussa. (Paalumäki ym. 2015)

Hydraulinen täyte johdetaan louhoksiin painovoimaisesti tai pumppaamalla. Täytteessä oleva vesi suotautuu täytteen läpi ja poistuu louhoksesta louhoksen alaosaan rakennettujen patojen ja suotoputkien kautta. Hydraulinen täyttömenetelmä vaatii aina suuria vesimääriä ja louhokseen sijoitetavan täytteen riittävä suotautuminen on kaikissa tilanteissa varmistettava. (Paalumäki ym. 2015). Kuva 12 havainnollistaa hydraulisen täytön lietemäisyyttä.

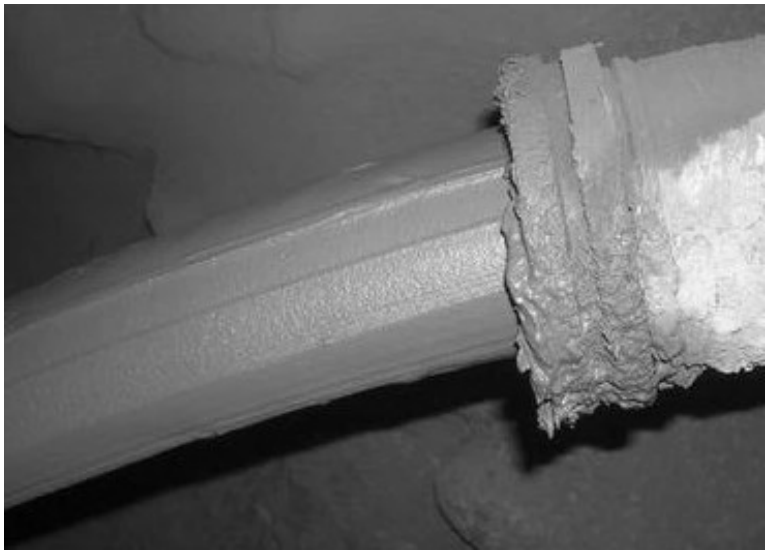


Kuva 12. Hydraulinen täyttö (Kuva: Paterson & Cooke United Kingdom Limited)

4.1.4 Pastatäyttö

Kaivostäytössä käytettävä pasta on tahnamainen kiviaineksen, sideaineen ja veden muodostama seos. Hydrauliseen täyttöön verrattuna, pastatäytön lietetiheys on suurempi, yleensä vaihdellen 75–78 %. Pastan valmistamiseen käytetään yleensä malmin rikastuksessa muodostuvaa rikastushiekkaa, johon sekoitetaan sideainetta kasvattamaan materiaalin lujuutta. (Paalumäki ym. 2015) Käytettävä sideainemäärä riippuu muun

muassa siitä, millainen lujuus sekä kovettumisaikaa täytöltä vaaditaan. Pastassa käytettävä sideainepitoisuus voi vaihdella välillä 2–10 % (Sivakugan ym. 2015). Maanalaisessa louhinnassa pastatäytössä käytetään aina sideainetta mahdollista nesteytymistä vastaan. Yleisimmin sideaineena käytetään sementtiä, mutta myös erilaiset sementtiseokset, joissa sementin lisäksi on lentotuhkaa tai/ja kuonaa, ovat yleistymässä. (Sivakugan ym. 2015).
Pastan vedenjohtavuusarvoja on tutkittu suhteellisen vähän verrattuna pastan muihin ominaisuuksiin. Pastatäytössä käytettävän sideaineen pitoisuuden ja koostumuksen vaikutusta pastatäytön vedenjohtavuuteen on käsitelty Fall ja muut (2009) tutkimuksessa. Tulokset osoittavat, että kasvattamalla sideaineen pitoisuutta saadaan nopeutettua pastatäytön kovettumista sekä samalla pienennettyä pastatäytön vedenjohtavuutta. Sideaineen vaikutusta pastatäytön kovettumiseen ja vedenjohtavuuteen on tutkittu aiemmassa Godbout ja muut (2007) tekemässä tutkimuksessa. Tutkimuksen mukaan pastatäytön vedenjohtavuusarvo vaihtelee välillä $1x10^{-5}$ – $1x10^{-6}$ cm/s sideainepitoisuuksilla 1-4,5 % (Portlandin sementti + kuona).
Toisin kuin hydraulisessa täytössä, pastatäytössä ylimääräinen vesi ei aiheuta ongelmaa. Pastatäytössä vesi ei erotu kiintoaineesta, vaan se sitoutuu täyttömateriaaliin. Pastatäytön etuna on nopeampi louhintasykli, koska riittävä tuenta saavutetaan lyhyemmässä ajassa, ylimääräinen vesi ei aiheuta ongelmia ja rikastushiekka voidaan loppusijoittaa maan alle, jolloin maanpäällisten rikastushiekka-alueiden jalanjälki pienenee. (Sivakugan ym. 2015) Kuva 13 on havaittavissa pastan tahnamainen koostumus.



Kuva 13. Rikastushiekasta valmistettu pasta, joka putkilinjaa pitkin ohjataan täytettävään louhokseen (Sivakugan ym. 2015)

Pastatäyttö on suhteellisen uusi louhosten täyttömenetelmän verrattuna muihin maanalaisissa kaivoksissa käytettyihin menetelmiin. Suomessa pastatäyttöä hyödyntää Agnico Eagle Finland Oy:n Kittilän kaivoksella ja Ruotsissa Bolidenin Garpenbergin kaivos.

4.1.5 Pasta-kivimursketäyttö

Pasta-kivimursketäyttö (eng. Paste aggregate fill) on pastatäytön variaatio, jossa pastan sekaan lisätään valmistusprosessin lopussa murskattua kiviainesta kuten louhinnassa muodostuvaa sivukiveä. Tämän seurauksena pastasta ja kivimurskeesta saadaan valmistettua hyvin homogeeninen massa, joka voidaan johtaa pastan tapaan pumppaamalla täytettävänä olevaan louhokseen. Louhokseen pumpattu massa pysyy homogeenisena eikä se lähde erottumaan. Massa kovettuu nopeasti pienen vesipitoisuuden johdosta ja säilyttää kauttaaltaan tasaisen lujuuden, mikä mahdollistaa louhinnan jatkamisen täytetyn louhoksen läheisyydessä. (Wilson ym. 2011) Kuva 14 on havainnollistettu laboratorio-olosuhteissa valmistetun pasta-kiviainesmurskeen koostumusta.



Kuva 14. Havainnekuva pasta-kivimursketäyttömateriaalista laboratorio-olosuhteissa (Kuva: Paterson & Cooke United Kingdom Limited)

Pastan ja kivimurskeen seoksella voidaan saavuttaa pastatäyttö korkeammat lujuusominaisuudet. Tämän johdosta pasta-kivimursketäyttöä voidaan käyttää vaativimmissa täyttökohteissa, joihin pastatäyttö ei ole lujuusominaisuuksiltaan riittävä. Käyttämällä kivimursketta voidaan vähentää pastassa käytettävän sideaineen osuutta, jonka seurauksena pystytään vähentämään sideaineen käytöstä aiheutuvia kustannuksia. (Wilson ym. 2011) Pasta-kivimursketäytöllä voidaan vähentää kaivostoiminnasta aiheutuvia ympäristövaikutuksia, koska siinä pystyään hyödyntämään sekä rikastushiekkaa että sivukiveä. Pasta-kivimursketäyttö on käytössä esimerkiksi kanadalaisella Kidd Creekin kaivoksella. (Wilson ym. 2011)

4.2 Alustava suunnitelma kaivostäytön käytöstä Sakatin kaivoksessa

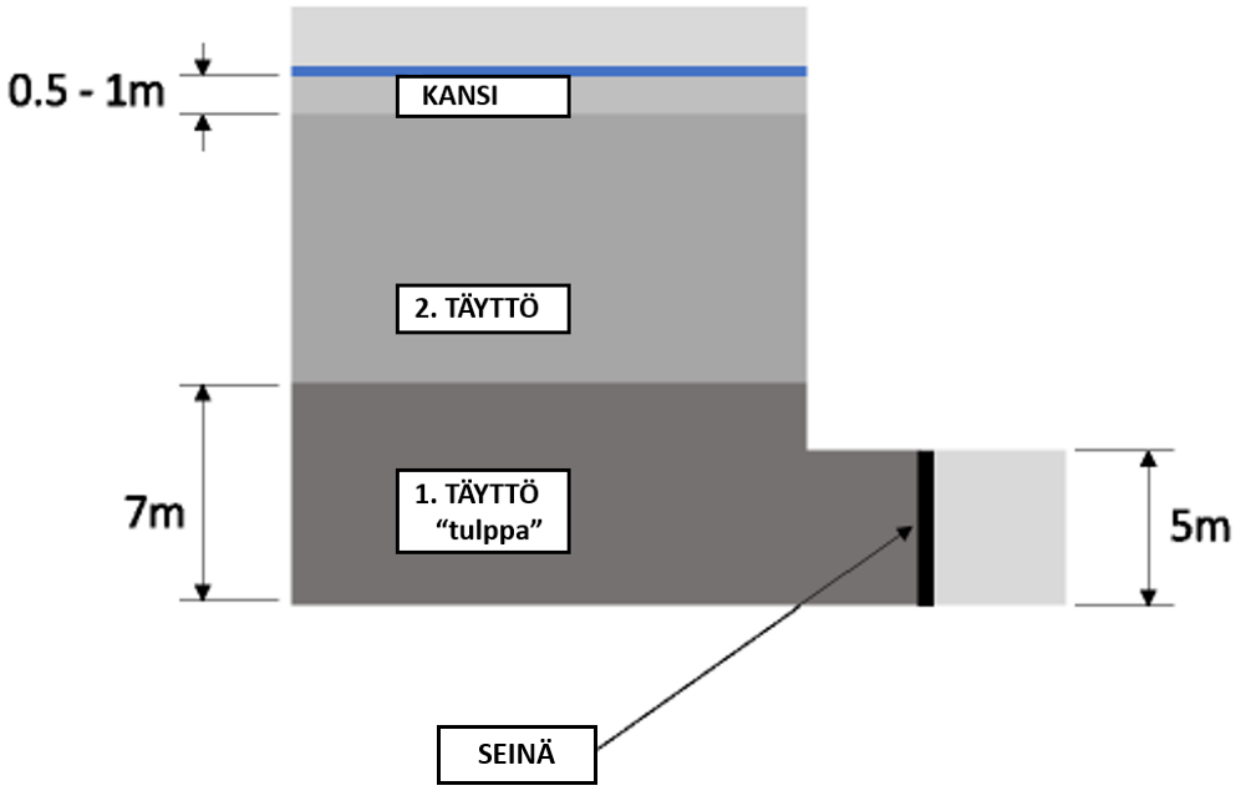
Sakatin kaivoksessa tyhjät louhokset on suunniteltu täytettävän pääasiassa kovettuvalla kaivostäytöllä joko pasta-kivimurske- tai pastatäytöllä. Avoimet louhostilat pyritään täyttämään mahdollisimman nopeasti heti sen jälkeen, kun louhos on saatu lastattua tyhjäksi, jotta kallioperässä ei ennättäisi tapahtua avonaisesta tilasta johtuvia merkittäviä muodonmuutoksia. Mikäli pastan valmistuksessa on katkos, kuten pastalaitoksen huoltoseisakki, tyhjät louhokset täytetään kovettuvalla sivukivitäytöllä. Tämänhetkisessä kaivossuunnitelmassa louhoksia ei ole suunniteltu täytettävän pelkällä sivukivellä. Sivukivitäyttöä voidaan kuitenkin satunnaisesti käyttää esimerkiksi toisen vaiheen louhoksissa, mikäli täyttökohteessa ei esiinny merkittäviä vesivuotoja.

Sakatin kaivoksessa louhosten täyttäminen ja käytettävät täyttömenetelmä perustuvat kaivos- ja louhintasuunnitelmaan. Nämä suunnitelmat määrittelevät missä järjestyksessä ja millä aikataululla louhoksia louhitaan ja sen mukaan määrittyy louhosten täyttöaikataulu ja -järjestys sekä millaiset ominaisuudet täyttömateriaalilta vaaditaan. Keskeisimpänä tekijänä louhostäytön valintaan vaikuttaa täytöltä vaadittava lujuus, miten nopeasti haluttu lujuus tulee saavuttaa sekä täytön kovettumisaika.

Louhostäytön lujuusvaatimus on riippuvainen louhittavasta kohteesta. Sakatin kaivoksessa louhinta etenee pääasiassa alhaalta ylöspäin, eli ensin louhitaan louhintatason alimmat louhokset, jotka täytetään pasta-kivimurske- tai pastatäytöllä, minkä jälkeen siirrytään louhimaan täytettyjen louhosten yläpuolelle. Kun louhinnan eteneminen tapahtuu alhaalta ylöspäin, vaaditaan louhostäytöltä suurta lujuutta, jotta työskentely täytetyn louhoksen päällä on mahdollista. Kun louhitaan pilareita, louhostäytön lujuusvaatimus pilarin viereisissä louhoksissa on suurempi kuin mitä tavanomaisesti louhosten täytössä vaaditaan. Erityisesti tämä korostuu, kun louhitaan louhinta-alueen alapuolisia vaakapilareita (eng. Sill pilar). Vaakapilarin louhinta tapahtuu vasta sen jälkeen, kun kaikki louhokset pilarin yläpuolelta on louhittu ja täytetty. Louhokset, jotka ovat suoraan vaakapilarin yläpuolella, tulee täyttää suuren lujuuden omaavalla louhostäytöllä, jotta vaakapilarin louhintaa varten voidaan taata turvalliset työskentelyolosuhteet. Louhokset, joissa täytöltä vaaditaan korkeampaa lujuusominaisuutta, on tämänhetkisen suunnitelman mukaan tarkoitus täyttää pasta-kivimursketäytöllä ennemmin kuin pastatäytöllä. Nämä louhokset on merkitty kaivossuunnitelmaan, jotta niiden täyttövaatimukset tulee huomioiduksi tuotannon aikana.

4.2.1 Pastatäyttö

Sakatin kaivoksessa pastan valmistamiseen käytetään molempia toiminnassa muodostuvia rikastushiekkajakeita, matala- ja korkearikkistä rikastushiekkaa. Pasta valmistetaan pastalaitoksella, joka tulee sijoittumaan joko maanpäälle tai maanalaiseen kaivokseen. Suodatusprosessin jälkeen matalarikkinen rikastushiekka kuljetetaan pastalaitokselle hihnakuljettimella. Korkearikkinen rikastushiekka puolestaan pumpataan laitokselle lietteenä. Pastalaitoksella rikastushiekkaan sekoitetaan sideainetta, jonka pitoisuus riippuu mm. louhostäytön lujuusvaatimuksesta ja louhintajärjestyksestä. Sakatin hankesuunnittelun yhteydessä on aloitettu pastatutkimukset ominaisuuksien ja soveltuvuuden selvittämiseksi. Tähän mennessä kokeellisia tutkimuksia on tehty pastalle, joka on muodostettu korkea- ja matalarikkisen rikastushiekan seoksesta ja jossa sideaineen on käytetty sementin ja kuonan seosta (50:50). Tutkimuksissa on testattu eri sideainepitoisuuksia ja selvitetty pastan kovettumisaikoja sekä kovettuneen pastan lujuusominaisuuksia. (Patterson & Cooke United Kingdom Limited. 2018)
Valmistettu pasta johdetaan pastalaitokselta putkilinjastoa pitkin täytettävään louhokseen. Alustavan suunnitelman mukaan louhoksen täyttö tapahtuu kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tehdään ns. tulppa louhoksen pohjalle. Louhos täytetään noin 2 metriä louhoksen alaosaan rakennettavan seinämän yläpuolelle, minkä jälkeen täytön annetaan kovettua. Kun ensimmäisen vaiheen täyttö on saavuttanut riittävän kovuuden, loppuosa louhoksesta täytetään ja täytön annetaan jälleen kovettua. Louhostäytön tulee kovettua riittävästi ennen kuin louhoksen läheisyydessä voidaan louhintoja jatkaa. Mikäli täytetyn louhoksen päällä tullaan liikkumaan työkoneilla, louhostäytön päälle voidaan valaa vielä kansi riittävän lujuusominaisuuksien saavuttamiseksi. Mikäli täyttömateriaalilla on saavutettu jo riittävä lujuus, kannen valu ei ole välttämätön. Pastalla täytetyn louhoksen rakennetta ja täyttöperiaatetta on havainnollistettu Kuva 15. (Paterson & Cooke United Kingdom Limited. 2018)



Kuva 15. Havainnekuva pastalla täytetyn louhoksen tyypillisestä rakenteesta (Paterson & Cooke United Kingdom Limited. 2018)

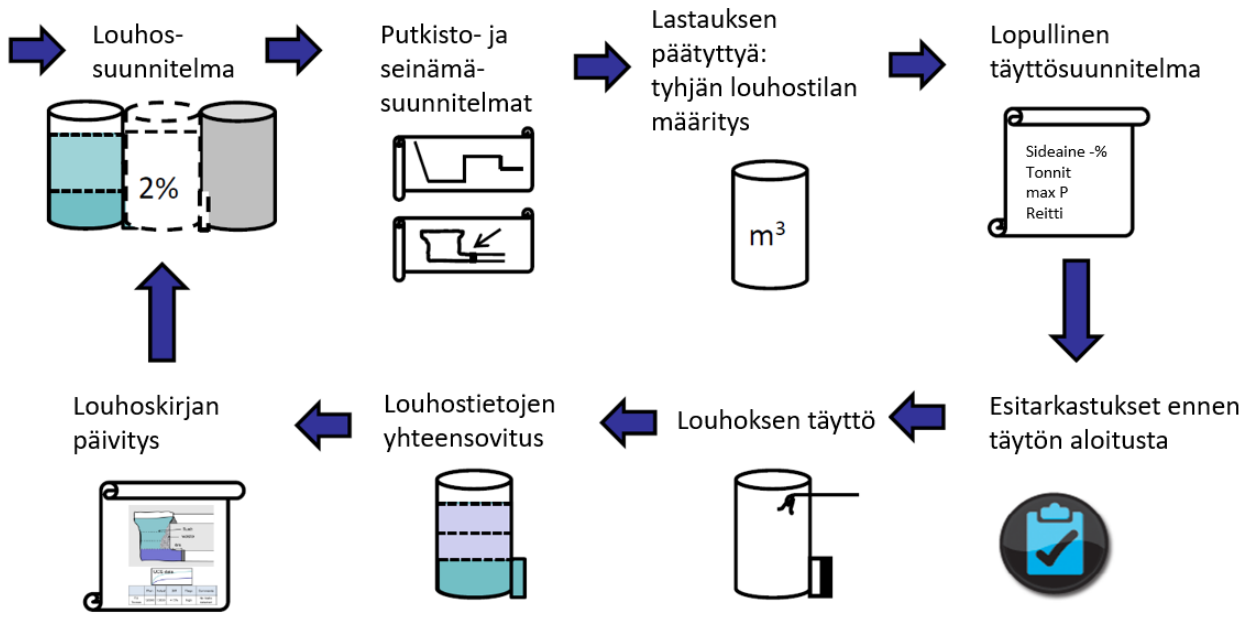
4.2.2 Pasta-kivimursketäyttö (eng. Paste aggregate fill)

Pasta-kivimursketäytössä hyödynnetään kaivoksen louhinnassa muodostuvaa sivukiveä, joka murskataan ja sekoitetaan pastan joukkoon pastalaitoksella. Pasta-kivimursketäyttöön käytetään ensisijaisesti mahdollisesti happoa tuottavia sivukiviä. Sekoittamalla mahdollisesti happoa tuottavia sivukiviä pastan sekaan saadaan pienennettyä kiven reaktiivista pinta-alaa ja siten hidastettua sulfidien hapettumisreaktiota ja metallien liukenemista. Hyödyntämällä louhinnassa muodostuvat sivukivet pasta-kivimursketäyttöön, maanpäälle ei ole tarvetta rakentaa pysyviä sivukiven sijoitusalueita. Alustavan suunnitelman mukaan pasta-kivimursketäytössä käytettään rikastushiekkaa ja sivukiveä sekoitussuhteella 70:30, mutta sivukiven osuus voi olla pienempikin.

Tyhjän louhostilan täyttö pasta-kivimurskeella toteutetaan noudatellen samoja periaatteita kuin edellä kuvatussa louhoksen pastatäytössä (luku 4.2.1). Putkistot ja pumput tullaan mitoittamaan siten, että ne soveltuvat sekä pastan että pasta-kivimurskeen pumppaukseen ja johtamiseen.

4.2.3 Menetelmien toteutettavuus ja laadunvarmistus

Louhostäytön suunnittelu ja louhosten täyttäminen ovat kiinteä osa maanalaisen kaivoksen louhintasykliä. Louhoksen täyttöprosessin vaiheita on havainnollistettu Kuva 16. Louhosten täyttäminen tapahtuu aina erillisen suunnitelman mukaan, joka laaditaan kullekin louhokselle erikseen ennen louhinnan aloittamista. Suunnitteluvaiheessa valitaan louhoksen täyttömenetelmä ja määrittelemään täytöltä vaaditut ominaisuudet, kuten lujuus ja kovettumisaika. Täyttömateriaalin valmistusreseptiä voidaan vielä muuttaa, mikäli louhoksen louhinnan yhteydessä havaitaan esimerkiksi kosteus- tai kallio-olosuhteissa tapahtuneen sellaisia muutoksia, jotka voivat vaikuttaa suunnitellun louhostäytön onnistumiseen. Jokaisesta louhoksesta laaditaan louhoskirja, jonne kerätään kaikki sen louhintaan liittyvät havainnot ja tiedot aina porauksesta louhostäyttöön saakka. Kun louhos on saatu täytettyä, louhinta- ja täyttövaiheen aikana kerätyt tiedot käsitellään ja käydään läpi tekijät, jotka on otettava huomioon seuraavien louhosten louhinnassa. Louhoskirjat arkistoidaan, jotta niihin on mahdollista myöhemmin palata.



Kuva 16. Keskeiset vaiheet louhoksen täytön suunnittelussa ja toteutuksessa (Kuva: Paterson & Cooke United Kingdom Limited)

Louhostäytön laadunvarmistamiseksi laaditaan tarkkailuohjelma, joka käsittää täyttömateriaalin valmistusvaiheen, louhoksen täyttövaiheen sekä jälkiseurannan täyttövaiheen päätyttyä. Pastan sekä pasta-kivimurskeen valmistuksen aikainen laaduntarkkailu on osa pastalaitoksen normaalia operatiivista toimintaa. Pastalaitoksella seurataan esimerkiksi pastan valmistukseen tulevien syötteiden partikkelikokoa, kiintoainepitoisuutta sekä virtaamaa. Valmistetun pastan ominaisuutta tutkitaan säännöllisin väliajoin esimerkiksi tekemällä painumamittauksia. Lisäksi täytettävään louhokseen syötettävästä pastasta otetaan näytteitä, joista laboratoriokokeilla varmistetaan louhokseen syötetyn pastan lujuus sekä kovettumisaika. Myös pastan valmistukseen käytetyn sideaineen sekä veden laatua tarkkaillaan.

Louhoksen täyttövaihetta valvotaan sekä maanalaisessa kaivoksessa että pastalaitoksella. Täytön aikana maanalla seurataan rakenteiden, kuten louhoksen alaosaan rakennetun seinän pysyvyyttä, mahdollisten vuotojen ilmaantumista sekä louhoksen täytön etenemistä. Pastalaitoksella seurataan louhokseen johdettavan pasta- ja pasta-kivimurskeen määrää, jotta täyttö osataan lopettaa oikea-aikaisesti. Seuraamalla menekkiä voidaan havaita mahdolliset pasta- ja pasta-kivimurskeen vuodot täytettävästä louhoksesta. Putkistopaineita seuraamalla voidaan havaita mahdolliset putkiston tukkeutumat ja putkirikot. Mikäli on epäilys, että louhostäyttö ei vastaa sille asetettuja vaatimuksia, kovettunutta täyttöä voidaan tutkia kairaamalla.

Lisäksi kaivoksessa tehdään kalliomekaanista seurantaa, joita ovat esimerkiksi siirtymä-, kuormitus- ja jännitystilojen muutosten mittaukset sekä seismisten tapahtumien seuranta. Kalliomekaanisen seurannan avulla saadaan selville kalliotilojen liikkeet, kallion laatu sekä mahdollisesti tapahtuva maanpinnan vajoaminen.

4.3 Muut Sakatin kaivoksessa käytettävät kalliotilojen tuentamenetelmät

Sakatin kaivoksessa kalliotiloissa käytettävät muut tuentamenetelmät ja niiden laajuus suunnitellaan aina kohdekohtaisesti pohjautuen kallioperän kalliomekaanisiin ominaisuuksiin ja kalliotilan käyttötarkoitukseen. Pysyvien kohteiden tuentavaatimukset ovat huomattavasti tunneleiden vaatimuksia korkeammat. Lopullinen suunnitelma päivitetään rakennusvaiheessa tunnelissa tehtyjen havaintojen pohjalta, jolloin voidaan varmistua, että alueen tuenta on riittävä. Tuennassa voidaan käyttää seuraavia menetelmiä, joiden yleiskuvaukset on esitelty seuraavaksi.

4.3.1 Kalliopultit ja vaijeripultit

Kalliopultitus on yleisimmin käytetty kalliontuentamenetelmä. Pultituksella saadaan vahvistettua rikkonaista kalliota puristamalla murtumapinnat tiiviisti yhteen, jolloin saadaan lisättyä murtumapintojen välistä kitkaa. Kalliotuennassa käytettävät pultit jaetaan aktiivisiin ja passiivisiin kalliopultteihin. Aktiiviset pultit tukevat kalliota välittömästä asentamisen jälkeen, kun taas passiiviset pultit alkavat tukea kalliota vasta sen jälkeen, kun kallion muodonmuutokset alkavat kuormittamaan pulttia. Tavallisimmat pulttityypit ovat sementtijuotetut pysyvät passiiviset pultit, kärkiankkuroidut pysyvät passiiviset pultit sekä lyhytaikaset kitkapultit. Pultit voivat toimia ainoana tuentamenetelmällä tai niitä voidaan käyttää yhdessä ruiskubetonin, verkkojen tai kalliopantojen kanssa. (Paalumäki ym. 2015)

Suurempien kivimassojen tuentaan käytetään vaijeripultteja. Toimintaperiaate vaijeripulteilla on lähes sama kuin kalliopulteilla. Vaijeripultti soveltuu hyvin vaativiaan tuentaan korkean lujuutensa johdosta. Vaijeripultin lujuus on jopa kolminkertainen perinteiseen harjateräspulttiin verrattuna. (Paalumäki ym. 2015) Maanalaisessa louhinnassa vaijeripultteja käytettään usein pysyvien tilojen kuten vinotunnelin risteysalueiden, huolto-, varasto- ja prosessitilojen tuentaan. Vaijeripultteja voidaan tukea myös pilareita ja kalliota louhoksen ja lastausaukkojen ympärillä (Paalumäki ym. 2015).

4.3.2 Ruiskubetonointi

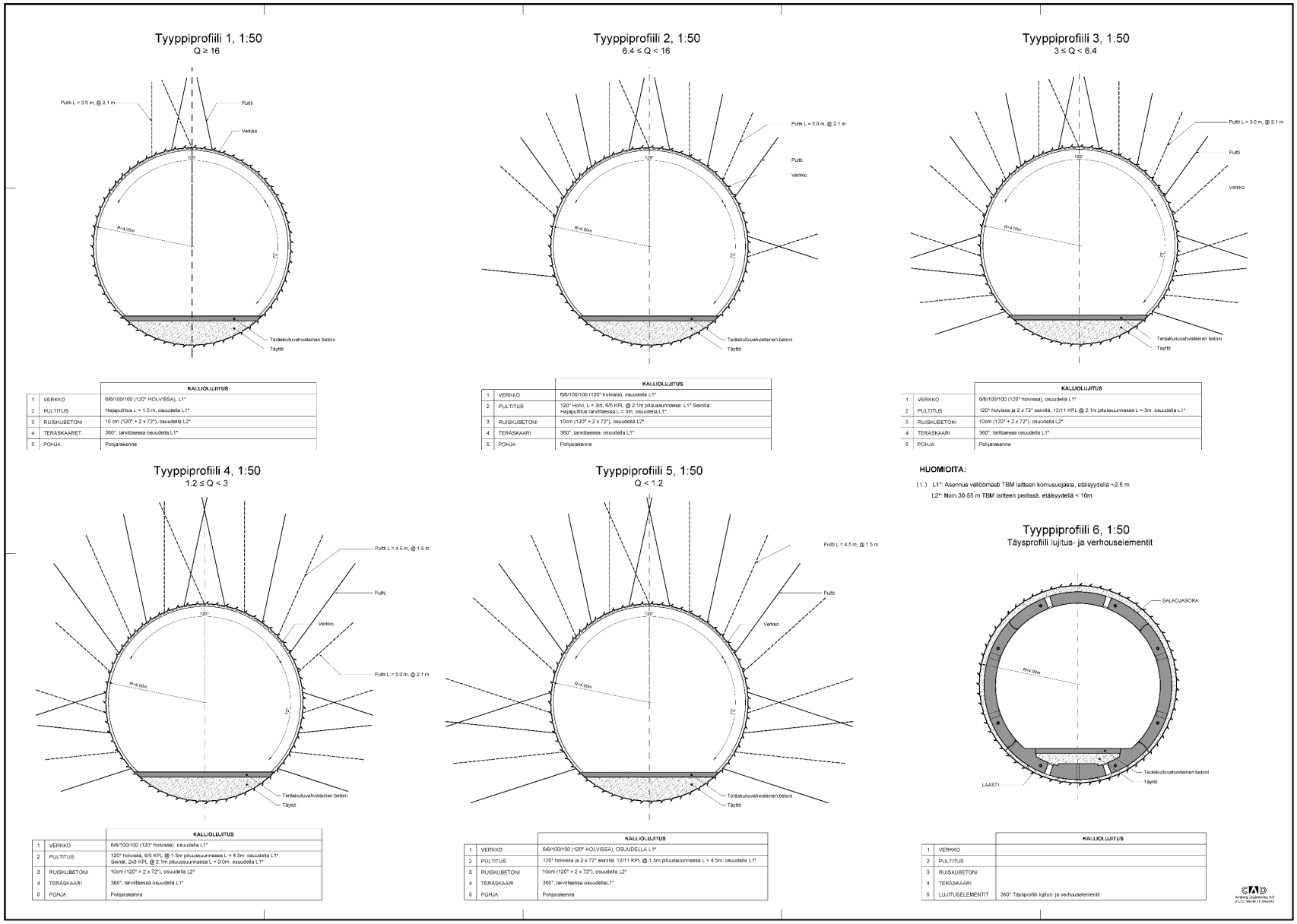
Ruiskubetonointi on menetelmä, jossa kalliotilan seinämille paineella suuttimen läpi ruiskutetaan betonia. Betoni muodostaa kallion pinnalle tiiviin massan tunkeutuen kallion pinnalla oleviin halkeamiin ja koloihin sekä tasoittaen pinnan epätasaisuuksia. Ruiskubetonointia käytetään vahvistamaan kallio- ja maaperään rakennettavia tiloja. (Väylä 2019) Kalliotuennan ohella ruiskubetonointi voi toimia jossakin määrin vesieristeenä. Ruiskubetonointia ei voida pitää täydellisenä eristeenä, mutta se hidastaa veden kulkeutumista. (Ritola ym. 2002) Halkeilutkin ruiskubetonirakenne toimii lujittavana elementtinä, mutta halkeamat mahdollistavat vuotovedelle parempia yhteyksiä ruiskubetonin läpi suoraan kalliotilaan. (Väylä, 2019)

Ruiskubetonointia voidaan vahvistaa lisäämällä siihen kuituja tai käyttämällä verkotusta parantamaan rakenteen sitkeyttä ja muodonmuutosominaisuuksia. Vahvistettua ruiskubetonointia hyödynnetään kohteissa, joissa kallion laatu on heikko ja kallio on sen vuoksi altis muodonmuutoksille ruiskubetonoinnin jälkeen. Ruiskubetonoinnissa käytettävät kuidut ovat yleensä teräskuituja, mutta myös muovikuituja on saatavilla. Huonolaatuisissa kallio-olosuhteissa käytetään raudoitusverkkoa, joka kestää suurempia kallion muodonmuutoksia kuin kuiduilla vahvistettu ruiskubetoni (Paalumäki ym. 2015).

4.3.3 Esivalmisteiset tuenta- ja verhouselementit

Kalliorakentamisessa tuennassa ja vuotovesien hallinnassa voidaan hyödyntää esivalmisteisia tuenta- ja verhouselementtejä. Elementeistä muodostuva segmenttikehä muodostaa tunnelin tuentana ja verhouksena toimivan elementtirakenteen. Tuenta- ja verhouselementtien (segmenttien) saumat voidaan tiivistää synteettisten tiivisteiden avulla. Lisäksi kallion pinnan ja segmenttien välinen rako tiivistetään injektoimalla. Tuenta- ja verhouselementtien taakse muodostuvaa kalliopohjaveden painetta rajoitetaan johtamalla vesi kontrolloidusti kaivoksen kuivatusjärjestelmään. Yleisesti menetelmä toimii yhdessä esi-injektoinnin kanssa, jolloin menetelmät täydentävät toisiaan. Teknisesti vuotovesien hallinta tiivistetyin segmenttielementein voidaan toteuttaa alle 10 barin pohjaveden paineissa, joka vastaa noin 100 m hydraulista nousukorkeuseroa.

Vuonna 2022 osana Sakatin kaivoshankkeen PFS-A-vaiheen suunnittelun täydennystä vinotunnelin lujituksesta on laadittu kallion laatuun perustuvat konseptuaaliset suunnitelma ns. tyyppikuvat vinotunnelien eri osa-alueille. Konseptuaalinen kuva lujituksen toteutuksesta on esitetty Kuva 17. Konseptuaalisessa suunnitelmassa vinotunneli tullaan toteuttamaan tunneliporauslaitteistolla ja tuenta toteutetaan kalliopulttien, teräskaarien, verkon, ruiskubetonin ja betonista valmistettujen tuenta- ja verhouselementtien avulla. Esivalmisteiset tuenta- ja verhouselementit asennetaan suoraan tunneliporauslaitteesta (kts. kuva 17, tyyppiprofiili 6).



Kuva 17. Tuenta- ja verhouselementtilujituksen tyyppisuunnitelma (Amberg Engineering 2022)

4. YHTEENVETO

Sakatin kaivoksessa tiivistys- ja tuentamenetelmien käytöllä vähennetään maanalaiseen kaivokseen tulevan vuotoveden määrää. Ensisijaisesti vedentuloa kaivokseen rajoitetaan tiivistämällä kalliotiloja käyttämällä esi- ja jälki-injektointimenetelmiä. Kaivosta ei tulla tiivistämään kauttaaltaan, vaan tiivistettävät alueet määritellään erikseen. Tämänhetkisten tutkimusten sekä kaivossuunnitelman perusteella injektointia tullaan käyttämään maanalaiseen kaivoksen sisäänkäynnin ja maanalaiseen kaivokseen vievän vinotunnelin alueella, sekä kohdissa, jossa tunneli joudutaan louhimaan kallioperässä olevien isompien vettä johtavien rakenteiden läpi.

Hankesuunnittelun edetessä tekniseen suunnitteluvaiheeseen (PFS-B) Sakatin kaivokselle laaditaan aluekohtaiset tiivistyssuunnitelmat ja valitaan käytettävät injektointiaineet. Tiivistämisen ohella vedentuloa kaivostiloihin voidaan vähentää tukemalla kalliotiloja. Sakatin kaivoksessa yksi merkittävimmistä kalliotuentamenetelmistä on tyhjien louhostilojen täyttäminen kovettuvalla pasta- tai pasta-kivimursketäytöllä. Tyhjiä louhoksia voidaan täyttää poikkeustilanteissa kovettuvalla sivukivitäytöllä tai pelkällä sivukivellä, jos esimerkiksi pastan valmistus on keskeytynyt.

Sakatin kaivoshankkeen YVA-selostusta koskevassa täydennyksessä tarkastellaan kahta pohjavesimallinnusskenaariota, joiden ympäristövaikutukset arvioidaan. Ympäristövaikutusten arvioinnin pohjalta Sakatin kaivokselle tullaan määrittelemään tarvittava tiivistystaso siten, että Viiankiaavan suoalueelle ei kohdistu sellaisia kuivatusvaikutuksia, jotka heikentäisivät merkittävästi niitä luontoarvoja, joiden Viiankiaapa on sisällytetty osaksi Natura 2000 -verkostoa.

LÄHTEET

Amberg Engineering. AA Sakatti TBM Study. Addendum TBM design to the PFSA TBM tunnelling development and alignment. 2022

Fall M, Adrien D, Célestin J.C, Pokharel M & Touré M. Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill. Mineral Engineering 22 (2009), 1307-1317. 11 s. 2009

Godbout J, Bussière B, Aubertin M & Belem T. Evolution of cemented paste backfill saturated hydraulic conductivity at early curing time. OttawaGeo2007, s 2230-2236. 7 s. 2007)

Liston D. Utilisation of cemented rockfill, cemented hydraulic fill and paste to successfully achive ore production expansion to 2 Mtpa at Chelopech Mine. Mine Fill 2014: Proceedings of the Eleventh International Symposium on Mining with Backfill, Australian Center for Geomechanics. Perth. 14 s. 2014

Melbye T, Hognestad H-O & Dimmock R. Pre-Injection technology for mines. 8th International Congress on Mine Water & the Environment, Johannesburg, South Africa. 2003

Paalumäki T, Lappalainen P & Hakapää A. Kaivos- ja louhintatekniikka. ISBN 978-952-13-5778-7. Kaivosteollisuus ja Opetushallitus. 2015

Paterson & Cooke United Kingdom Limited. Tailings and Backfill Prefeasibility Report. 85 s. SALASSAPIDETTÄVÄ. 2018

Sivakugan N, Veenstra R & Naguleswaran N. Ungerdround Mine Backfilling in Australia Using Paste fills and Hydraulic Fills. International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering. Article number 18. 2015
Väylävirasto. Väyläviraston ohjeita 28/2019. Kalliotunnelin kalliotekninen suunnitteluohje. 2019

SFS-EN 1997-1, EUROKOODI 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt, 2014

SRK Consulting. Sakatti PFS-A Geotechnical Assessment. 97 s. SALASSAPIDETTÄVÄ. 2018

SRK Consulting. Sakatti Cu-Ni-PGE project, pre-feasibility study, Mining engineering. SALASSPIDETTÄVÄ. 2019

Väylä. Väyläviraston ohjeita 28/2019. Kalliotunnelin kalliotekninen suunnitteluohje. VÄYLÄ/6845/06.04.01/2019. 103 s. 2019

Wilson S & Calverd J. Benefits of paste aggragate fill. Minefill 2011, International Conference on Mining with Backfill, The South African Institute of Mining and Metallurgy. 8 s. 2011

Ritola J & Vuopio J. VTT tiedotteita 2147. Kalliotilojen vesitiiviyden hallinta. 132 s. 2002.