

Sakatin maanalainen kaivos

Vuotovesien hallinta ja tuentasuunnitelma

Versio: 2

Päivämäärä: 16/01/2025



Sisällysluettelo

Määritelmät ja lyhenteet	4
1 Johdanto	5
2 Vuotovesien hallinta- ja tuentasuunnittelun ohjaus	5
3 Suunnitteluperusteet	7
3.1 Kalliotilojen asemointi ja dimensiot	8
3.2 Louhinnan vaiheistus	13
3.3 Kalliotilojen lujitus	15
3.4 Kaivostäyttö	18
3.5 Kalliotilojen vuotovesien hallinta	22
4 Suunnittelun lähtötiedot	31
4.1 Suunnittelualueet	31
4.2 Kallionäytekairaukset	33
4.3 Kalliotutkimukset	34
4.4 Mallit	36
5 Seurantaohjelmat	37
5.1 Kalliomekaaninen seurantaohjelma	37
5.2 Hydrogeologinen seurantaohjelma	38
6 Kalliotilojen lujitussuunnitelma	38
6.1 Vinotunnelin lujitus	38
6.2 Kaivostunneleiden lujitus	40
7 Kaivostäytön suunnitelma	42
8 Kalliotilojen tiivistyssuunnitelma	43
8.1 Vinotunnelin tiivistys	43
9 Lähdeluettelo	55
Liite 1: Lujituksen tyypissuunnitelmaesimerkki Vinotunneli	57
Liite 2: Tiivistyksen tyypissuunnitelma vinotunneli	58
Liite 3: Tiivistyksen tyypissuunnitelma kaivostilat	59

Versio	Pvm	Tekijä	Muutokset
2	16/01/2025	AA Sakatti Mining Oy, Hannes Lager, Christian Garvey and Yannis Vazaios ARUP, Johannes Gollegger Innocon, Michael DiGiovinazzo SRK Finland	Raportin nimi muutettu vuotovesien hallinta- ja tuentaraportiksi. Raportti päivitetty ja uudelleenstrukturoidu.
1.1	13/01/2023	AA Sakatti Mining Oy ja Mitta Engineering Oy	Raportti julkaistu YVA-selostuksen täydennyksen yhteydessä

Määritelmät ja lyhenteet

Lyhenne / Termi	Määritelmä
DFN	Discrete Fracture Network (eng.) Rakoverkkomalli (fin.) Menetelmä, jossa kallion rakoilua mallinnetaan muodostamalla yksittäisiä (diskreettejä) rakoja kuvaavia geometrisiä objekteja, esimerkiksi tasopintoja, kolmiulotteiseen kalliomassamalliin. Malliin voidaan liittää rakojen ominaisuustietoa sekä mallintaa niiden vuorovaikutuksia toistensa suhteen. Yleensä rakojen muodostamisessa käytetään erilaisia tilastollisia simointimalleja.
FEM	Finite Element Method (eng.) Elementtimenetelmät (fin.) Numeerisen analyysin menetelmä, jossa laskenta-alue jaetaan pieniin osaluokituksi eli elementteihin. Ratkaistavaa suuretta arvioidaan jollakin yksinkertaisella funktiolla.
FD	Finite Difference Method (eng.) Differenssimenetelmät (fin.) Numeerisen analyysin menetelmä, joissa ratkaistava yhtälö diskretoidaan ennalta määrättyihin pisteisiin ja yhtälön derivaatat korvataan sopivalla erotusosamäärällä.
Kuivatus	Kuivatuksella tarkoitetaan kalliotilaan muodostuvista vesivuodoista aiheutuvien vesien hallittua poisjohtamista esimerkiksi pumppaamalla.
Louhos	Maanalaisessa kaivostoiminnassa louhos on malmin louhintaa varten louhittu avoin tila.
Profiili	Tunnelin poikkileikkausta kuvaava geometria.
RG-luokitus	Rakennusgeologinen kallioluokitus
Taso	Louhintaa-alueen korkeusasema
Tiivistäminen	Tiivistämisellä tarkoitetaan toimenpiteitä, joilla ehkäistään vesivuotojen muodostumista kalliotilaan ja ehkäistään muutoksia pohjavesiolosuhteissa.
Transmissiviteetti	Vedenjohtokyky, joka kuvaa maa- tai kallioperän kerroksen kykyä kuljettaa vettä. Voidaan johtaa laskennallisesti kertomalla hydraulinen johtavuus kerroksen paksuudella.
Leakance muut- tuja	Numeerisen pohjavesimallin vuotosolmujen vedenjohtavuutta kuvaava muuttuja.
Q-luokitus	Alun perin Norjassa kehitetty kvantitatiivinen ja empiirinen kallion luokittelujärjestelmä. Q-luokituksessa kalliomassalle määritetään kallion laatua kuvaava Q-luku. Q-luvun pohjalta annetaan myös suositus kalliotilan tuennassa käytettävistä menetelmistä sekä mitoituksista. Q-luokituksen mukainen lujitusmenetelmä perustuu toteutuneisiin kohteisiin eli se on luonteeltaan empiirinen.

1 Johdanto

Anglo American -konserniin kuuluva AA Sakatti Mining Oy selvittää mahdollisuuksia Sodankylässä sijaitsevan Sakatin monimetalliesiintymän hyödyntämiseen. Sakatin esiintymä sijoittuu Natura 2000-verkostoon kuuluvalla ja soidensuojeluohjelmalla suojellun Viiankiaavan länsilaidalle. Sakatin esiintymä sijaitsee maanalla Natura-alueen alapuolella ja kaivoksen maanpäällinen tehdas-alue sijoittuu Natura-alueen ulkopuolella sijaitsevalle Kuusivaaran alueelle.

Sakatin pääesiintymä alkaa noin 250 metriä maanpinnantason alapuolelta jatkuen aina 1 200 metrin syvyyteen. Esiintymä on auki syvemmälle. Pääesiintymästä koilliseen on pienempi, lähempänä maanpintaa sijaitseva satelliittiesiintymä NE, jossa ylimmät louhokset sijoittuvat lähimmillään noin 80 metriä maanpinnasta.

Sakatin maanalainen kaivos tulee sijoittumaan suurelta osin Viiankiaavan suon alapuolelle, jonka vuoksi maanalaisiin kaivostiloihin tulevaa vedenmäärää on tarpeen rajoittaa louhintateknisin menetelmin työskentelyolosuhteiden turvaamiseksi sekä ympäristöjalanjäljen pienentämiseksi.

Tämän raportin tarkoituksena on avata Sakatin kaivoshankkeen suunnitteluperusteet vuotovesien hallinnalle ja tuennan suunnittelulle. Suunnitteluperusteiden tarkoituksena on koostaa suunnittelussa käytettävien menetelmien taustat, esittää teoreettinen tausta valituille suunnittelun lähtökohdille sekä esittää ajantasainen kuvaus suunnittelun lähtökohdista. Suunnitteluperusteita täsmennetään osana tulevia suunnitteluvaiheita. Raportissa esitetään yleistason kuvaus vuotovesien hallinnassa ja tuennan suunnittelussa käytettävästä lähtöaineistosta. Lisäksi esitetään yleistason suunnitelmat kallion tuennalle ja vuotovesien hallinnalle.

2 Vuotovesien hallinta- ja tuentasuunnittelun ohjaus

Sakatin maanalaisen kaivoksen vuotovesien hallinnan ja tuennan suunnittelua ohjaavat tilojen tilojen turvallinen käyttö, alueen geologiset ja geotekniset olosuhteet, ympäristönäkökohdat sekä mallinnuksien pohjalta lisääntynyt ymmärrys kalliomassan geoteknisestä käyttäytymisestä.

Sakatin maanalaisen kaivoksen alueen tiedetään olevan hydrogeologisilta ja kallioteknisiltä ominaisuuksiltaan vaihteleva, ja näin ollen maanalaisen kaivoksen alue on jaettu eri suunnitteluosa-alueisiin. Vettä johtavat rakenteet on huomioitu kaivossuunnittelussa, ja ne otetaan huomioon myös tulevassa kaivostoiminnassa. Koska kaikkia vettä johtavia rakenteita ei voida louhinnassa kokonaan välttää, kaivoksen toteutuksessa on varauduttu kalliotilojen tiivistämiseen.

Maanalaisten tilojen tuennalla varmistetaan louhinta-alueiden vakaus ja turvallisuus. Kaivoksen tuennalla tarkoitetaan louhoksia ympäröivän kalliomassan vahvistamista täytöllä. Tunneleiden kalliotuenta tarkoittaa tunneleita ympäröivän kalliomassan vahvistamista esimerkiksi kalliopul-teilla tai ruiskubetonilla. Tuennan tarve ja menetelmät määräytyvät louhittavan tilan käyttöön mukaan, ja pysyvien tilojen, kuten vinotunneleiden ja varastotilojen, osalta käytetään pitkäkestoisia tukirakenteita.

Kaivoksen ja vinotunneleiden suunnittelussa keskitytään tunnistamaan systemaattisesti alueet, joissa tarvitaan esi-injektointia. Mittavienkin tutkimusten jälkeen kalliooperän hydrogeologisiin ja geoteknisiin ominaisuuksiin sekä kalliomassan käyttäytymiseen jää epävarmuuksia, jotka joudutaan ratkaisemaan rakentamisvaiheessa. Tähän tarkoitukseen on kehitetty mm. (Peck, 1969)

pohjalta seurantamenetelmiä, joilla näitä epävarmuuksia voidaan hallinta (Stille, 2015). Euroopassa seurantamenetelmä on formalisoitu geoteknistä suunnittelua koskevaan standardiin Eurokoodi 7 (EN1997-1:2004, 2004). Sakatin hankkeessa sekä kallion tuennan, että vuotovesien hallinnan suunnittelu pohjautuu Eurokoodi 7 mukaiseen seurantamenetelmään (EN1997-1:2004, 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.*

Vuotovesien hallinnassa seurantamenetelmää voidaan soveltaa esimerkiksi seuraavilla tavoilla:

- Rakenteen sallitun käyttäytymisen rajojen määrittely
 - Pohjaveden pinnan alenemarajojen määrittely alueittain
 - Suojeltujen lajien elinolosuhteet
 - Lupaehdot
 - Vuotovesimäärät alueittain ja tunneliosuuksittain
 - Kaivosturvallisuus
 - Pumpkauksen taloudellisuus
 - Ympäristönäkökulmat
- Rakenteen mahdollisen käyttäytymisen vaihtelualueen arviointi
 - Kallion vedenjohtavuuden arviointi alueittain
 - Hydrogeologiset mittaukset
 - Numeeriset mallit
 - Muut projektit samantyyppisessä geologiassa
 - Kallion injektoitavuuden arviointi alueittain
 - Hydrogeologiset mittaukset
 - Vertailukohteet toteutuneista hankkeista
 - Tiivistysrakenteiden rakennettavuuden arviointi alueittain
 - Pohjaveden in-situ painekorkeus
 - Pohjaveden painekorkeus rakentamisaikana arviointi numeerisesti

- Pohjaveden toteutunut painekorkeus rakentamisen jälkeen numeerisesti
- Vuotovesimäärien arviointi alueittain
 - Numeeristen mallien perusteella
 - Analyttisesti
- Pohjaveden pinnan aleneman arviointi
 - Numeeristen mallien perusteella
 - Analyttisesti
- Seuranta ja toimenpidesuunnitelmat
 - Vuotovesien hallintaohjelma
 - Monitorointiverkon perustaminen
 - Kalliopohjaveden pinnan aleneman seuranta louhinnan ohittaessa mittauspisteen
 - Pintapohjaveden pinnan aleneman seuranta louhinnan ohittaessa mittauspisteen
 - Monitorointiverkoston kattavuuden ja toiminnan arviointi havaintojen perusteella
 - Valitun tiivistysmenetelmän toimivuuden arviointi
 - Lisätiivistystoimenpiteiden suunnittelu tarvittaessa
 - Pohjaveden kompensatiopumppaus tarvittaessa
 - Injektoinnin toteutussuunnittelu työmaalla
 - Lopullisen vedenjohtavuuden mittaaminen
 - Työmaalla tunnusteluporauksin
 - Tyyppisuunnitelman valinta
 - Kallion injektointivuuden seuranta
 - Injektointilaitteiston online-mittaukset (paine ja virtaama)
 - Injektointimassan virtausprofiilin valvonta ja analysointi online-mittauksena
 - Reseptin muuttaminen mittaustulosten perusteella lähes reaaliajassa
 - Injektoinnin onnistumisen mittaaminen
 - Työmaalla kontrolliporauksin
 - Tavoitteen uudelleenarviointi, tyyppisuunnitelman muuttaminen ja uusintainjektointi, jos tavoitetta ei saavuteta.

3 Suunnitteluperusteet

Tässä luvussa esitellään vuotovesien hallinnan sekä tuennan suunnitteluperusteet Sakatin hankkeessa ja kuvataan, miten suunnittelua edistetään hankekehitysvaiheiden edetessä. Suunnitteluperusteilla tarkoitetaan hankkeen lähtökohtien, tavoitteiden, rajoitteiden ja teknisten määräysten koostamista yhteismitalliseen muotoon. Erityisesti keskitytään siihen, miten ja mistä kalliotilojen suunnittelu lähtee liikkeelle, miten tilojen stabiilitetti huomioidaan tilojen asemoinnissa, tekniset ratkaisut lujitukseen ja niiden ohjaavat tekijät.

Sakatin hankkeen vuotovesien hallinnan ja tuennan suunnittelussa käytetään empiirisiä, analyttisiä ja numeerisia menetelmiä, ja kuvaukset kustakin suunnittelumenetelmästä on esitetty taulukossa 1. Suunnittelumenetelmiä voidaan myös tarpeen vaatiessa yhdistellä.

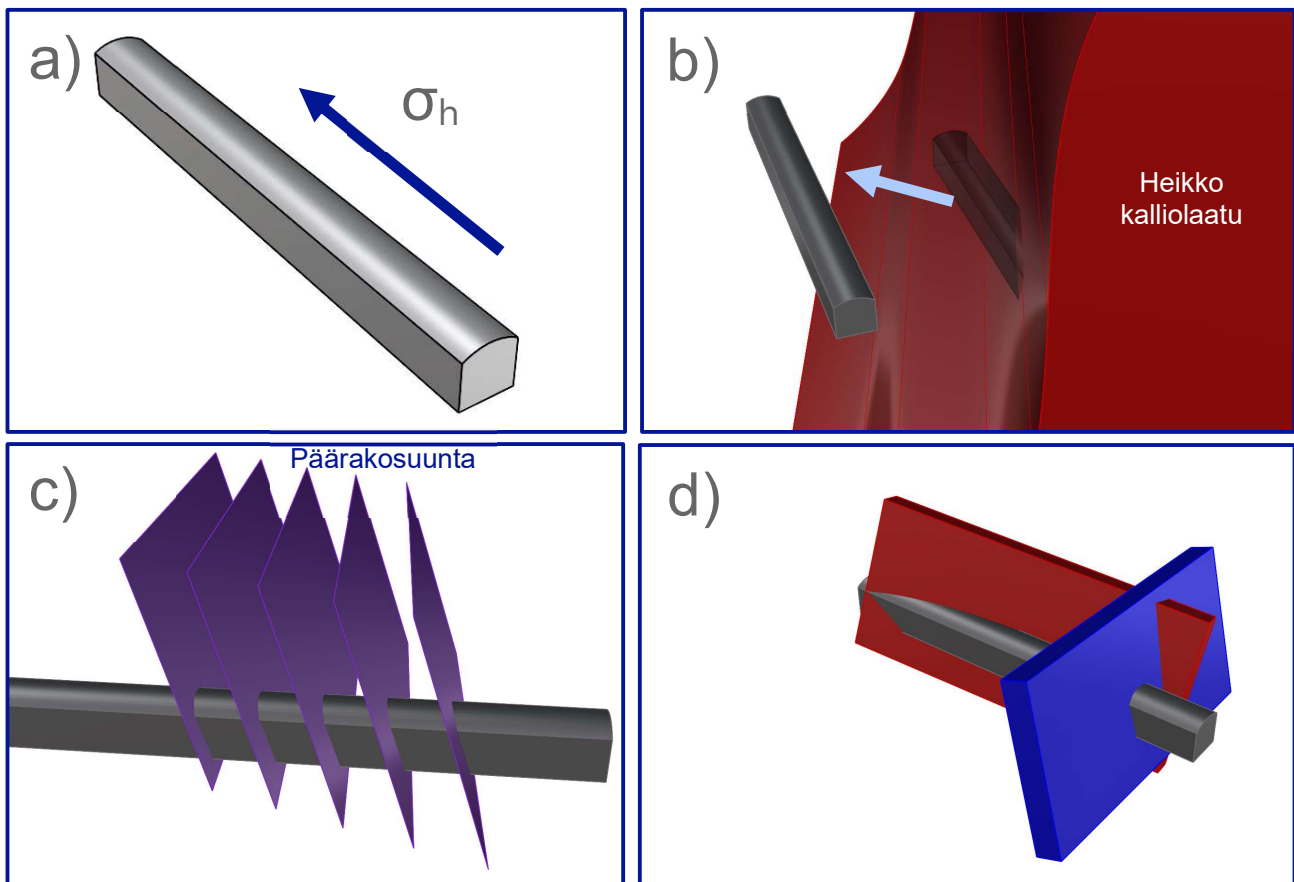
Taulukko 1. Sakatin hankkeessa käytettävien suunnittelumenetelmätyyppien määritelmät

Suunnittelumenetelmä	Kuvaus
Empiirinen	Suunnittelumenetelmä perustuu kokemustietoon kerättyinä toteutuneista hankkeista ja kaivoksista. Empiiriset suunnittelumenetelmät voivat sisältää kvalitatiivisia ja kvantitatiivisia menetelmiä. Esimerkkejä kallion tuennassa käytettävistä empiirisistä menetelmistä: - Q-luokitus (tunneleiden lujitus) (NGI, 2022) - Hydraulinen säde taulukkomitoitus (Mathews et al., 1980)
Analyttinen	Suunnittelumenetelmä perustuu luonnonlakien, tyypillisesti fysiikan laeista ja aksioomista johdettavissa oleviin kaavoihin, joiden suljetun muodon ratkaisu on määritettävissä. Mitoitustulokset voidaan laskea suoraan sijoittamalla muuttujat kaavoihin. Kalliotekniikassa tyypillinen laskentaesimerkki analyttisestä mitoituksista on määrätyn kokoisen irtonaisen kalliolohkon kiinnittäminen kalliopultin tai ruisku-betonikerroksen avulla. Kallion lujituksessa käytettäviä analyttisiä menetelmiä ovat esimerkiksi: - Lohkoteoria (Block theory) - Kallion reaktiokäyrä (Ground reaction curve) Kallion tiivistyksen suunnittelussa käytettäviä analyttisiä menetelmiä ovat esimerkiksi: - Thiemin kaivoyhtälö - Rakovirtauksen kuutiolaki (Eloranta, 2007) - Vuotovesivirtauksen arviointi kalliotunneliin ja injektoituun tunneliin (Gustafson, 2012, 1986) - Injektointimassan maksimitunkeuma (Gustafson and Stille, 1996; Stille, 2015) Kaivostäytön suunnittelussa käytettäviä analyttisiä menetelmiä ovat esimerkiksi: - Pastatäytön vaadittu mitoituslujuus kuormitustapauksittain (Belem and Benzaazoua, 2008)
Numeerinen	Numeeriset mitoitusmenetelmät sisältävät joukon laskentamenetelmiä, joilla voidaan ratkaista sellaisia laskentaongelmia, joiden analyttinen ratkaiseminen on käytännössä mahdotonta (Haataja et al., 2002). Kalliosuunnittelun ja vuotovesien hallinnan kontekstissa käytetyt menetelmät ovat yleensä erilaisia differenssi- (FD) ja elementtimenetelmien (FEM) sovellutuksia. Lisäksi voidaan käyttää erilaisia stokastisia simulointimenetelmiä. Numeeriset menetelmät mahdollistavat mitoittettavan kalliotilan sekä esimerkiksi lujituksen kuvaamisen tarkkoine materiaaliparametreineen.

3.1 Kalliotilojen asemointi ja dimensiot

Sekä kalliotilojen pysyvyyden, että vuotovesien kannalta olennainen suunnittelu alkaa jo kalliotilojen asemointi- ja dimensiointivaiheessa. Kalliotilojen asemoinnilla tarkoitetaan kallioon louhittavien tilojen ja louhosten sijaintia sekä suuntaa. Kalliotilojen dimensioilla tarkoitetaan kalliotilojen fyysistä muotoa sekä ulottuvuuksia eri suunnissa, kuten leveyttä, korkeutta sekä pituutta. Kaivos-toiminnassa kalliotilojen dimensioiden ja asemointi määräytyvät tyypillisesti toiminnallisten vaatimusten perusteella. Tilojen dimensioiden ja suuntauksen osalta kallion stabiilitetti kuitenkin otetaan

toiminnallisten reunaehtojen puitteissa huomioon, koska esimerkiksi tilojen kallioteknisessä suunnittelussa voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä suuntaamalla tilat mielekkäällä tavalla. Suuntaamalla kalliotila mielekkäästi voidaan vähentää esimerkiksi tilan lujitustarvetta. Tyypillisesti syvät maanalaiset kalliotilat pyritään suuntaamaan siten, että kalliotilan tai tunnelin pituusakseli vastaa suurimman vaakasuuntaisen pääjännitystilakomponentin suuntaa (Kuva 1a). Kalliolaadun vaikutus huomioidaan sijoittamalla tilat toiminnallisten reunaehtojen puitteissa mahdollisimman hyvään kalliolaatuun (Kuva 1b) ja maanalaisten tilojen pituusakseli suunnataan mahdollisuuksien mukaan kohtisuoraan merkittävintä kallion rako- tai liuskeisuussuuntaa vastaan (kuva 1c). Merkitävät kallioperän heikkousvyöhykkeet ja ruhjeet pyritään läpäisemään mahdollisimman kohtisuorassa kulmassa suhteessa vyöhykkeen orientaatioon (kuva 1d). Edellä esitetyt periaatteet ovat ohjeellisia, ja tyypillisesti kalliotilojen asemoinnissa tehdään kompromisseja kallioteknisesti optimaalisen ja toiminnallisten reunaehtojen välillä.



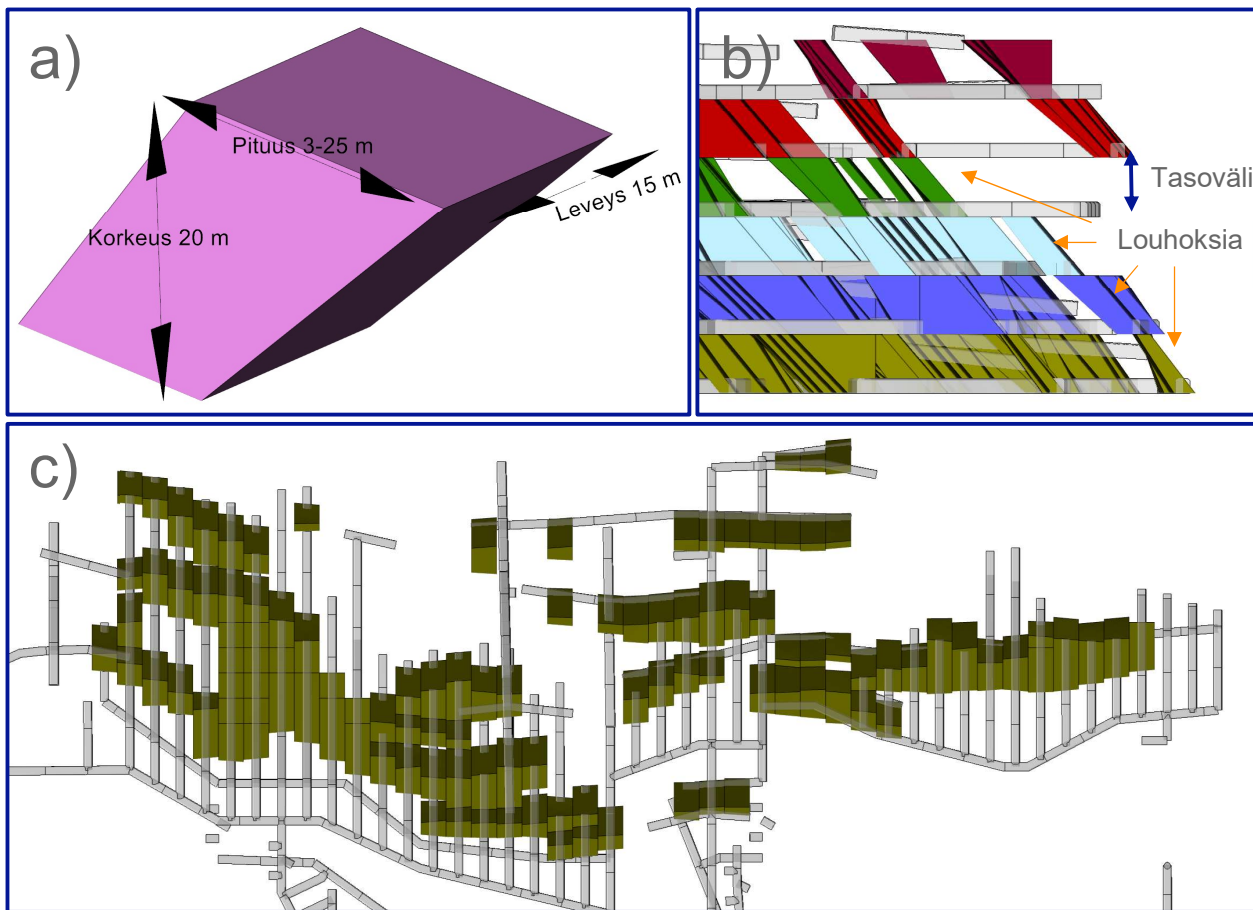
Kuva 1. a) Tunnelin suunnittelussa pyritään mahdollisuuksien mukaan asemoimaan tunnelin pituusakseli yhdensuuntaiseksi paikallisen maksimivaakajännityskomponentin σ_h suhteen, b) Tunnelin uudelleenaseointi kalliolaadun perusteella, c) Tilan suuntaaminen mahdollisuuksien mukaan vallitsevaa päärakosuuntaa vastaan, d) tunnelin suuntaaminen heikkousvyöhykelävistyksen kohdalla optimaalinen lävistyskulma (sininen) vs. haastavampi lävistyskulma (punainen)

Kaivossuunnittelu lähtee liikkeelle malmiksi määritellyn mineralisaation geometriasta, jonka pohjalta suunnitellaan louhosgeometriat malmin louhimiseksi. Kaivossuunnittelussa varsinaisten louhosten geometrian suunnittelussa toiminnallisena vaatimuksena ovat louhittavien mineralisaation osien eli malmilinssien muodot ja kallistukset. Louhosten stabiileetti asettaa kuitenkin reunaehtoja

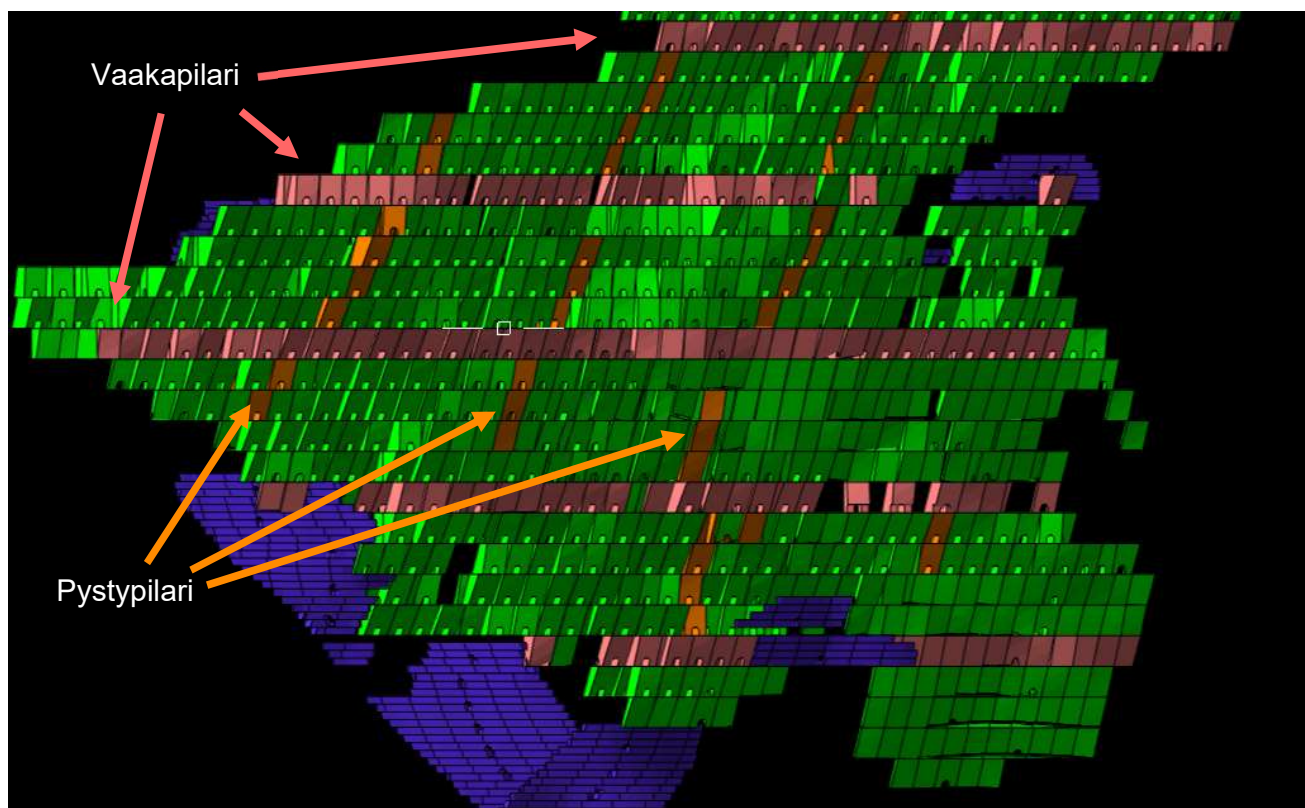
louhosten dimensioille. Käytännössä louhoskokoa rajoitetaan osana louhosoptimointiin käytettäviä parametrejä eli louhoksen minimi- ja maksimikoot toimivat louhosoptimoinnin lähtötietoina. Louhoskokoa rajoittavien dimensioiden (leveys, korkeus, pituus) määrittelyyn käytetään Sakatin hankkeessa pääosin empiiristä menetelmää (Mathews et al., 1980) myöhempiä täydennyksiä (Hutchinson, 1996; Suorineni, 2014). Myöhemmissä suunnitteluvaiheissa voidaan hyödyntää myös numeerisia mallinnuksia kallioteknisesti haastaviin louhoksiin. Louhosdimensioiden muuttujia on esitelty kuvassa 2.

Louhosten geometria suhteessa toisiinsa mitoitetaan määrittämällä louhostasojen välinen etäisyys. Mitoitusmenetelmänä käytetään empiirisiä menetelmiä, malmilinsien paksuuden ja kaateen suhdetta, täydennettynä tarvittaessa numeeristen menetelmien tuloksilla. Kaivoksen pysyvyyden näkökulmasta osa louhoksista jätetään myös tarkoituksella louhimatta, jolloin louhittujen louhosten väliin jää kalliotilan jännitystilaa uudelleenjärjestymisen mahdollistavia vaak- ja pystypilareita. Vaaka- ja pystypilareita on visualisoitu kuvassa 3.

Kalliotilojen suuntaa määrittävät sekä vallitseva jännitystila että alueen rakoilu ja rakovyöhykkeet. Louhosten dimensiot ja etäisyydet vaikuttavat tasoväliin, ja välitasot sekä tukipilarit varmistavat rakenteiden tukevuuden. Kalliotilojen asemointi suhteessa pohjaveteen on myös keskeinen tekijä, joka tulee huomioida suunnittelussa.



Kuva 2. a) Louhoksen dimensioiden määritelmät, b) pituusleikkaus louhosten tasoväleistä, jossa tasovälin määritelmä on esitetty c) vaakaleikkaus yhdestä louhintatasosta, josta ilmenee louhosten (tummanvihreällä) sijoittuminen vaakasuunnassa rinnakkain.



Kuva 3. Maanalaisen kaivoksen louhosten väliin louhimatta jätettävät vaaka- ja pystypilarit. Kuvassa on esitetty vaakapilarit punaisella ja pystypilarit oranssilla.

Taulukkoon 2 on koottu kalliotilojen asemoinnin keskeiset suunnitteluperusteet. Suunnitteluperusteet on esitetty vinotunnelille, maanalaisen kaivoksen pysyville tiloille kuten pastalaitokselle sekä tuotantoalueille.

Taulukko 2. Kalliotilojen asemoinnin ja dimensionoinnin suunnitteluperusteet.

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Kaikkia kalliotiloja ja louhoksia koskevat yleiset suunnitteluperusteet		
Kalliotilan asemointi	Kalliotilan asemointi määräytyy ensisijaisesti tilan toiminnallisten vaatimusten perusteella	Kaikki kalliotilat asemoidaan toiminnallisesti tarkoituksenmukaisesti sijainteihin. Asemoinnissa kuitenkin huomioidaan geotekniset rajoitteet ja reunaehdot.
Kalliotilan asemointi	Tilojen asemoinnissa huomioidaan kallion paikallinen jännitystila	Kaikki kalliotilat asemoidaan toiminnallisesti tarkoituksenmukaisesti sijainteihin. Asemoinnissa kuitenkin huomioidaan jännitystilan vaikutus tilojen asemointiin.
Kalliotilan asemointi	Tilojen asemoinnissa huomioidaan tiedossa oleva kallion laatu	Kaikki kalliotilat asemoidaan toiminnallisesti tarkoituksenmukaisesti sijainteihin. Asemoinnissa kuitenkin huomioidaan kalliolaadun vaikutus tilojen asemointiin.
Kalliotilan asemointi	Tilojen asemoinnissa huomioidaan vallitsevat kallion rakennegerologiset olosuhteet	Kalliotila suunnitetaan mahdollisuuksien mukaan vallitsevaa päärakosuuntaa tai liuskeisuutta vastaan.
Kalliotilan asemointi	Tilojen asemoinnissa huomioidaan hydrogeologisesti merkittävät kallioerän rakenteet	Kalliotilan asemoinnissa vältetään tiedossa olevia hydrogeologisesti merkittäviä rakenteita.

Sakatin maanalainen kaivos

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Kalliotilan dimensiot	Kalliotilojen dimensiot määräytyvät tilan toiminnallisten vaatimusten perusteella	Tilojen dimensiot määräytyvät esimerkiksi tilaan tulevien laitteiden, infrastruktuurin ja käyttötarkoituksen perusteella. Tilojen dimensiota kuitenkin rajoitetaan sijaintikohtaisesti geoteknisten ja kalliomekaanisten reunaehtojen perusteella.
Kalliotilan dimensiot	Kalliotilan dimensioiden tulee mahdollistaa tilojen stabiliteetin säilyminen ja mielekäs lujitus-suunnittelu.	Tilojen dimensiota ei suunnitella tarpeettoman suureksi, vaan tilojen dimensioiden tulee vastata suunniteltua tilojen käyttöä.
Vinotunnelin suunnitteluperusteet		
Vinotunnelin sisäänkäynti	Vinotunnelin sisäänkäynti sijaitsee Kuusivaarassa	Vinotunnelin sisäänkäynti tulee sijaita tulevan prosessialueen lähellä. Kuusivaara erottuu ympäröivästä maastosta korkeampana maastonkohtana, jolloin kallion pinta on sisäänkäynnin rakenteita ajatellen lähempänä ja kalliolaatu on todennäköisesti ympäristöään parempi. Kalliota peittävien maakerrosten paksuus Kuusivaaran alueella on todettu ohueksi. Vinotunnelin sisäänkäynnin tulee olla tulva-aluetta korkeammalla ja kaivoksen vesi ei saa purkautua kaivoksesta sulkemisen jälkeen.
Vinotunnelin linjaus	Vinotunnelin linjauksen pääosa on pohjoiseteläsuuntainen	Sakatin hankealueella vallitseva kallion rakennegeologinen suuntaus on keskimäärin itä-länsi-suuntainen, jolloin vinotunnelin linjaus kulkee kohtisuorassa tätä kallioperän suuntausta vastaan.
Vinotunnelin linjaus	Vinotunnelin linjausta täsmennetään ruhje- ja heikkousvyöhykkeiden kohdalla	Vinotunnelin linjauksen osalta huomioidaan lävistyskulma suhteessa tunnettuihin ruhje- ja heikkousvyöhykkeisiin.
Vinotunneleiden keskilinjojen välinen etäisyys	Vinotunneleiden keskilinjojen välinen etäisyys on vähintään 3 kertaa tunnelin profiilin halkaisijan suuruinen	Empiirinen tunnelisuunnittelun lähtökohta. Etäisyyttä voidaan pienentää toiminnallisten reunaehtojen perusteella sekä tarkennettujen suunnitteluanalyysien perusteella.
Vinotunnelin pituuskaltevuus	Vinotunnelin pituuskaltevuus on enintään 1:7	Empiirinen rajoite kaivoslaitteiden toiminnan näkökulmasta. Pituuskaltevuusvaatimuksesta voidaan poiketa perustellusta syystä, jos toiminnallisten vaatimusten täyttyminen on osoitettavissa.
Pastalaitos		
Pastalaitoksen sijainti	Esiintymän jalkapuolella Esiintymän länsipuolella Tavoitetaso -330	Empiirinen kaivossuunnittelun periaate pyrkiä sijoittelemaan tilat esiintymän jalkapuolelle. Sijaintia voidaan kuitenkin muuttaa kalliolaadun ja tehdyn suunnittelutyön perusteella myös esiintymän yläpuolelle. Pastan pumppaus alaspäin jakeluverkostoon. Sekundääripumppauksen välttäminen.
Pastalaitoksen dimensiot	Pastalaitoksen dimensiot määräytyvät pastalaitoksen tilaavaatimusten perusteella	Pastalaitoksen tarkat dimensiot täsmentyvät kaivossuunnittelun edetessä.
Murskausasema		
Murskausaseman sijainti	Esiintymän jalkapuolella Tarkka sijainti määräytyy toiminnallisten vaatimusten perusteella	Empiirinen kaivossuunnittelun periaate pyrkiä sijoittelemaan tilat esiintymän jalkapuolelle.
Kaatonousut		
Kaatonousujen halkaisija	Nousukuilun maksimihalkaisija määräytyy kallioteknisten rajoitteiden perusteella	Kuilun halkaisijaa ei voida kalliolaadusta riippuen kasvattaa määrättömästi.

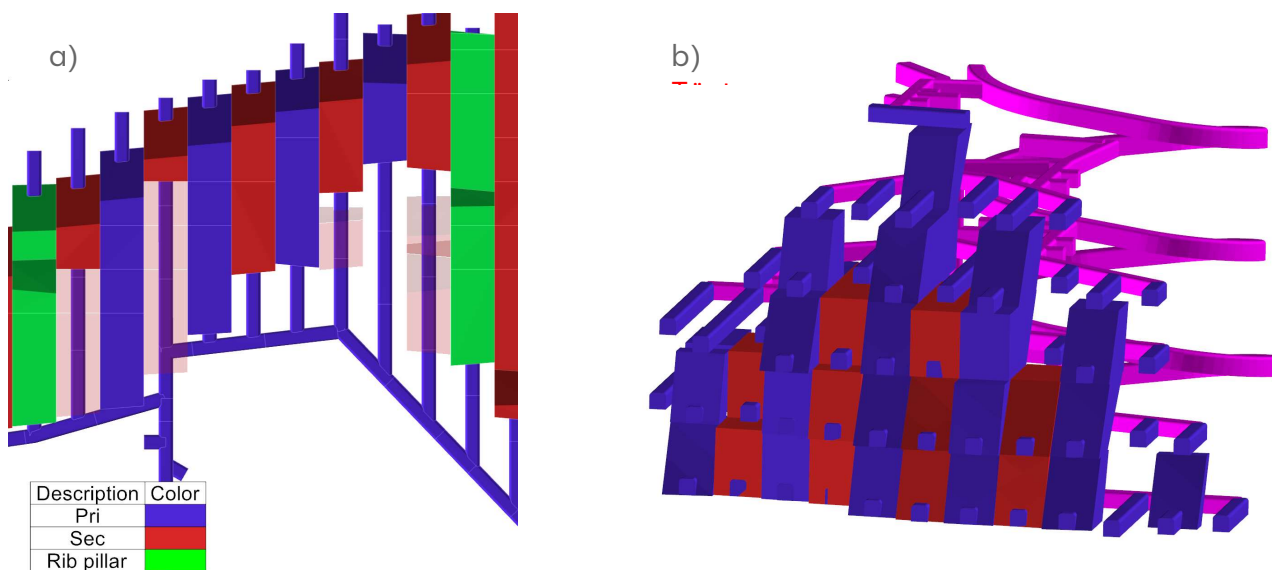
Sakatin maanalainen kaivos

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Louhosten dimensiot ja sijottuminen – Välitasolouhinta (Pitkäreikälouhinta)		
Suunnittelumenetelmä	Empiirinen Hydraulinen säde taulukkomitoitus	Louhoskoon suunnittelussa käytetään tässä hankevaiheessa empiiristä menetelmää (Mathews et al., 1980). Louhoskoon suunnittelussa käytetään myöhemmissä suunnitteluvaiheissa tarveperusteisesti myös numeerisia menetelmiä.
Louhosten leveys	15 m	Hydraulinen säde taulukkomitoitus Dimensiot päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Louhosten korkeus	20 m	Hydraulinen säde taulukkomitoitus Dimensiot päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Louhosten pituus	25–40 m	Hydraulinen säde taulukkomitoitus Dimensiot päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Pystypilarien etäisyys	150 m välein	Empiirinen pystypilarien suunnitteluperiaate Etäisyydet päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Vaakapilarien etäisyys	100 m välein	Empiirinen vaakapilarien suunnitteluperiaate Etäisyydet päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Tasoväli	20 m	Kaivossuunnitelman lähtökohta Etäisyydet päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Suojaetäisyys	15–20 m	Kohtisuora etäisyys louhoksien ja pysyvien tunneleiden ja tilojen välissä. Etäisyydet päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Louhoskoko – Lyhytreikälouhinta (Cut & Fill)		
Suunnittelumenetelmä	Empiirinen perustuva	referenssikohteisiin
Louhosten leveys	3–8 m	Dimensiot päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Louhosten korkeus	5 m	Dimensiot päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Louhosten pituus	100 m	Dimensiot päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä
Välitasojen välinen etäisyys	15 m	Dimensiot päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä

3.2 Louhinnan vaiheistus

Kallion louhinta aiheuttaa kallion paikalliseen jännitystilakenttään muutoksia. Kalliotekniikassa puhutaan jännitystilän uudelleenjärjestymisestä louhinnan seurauksena. Louhittua tilaa ympäröivän kalliomassan jännitystilamuutokset voivat aiheuttaa muodonmuutoksia kalliotilaan lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Myös ympäröivien kalliotilojen louhinta voi aiheuttaa muutoksia läheisen kalliotilan jännitystilaolosuhteisiin. Kalliotilojen ja louhosten louhintaa vaiheistetaan mahdollistamaan kallion pysyvyys.

Louhosten louhinta vaiheistetaan primääri- ja sekundäärilouhosmenetelmällä (Kuva 4). Louhintaa vaiheistetaan siten, että primäärilouhoksia louhitaan ensin, joiden avulla kallion jännitystiloja voidaan ohjailla. Primäärilouhoksien louhinnalla kalliojännitystiloja ohjaillaan louhimalla primäärejä pysty- sekä vaakasuunnassa ennen sekundäärilouhosten aloittamista. Sekundäärilouhosten aloittaminen voidaan tehdä, kun primäärilouhokset ovat louhittu vähintään samalta tasolta. Primäärilouhoksia voi joissain profiileissa olla pitkällä matkalla, jolloin louhintajärjestyksen vaiheistamiseen tulee tehdä muutoksia jännitystilojen muutoksien perusteella.



Kuva 4. Yleisperiaate primääri -sekundäärilouhinnassa: a) vaakaleikkaus louhintatasolta: primäärilouhokset (violetti) on louhittu aloittamalla paneelin perältä, jonka jälkeen siirytään louhimaan sekundäärilouhoksia (punainen), b) 3D-kuva louhintajärjestyksestä tasoväleittäin: primäärilouhokset on louhittu alhaalta ylöspäin ja keskeltä ulospäin, jonka jälkeen siirytään sekundäärilouhosten louhintaan.

Louhinnan vaiheistuksella ohjaillaan kalliotilojen ja louhosten louhinnasta aiheutuvien jännitystilamuutosten uudelleenjärjestymistä kaivoksen stabiliteetin kannalta optimaalisella tavalla. Suunnittelumenetelminä toimivat empiiriset viitekohteisiin perustuvat menetelmät, joita täydennetään tarvittaessa numeerisilla menetelmillä suunnittelun edetessä. Louhinnan vaiheistuksen keskeiset suunnitteluperusteet on koottu taulukkoon 3.

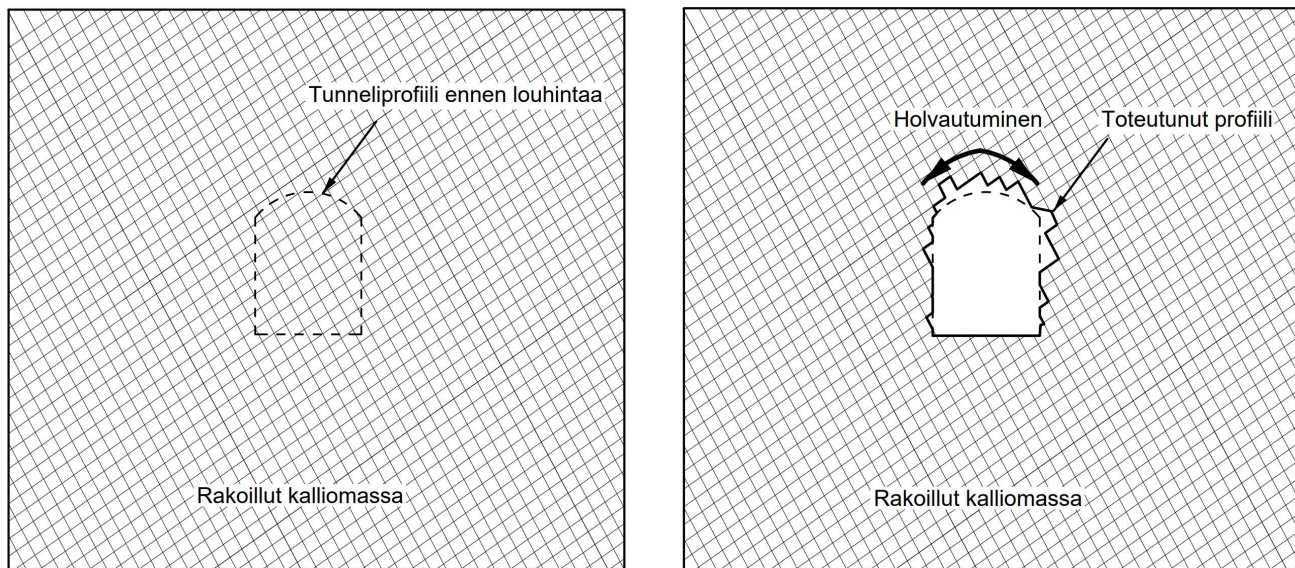
Taulukko 3. Louhinnan vaiheistuksen suunnitteluperusteet.

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Kaikkia kalliotiloja ja louhoksia koskevat yleiset suunnitteluperusteet		
Louhinnan vaiheistus	Louhinnan vaiheistuksen tulee tukea kalliotilojen pysyvyyttä	
Louhinnan vaiheistus	Kaivoksen pysyvyyden kannalta merkittävässä kohteissa huomioidaan	
Louhosten vaiheistus - Pitkäreikälouhokset		
Ohjaava louhintajärjestys	Primääri-Sekundäärilouhinta	1. Primäärilouhosten louhinta 2. Primäärilouhosten täyttö 3. Sekundäärilouhosten louhinta 4. Sekundäärilouhosten täyttö
Suunnittelumenetelmä	Empiirinen	Empiirinen vertailukohteisiin perustuva suunnitteluperiaate. Myöhemmissä suunnitteluvaiheissa voidaan käyttää myös numeerisia menetelmiä.
Pystysuuntainen louhintavaiheistus	Alhaalta ylöspäin	Voidaan tämentää paikallisesti. Voidaan tämentää tulevilla suunnitteluvaiheissa
Vaakasuntainen louhintavaiheistus paneelissa	Keskeltä ulospäin	Voidaan tämentää paikallisesti. Voidaan tämentää tulevilla suunnitteluvaiheissa

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Pituussuuntainen louhin- tavaiheistus	Perältä taaksepäin	Voidaan täsmentää paikallisesti Voidaan täsmentää tulevissa suunnitteluvaiheissa
Louhosten vaiheistus – D&F-louhokset		
Suunnittelumenetelmä	Empiirinen perustuva	referenssikohteisiin
		Empiirinen vertailukohteisiin perustuva suunnitteluperiaate Myöhemmissä suunnitteluvaiheissa voidaan käyttää myös numeerisia menetelmiä.
Louhintajärjestys	Alhaalta ylöspäin	1. Louhintaa 2. Täyttö

3.3 Kalliotilojen lujitus

Kalliotilan pysyvyys aiheutuu ensisijaisesti kalliotilaa ympäröivästä kalliomassasta itsestään. Luja kivilajeista koostuvissa ja rakoilleissa kalliomassoissa merkittävä osa kallion pysyvyydestä aiheutuu ympäröivän kalliomassan holvautumisesta louhinnan jälkeen. Louhinnan seurauksena kalliomassa löyhtyy. Irtonaiset lohkariekat irtoavat tunnelin louhinnan yhteydessä tai mekaanisesti irrottamalla heti louhinnan jälkeen. Louhittua kalliotilaa ympäröivässä kalliomassassa jännitystila jakautuu uudelleen ja muodostuu tunnelin pysyvyyttä ylläpitävä holvaantuminen (Kuesel et al., 1995). Erittäin rakoilleissa kalliomassoissa kallion irtonaisten kappaleiden irtoaminen voi kuitenkin jatkua pitkäänkin ja varsinaisen holvaavan tukivoiman syntyminen voi ulottua pitkälle tunnelin yläpuolelle. Kuvassa 5 on esitetty, miten rakoilleissa kalliomassassa louhinnan aiheuttama löyhtyminen aiheuttaa ensin irtonaisten kappaleiden irtoamisen, mutta samalla muodostuu kalliotilan yläpuolelle holvautumisesta aiheutuen tilan pysyvyyttä ylläpitävä tuki. Kalliotilaa ympäröivää kalliomassaa voidaankin ajatella osana kalliotilan pysyvyyttä tukevaa rakennetta.

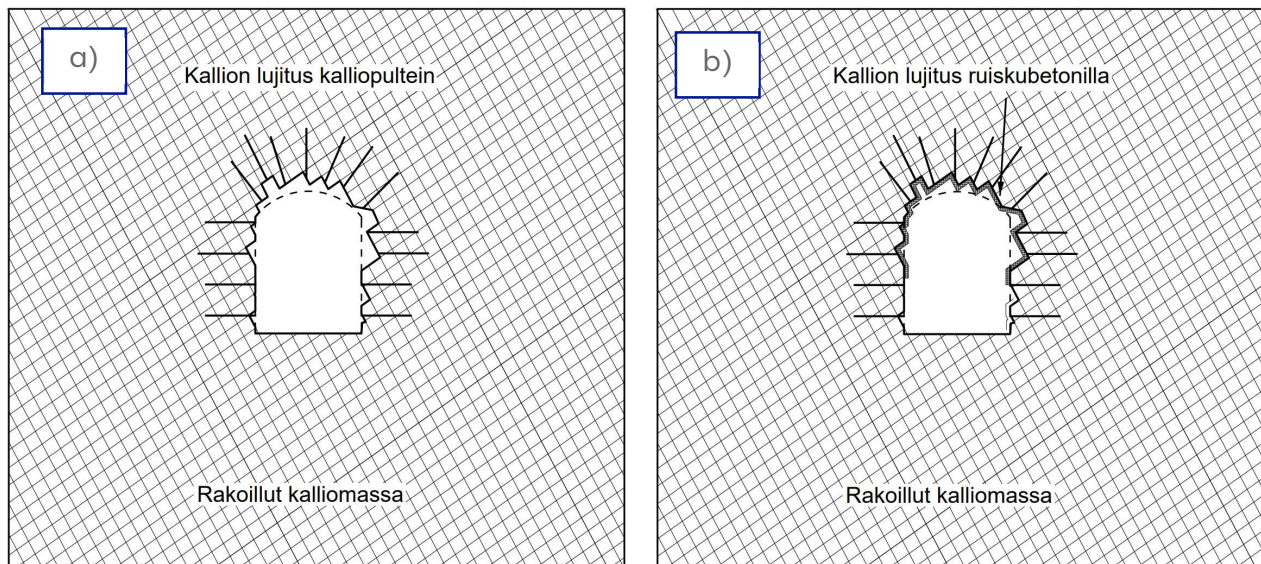


Kuva 5. Rakoilleen kalliomassan holvautuminen osana kallioon louhitun tilan pysyvyyttä.

Kallion lujittamisella tarkoitetaan kallion vahvistamista erilaisilla lujittavilla toimenpiteillä. Kallion pultitus on lujitusmenetelmä, jossa kalliomassan omaa lujuutta vahvistetaan asentamalla lohkoja toisiinsa sitovia pultteja kalliotilaa ympäröivään kallioon. Pultit sitovat tunnelin katossa ja seinillä

olevat irtonaiset kalliolohkot toisiinsa ja mahdollistavat kallion toimimisen kuormitukset kantavana rakenteena. Kuvassa 6a on esitetty kallion lujitusperiaate pulteilla.

Ruiskubetonointi on lujitusmenetelmä (Kuva 6b), jossa kalliota vahvistetaan ruiskuttamalla betonikerros kalliopintaan. Ruiskubetonin kapasiteetti suunnitellaan kantamaan kalliopulttien väliin jäävien irtolohkojen paino sekä kallioista tulevat kuormitukset. Ruiskubetonia voidaan edelleen vahvistaa sekoittamalla sen joukkoon kuituja tai asentamalla ruiskutettavalle pinnalle teräsverkot. Ruiskubetonissa käytettäviä kuituja on sekä teräksisiä, että erilaisista polymeerikuituja. Kalliotilan lujituksessa voidaan käyttää myös teräsverkkoja, jotka estävät kallioista irtoavien kappaleiden putoamisen kalliotilaan.



Kuva 6. Periaatekuvat kallion vahvistamisesta a) kalliopulteilla ja b) ruiskubetonilla.

Sakatin hankkeessa käytettävät suunnitteluperusteet kalliotilojen lujitukselle on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Kalliotilojen lujituksen suunnitteluperusteet.

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Kaikkia kalliotiloja ja louhoksia koskevat yleiset suunnitteluperusteet		
Kalliolujitus	Kalliolujituksen tulee mahdollistaa turvallinen työskentely suunnittelutavassa kalliotilassa.	
Kalliolujitus	Pääasiallisina kallion lujitusmenetelminä käytetään: - Pultitusta - Ruiskubetonointia - Verkotusta	
Suunnittelumenetelmät	Empiirinen taulukkolujitus Numeeriset menetelmät Analyttiset menetelmät	Kallion lujitussuunnittelussa on tähän mennessä käytetty pääosin empiirisiä menetelmiä. Suunnittelun lähtötietojen täsmennyessä suunnittelua täydennetään numeeristen analyysien tuloksilla. Detalji- ja toteumasuunnittelussa hyödynnetään tarpeen mukaan myös analyttisiä menetelmiä.
Vinotunnelin lujitus		

Sakatin maanalainen kaivos

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Suunnittelumenetelmät	Empiirinen taulukkolujitus Numeerinen menetelmä	Tähän asti tehdyn suunnittelun lähtökohtana tyyppilujituksille on ollut empiirinen taulukkolujitus Q-luokitukseen perustuen (NGI, 2022) Vuoden 2024 aikana tyyppilujitusten suunnittelumenetelmää täydennettiin numeerisella menetelmällä käyttäen stokastista DFN-mallinnusta Flac3D-ohjelmistoa. Lisäksi vuoden 2024 aikana on tehty lohkoanalyysyjä käyttäen UnWedge-ohjelmistoa.
Kalliolujitusmenetelmät	Vinotunnelin pääasiallinen lujitusmenetelmä: - Pultitus - Ruiskubetoni	Lujitus toteutetaan TBM-laitteesta kaksivaiheisesti havaitun kalliolaadun perusteella. TBM-laitteessa lujitusta tehdään kaksivaiheisesti: 1. vaiheessa heti teräpään jälkeen sijaitsevassa lujitusmoduulissa asennetaan työturvallisuuden kannalta olennainen välitön lujitus 2. vaiheessa laitteen loppupäässä asennetaan lopullinen lujitus.
Kalliolujitusmenetelmät	Vinotunnelin täydentävät lujitusmenetelmät: - Verkotus - Esivalmisteiset tuenta- ja verhouselementit	Paikallisesti voidaan käyttää verkotusta heikossa kalliolaadussa Esivalmisteisia tuenta- ja verhouselementtejä pidetään yhtenä teknisenä ratkaisuna tunnelin lujitukseen ja vuotovesien hallintaan. Viimeaikaisten kalliotutkimusten perusteella lujitus voidaan kuitenkin toteuttaa ensisijaisilla menetelmillä eli ruiskubetonoimalla ja pultittamalla. Vuotovesien hallinnassa ensisijainen menetelmä on esi-injektointi.
Pultin tyyppi	Tyypisuunnitelmissa tulee esittää kussakin tyyppiprofiilissa käytettävä pulttityyppi.	
Pulttiväli	Tyypisuunnitelmissa tulee esittää kussakin tyyppiprofiilissa käytettävä pulttiväli	
Ruiskubetonin kattavuus	Tyypisuunnitelmissa esitetään ruiskubetonin sijoittuminen profiilin alalle, kuten holviin ja seinille	
Ruiskubetonin lujuusluokka	Tyypisuunnitelmissa tulee esittää kussakin tyyppiprofiilissa käytettävä ruiskubetonin lujuusluokka	
Ruiskubetonin paksuus	Tyypisuunnitelmissa tulee esittää kussakin tyyppiprofiilissa käytettävä ruiskubetonipaksuus	
Kaivostunneleiden lujitus		
Suunnittelumenetelmä	Empiirinen taulukkolujitus	Kaivossuunnittelussa tyyppilujitukset on laadittu käyttäen kaivossuunnitteluun täydennettyä versiota Q-luokituksesta. (Potvin and Hadjigeorgiou, 2016)
Kalliolujitusmenetelmät	Pääasiallinen lujitusmenetelmä: - Pultitus - Ruiskubetoni	
Louhosten lujitus		
	Empiirinen taulukkolujitus	Lujitustarve arvioidaan tapauskohtaisesti osana louhintaa.

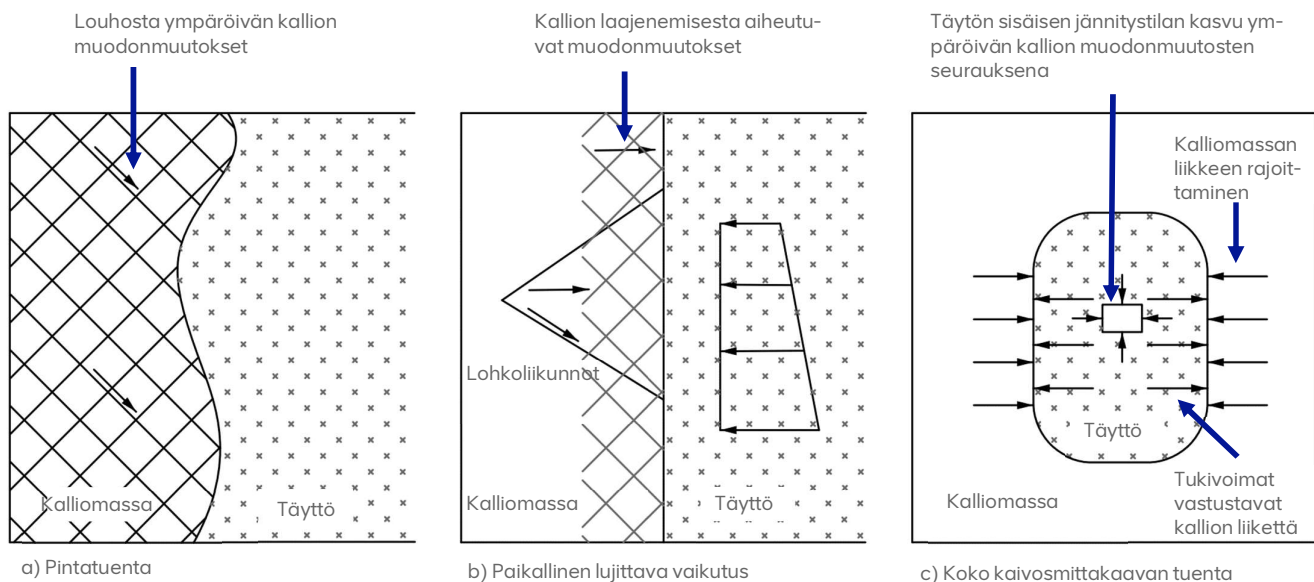
3.4 Kaivostäyttö

Kaivostäyttö on louhittujen tilojen täyttämistä. Louhinnassa syntyneet tilat eli louhokset voidaan jättää tyhjäksi tai täyttää. Täyttöä tehdään hankkeesta riippuen eri syistä ja eri tavoilla. Kaivostäyttöön voidaan käyttää pastatäyttöä, pasta-kivimursketäyttöä sekä poikkeustapauksissa sivukiveä tai betoni-sivukivi sekoitusta (cemented rock fill=CRF)

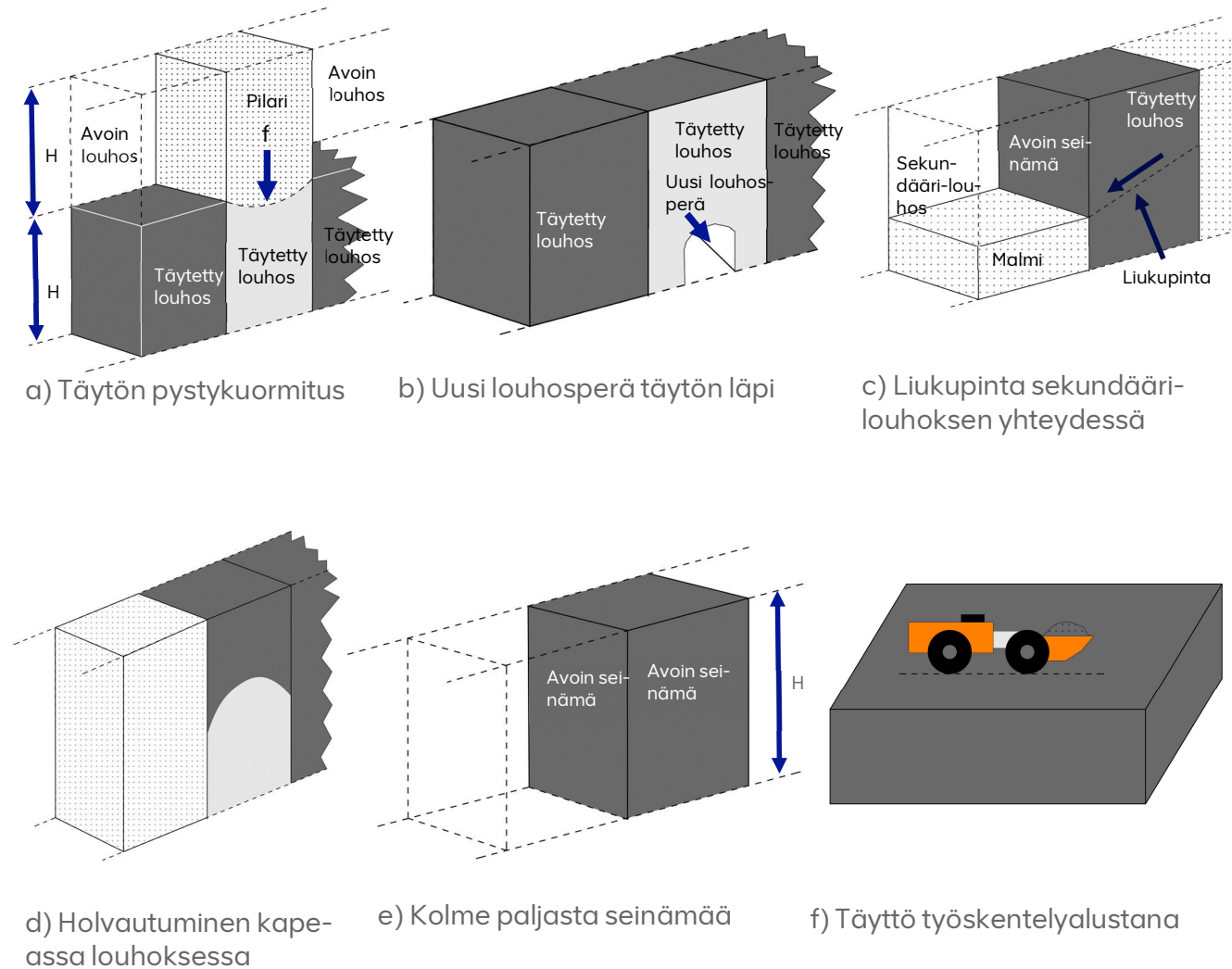
Kaivostäytön tehtävä kaivoksen tuennassa on osa kuvassa 4 esiteltyä primääri-sekundäärilouhinta. Kaivostäyttö osallistuu kaivoksen stabiliteetin tukemiseen kolmella eri mittakaavalla, jotka on esitetty kuvassa 7. Pienimmässä mittakaavassa kaivostäyttö tukee kallion pintaa paikallisia muodonmuutoksia vastaan. Osittainen tukeva vaikutus louhostasolla muodostuu täytön aiheuttaman tukivoiman rajoittaessa kalliolohkojen liikuntoja. Koko kaivoksen mittakaavassa kaivostäyttö rajoittaa koko kalliomassan liikettä syntyvien tukivoimien välityksellä. Kovettuvan kaivostäytön ensisijaisia tehtäviä ovat:

- Tukea paikallisesti louhosten stabiliteettia niin, että malmi voidaan louhia vaiheittain turvalisesti ja tarjota kantava työskentelytaso seuraavien louhosten louhinnalle.
- Tukea kaivoksen stabiliteettia alueellisella tasolla ja rajoittaa kalliomassan jännitystilän uudelleenjärjestymisestä aiheutuvia muodonmuutoksia.

Kovettuvan kaivostäytön suunnittelu perustuu kuormitustapauksiin, joita vasten kovettuvalle kaivostäytölle asetettavat lujuusvaatimukset määräytyvät. Lujuusvaatimusten mitoitustilanteet ovat johdettavissa kaivossuunnitelman asettamista toiminnallisista vaatimuksista eli käyttötilanteista. Kuvassa 8 on esitelty erilaisia kuormitustapauksia. Kaikkia kuormitustapauksia ei kuitenkaan huomioida kaikissa tapauksissa, vaan valittavat kuormitustapaukset pohjautuvat kaivossuunnitelman mukaiseen käyttötarkoitukseen ja louhinnan vaiheistukseen.

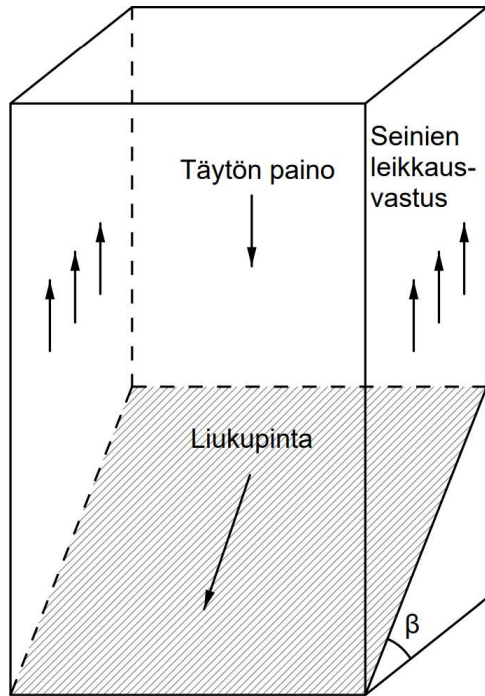


Kuva 7. Täytön roolit eri mittakaavan tuennassa kaivoksessa: a) Pintatuenta: Täyttö estää etenevän vaurion syntymisen kalliomassaan matalan jännitystilän olosuhteissa, b) Osittainen lujittava vaikutus: Täyttö aiheuttaa paikallisen tukivoiman kallion rikkonaisuuksiin ja irtolohkoihin, c) Täytön rooli koko kaivoksen tuennassa: Täytön kokoon puristuessa syntyvät tukivoimat osallistuvat koko kaivoksen tuentaan. (muokattu lähteestä Tan et al., 2020)

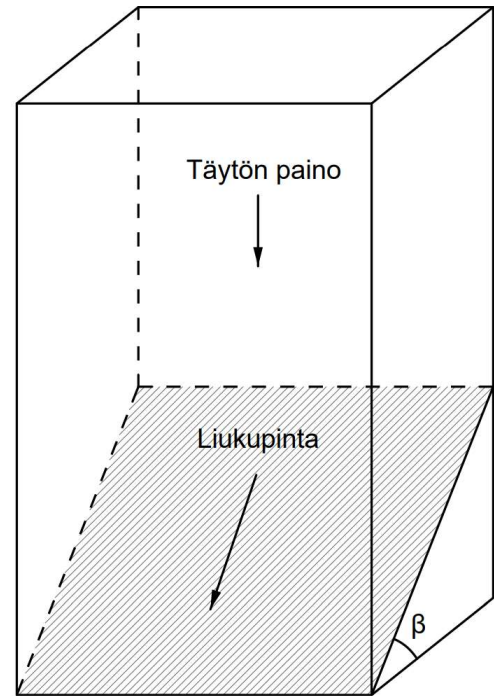


Kuva 8. Täytön suunnittelua ohjaavat kuormitustapaukset (muokattu lähteestä Belem and Benzaazoua, 2008)

Mitoitusmenetelmänä käytetään empiirisiä ja analyttisiä menetelmiä, joita voidaan tarvittaessa tukea numeerisin analyysin. Esimerkki kovettuvan kaivostäytön analyttisestä mitoituksessa käytettävistä kuormitustarkasteluista on esitetty kuvassa 9. Kuvassa esitetyssä kuormitustapauksessa kaivostäytön lujuus mitoitetaan täytön omaa massaa vastaan huomioimalla louhoksen dimensiot ja oletetun liukupinnan kaltevuuskulma (Mitchell et al., 1982). Jos täytetty louhos on mitoitustilanteessa useammalta sivultaan yhteydessä kallioon, lisäävät kallio-täyttö-rajapintaan syntyvät leikkausvoimat tuentavaikutusta entisestään.



a) Kolmelta suunnalta tuetun louhoksen täytön mitoitus



b) Vapaana seisovan louhoksen mitoitus

Kuva 9. Lujittuvan kaivostäytön analyttinen kuormitustarkastelu: a) suljettu tapaus, jossa seinien tukivoimat huomioidaan, b) vapaasti seisova mitoitustapaus, jossa louhoksen ympärillä ei ole seiniä. (muokattu lähteistä Belem and Benzaazoug, 2008; Mitchell et al., 1982)

Sakatin kaivoshankkeen keskeiset kaivostäytön suunnitteluperusteet on esitetty taulukossa 5. Täyttömenetelmänä käytetään pääasiassa pasta-kivimurske- tai pastatäyttöä. Täytön rakenne koostuu neljästä pääkomponentista: pato, ensimmäinen täyttö "tulppa", toinen täyttökerros ja kansi. 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. 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.

Pastan runkoaineena käytetään molempia prosessissa syntyviä rikastushiekkaajakeita, matala- ja korkearikkistä rikastushiekkaa. Pastan sideaineena toimii sementti. Sakatin hankkeessa selvitetään mahdollisuutta korvata sementti osittain tai kokonaan teollisuuden sivutuotteilla. Pasta-kivimursketäytössä hyödynnetään kaivoksen louhinnassa muodostuvaa sivukiveä, joka murskataan ja sekoitetaan pastan joukkoon pastalaitoksella. Alustavan suunnitelman mukaan pasta-kivimursketäytössä käytetään rikastushiekkaa ja sivukiveä sekoitussuhteella 70:30, mutta sivukiven osuus voi olla pienempikin. Täytön lujuusvaatimukset on eritelty eri osille, kuten tulppatäytölle ja kannelle, ja nämä vaatimukset tarkentuvat kaivossuunnittelun edetessä. Vastaavasti täytön lujitumisaika sekä sementin annostus vaihtelevat täytön sijainnin ja käyttötarkoituksen mukaan, ja

Sakatin maanalainen kaivos

niitä päivitetään suunnittelun aikana. Pasta valmistetaan maanalaiseen kaivokseen rakennettavalla pastalaitoksella.

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.

Taulukko 5. Kaivostäytön suunnitteluperusteet

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Kaivostäytön yleiset suunnitteluperusteet		
Ensisijainen täyttömenetelmä	Pastatäyttö Pasta-kivimursketäyttö	Ensisijainen täyttömenetelmä
Toissijainen täyttömenetelmä	Täydentävät täyttömenetelmät: Kivimursketäyttö Kovettuva sivukivitäyttö (CRF)	Käytetään vain poikkeustilanteissa.
Täytön mitoitusmenetelmä	Analyttinen menetelmä	Täytön suunnittelussa käytetään analyttistä menetelmää (Mitchell et al., 1982)
Täytön suunnitteluperusteet		
Täytön rakenne	Louhostäyttö jakautuu neljään pääkomponenttiin: - Pato - 1. Täyttö "tulppa" - 2. Täyttö - Kansi	Täytön tyyppisuunnitelma ja rakenne päivittyy kaivossuunnittelun edetessä louhosdimensioiden pohjalta.
Louhosten täyttöajan kohta	1 kk louhoksen louhinnan jälkeen	Tavoitteellinen arvo, jota käytetään kaivossuunnittelun lähtökohtana. Täyttöajankohta päivittyy kaivosuunnittelun edetessä.
Täytön runkoaine	Matala- ja korkearikkinen rikastushiekka	Täytön pääasiallisena runkoaineena toimii prosessin sivutuotteena saatavat rikastushiekat. Pasta-kivimursketäytössä käytetään sivukivimursketta. pasta-kivimursketäyttöön käytetään ensisijaisesti mahdollisesti happea tuottavia sivukiviä. Alustavan suunnitelman mukaan pasta-kivimursketäytössä käytetään rikastushiekkaa ja sivukiveä sekoitussuhteella 70:30, mutta sivukiven osuus voi olla pienempi.
Täytön sideaine	Sementti Teollisuuden sivuvirrat	Runkoaineiden (rikastushiekka, sivukivimurske) sekoitussuhteet täsmentyvät suunnittelun edetessä. Suunnittelu pohjautunut toistaiseksi sementin käyttöön sideaineena. Sakatin hankkeessa on laadittu vuonna 2024 selvitys sementin mahdollisesta osittaisesta tai kokonaisvaltaisesta korvaamisesta teollisuuden sivutuotteista koostuvilla sideaineilla täytön hiilijalanjäljen ja resurssitehokkuuden näkökulmasta.
Täytön lujuusvaatimus	Tulppa 540 kPa Kansi: 500 kPa Täyttö, jonka vierestä louhitaan: 220 kPa Täyttö, jonka vierestä ei louhita: 120 kPa	Perustuvat täytön tyyppisuunnitelmaan PFS-A-vaiheessa. Täytön lujuusvaatimukset päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä.

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Täytön vähimmäislujittumisaika	Tulppa: 7 vrk Kansi: 28 vrk Täyttö, jonka vierestä louhitaan: 28 vrk Täyttö, jonka vierestä ei tulla louhimaan: 28 vrk	Perustuvat täytön tyyppisuunnitelmaan PFS-A-vaiheessa. Täytön lujuusvaatimukset päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä.
Sementtiannostus	Tulppa: 8 % Kansi: 3 % Täyttö, jonka vierestä louhitaan: 2 % Täyttö, jonka vierestä ei tulla louhimaan: 1,5 %	Perustuvat täytön tyyppisuunnitelmaan PFS-A-vaiheessa. Täytön lujuusvaatimukset päivittyvät kaivossuunnittelun edetessä.

3.5 Kalliotilojen vuotovesien hallinta

Vuotovesien hallinnalla tarkoitetaan maanalaisessa rakentamisessa kalliotilaan vuotavan veden rajoittamiseen sekä hallittuun poistamiseen tähtäviä toimenpiteitä. Vuotovesien hallinta jakaantuu edelleen tiivistykseen ja kuivatukseen. Tiivistämisellä vähennetään vesivuotojen muodostumista ja ehkäistään muutoksia pohjavesiolosuhteissa. Kuivatuksella tarkoitetaan kalliotilaan muodostuvien vesivuotojen ohjaamista pois kalliotilasta.

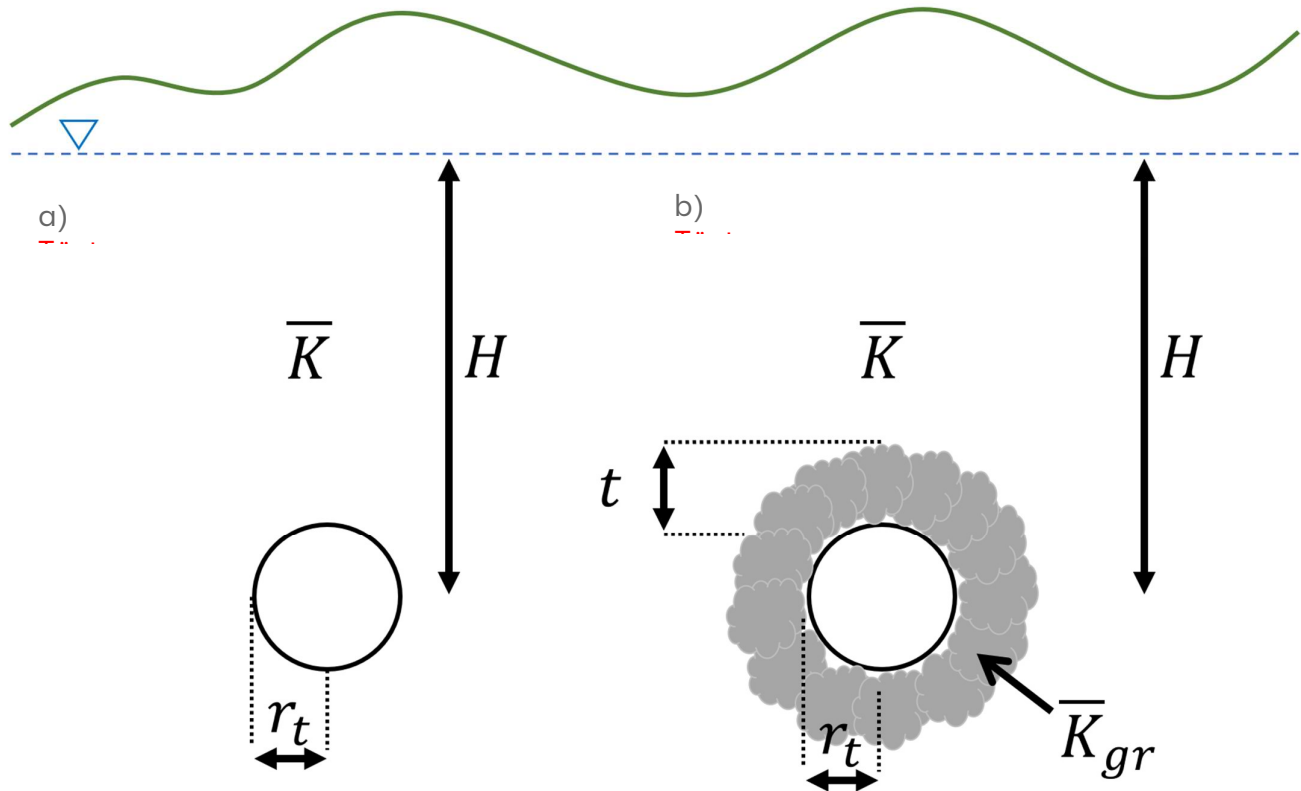
Kalliotilan tiivistyssuunnittelua ohjaavista suunnitteluperusteista merkittävin on kalliotilaan sallittu vuotovesimäärä sekä siitä johdettava tiivistysluokka. Sakatin hankkeen vuotovesien hallinnassa sallittu vuotovesimäärä eli tiivistystavoite ilmoitetaan muodossa [l/min/100 m] tunneleille ja [l/min] maanalaisen kaivoksen alueille. Tunneliosuuden, jolle tiivistystavoitetta määritellään pituus voi vaihdella vapaasti eli tiivistystavoite normalisoitu yksikkö [l/min/100 m] on tapa esittää tulokset yhteismitallisessa muodossa. Samassa tunnelissa tiivistystavoite voi vaihdella tunneliosuuksittain ja maanalaisessa kaivoksessa alueittain ja syvyysuunnassa. Sallitusta vuotovesimäärästä johdetaan kallion tiivistysluokat, joita Suomessa on määritetty esimerkiksi Injektointiohjeessa (BY53, 2006).

Tiivistystavoitteen määrittävä tekijä muodostuu kalliotilan toiminnallisista vaatimuksista tai ympäristövaatimuksista. Osassa tiloja vaadittu tiiveystaso määräytyy kuivatusjärjestelmän rajoitteista, esimerkiksi pumppauskapasiteetista sekä turvallisista työskentelyedellytyksistä kaivoksessa. Kalliotilaan vuotavan veden poispumppaaminen erityisesti syvällä sijaitsevista kalliotiloista voi muodostaa merkittävän käyttökustannusvaikutuksen, joten vuotoveden määrää on mielekästä hallita myös taloudellisesta näkökulmasta. Tiivistystavoite voi määräytyä myös tavoitteesta välttää merkittäviä hydrogeologisia vaikutuksia pohjavesiympäristöön, esimerkiksi maapohjaveden pinnantasoihin.

Sakatin hankkeessa tiivistystavoitteen yhdeksi lähtökohdaksi on valittu pohjaveden virtausmallin tulosaineisto. Tiivistystavoitetta täsmennetään suunnittelun edetessä sekä rakentamisen aikana. Koska mallin mittakaava on koko hankealueen kokoinen, tarkemmassa suunnittelussa huomioidaan myös paikallisia kallioperän hydrogeologisia piirteitä. Tarkemman suunnittelun tavoitteena on kohdistaa tiivistystoimenpiteet kokonaisuuden kannalta merkittävimpiin hydrogeologisiin rakenteisiin. Esimerkiksi, jos rakentamisvaiheessa havaitaan vesimenekkimittauksin ennakoimattomia vettä johtavia vyöhykkeitä, määritetään niille tiivistystavoite ja tiivistys toteutetaan tavoitteen

mukaisesti. Vastaavasti jos kallio osoittautuu mittauksin paikallisesti ennakoitua tiiviimmäksi, päivitetään tiivistystavoitetta ja injektointisuunnitelmaa vastaamaan havaittuja kallio-olosuhteita.

Tulevissa suunnittelu ja toteutusvaiheissa numeerisen pohjavesimallinnuksen tuloksia analysoidaan ja vertaillaan analyttisillä laskentamenetelmillä saatuihin tuloksiin. Esimerkiksi vuotovesimäärät arvioidaan Thiemin kaivoyhtälöön (Gustafson, 2012) perustuvilla analyttisillä menetelmillä sekä injektioimattomalle tunnelille, että injektoidulle tunnelille. Suunnittelun edetessä tarkasteluja kohdistetaan kokonaisuuden kannalta merkittävimpiin rakenteisiin. Vuotovesimäärien laskennassa käytettävien analyttisten laskentamenetelmien perusoletuksia on esitelty kuvassa 10.



Kuva 10. Vuotovesimäärien laskentaan käytettävän analyttisen menetelmän konseptuaalinen kuvaus: a) injektioimaton tunneli: tunneliin vuotava vesimäärä riippuu kallion vedenjohtavuudesta (K), pohjaveden painekorkeudesta (H) ja tunnelin poikkileikkauksen säteestä r_t , b) Injektioimalla tiivistetty tunneli: Tunneliin vuotava vesimäärä riippuu edellisten lisäksi tunnelia ympäröivän injektoidun vyöhykkeen vedenjohtavuudesta (K_{gr}) ja vyöhykkeen paksuudesta (t). (muokattu lähteestä Gustafson, 2012)

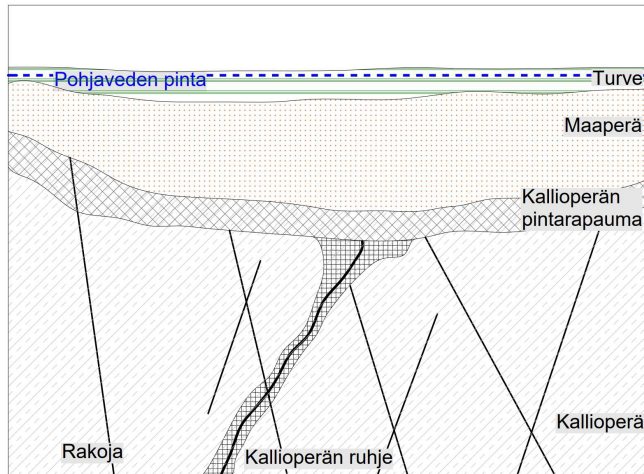
Tiivistystavoitteen saavuttamiseen valitaan tiivistysstrategia. Esimerkkejä mahdollisista tiivistysstrategioista on esitetty kuvassa 11 (c – e). Kallion tiivistys voidaan toteuttaa kriteeripohjaisella tai systemaattisella esi-injektioinnilla (kuva 11c), jälki-injektioinnilla (kuva 11d) sekä erilaisilla vedenpitävillä membraani- ja vesipainerakenteilla (Kuva 11e). Usein näitä menetelmiä yhdistetään halutun lopputuloksen saavuttamiseksi.

Injektointi on menetelmä, jossa tunnelia ympäröivän kalliomassan vettä johtavat raot ja rikkonaisuusvyöhykkeet tiivistetään pumppaamalla niihin injektointimassaa kalliota poratuista injektointirei'istä. Injektointimassa lujittuu paikalleen ja vähentää kalliotilaan vuotavan veden määrää. Injektointimassat ovat yleisimmin sementtipohjaisia, mutta myös kolloidista silikaa ja erilaisia

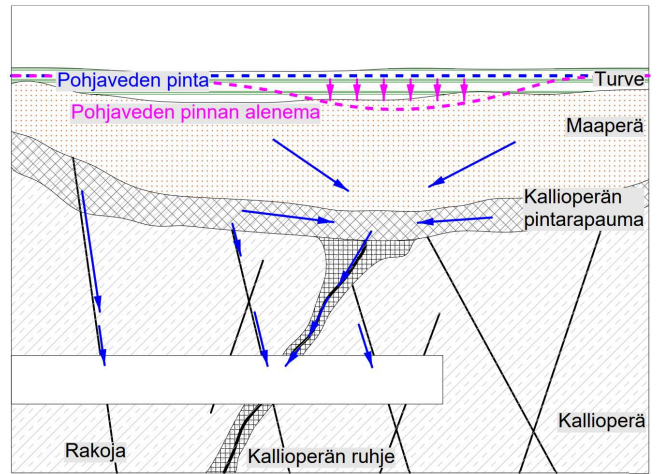
synteettisiä injektointiaineita käytetään. Menetelmä jakaantuu edelleen kahteen pääkategoriaan: esi- ja jälki-injektointiin. Esi-injektointi tehdään nimensä mukaisesti ennen injektoitavan tunneli-osuuden louhintaa. Jälki-injektointi tehdään taas louhinnan jälkeen, tyypillisesti poraamalla louhitystä kalliotilasta injektointireiät kohtisuoraan toteutunutta kalliopintaa vastaan.

Jos vuotovesien hallinnan tavoitteena on mahdollisimman vähäinen vaikutus ympäröivän kallion pohjavesiolosuhteisiin ja pohjaveden pinnantasoihin, on louhinnan jälkeen mahdollista käyttää myös pohjaveden korvauspumppausta (Kuva 11f). Menetelmässä alueella, jolla kalliotilan vaikutuksia pohjaveden pinnantasoihin halutaan kompensoida, maa- ja kallioperään porataan pumppauskaivoja, joista johdetaan paineellista vettä tavoiteltuun sijaintiin akviferissä. Akviferiin pumpattu vesi kompensoi kalliotilan aiheuttamia muutoksia pohjaveden painekorkeuksissa ja mahdollistaa pohjaveden pinnan pysymisen tavoitellulla tasolla. Huomioitavaa on, että menetelmä voi lisätä vesivuotoja kalliotilaan, koska pumppaus voi nostaa veden painekorkeuksia myös kalliotilaa ympäröivässä kalliossa. Menetelmää käytetäänkin yleensä louhintakohteissa herkillä kaupunkialueilla, joissa pohjaveden pinnanalenemat voivat aiheuttaa esim. Rakennusten painumia.

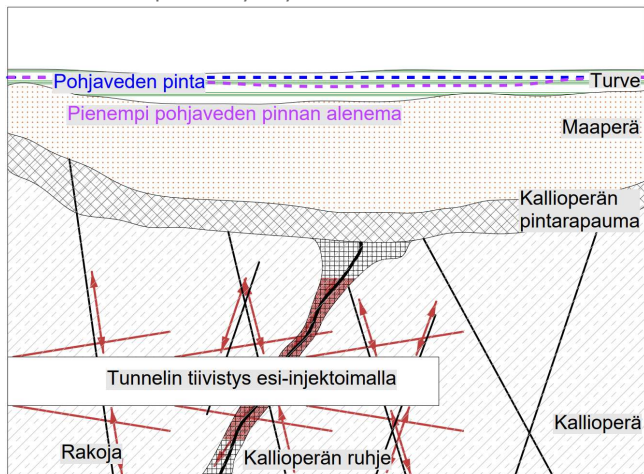
Sakatin maanalainen kaivos



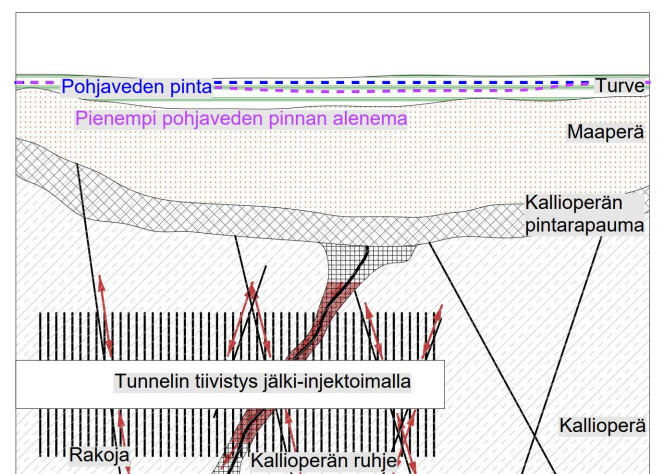
a) Alkutilanne ennen tunnelin louhintaa vettä johtavan kallioperän vyöhykkeen kohdalla



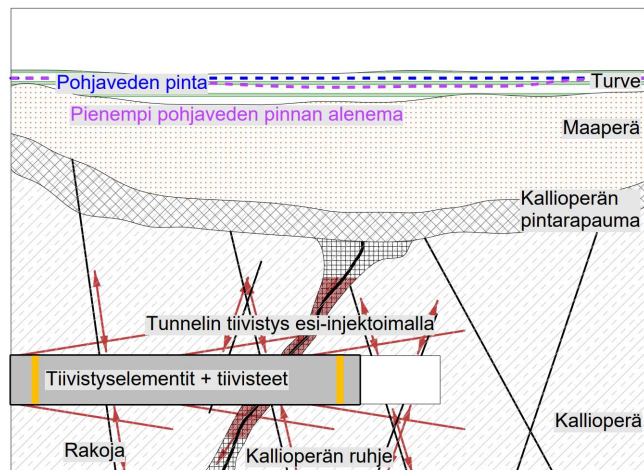
b) Tilanne louhinnan jälkeen ilman tiivistystoimenpiteitä – kalliassa vesivuotoja



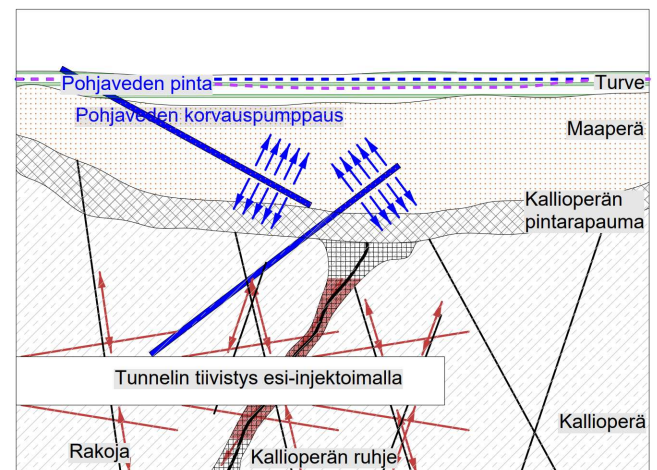
c) Kallion tiivistys esi-injektoimalla



d) Kallion tiivistys louhinnan jälkeen jälki-injektoimalla



e) Jäännösvesivuotojen tiivistäminen vesitiiviillä rakenteella (paikalla tehty tai esivalmisteinen)



f) Pohjaveden pinnan kompensatiopumppaus heikkovyöhykkeen kohdalla

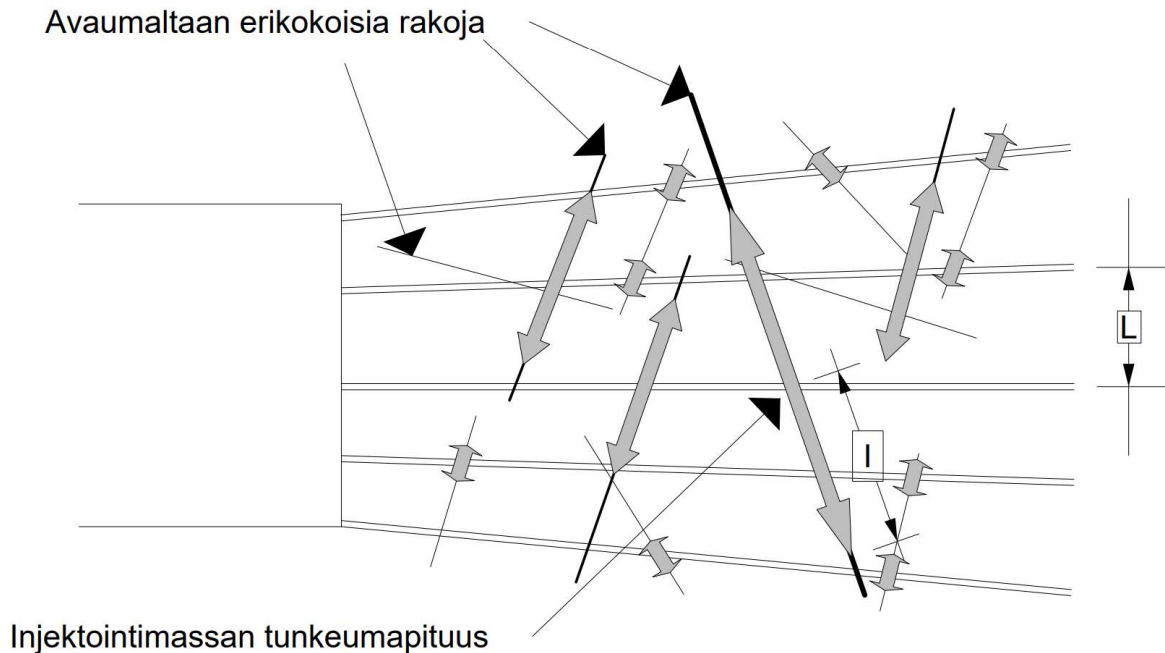
Kuva 11. Esimerkkejä kallion vettä johtavan vyöhykkeen vaikutuksesta pohjavesiin, esimerkkejä tiivistysrakenteista sekä pohjaveden kompensatiopumppauksesta.

Esi-injektoinnin suunnittelussa merkittävimpiä suunnittelun lähtötietoja ovat injektoitavan kalliomassan rakojen arvioidut transmissiviteetit [m^2/s] ja transmissiviteettien jakauma. Transmissiviteetin avulla arvioidaan kalliomassan rakojen vesivuotopotentiaalia sekä injektoitavuutta. Transmissiviteettijakaumasta voidaan laskennallisesti johtaa myös rakojen hydraulinen avauma (mm), jonka perusteella voidaan arvioida kunkin injektointimassan soveltuvuutta kohteeseen sekä saavutettavissa olevaa tiivistystulosta eli injektointitehokkuutta (%). (Gustafson, 2012; Stille, 2015)

Kallion injektoitavuuden arviointiin tarvittava lähtöaineisto on kallion transmissiviteettitietoa. Koska transmissiviteetti- ja kallion vedenjohtavuusmittaukset ovat mittakaavariippuvaisia (Gustafson, 2012; Stille, 2015), tulisi injektoitavuuden arvioinnissa käyttää yksityiskohtaisempaa mitaustietoa kuin kallion vedenjohtavuuden arvioinnissa. Jotta mittaustulokset olisivat edustavia ja käytettäviä injektoinnin suunnitteluun, tulee transmissiviteettimittauksia olla tehtynä riittävä määrä jokaisesta mitattavasta kairareiästä. Stille suosittelee vähintään 100 intervallin testaamista tuplapacker-menetelmällä jokaisesta mitattavasta reiästä (Stille, 2015). Myös mitattavan kairareikäintervallin pituus tulee olla riittävän lyhyt. Edustavan transmissiviteettijakauman saavuttamiseksi mittaussuunnitelman tulee olla noin 2 – 3 m (Kvartsberg et al., 2023). Mittavienkin ennakkotutkimusten jälkeen kallion transmissiviteettiominaisuuksiin jää aina epävarmuuksia, jotka tulee ratkaista optimoimalla injektointiprosessia työmaahavaintoihin ja mittauksiin perustuen.

Kallion esi-injektoinnin mitoituksessa varmistetaan tunnelin ympärille muodostuvan injektoidun vyöhykkeen laajuus ja riittävä kattavuus esi-injektointireikien välisissä raoissa. Esi-injektoinnin suunnittelussa injektointimassa ja sen ominaisuudet mitoitetaan siten, että riittävä injektointimassan tunkeuma (I) saavutetaan (Kuva 12). Minimitunkeuma määritetään injektointireikien etäisyyden (L) perusteella siten, että injektointimassan voidaan katsoa täyttäneen reikien välisen tilan sekä kulkeutuneen tavoite-etäisyydelle injektointiprofiilin ulkopuolelle. Käytännössä injektoitavien rakojen kohtauskulma suhteessa injektointireikiin muuttaa vaadittua tunkeumapituutta, joten tunkeumapituuden laskennassa tulee huomioida myös paikallisten päärakosuuntien orientaatio suhteessa injektointireikiin. (Stille, 2015)

Koska rakojen hydraulisia avaumia voidaan pitää potenssijakautuneena (Gustafson, 2012), injektointisuunnittelussa haasteena on riittävän tunkeumapituuden saavuttaminen. Erityisen tärkeää riittävä tunkeumapituus tiivistyksen tavoitetasoon saavuttamiseen vaadittavissa raoissa. Samaa aikaan tulee välttää liian suurta tunkeumaa injektoitavan kallion isoimmissa raoissa, mikä johtaa injektointimassan ylikulutukseen, injektointimassan kulkeutumiseen liian kauas injektointikohteesta ja injektoinnin epäonnistumistodennäköisyyden kasvuun. Käytännössä pyritäänkin sulkemaan rakoavaumaltaan vain kaikkein suurimmat raot, koska näin saavutettu tiivistystehokkuus riittää yleensä alentamaan kallion transmissiviteettiä riittävästi suhteessa tavoitetasoon. (Stille, 2015)



Kuva 12. Periaatekuva injektointimassan tunkeumasta hydrauliselta avaumaltaan erikokoisiin rakoihin. Injektointimassan tunkeumapituus (I) kasvaa rakoavauman kasvaessa. Reikäväli (L) suunnitellaan siten, että injektointimassan tunkema riittää kattamaan reikien välisen osuuden injektointivista raoista. (muokattu lähteestä: Gustafson and Stille, 2005)

Injektointimassan tunkeuma suunnitellaan yhdistämällä lähtötiedot oletetusta rakojen hydraulisesta avaumasta sekä oletetusta rakovirtausmallista. Rakovirtauksen geometriaa voidaan yksinkertaisimmillaan kuvata kanavina (1D) tai tasoina (2D) (Kuva 12a ja b), joille on molemmille määritettävissä omat tunkeumamallinsa. Injektointimassan virtausominaisuudet (reologia) mitoitetaan täyttämään edellä mainitut tavoitteet, eli riittävä tunkeuma tiivistämisen kannalta merkittävässä raoissa, mutta välttämällä liiallista tunkeumaa avaumaltaan kaikkein isoimmissa raoissa. Sementtipohjaisilla injektointiaineilla säädetään injektointimassan virtaus- ja lujuudenkehitysominaisuuksia esimerkiksi seuraavilla reseptiikan ja injektointisuunnitelman parametreilla: (Stille, 2015)

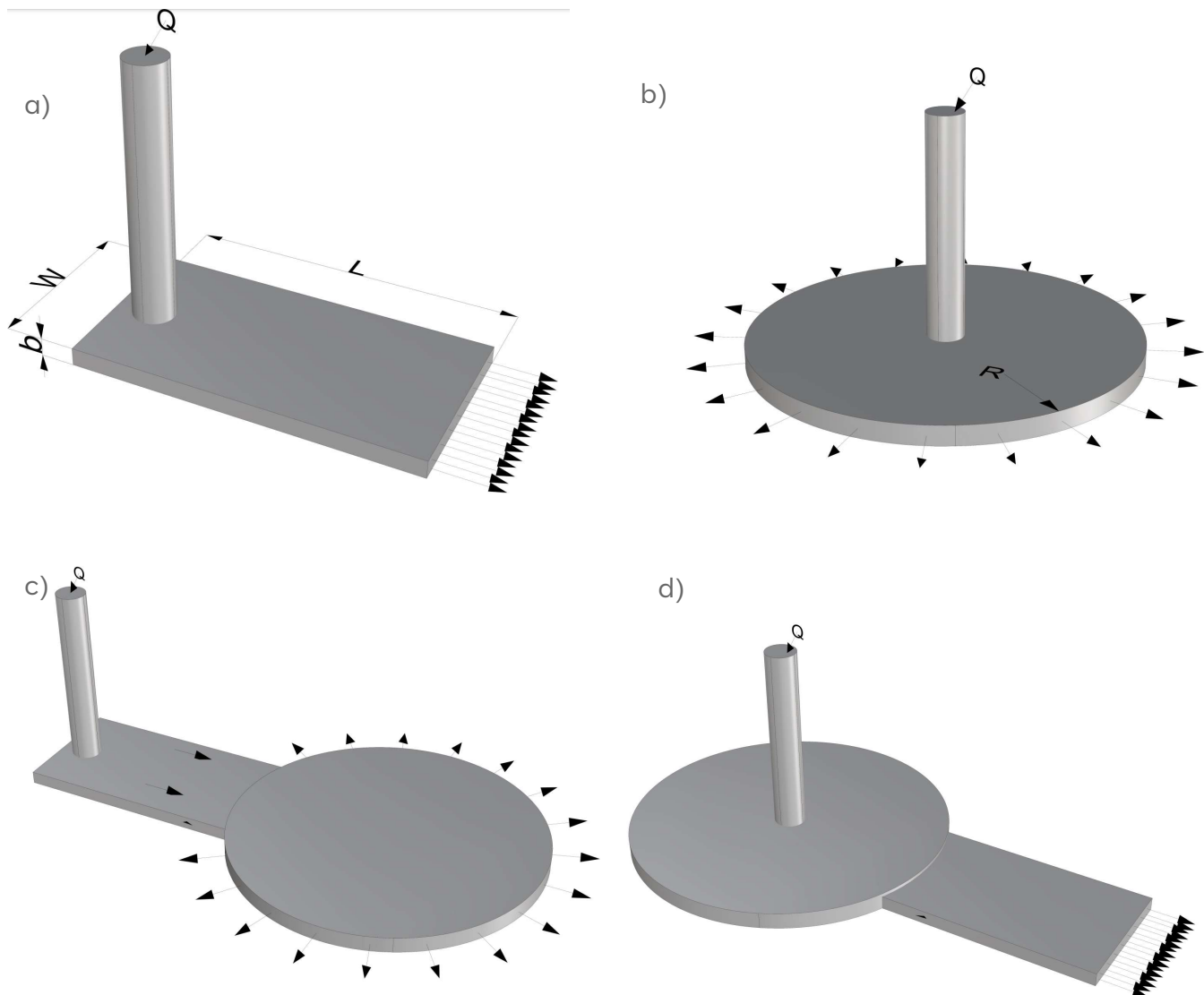
- Sementin raekoko d95
- Myötöraja
- Vesi-Sementtisuhte

Lisäksi injektointimassan tunkeumaan vaikuttavat seuraavat injektointisuunnitelman parametrit:

- Injektoinnin lopetuskriteerit
- Injektointipaine
- Injektointiaika
- Injektointiaineen suurin sallittu menekki

Injektointimassan tunkeuman suunnittelussa haasteena on huomioida erilaiset virtaustavat, joilla rakogeometria vaikuttaa injektointimassan tunkeumaan. Todellisuudessa injektointimassan virtaus voi muodostua 1D- ja 2D-virtausten mielivaltaisena yhdistelmänä (Kuva 13 c ja d), jolloin

yksinkertaistetut virtausmallit eivät sellaisenaan tuota tunkeuman kannalta realistisia tuloksia. Virtauksen dimensionaalisuus on kuitenkin arvioitavissa injektointityön paine- ja virtaamakuvaajista, jotka mahdollistavat virtaustilanteen arvioimisen ajan funktiona. Näin ollen injektointityön onnistuminen vaatii ohjausta ja suunnittelua myös toteutusvaiheessa. Nykyaikaisilla online-mittausmenetelmillä injektointiprosessia on mahdollista seurata ja säätää reaaliajassa. Myös reseptiikkaa ja injektointikriteereitä tulee päivittää toteutusvaiheessa kertyvien havaintojen perusteella. Näistä merkittävistä epävarmuustekijöistä johtuen injektoinnin suunnittelussa ei kannata tavoitella tyhjentävää, kaikkiin hankkeen injektointikohteisiin sopivaa suunnitelmaa, vaan injektoinnin suunnittelussa kannattaa hyödyntää seurantamenetelmiä. (Stille, 2015)



Kuva 13. Esimerkkejä injektointimassan yksinkertaistetuista virtausmalleista injektointireiästä kalliorakoon: a) 1D ka-
navavirtaus, b) 2D radiaalinen virtaus (muokattu lähteestä Stille, 2015) sekä monimutkaisempia yhdistelmävirtaus-
malleja: c) Yhdistetty 1D-2D virtaus, d) yhdistetty 2D-1D virtaus (muokattu lähteestä Kobayashi et al., 2008)

Sakatin maanalainen kaivos

Koska vuotovesien hallinnassa vuotovesimäärien vaatimukset ja injektointisuunnittelu on mielekästä toteuttaa päivittäen suunnitelmia iteratiivisesti hankkeen edetessä ja työmaahavaintojen pohjalta, Sakatin hankkeessa vuotovesien hallinnan suunnittelun pohjana toimii Eurokoodi 7 (EN1997-1:2004, 2004) seurantamenetelmä. Kooste tämänhetkisistä vuotovesien hallinnan suunnitteluperusteista on esitetty taulukossa 6.

Sakatin hankkeessa ensisijaiseksi tiivistysstrategiaksi vinotunneleille on valittu kriteeripohjainen esi-injektointi, mutta tiivistykseen voidaan käyttää myös muita menetelmiä. Injektointimenetelmistä esi-injektointi toimii tyypillisesti parhaiten rakoilleen kallion tiivistämisessä, jälki-injektointi vaatii tyypillisesti tiivistystoimenpiteiden ulottamisen huomattavasti varsinaista vuotokohtaa laajemmalle alueelle.

Taulukko 6. Sakatin hankkeen vuotovesien hallinnan yleiset ja vinotunnelia koskevat suunnitteluperusteet. Suunnitteluperusteet täsmentyvät suunnittelun edetessä.

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Vuotovesien hallinnan yleiset suunnitteluperusteet		
Tiivistystavoite	Kaikille Sakatin hankkeessa louhittaville tiloille määritetään tavoitteellinen tiivistystaso	Tiivistystaso ilmoitetaan muodossa [l/min/100 m tunneleille] ja [l/min] kaivoksen alueille.
Tiivistystavoitteen määrittäminen	Tiivistystavoite määräytyy tilan toiminnallisten vaatimusten tai ympäristövaatimusten perusteella.	Tiivistystavoitteen määrittelyssä tarkastellaan tilan kuivatus- ja pumppausjärjestelmien kapasiteettia, turvallisia työedellytyksiä sekä pohjavesivaikutusten minimointia. Tiivistystavoitteet kohdennetaan vuotovesien kokonaishallinnan kannalta merkittävimpiin hydrogeologisiin rakenteisiin. Suunnittelussa vältetään osaoptimointia.
Tiivistystavoitteen määrittäminen menetelmät	Numeerinen Analyttinen	Tiivistystavoitteen määrittelyn lähtökohtana käytetään numeerisen pohjavesimallin tulosaineistoja. Numeerisen pohjavesimallin voidaan katsoa kuvaavan kalliomassan alueellista keskimääräistä vedenjohtavuutta ja malli on laajuudeltaan koko hankkealueen kokoinen. Näin ollen tiivistystavoitetta pitää täsmentää paikallisin analyysein esimerkiksi kallioperän hydrogeologisesti merkittävien rakenteiden kohdalla. Tiivistystavoitetta täsmennetään paikallisesti numeerisin sekä analyyttisin menetelmin. Analyyttisistä menetelmistä käytetään Thiemin kaivoyhtälöstä johdettuja vuotovesimäärän arviointimalleja (Gustafson, 2012) eri kallion transmissiviteettiolosuhteissa. Tiivistystavoitteet täsmennetään suunnittelun edetessä.
Tiivistyssuunnittelun menetelmät	Seurantamenetelmä	Sakatin hankkeessa käytetään tiivistyssuunnittelussa Eurokoodi 7 mukaisia seurantamenetelmiä.
Vinotunnelin suunnitteluperusteet		
Tiivistystavoite	Tiivistystavoitteen lähtökohtana toimivat numeerisen pohjaveden virtausmallin tulokset. Tiivistystavoitetta määrittävät myös TBM-laitteen pumppauskapasiteetti sekä turvalliset työskentelyolosuhteet.	Esimerkki tiivistystavoitteen määrittämisestä on esitetty luvussa 8. Tiivistystavoitetta täsmennetään suunnittelun edetessä.

Sakatin maanalainen kaivos

Muuttuja	Arvo	Kuvaus
Tiivistysstrategia	Kriteeripohjainen esi-injektointi	Vinotunnelin ensisijaisena tiivistysstrategiana käytetään kriteeripohjaista esi-injektointia. TBM-laitteesta porataan tunnustelureiät, tunnustelureikien vesivuodot mitataan ja vuotokriteerin ylittyessä injektointi käynnistetään. Suunnittelun edetessä karttuu myös lisää tietoa kallioperän hydrogeologisesti merkittävistä vyöhykkeistä. Näiden analyysien perusteella voidaan määrittää osa tunnetuista hydrogeologisista vyöhykkeistä systemaattisesti injektoitavaksi. Myös vinotunnelin louhinnan vaiheistettu toteutus mahdollistaa tiivistysstrategian kohdentamisen vuotovesien hallinnan kannalta olennaisiin rakenteisiin. Ensimmäisen tunnelin rakentamisen aikana kertyvää hydrogeologista aineistoa käytetään ohjaamaan suunnittelua jäljempänä tulevien vinotunneliosuuksien tiivistykseen.
Toissijaiset tiivistysstrategiat	Jälki-injektointi	Jälki-injektointia käytetään esi-injektoinnin tulosten parantamiseen tilanteissa, joissa tiivistystavoitetta ei saavuteta esi-injektoinnilla.
Toissijaiset tiivistysstrategiat	Membraani ja vesipainerakenne	Tämänhetkisen suunnittelun lähtötietojen perusteella Sakatin hankealueen tiivistystavoitteet pystytään saavuttamaan esi-injektoimalla. Erillisen membraanin ja vesipainerakenteen tarvetta arvioidaan suunnittelun edetessä uusien lähtötietojen karttuessa.
Esi-injektoinnin aloituskriteeri	Tunnustelurei'istä mitattu vesi-vuotomäärä Tunnustelurei'istä mitattu vedenjohtavuus	Aloituskriteerin numeeriset arvot täsmentyvät suunnittelun edetessä.
Esi-injektointimateriaalit	Tavanomainen portland sementti (OPC) Mikrosementti (UFC) Kolloidinen silika Synteettiset injektointiaineet (PUR)	Tämänhetkiset hydrogeologisen aineiston analyysit ovat osoittaneet, että vinotunnelin linjauksella kallion transmissiviteetin ja rakojen hydraulisen avauman jakaumissa on merkittävää vaihtelua erityisesti syvyysuunnassa. Jotta tiivistystavoitteet voidaan täyttää kaikilla vinotunnelilinjauksen alueilla, tulee myös erilaisia injektointimateriaaleja käyttää. Tavanomaisella portlandsementillä tiivistetään rakenteet, joiden todennettu hydraulinen avauma on suuri. Tyypillisesti näitä rakenteita esiintyy Sakatin vinotunnelilin alueella kallion pintaosissa ja merkittävässä rakovyöhykkeissä. Vastaavasti syvemmälle kallioperään siirryttäessä keskimääräinen hydraulinen avauma pienenee, jolloin myös injektointimateriaalin tunkeutuvuutta pitää lisätä joko sementin raekokoa pienentämällä tai käyttämällä silika tai polyuretaanipohjaisia injektointiaineita. Käytettävät injektointiaineet eivät saa vaikuttaa negatiivisesti luokiteltujen pohjavesialueiden vedenlaatuun.
Tunnustelureikämäärä	4	Tunnustelureikämäärä perustuu nykyiseen injektoinnin tyyppisuunnitelmaan. Tunnustelureikämäärää vähennetään hydrogeologisesti vähemmän sensitiivisissä kallio-osuuksissa ja vastaavasti kasvatetaan hydrogeologisesti merkittäviä vyöhykkeitä lähestyttäessä. Tunnustelureikämäärä täsmentyy suunnittelun edetessä.
Injektointiviuhkan reikämäärä	20 injektointireikää	Injektointiviuhkan reikämäärä perustuu nykyiseen injektoinnin tyyppisuunnitelmaan. Injektointireikien määrää muutetaan todennettujen kallio-olosuhteiden perusteella.

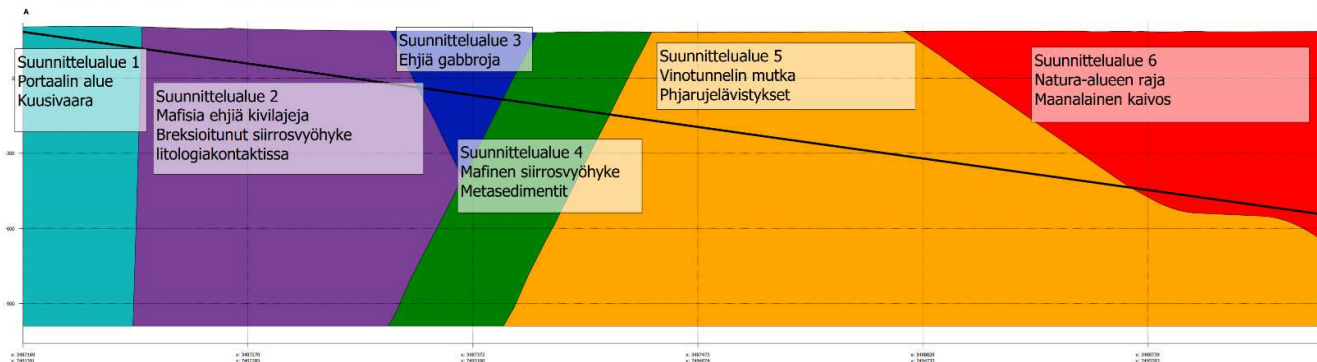
Muuttuja	Arvo	Kuvaus
		Tyypisuunnitelmia ja reikämäärää täsmennetään suunnittelun edetessä.
Injektointiviuhan pituus	44.5 m	Injektointiviuhan pituus perustuu nykyiseen injektoinnin tyyppisuunnitelmaan. Injektointiviuhan pituutta muutetaan todennettujen kallio-olosuhteiden perusteella. Tyypisuunnitelmia ja injektointiviuhan pituutta täsmennetään suunnittelun edetessä.
Injektointiviuhan limitys	4.5 m	Injektointiviuhan limityksellä tarkoitetaan pituutta, jolla peräkkäiset injektointiviuhat ulotetaan toistensa päälle tiivistyksen kattavuuden varmistamiseksi. Tyypillisesti limitys on muutamia metrejä. Injektointiviuhan limitys perustuu nykyiseen injektoinnin tyyppisuunnitelmaan. Tyypisuunnitelmia ja limitystä täsmennetään suunnittelun edetessä.

4 Suunnittelun lähtötiedot

4.1 Suunnittelualueet

Sakatin hankkeen suunnittelussa maanalainen kaivos on jaettu kuuteen eri suunnittelualueeseen, joihin kuuluvat kaivoksen sisäänkäynnin alue Kuusivaarassa, vinotunneliosuus ja esiintymän alue eli varsinaisen maanalaisen kaivoksen alue. Suunnittelualueet on havainnollistettu kuvassa 14. Suunnittelualuejaon pohjana toimivat geologiset-, geotekniset- ja suunnittelualakohtaiset reunaehdot. Maanalaisista tiloista erityisesti vinotunnelin alueelle sijoittuu paljon erilaisia geologisia ympäristöjä, joiden lisäksi tunnelilinjauksen sijainti syvyysuunnassa muuttuu huomattavasti tunnelinlinjan edetessä kohti esiintymän aluetta. Tämän vuoksi maanalainen kaivos on jaettu suunnittelualueisiin, joilla kaikilla on omat painopisteensä teknisessä suunnittelussa. Yleiskuvaus suunnittelualueista on esitetty taulukossa 7. Lisäksi suunnittelualueiden geologisista olosuhteista on esitetty yleiskuvaukset taulukossa 8.

Sakatin Hanke - Pituusleikkaus suunnittelualueista



Kuva 14. Sakatin hankkeen maanalaisen kaivoksen suunnittelualueet.

Suunnittelualueilla korostuvat erilaiset suunnittelutyötä ohjaavat tekijät. Esimerkiksi suunnittelualueella 1 korostuvat kaivoksen sisäänkäynnin stabiliteetti ja vesivuotojen hallinta, kalliokaton paksuus sekä erityisesti vettä johtavien rakenteiden esi-injektointi. Mafisilla kivilajeilla (suunnittelualue 2) suunnittelun fokus on puolestaan TBM-louhinnan aloituskohdan valinnassa ja lujituksen optimoinnissa. Siirrosvyöhykkeiden esi-injektointi sekä tuentamenetelmien valinta korostuvat voimakkaasti siirrostuneilla osuuksilla suunnittelualueilla 4 ja 5. Kallioperän rakenteet ja niiden suhde

Sakatin maanalainen kaivos

pohjaveteen vaikuttavat ratkaisevasti suunnitteluun, erityisesti Natura-alueen ja esiintymän läheisyydessä (suunnittelualue 6).

Taulukko 7. Sakatin hankkeen maanalaisen kaivoksen suunnittelun suunnittelufokus suunnittelualueittain.

Alue	Kuvaus	Suunnittelufokus
1	Kaivoksen sisäänkäynti ja Kuusivaaran alue	Kaivoksen sisäänkäynnin stabiilitetti Kalliokaton paksuus Kaivoksen sisäänkäynnin vesivuodot Vinotunnelin alkuosa vettä johtavassa kalliossa – vuotovesien hallinta
2	Vinotunnelin alue Mafisia ehjiä kivilajeja Lopussa breksioitunut heikkousvyöhyke kvartsiitin ja gabbbron kontakteissa	Mafisen vulkaniitin lujuusominaisuudet hyvin korkeat – TBM-louhinnan kokoonpano ja aloituskohdan valinta Lujituksen optimointi ehjässä kalliossa Siirrosvyöhykkeestä mitattu ympäröivää ehjää kalliota korkeampia vedenjohtavuuksia – siirroksen esi-injektointi TBM louhinnan etenemä
3	Vinotunnelin alue Pääosin ehjiä ja lujia gabbroja Kapeita rikkonaisuusvyöhykkeitä	Lujituksen optimointi ehjässä kalliossa TBM louhinnan etenemä
4	Vinotunnelin alue Voimakkaasti siirrostunut ja deformatunut heikkousvyöhyke ja siirros Siirrosbreksiaa ja savia	Todennetut kallion lujuusominaisuudet ympäröivää kalliomassaa merkittävästi pienemmät Liuskeisuus Savivyöhykkeet
5	Vinotunnelin alue Vinotunnelin mutka ja pohjaruhjelävistykset	Pohjaruhjelävistysten lujitus Pohjaruhjelävistysten vuotovesien hallinta
6	Natura-alueen raja ja esiintymän alue Pääosin ehjiä ultramafisia kivilajeja (Peridotiitti) Paikoin rikkonaisia alueita esiintymän jalkapuolella (Afaniitti)	Kallion vallitseva (in-situ) jännitystila Jännitystilan vaikutukset louhittaviin tiloihin ja lujitus suunnitteluun

Taulukko 8. Yleiskuvaus geologisista olosuhteista suunnittelualueittain.

Alue	Kuvaus	Geologia	alkupaalu	loppupaalu	pituus (m)
1	Kaivoksen sisäänkäynti ja kuusivaaran alue	Mafiset vulkaniitit Peliitit	0	470	470
2	Vinotunnelin alue Mafisia ehjiä kivilajeja Lopussa breksioitunut heikkousvyöhyke kvartsiitin ja gabbbron kontakteissa	Mafiset vulkaniitit Kvartsiitti Breksia Gabbro	479	1580	1110

Sakatin maanalainen kaivos

Alue	Kuvaus	Geologia	alkupaalu	loppupaalu	pituus (m)
3	Vinotunnelin alue Pääosin ehjiä ja lujia gabbroja Kapeita rikkonaisuusvyöhykkeitä	Gabbro	1580	1920	340
4	Vinotunnelin alue Voimakkaasti siirrostunut ja deformatunut heikkousvyöhyke ja siirros Siirrosbreksiaa ja savia	Metasedimentti Breksia	1920	2350	430
5	Vinotunnelin alue Vinotunnelin mutka ja pohjaruhjelävistykset	Metasedimentti Gabbro	2350	4430	2080
6	Natura-alueen raja ja esiintymän alue Pääosin ehjiä ultramafisia kivilajeja (Peridotiitti) Paikoin rikkonaisia alueita esiintymän jalkapuolella (Afaniitti)	Peridotiitti Afaniitti	4430	5215	785

4.2 Kallionäytekairaukset

Suunnittelualueilla 2–4 toteutettiin kattava kairausohjelma kallioteknisistä olosuhteista vuosina 2023–2024. Osa kairauksista suunnattiin vinotunnelin suuntaisesti. Suunnittelualueella 2 kairaukset kattavat pääosin mafisia vulkaniitteja, päättyen lopussa breksioituneeseen heikkousvyöhykkeeseen. Suunnittelualueella 3 kairauksissa löydetty rikkonaisuusvyöhykkeet olivat kapeita. Suunnittelualueella 4 tavoitteena oli ymmärtää voimakkaasti siirrostuneen ja deformatuneen vyöhykkeen laajuus sekä täsmentää ruhjelävistysten sijainnit ja pituudet. Kairauskaudella 2024–2025 suunnittelualueelle 5 tullaan kairaamaan vastaavat vaakasuuntaiset kairareitit vinotunnelinlinjalla. Suunnittelualueen 6 osalta on olemassa eniten kairautietoa, koska alueella on toteutettu useiden vuosien ajan malminetsintätutkimuksia.

Taulukko 9. Sakatin hankkeessa toteutetut kallionäytekairausmäärät suunnittelualueittain

Alue	Kuvaus	Kairareikien kokonais- määrä suunnittelu- alueella	Kairareikien kokonaispituus suunnittelualueella (m)	Vaakasuntainen vinotunnelin suuntainen kairaus (m)
1	Kaivoksen sisäänkäynti ja Kuusivaaran alue	12	470	0
2	Mafisia ehjiä kivilajeja Lopussa breksioitunut heikkousvyöhyke kvartsiitin ja gabbbron kontakteissa	12	3320	1440
3	Pääosin ehjiä ja lujia gabbroja Kapeita rikkonaisuusvyöhykkeitä	3	1060	500
4	Voimakkaasti siirrostunut ja deformatunut heikkousvyöhyke ja siirros Siirrosbreksiaa ja savia	14	3500	998
5	Vinotunnelin mutka ja pohjaruhjelävistykset	13	8920	0
6	Natura-alueen raja ja esiintymän alue Pääosin ehjiä ultramafisia kivilajeja (Peridotiitti) Paikoin rikkonaisia alueita esiintymän jalkapuolella (Afaniitti)	Yli 500		0

4.3 Kalliotutkimukset

Sakatin hankkeessa kalliolaatua kartoitetaan osana normaalia malminetsintää. Kalliosta kairatuista kairasydännäytteistä kartoitetaan kaivos- ja kallioteknisen suunnittelun lähtötiedoiksi kalliolaatutiedot Q- ja RG-kallioluokituksen parametrit. Kallion luokittelu toimii lähtökohtana kaivos- ja kallioteknisessä suunnittelussa. Kallionlaatukartoituksessa kartoitetut kallionlaatutiedot on esitetty taulukossa 10.

Geoteknisiä kartoitustietoja, lujuustestejä ja hydrogeologisia tutkimuksia hyödynnetään kallioluokituksen perustana. Lisäksi tiedonhallinnassa noudatetaan tarkkoja QAQC-laadunvarmistusprosesseja, jotta tutkimustulokset tukevat suunnittelua ja toteutusta.

Taulukko 10. Sakatin hankkeen kalliomekaanisen ja kalliolaatukartoituksen aineistot.

Aineisto	Sisältö	Kuvaus
Kalliomekaaninen kartoitus (loggaus)	Geometria: - Reikätkunus - Kairasydämen halkaisija - Alkusyvyys - Loppusyvyys RG-luokituksen parametrit: - Raekoko - Tekstuuri - Rapautuminen - Kallioluokka Q-luokituksen parametrit - RQD - J_n - J_r - J_a - Q' - Kalliolaatuluokka RMR-luokituksen parametrit - 4Ab - 4Ac - 4Ad - 4Ae GSI: - GSI-luku Muut kalliomekaaniset parametrit: - Kivilaji - Rakotäytteet - Rakotäytepaksaus - Rakojen määrä - Rakotiheys	Kalliomekaaninen loggausdata toimii lähtötietona kallion laatuarvioinnille, geotekniselle kalliomassamallille sekä lujitusuunnittelulle.
Kallion epäjatkuvuuskohtien loggaus (rakosuunnat)	Rakojen orientaatio - Syvyys - Alpha-kulma - Beta-kulma Q-luokituksen parametrit: - J_r - J_a Rakotiedot: - Täytteet - Huomautukset	Rakojen kartoitustiedot toimivat lähtökohtana kallion pääarakosuuntien arvioinnille sekä numeerisille analyyseille sekä DFN-mallinnukselle.

Sakatin maanalainen kaivos

Aineisto	Sisältö	Kuvaus
Point Load Test – testit	PLT testausdata: - Kairasydämen halkaisija - Syvyys - L (MPa) - Is50 (MPa)	PLT testausdata on indikatiivinen lujuustestaineisto, jolla voidaan testata verrattain nopeasti ja tilastollisesti kattavasti suuri määrä näytteitä. PLT-testausaineisto on korreloitavissa laboratoriotason lujuustestien tuloksiin, jolloin PLT-mittausaineistoa voidaan käyttää kallion lujuusominaisuuksien jakauman arvioinnissa.

Kalliomassan mekaanisia lujuusominaisuuksia hyödynnetään vinotunnelin suunnittelussa TBM laitteen etenemämitoituksessa, kalliomekaanisten mallien lähtötietona sekä lujitus suunnittelun lähtötietona. Sakatin hankkeessa toteutetut kallionäytteiden lujuustestauskampanjat on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Sakatin hankkeessa toteutetut kallionäytteiden lujuustestikampanjat.

Vuosi	Laboratorio	Näytemäärät	Testaussisältö	Kuvaus
2013	Luleå University	Testattu: 264 UCS 14 Kimmomoduuli	Kallion lujuustestit esiintymän alueelle: - UCS	Kimmomoduulaineisto rajallinen.
2020	SMCOY	Testattu: 12 UCS 15 TCS 24 BTS 12 CAI	Kallion lujuustestaus vinotunnelin ja esiintymän alueella - UCS - TCS - BTS - CAI	Tuloksia voidaan pitää luotettavina ja hyvin dokumentoituina.
2021	SMCOY	Testattu: 13 UCS 7 TCS 30 BTS 17 CAI	Kallion lujuustestaus vinotunnelin ja esiintymän alueella - UCS - TCS - BTS - CAI	Tuloksia voidaan pitää luotettavina ja hyvin dokumentoituina.
2021	SMCOY	Testattu: 4 UCS 4 TCS 8 BTS 4 CAI	Kallion lujuustestaus esiintymän alueella, fokus malmin testaamisessa - UCS - TCS - BTS - CAI	Tuloksia voidaan pitää luotettavina ja hyvin dokumentoituina.
2024	SMCOY	Näyteistetty: 270 näytettä Testatut osanäytteet: 179 UCS (sis. E and vp) 30 TCS 169 BTS 28 CAI	Testauskampanja kairauskampanjan 2023–2024 tavoitteena vinotunnelin ja tarvekilouhoksen edustava tilastollinen otos suunnittelualueilta 2 - 4. Näyteistetyt kairareiät: - 23KUU030 - 23KUU031 - 23KUU032 - 23KUU033 - 23KUU034 - 23KUU035 - 24KUU036 - 24KUU037 - 24KUU038 - 24KUU039 - 24KUU040 - 24KUU041 - 24KUU042	Erittäin edustava ja laaja tilastollinen otos. Tuloksia voidaan pitää luotettavina ja hyvin dokumentoituina.

Vuosi	Laboratorio	Näytemäärät	Testaussisältö	Kuvaus
			- 23HYD056 - 24MOS8294 - 24MOS8294B	
			Tehdyt testit: - UCS - TCS - BTS - CAI - JST	

4.4 Mallit

Sakatin hankkeessa suunnittelun lähtötietona toimii useita geologisia malleja sekä numeerisia laskentamalleja. Sakatin hankkeessa hyödynnettävät geologiset ja numeeriset laskentamallit on koostettu Taulukko 12.

Geologiset mallit ovat pääosin Leapfrog-ohjelmistolla laadittuja geologisia yhdistelmämallia, jotka yhdistävät taulukkomuotoista lähtötietoaineistoa, esimerkiksi kairareikätietoja, kairareikästä kartoitettua ja mitattua tietoa sekä geofysiikan mittausaineistoa, joiden pohjalta tulkitut kallioperän osa-alueet on mallinnettu kolmiulotteisiksi objekteiksi (solidit ja tasopinnat). Sakatin litologinen malli kuvaa hankealueen kallioperän kivilajit ja kivilajiyksiköt. Sakatin rakennegeologinen malli kuvaa hankealueen kallioperän rakennegeologiset piirteet, kuten heikkous- ja ruhjevyyhykkeet. Sakatin geotekninen malli koostaa yhteen geo- ja kalliotekniset kartoitustiedot, kivilajien lujuus- testit, litologiatiedot yhdeksi geotekniseksi kalliomassamalliksi, jossa kalliolaadun kannalta olennaiset tiedot on jaoteltu geoteknisiksi yksiköiksi ja 3D-mallinnettu solideiksi.

Geologisten mallien lisäksi Sakatin hankkeessa on laadittu numeerisia malleja, joita hyödynnetään suunnittelun lähtötietojen sekä reunaehtojen tuottamiseen. Numeerinen kalliomekaaninen malli tarkastelee kalliomekaanisia ilmiöitä, kuten kallion liikuntojen mahdollisuutta kaivoksen louhinnan seurauksena, ja tuottaa reunaehdot kaivossuunnitteluun. Numeerinen pohjaveden virtausmalli on toiminut ympäristövaikutusten arvioinnin pohjana pohjavesivaikutusten arvioinnin osalta. Numeerisen pohjavesimallinnuksen tuloksia hyödynnetään vuotovesien hallinnan suunnittelun alustavina lähtökohtina.

Taulukko 12. Sakatin hankkeen tuenta- ja tiivistyssuunnittelussa hyödynnettävät geologiset ja numeeriset laskentamallit.

Malli	Tyyppi	Status	Kuvaus
Litologinen malli	Geologinen Leapfrog 3D-malli	2023	Litologinen malli käsittää Sakatin litologiset yksiköt ja pääkivilajit mallinnettuina solideiksi esiintymän ja vinotunnelin alueelta.
Rakennegeologinen malli	Geologinen Leapfrog 3D-malli	2023	Rakennegeologinen malli käsittää Sakatin rakennegeologiset pääepäjatkuvuuskohdat, eli ruhjeet ja heikkousvyöhykkeet mallinnettuina solideina tai tasopintoina esiintymän alueella. Rakennegeologinen malli päivittyy vaakakairaustiedon perusteella myös vinotunnelinlinjaukselle.
Geotekninen kalliomassamalli	Geologinen Leapfrog 3D-malli	2024	Geotekninen kalliomassamalli käsittää geoteknisen loggausaineiston sekä litologisen ja rakennegeologisen malliaineiston pohjalta jatkojalostetun geoteknisen

Malli	Tyyppi	Status	Kuvaus
			kalliomassan jaoteltuna geoteknisesti samankaltaisiin vyöhykkeisiin.
			Geoteknistä kalliomassamallia käytetään lähtötietona kaivos- ja tunnelisuunnittelussa sekä geomekaanisessa mallinnuksessa.
Geomekaaninen malli	Numeerinen 3D	2024	Geomekaaninen malli on numeerinen 3D-malli, jolla tarkastellaan kaivoksen louhinnan kalliomekaanisia vaikutuksia hankealueen kalliomassaan.
Numeerinen pohjaveden virtausmalli	Numeerinen 3D	2024	Pohjaveden virtausmalli on numeerinen 3D-malli, jolla tarkastellaan kaivoksen maanalaisten tilojen rakentamisen vaikutuksia ympäröivään pohjavesisysteemiin sekä maanpinnan maakerrosten pohjavesikerrokseen.

5 Seurantaohjelmat

Osana Sakatin hankkeen seuraavia suunnitteluvaiheita laaditaan seuranta- ja monitorointiohjelmat, jotka tuottavat lähtöaineistoa suunnitelmien iterointiin erityisesti kaivoksen rakentamis-, toiminta- ja sulkemisvaiheen aikana. Kaivoksen tuennan ja vuotovesien hallinnan kannalta olennaiset seurantaohjelmat ovat hydrogeologinen seurantaohjelma sekä kalliomekaaninen seurantaohjelma. Hydrogeologinen seurantaohjelma on kehittynyt jo kaivoksen suunnittelun aikana ja hankealueen maa- ja kallioperän pohjavesiseurannasta on kertynyt aineistoa jo useiden vuosien ajalta. Tässä luvussa esitellään kaivoksen tiivistyksen ja tuennan kannalta merkittävimmät seurantaohjelmat.

5.1 Kalliomekaaninen seurantaohjelma

Kalliomekaaninen seurantaohjelma tuottaa tietoa Sakatin hankkeen kalliomekaanisten muutosten seurannasta, joka palvelee esimerkiksi kallion tuennan suunnittelua. Seurannan tavoitteena on varmistua kalliomassaan ja suunnitteluun liittyvien parametrien oikeellisuudesta sekä päivittää suunnitelmia tarpeen vaatiessa. Kalliomekaanisessa seurantaohjelmassa voidaan käyttää esimerkiksi seuraavia mittausmenetelmiä:

- Siirtymämittaukset
 - o Tarkkavaaitus
 - o Konvergenssimittaus
 - o Ekstensometrimittaus
- Kuormitusmittaus
 - o Venymäpultit
- Jännitystilän seurantamittaus
 - o Irtikairauskennot

Kalliomekaanisen seurantaohjelman tuottamia tietoja käytetään osana kalliotilojen lujituksen lopullista suunnittelua kaivoksen rakennus- ja toimintavaiheissa. Eurokoodi 7:n mukaisen suunnitteluprosessin mukaisesti ennen rakentamisen aloittamista on määritettävä rakenteen sallitun käyttäytymisen rajat sekä laadittava seurantaohjelma, jonka perusteella voidaan osoittaa, että mitattu rakenteen käyttäytyminen on sallituissa rajoissa (EN 1997-1:2004, 2004). Esimerkiksi siirtymämittausten tuloksia verrataan ennen louhintaa ja heti louhinnan jälkeen, jotta voidaan verifioida kallion lujitus suunnitelman kannalta keskeiset laskennalliset oletukset. Lujitus suunnitelmat

päivitetään vastaamaan mittaustuloksia ja tarvittaessa kallion lujitusta lisätään. Pidemmällä aikavälillä seurataan kaivoksen louhinnan aiheuttamien jännitystilamuutosten vaikutuksia olemassa oleviin kalliotiloihin.

5.2 Hydrogeologinen seurantaohjelma

Hydrogeologinen seurantaohjelma tuottaa tietoa kallion vuotovesien hallinnan suunnitteluun. Sakatin hankkeessa hydrogeologista seurantaohjelmaa on kehitetty osana kaivoksen suunnittelua ja ennakkotutkimuksia. Osana hydrogeologisia tutkimuksia toteutettu hankealueen perustilaseurantaverkko sisältää esimerkiksi jatkuvatoimisia online- sekä manuaalisia pohjaveden pinnan mittaustuloksia, hydraulisen painekorkeuden mittauksia pietsometrein sekä pohja- ja pintavesinäytteenottoa.

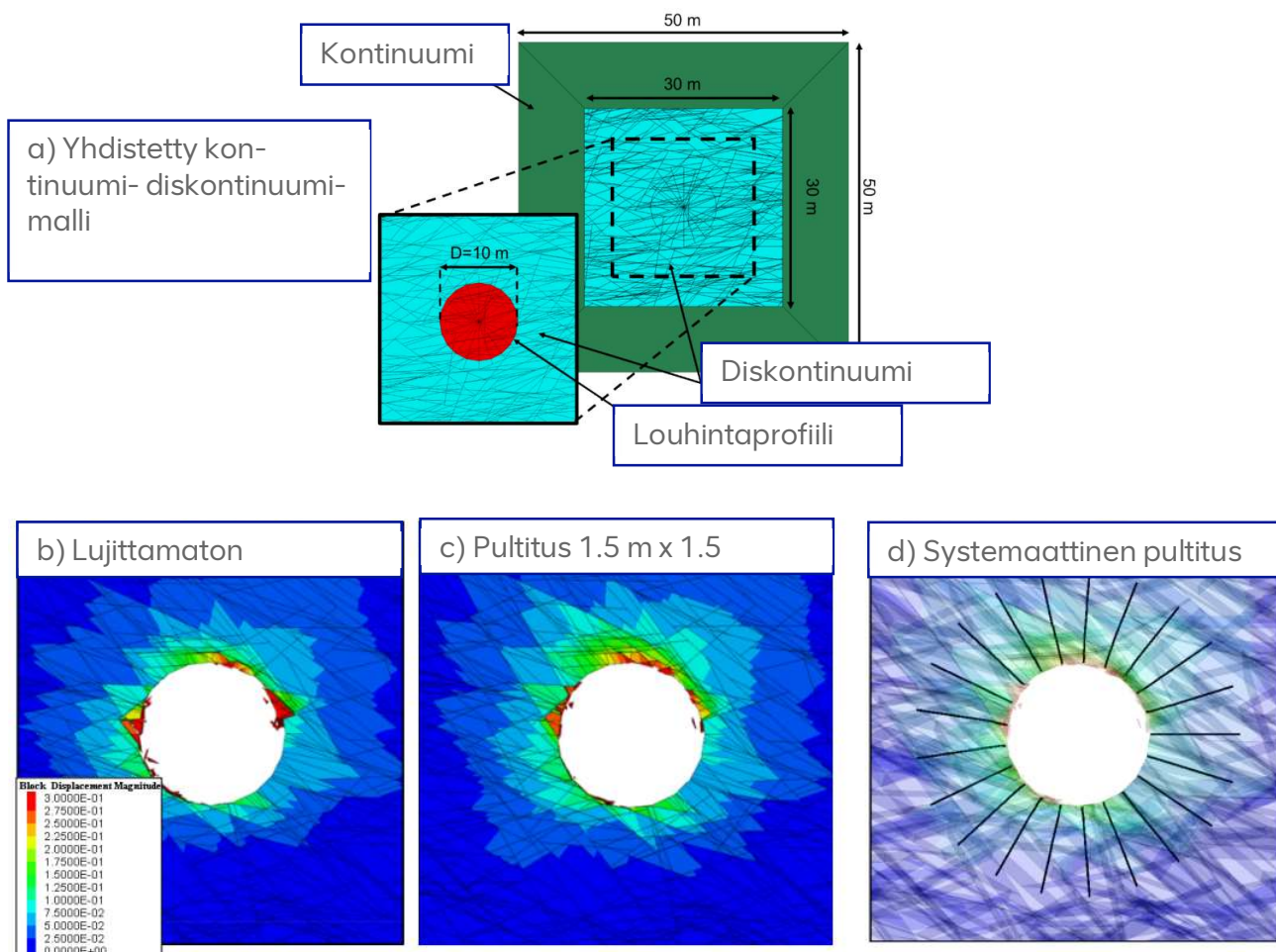
Pohjaveden seurantamittauksia käytetään osana kalliotilojen tiivistyksen toteutus ja työnaikaista suunnittelua verifioimaan keskeiset suunnitteluoletukset. Kallion tiivistyssuunnittelussa käytetään Eurokoodi 7:n pohjautuvaaseurantamenetelmää, joten ennen louhinnan aloittamista on määritettävä seurantaohjelma, jolla kallioperän hydrogeologisia muutoksia seurataan. Esimerkiksi vinotunnelin alueella on asennettuna kallioperässä vallitsevaa hydraulista painekorkeutta monitoroivia pietsometrejä, joiden tuloksia tarkastellaan ennen ja jälkeen louhinnan sekä louhinnan ohittaessa mittauspisteen. Koska kalliotilan louhinnasta aiheutuvan pohjavesivaikutuksen näkyminen maaperän pohjavesikerroksissa voi olla viipymäajaltaan merkittävä, tulee mahdollisiin poikkeamiin reagoida jo heti louhinnan edetessä kallioperästä saatujen tietojen perusteella. Tarvittaessa tiivistyssuunnitelmia päivitetään vastaamaan havaittuja pohjavedenpinnan muutoksia.

6 Kalliotilojen lujitussuunnitelma

6.1 Vinotunnelin lujitus

Vinotunnelin tyyppilujituksia on kehitetty PFS-A-vaiheen jälkeen. Vuonna 2022 valmistuneessa selvityksessä vinotunnelin lujitusprofiileita päivitettiin ensimmäisen kerran. Päivitykset toteutettiin analysoimalla uutta dataa kalliolaadusta vinotunnelilinjauksella, mitoitusmenetelmänä oli empiirinen taulukkolujitus Q-lukuun perustuen (Amberg Engineering, 2022).

Vuoden 2024 aikana vinotunnelilinjauksen tyyppilujitukset päivitettiin uudelleen perustuen vaaka-suuntaisista kairauksista kerättyyn kallionlaatuaineistoon sekä rakosuuntatietoihin. Mitoitusmenetelmänä käytettiin stokastiseen DFN-menetelmään perustuvaa menetelmää, jossa huomioidiin kallion rakosuuntatiedot ja profiilin lujitus mitoitettiin perustuen arvioituun in-situ jännitystilaan rakosuuntien perustella syntyvien kalliolohkojen dimensioiden tilastolliseen jakaumaan. Lujitustarve mitoitettiin numeerisesti yhdistetyllä kontinuumi- ja epäjatkuvuuskohdat (kallioraot) huomioivalla mallilla. Mitoituksessa käytetyn numeerisen mallinnuksen periaate sekä esimerkkikuvaus lujitussuunnittelun etenemisestä on esitetty kuvassa 15. Numeerinen mitoitusmenetelmä mahdollistaa suunnitelmien täsmentämisen tulevaisuuden suunnittelu- ja toteutusvaiheissa kertyvän tiedon perusteella. (ARUP, 2024)



Kuva 15. Tyypilujitusprofiilien numeerinen mitoitusmenetelmä vinotunneille: a) Numeerisen mallin rakenne - yhdistetty kontinuumi-diskontinuumimalli, jossa on huomioitu kallion epäjatkuvuuskohtien (rakojen) tilastollinen jakauma, sekä esimerkitulokset suunnitteluprosessista b) lujittamaton tunneli, c) Pultitusprofiili 1,5 m x 1,5 m, d) Systemaattinen pultitus. (ARUP, 2024)

Vinotunneleiden tyypilujitusprofiilit on esitetty taulukossa 13. Eri suunnittelualueille määritellyt luokitukset ja tukirakenteet täsmentyvät suunnittelun edetessä. Taulukossa kuvataan kalliolaatu-luokka, tukirakenteiden (ruiskubetonointi, RB) lujuus ja paksuus, teräksen vetolujuus sekä pulttien ominaisuudet, kuten halkaisija, jako ja pituus. Nämä tiedot tarkentuvat jatkosuunnittelun myötä.

Taulukko 13. Vinotunnelin tyypilujitusprofiilit suunnittelualueittain. Tyypilujitusprofiilit täsmentyvät suunnittelun edetessä. (ARUP, 2024)

Alue	Luokka	Q	Osuus -%	RB lujuus luokka	RB pak- suus (mm)	Teräksen vetolujuus	Pultin hal- kaisija (mm)	Pulttijako (m)	Pulttipituus (mm)
1	I	>10,0	60	C35/40	75	500	32	2.5 x 2.5	3800
	II	1,5–10,0	20	C35/40	75	500	32	1.75 x 1.75	3800
	III	<1,5	20	C35/40	75	500	32	1.5 x 1.5	3800
2	I	>10,0	90	C35/40	75	500	32	2.5 x 2.5	3800
	II	1,5–10,0	9	C35/40	75	500	32	1.75 x 1.75	3800

Sakatin maanalainen kaivos

Alue	Luokka	Q	Osuus -%	RB lujuus luokka	RB pak- suus (mm)	Teräksen vetolujuus	Pultin hal- kaisija (mm)	Pulttijako (m)	Pulttipituus (mm)
3	III	<1,5	1	C35/40	75	500	32	1.25 x 1.25	3800
	I	>1,5	80	C35/40	75	500	32	2.0 x 2.0	3800
	II	0,2–,5	10	C35/40	125	500	32	1.75 x 1.75	3800
	III	<0,2	10	C35/40	150	500	32	1.25 x 1.25	3800
4	I	>0,05	80	C35/40	150	500	32	1.5 x 1.5	3800
	II	0,005– 0,05	15	C35/40	200	500	32	1.25 x 1.25	3800
	III	<0.005	5	C35/40	250	500	32	1.0 x 1.0	3800
5	I	>0,1	85	C35/40	125	500	32	1.75 x 1.75	3800
	II	0,02–0,1	10	C35/40	175	500	32	1.5 x 1.5	3800
	III	<0,02	5	C35/40	200	500	32	1.25 x 1.25	3800
6	I	>0,2	85	C35/40	125	500	32	1.75 x 1.75	3800
	II	0,02–0,2	10	C35/40	175	500	32	1.5 x 1.5	3800
	III	<0,25	5	C35/40	200	500	32	1.25 x 1.25	3800

6.2 Kaivostunneleiden lujitus

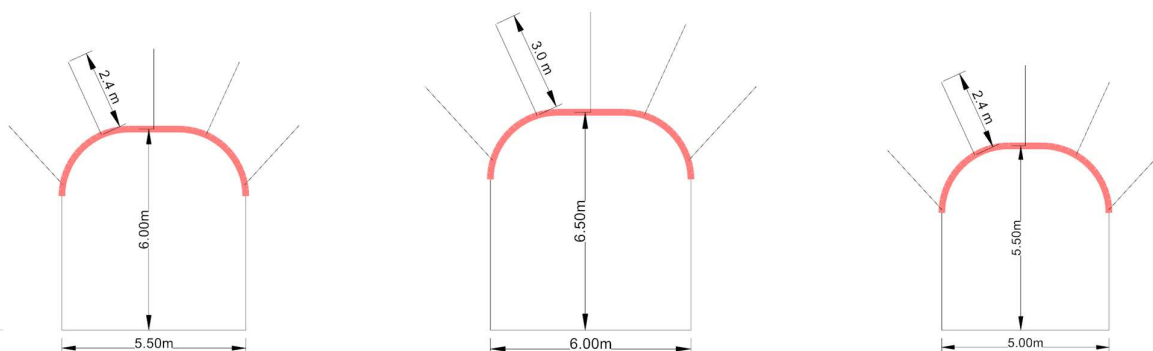
Kaivostunneleiden lujitus suunnittelu on toteutettu vuonna 2024 perustuen empiiriseen taulukko-lujitusmenetelmään (Potvin and Hadjigeorgiou, 2016). Menetelmässä tuennan tarpeen arviointi perustuu kallion Q-arvoon, louhittavan tilan kokoon ja muotoon, sekä kohteen arvioituun elinkaareen. Kalliotiloissa käytetään erilaisia yleisesti käytössä olevia tuentamenetelmiä. Pulttien mitoitus, tiheys ja laatu vaihtelee kyseisen tilan ominaisuuksien perusteella. Taulukossa 14 on esitetty kaivoksen perätyypeittäin käytettävä tuenta ja mitoitus kalliolaadun perusteella.

Taulukko 14. Kaivostunneleiden lujituksen tyyppiprofiilit (SRK, 2024)

Kalliotuenta tyyppillisesti perustuen kallionlaatu luokitukseen (Rock Quality Rating) (Q)					Odotettu tyyppilinen kalliolaadun vaihteluväli - Q Class											
					Erittäin heikko			Heikko			Tyydyttävä			Hyvä		
Tunneli tyyppi	Tuennan elinkaari	Profiilin koko	Profiili ID	Erisijainen tuennatyyppi (tyypillinen ja peräkkäinen ylläpidettävissä oleva suunnitelma)	Pulttia per lineaari m	Verkotus m ² per lineaari m	Teräskuitu vahvistettu ruiskubetonointi m ³ per lineaari m	Pulttia per lineaari m	Verkotus m ² per lineaari m	Teräskuitu vahvistettu ruiskubetonointi m ³ per lineaari m	Pulttia per lineaari m	Verkotus m ² per lineaari m	Teräskuitu vahvistettu ruiskubetonointi m ³ per lineaari m	Pulttia per lineaari m	Verkotus m ² per lineaari m	Teräskuitu vahvistettu ruiskubetonointi m ³ per lineaari m
Vinoramppi	Koko kaivoksen elinkaari	6.0x6.5 Arch	A	3.0m pitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	10.2	17.6	1.6	6.8	-	0.9	4.8	-	0.6	3.9	-	0.5
Jalkapuolen tasoperä	Koko kaivoksen elinkaari	5.0x5.5 Arch	B	2.4mpitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	8.3	14.8	1.3	5.4	-	0.7	3.5	-	0.5	2.7	-	0.3
Ramppi-taso yhteys	Tason elinkaari	5.0x5.5 Arch	B	2.4mpitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	8.3	14.8	1.3	5.4	-	0.7	3.5	-	0.5	2.7	-	0.3
Jalkapuolen Malmiperä	Tason elinkaari	5.0x5.5 Arch	B	2.4mpitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	8.3	14.8	1.3	5.4	-	0.7	3.5	-	0.5	2.7	-	0.3
Malmiperä	Tason elinkaari	5.0x5.5 Arch	B	2.4m pitkät hartsijuotetut/kitka kalliopultit ja -levyt	8.3	14.8	1.3	5.4	-	0.7	3.5	-	0.5	2.7	-	0.3
Cut & Fill ramppi	Tilapäinen	5.0x5.5 Arch	B	2.4mpitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	8.3	14.8	1.3	5.4	-	0.7	3.5	-	0.5	2.7	-	0.3
Tuuletusperä	Koko kaivoksen elinkaari	5.0x5.5 Arch	B	2.4mpitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	8.3	14.8	1.3	5.4	-	0.7	3.5	-	0.5	2.7	-	0.3
Kuprikka	Tason elinkaari	5.0x5.5 Arch	B	2.4mpitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	8.3	14.8	1.3	5.4	-	0.7	3.5	-	0.5	2.7	-	0.3
Lastauspaikka	Tason elinkaari	5.0x5.5 Arch	B	2.4mpitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	8.3	14.8	1.3	5.4	-	0.7	3.5	-	0.5	2.7	-	0.3
Lastauskuprikka	Tason elinkaari	5.5x6.0 Arch	C	2.4mpitkät hartsijuotetut kalliopultit ja -levyt	9.3	16.3	1.5	6.2	-	0.8	4.2	-	0.6	3.3	-	0.4

Lähtökohtaisesti maanalaisen kaivoksen pysyvät tilat kuten pumppaamot, huolto-, varasto- ja toimistotilat pyritään rakentamaan kalliolaadultaan hyvään kalliomassaan. Pysyvissä tiloissa työskennellään pidempiä aikoja koko kaivoksen elinkaaren ajan, joten näissä tiloissa tuennan vaatimustaso on yllä olevaa taulukkoa vaativampi ja niihin kalliotuenta on suunniteltava tapauskohtaisesti.

Periaatekuva eri tunnelikokojen pulttauksesta ja ruiskubetonoinnista. Pulttien määrä ja tiheys vaihtelee kalliolaadun mukaan seuraten yllä olevaa taulukkoa.



Kuva 16. Esimerkkiprofiileja kaivostunneleiden lujituksesta.

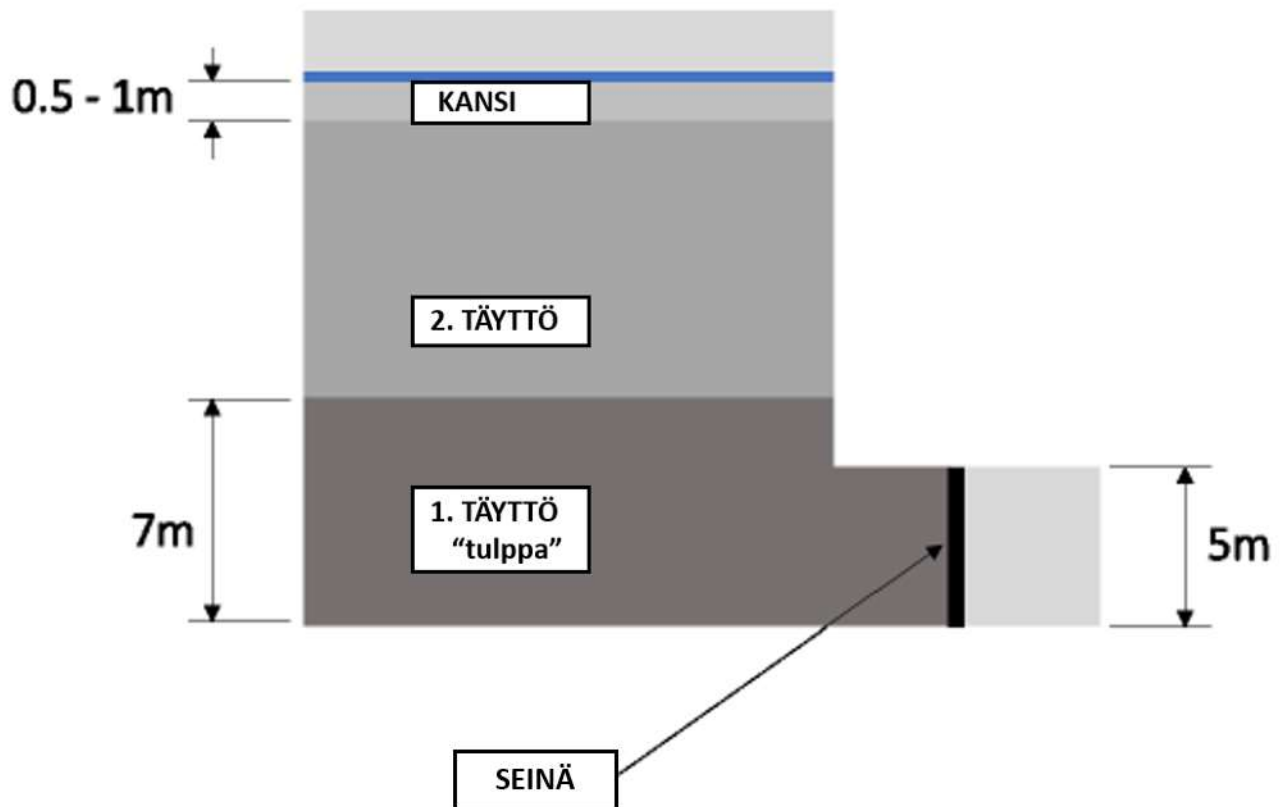
7 Kaivostäytön suunnitelma

Sakatin hankkeessa louhitut louhokset täytetään mahdollisimman pian louhinnan jälkeen kovettuvalla kaivostäytöllä. Kaivostäytönä käytetään pääasiassa pasta-kivimurske tai pastatäyttöä. Mikäli pastan valmistuksessa on katkos, kuten pastalaitoksen huoltoseisakki, tyhjät louhokset täytetään kovettuvalla sivukivitäytöllä (CRF, Cemented rock fill). Sivukivitäyttöä voidaan kuitenkin satunnaisesti käyttää esimerkiksi toisen vaiheen louhoksissa, mikäli täyttökohteessa ei esiinny merkittäviä vesivuotoja. Viimeisimmässä kaivossuunnitelmassa louhoksia ei ole suunniteltu täytettävän pelkällä sivukivellä. Kaivostäytön tyyppisuunnitelma on esitetty kuvassa 17.

Pastatäyttö koostuu pääasiassa toiminnassa syntyvästä rikastushiekasta sekä sideaineesta (esim. Sementistä, bentoniitista tai lentotuhkasta) joka kovettaa täytön vaadittuun lujuuteen. Pastatäyttöön voidaan myös sekoittaa sivukiveä, jolloin kyseessä on pasta-kivimursketäyttö. Sekundäriveraikan louhoksien täyttöön, poislukien louhinta-alueiden pohjat, on tulppa osittain mahdollista tehdä sivukivellä, kuljettamalla sivukiveä kasaan louhoksen pohjalle ennen pastatäytön aloittamista.

Pastatäytön tarkoituksena on tukea ja tiivistää kalliota louhinnan edetessä. Sakatin hankkeessa louhinta tapahtuu alhaalta ylöspäin ja seuraava louhos louhitaan jo louhitun louhoksen päältä. Louhintajärjestys määräytyy osittain myös kaivostäytön perusteella. Täytetylle louhokselle on huomioitava riittävä kuivumis-/kovettumisaika ennen kuin sen vieressä olevaa louhosta voidaan aloittaa louhimaan. Kuivumis-/kovettumisaika on huomioitava louhintasuunnitelmassa.

Louhoksen tyhjennettyä louhoksen lastausaukkoon rakennetaan ns. pato tai seinä. Tavallisesti pato rakennetaan sivukivestä ja se ruisku betonoidaan, jotta pastatäyttö ei valu pois louhoksesta. Louhoksen täyttö suoritetaan useammassa vaiheessa. Täytön ensimmäinen vaihe on ns. tulppa, jossa louhos täytetään 30–50 prosenttisesti. Ensimmäisen ja toisen täyttövaiheen välissä on kovettumisaika, jolla varmistetaan louhoksen täytölle riittävä lujuus.



Kuva 17. Havainnekuva pastalla täytetyn louhoksen tyypillisestä rakenteesta (Paterson&Cooke, 2018)

8 Kalliotilojen tiivistyssuunnitelma

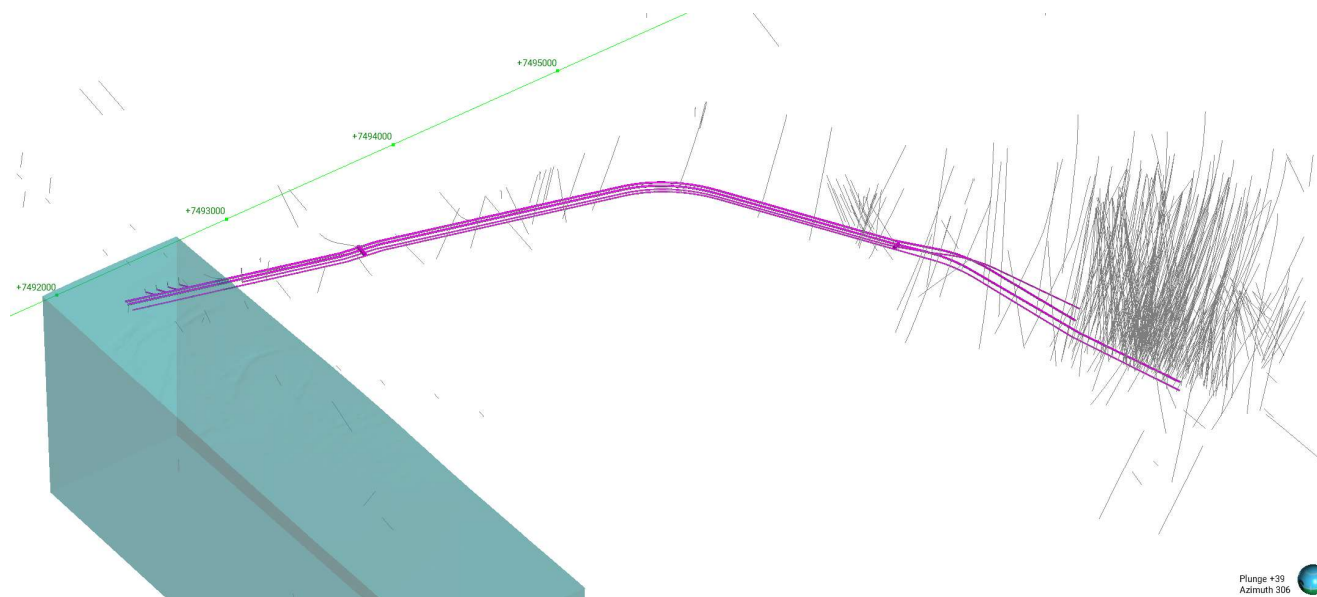
Sakatin hankkeessa tiivistystavoitteen lähtökohdaksi on otettu numeerisen pohjaveden virtausmallin tulosaineistot. Numeerinen pohjaveden virtausmalli tuottaa tulokset vuotosolmuittain, jotka voidaan esimerkiksi vinotunnelin osalta projektoida vinotunnelin paalulujuille, jolloin vuotovesien tavoitetaso on laskettavissa tunnelijaksoittain. Vastaavasti kaivostunneleiden ja louhosten osalta tuloksia on mahdollista tarkastella esimerkiksi tasoväleittäin tai paneeleittain. Numeerinen pohjavesimalli on alueelliselta kattavuudeltaan erittäin laaja ja hilakooltaan iso, joten tuloksia ei kuitenkaan tule tulkita liian kirjaimellisesti tai yksityiskohtaisesti paikallisella, esimerkiksi yksittäistä louhosta koskevalla tasolla. Kaivostunneleiden ja louhosten osalta vuotovesitavoite voidaan arvioida kokonaisvuotovesimääränä paneeleittain tai tasoväleittäin.

8.1 Vinotunnelin tiivistys

Numeerisen pohjavesimallin pohjalta lasketut tiivistystavoitteet sekä tiivistysluokat suunnittelualueille 1- 6 on esitetty taulukoissa 15, 16, 17, 18, 19 ja 20. Koska tunneliin vuotava vesimäärä on numeerisessa pohjavesimallissa aikariippuvainen, on tarkastelun lähtökohdaksi otettu vuotovesimäärä 2 vuotta vinotunneleiden louhinnan jälkeen. Koska kallion vuotovesimäärä noudattaa tyypillisesti logaritmista normaalijakaumaa, tulee tiivistysluokan määrittelyssä tarkastella tuloksen magnitudia absoluuttisen arvon sijaan. Tiivistysluokan lähtökohta määräytyy mallinnetun vuotovesimäärän perusteella ylöspäin pyöristettynä. Tiivistystavoitteet täsmentyvät suunnittelun

edetessä laadittavien tarkasteluiden perusteella. Tiivistystavoitetta tullaan myös täsmentämään erityisesti ruhje- ja heikkousvyöhykelävistysten kohdalla.

Suunnittelualue 1



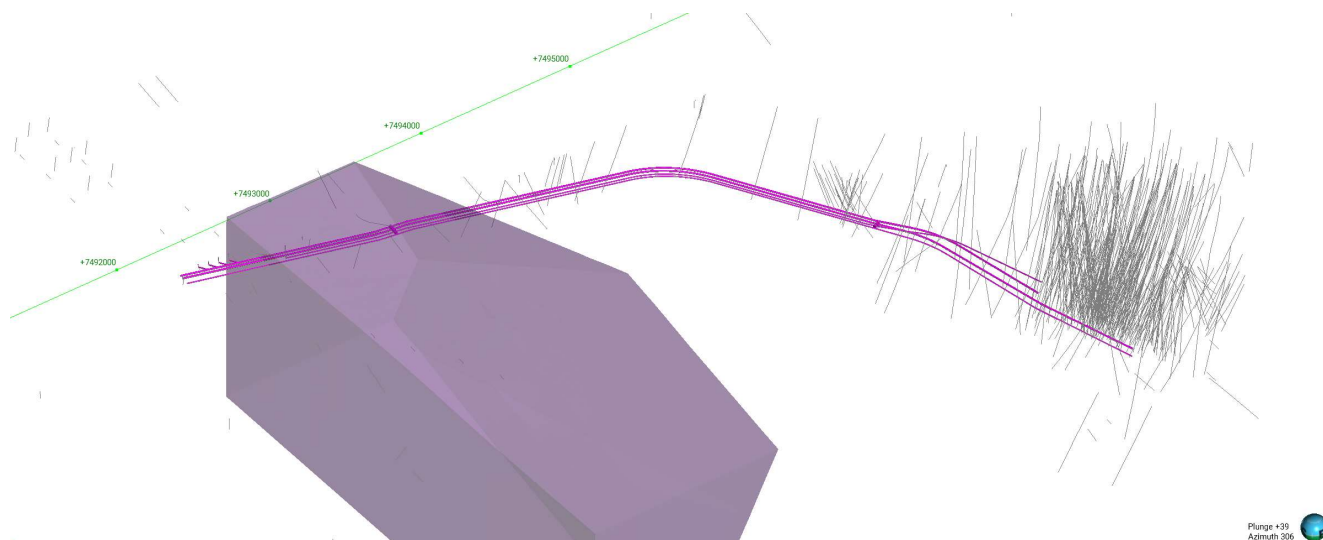
Plunge +39
Azimuth 306

Kuva 18. Suunnittelualue 1 korostettuna Sakatin hankkeen geoteknisessä 3D-mallissa

Taulukko 15. Vinotunnelin vuotovesimäärät ja tiivistysluokat määritettynä numeerisen pohjavesimallin tuloksista 2 vuotta vinotunnelin louhinnan jälkeen. Vuotovesimäärä ja tiivistystavoite täsmentyvät suunnittelun edetessä.

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tiivistysluokka
ALEMPI ITÄINEN	3,47E-07	0	100	3,23	A
ALEMPI ITÄINEN	3,47E-07	100	200	6,13	B
ALEMPI ITÄINEN	3,47E-07	200	300	5,51	B
ALEMPI ITÄINEN	3,47E-07	300	400	5,58	B
ALEMPI ITÄINEN	3,47E-07	400	500	17,22	C
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	0	100	1,48	AA
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	100	200	8,35	B
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	200	300	6,55	B
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	300	400	15,26	C
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	400	500	6,66	B
YLEMPI ITÄINEN	3,47E-07	0	100	4,87	A
YLEMPI ITÄINEN	3,47E-07	100	200	3,71	A
YLEMPI ITÄINEN	3,47E-07	200	300	6,76	B
YLEMPI ITÄINEN	3,47E-07	300	400	7,05	B
YLEMPI ITÄINEN	3,47E-07	400	500	2,65	A
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	0	100	1,79	AA
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	100	200	5,25	B
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	200	300	5,97	B
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	300	400	4,62	A
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	400	500	10,44	C

Suunnittelualue 2



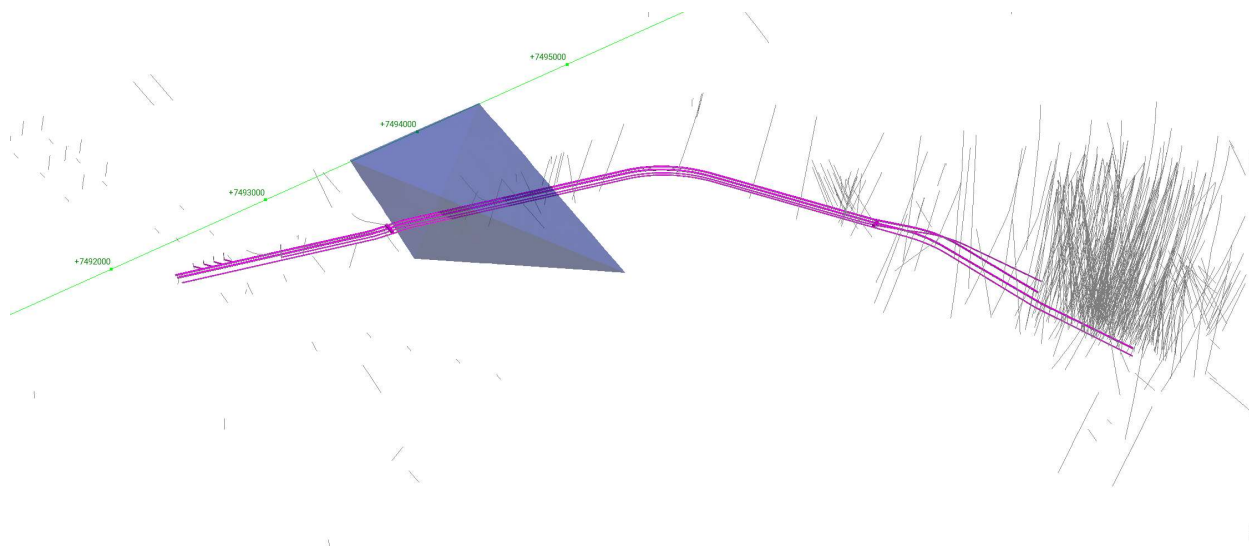
Kuva 19. Suunnittelualue 2 korostettuna Sakatin hankkeen geoteknisessä 3D-mallissa

Taulukko 16. Vinotunnelin vuotovesimäärät ja tiivistysluokat suunnittelualueella 2 määritettynä numeerisen pohjavesimallin tuloksista 2 vuotta vinotunnelin louhinnan jälkeen. Vuotovesimäärä ja tiivistystavoite täsmentyvät suunnitelun edetessä.

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tiivistysluokka
ALEMPI ITÄINEN	6,58E-08	500	600	13,05	C
ALEMPI ITÄINEN	6E-08	600	700	11,40	C
ALEMPI ITÄINEN	6E-08	700	800	11,28	C
ALEMPI ITÄINEN	6E-08	800	900	7,80	B
ALEMPI ITÄINEN	6E-08	900	1000	6,25	B
ALEMPI ITÄINEN	6E-08	1000	1100	10,63	C
ALEMPI ITÄINEN	6E-08	1100	1200	13,53	C
ALEMPI ITÄINEN	4,79E-08	1200	1300	14,15	C
ALEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1300	1400	8,11	B
ALEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1400	1500	6,54	B
ALEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1500	1600	6,12	B
ALEMPI LÄNTINEN	7,58E-08	500	600	13,30	C
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	600	700	3,72	A
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	700	800	8,05	B
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	800	900	9,94	B
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	900	1000	8,99	B
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	1000	1100	8,89	B
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	1100	1200	8,69	B
ALEMPI LÄNTINEN	4,44E-08	1200	1300	16,22	C
ALEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1300	1400	8,48	B
ALEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1400	1500	6,36	B

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tilivistysluokka
ALEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1500	1600	6,87	B
YLEMPI ITÄINEN	3,47E-07	500	600	10,47	C
YLEMPI ITÄINEN	3,47E-07	600	700	14,28	C
YLEMPI ITÄINEN	8,52E-08	700	800	13,89	C
YLEMPI ITÄINEN	6E-08	800	900	8,46	B
YLEMPI ITÄINEN	6E-08	900	1000	7,09	B
YLEMPI ITÄINEN	6E-08	1000	1100	6,67	B
YLEMPI ITÄINEN	6E-08	1100	1200	7,31	B
YLEMPI ITÄINEN	6E-08	1200	1300	3,44	A
YLEMPI ITÄINEN	6E-08	1300	1400	8,10	B
YLEMPI ITÄINEN	3,63E-08	1400	1500	13,05	C
YLEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1500	1600	12,49	C
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	500	600	7,01	B
ALEMPI LÄNTINEN	3,47E-07	600	700	13,04	C
ALEMPI LÄNTINEN	1,11E-07	700	800	15,87	C
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	800	900	10,46	C
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	900	1000	7,62	B
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	1000	1100	8,64	B
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	1100	1200	7,78	B
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	1200	1300	7,29	B
ALEMPI LÄNTINEN	6E-08	1300	1400	7,61	B
ALEMPI LÄNTINEN	3,58E-08	1400	1500	13,11	C
ALEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1500	1600	12,57	C

Suunnittelualue 3



Plunge +99
Azimuth 306

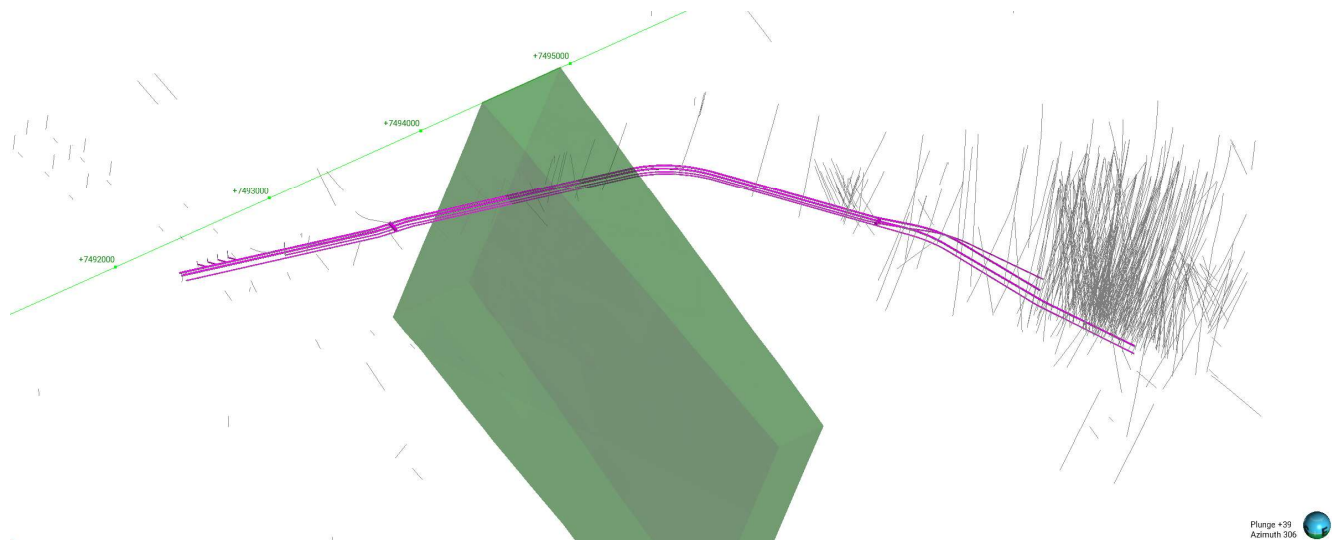
Kuva 20. Suunnittelualue 3 korostettuna Sakatin hankkeen geoteknisessä 3D-mallissa

Sakatin maanalainen kaivos

Taulukko 17. Vinotunnelin vuotovesimäärät ja tiivistysluokat suunnittelualueella 3 määritettynä numeerisen pohjavesimallin tuloksista 2 vuotta vinotunnelin louhinnan jälkeen. Vuotovesimäärä ja tiivistystavoite täsmentyvät suunnittelun edetessä.

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100m)	Tiivistysluokka
ALEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1600	1700	6,26	B
ALEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1700	1800	5,00	B
ALEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1800	1900	6,32	B
ALEMPI ITÄINEN	1,62E-08	1900	2000	6,04	B
ALEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1600	1700	6,93	B
ALEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1700	1800	5,09	B
ALEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1800	1900	6,79	B
ALEMPI LÄNTINEN	1,71E-08	1900	2000	6,14	B
YLEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1600	1700	4,23	A
YLEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1700	1800	5,70	B
YLEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1800	1900	5,93	B
YLEMPI ITÄINEN	1,8E-08	1900	2000	4,51	A
YLEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1600	1700	4,53	A
YLEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1700	1800	5,39	B
YLEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1800	1900	5,95	B
YLEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	1900	2000	4,23	A

Suunnittelualue 4



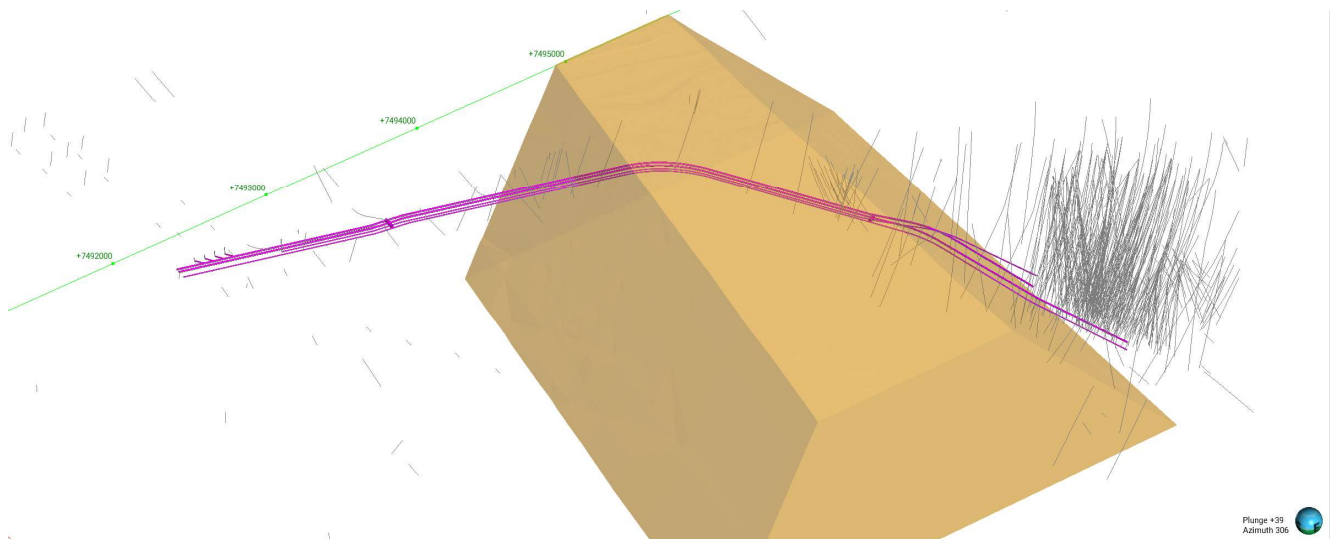
Kuva 21. Suunnittelualue 4 korostettuna Sakatin hankkeen geoteknisessä 3D-mallissa

Taulukko 18. Vinotunnelin vuotovesimäärät ja tiivistysluokat suunnittelualueella 4 määritettynä numeerisen pohjavesimallin tuloksista 2 vuotta vinotunnelin louhinnan jälkeen. Vuotovesimäärä ja tiivistystavoite täsmentyvät suunnittelun edetessä.

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tiivistysluokka
ALEMPI ITÄINEN	8E-09	2000	2100	3,68	A

Tunnelli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tiivistysluokka
ALEMPI ITÄINEN	8E-09	2100	2200	4,39	A
ALEMPI ITÄINEN	8E-09	2200	2300	4,46	A
ALEMPI ITÄINEN	8E-09	2300	2400	3,13	A
ALEMPI LÄNTINEN	8E-09	2000	2100	3,66	A
ALEMPI LÄNTINEN	8E-09	2100	2200	4,33	A
ALEMPI LÄNTINEN	8E-09	2200	2300	4,88	A
ALEMPI LÄNTINEN	8E-09	2300	2400	3,39	A
YLEMPI ITÄINEN	1,8E-08	2000	2100	6,16	B
YLEMPI ITÄINEN	1,37E-08	2100	2200	6,32	B
YLEMPI ITÄINEN	8E-09	2200	2300	5,04	B
YLEMPI ITÄINEN	8E-09	2300	2400	4,63	A
YLEMPI LÄNTINEN	1,8E-08	2000	2100	6,42	B
YLEMPI LÄNTINEN	1,37E-08	2100	2200	5,49	B
YLEMPI LÄNTINEN	8E-09	2200	2300	4,33	A
YLEMPI LÄNTINEN	8E-09	2300	2400	5,50	B

Suunnitteluvaihe 5



Kuva 22. Suunnittelualue 5 korostettuna Sakatin hankkeen geoteknisessä 3D-mallissa

Taulukko 19. Vinotunnelin vuotovesimäärät ja tiivistysluokat suunnittelualueella 5 määritettynä numeerisen pohjavesimallin tuloksista 2 vuotta vinotunnelin louhinnan jälkeen. Vuotovesimäärä ja tiivistystavoite täsmentyvät suunnittelun edetessä.

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tiivistysluokka
ALEMPI ITÄINEN	8E-09	2400	2500	4,04	A
ALEMPI ITÄINEN	8E-09	2500	2600	4,02	A
ALEMPI ITÄINEN	8E-09	2600	2700	3,07	A

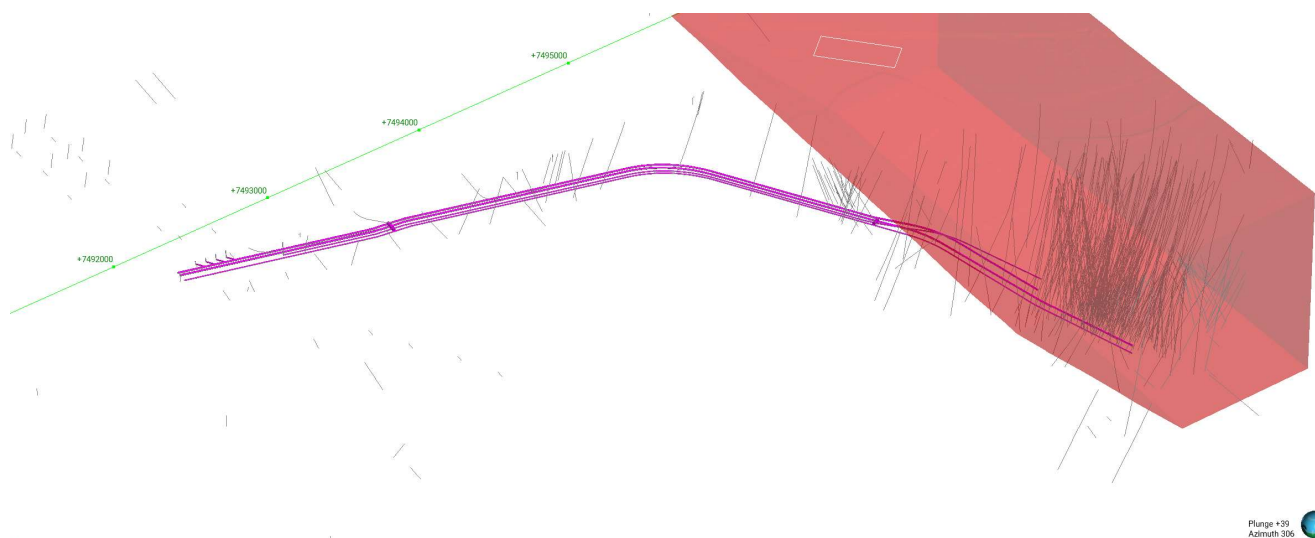
Sakatin maanalainen kaivos

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tilivistysluokka
ALEMPI ITÄINEN	5,32E-09	2700	2800	4,39	A
ALEMPI ITÄINEN	4,47E-09	2800	2900	10,17	C
ALEMPI ITÄINEN	4,8E-09	2900	3000	1,61	AA
ALEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3000	3100	2,09	A
ALEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3100	3200	2,73	A
ALEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3200	3300	2,33	A
ALEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3300	3400	2,14	A
ALEMPI ITÄINEN	3,52E-09	3400	3500	2,80	A
ALEMPI ITÄINEN	3,19E-09	3500	3600	2,21	A
ALEMPI ITÄINEN	3,19E-09	3600	3700	2,46	A
ALEMPI ITÄINEN	3,19E-09	3700	3800	2,06	A
ALEMPI ITÄINEN	3,19E-09	3800	3900	4,82	A
ALEMPI ITÄINEN	1,78E-08	3900	4000	15,93	C
ALEMPI ITÄINEN	3,19E-09	4000	4100	4,61	A
ALEMPI ITÄINEN	2,56E-09	4100	4200	3,10	A
ALEMPI ITÄINEN	2,49E-09	4200	4300	2,63	A
ALEMPI ITÄINEN	2,49E-09	4300	4400	2,26	A
ALEMPI ITÄINEN	2,49E-09	4400	4500	1,54	AA
ALEMPI LÄNTINEN	8E-09	2400	2500	4,45	A
ALEMPI LÄNTINEN	8E-09	2500	2600	3,75	A
ALEMPI LÄNTINEN	8E-09	2600	2700	3,17	A
ALEMPI LÄNTINEN	5,12E-09	2700	2800	5,45	B
ALEMPI LÄNTINEN	4,49E-09	2800	2900	11,56	C
ALEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	2900	3000	2,60	A
ALEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3000	3100	2,39	A
ALEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3100	3200	3,26	A
ALEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3200	3300	3,26	A
ALEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3300	3400	2,44	A
ALEMPI LÄNTINEN	3,54E-09	3400	3500	3,37	A
ALEMPI LÄNTINEN	3,19E-09	3500	3600	3,32	A
ALEMPI LÄNTINEN	3,19E-09	3600	3700	3,36	A
ALEMPI LÄNTINEN	3,19E-09	3700	3800	2,50	A
ALEMPI LÄNTINEN	3,19E-09	3800	3900	6,50	B
ALEMPI LÄNTINEN	1,41E-08	3900	4000	4,87	A
ALEMPI LÄNTINEN	3,15E-09	4000	4100	4,17	A
ALEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4100	4200	2,66	A
ALEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4200	4300	2,90	A
ALEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4300	4400	2,61	A
ALEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4400	4500	2,87	A
YLEMPI ITÄINEN	8E-09	2400	2500	3,98	A
YLEMPI ITÄINEN	8E-09	2500	2600	2,92	A
YLEMPI ITÄINEN	8E-09	2600	2700	3,91	A
YLEMPI ITÄINEN	8E-09	2700	2800	3,30	A

Sakatin maanalainen kaivos

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tilivistysluokka
YLEMPI ITÄINEN	7,31E-09	2800	2900	4,06	A
YLEMPI ITÄINEN	4,8E-09	2900	3000	2,18	A
YLEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3000	3100	2,72	A
YLEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3100	3200	2,74	A
YLEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3200	3300	1,93	AA
YLEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3300	3400	2,70	A
YLEMPI ITÄINEN	4,8E-09	3400	3500	3,33	A
YLEMPI ITÄINEN	4,34E-09	3500	3600	3,71	A
YLEMPI ITÄINEN	3,19E-09	3600	3700	3,11	A
YLEMPI ITÄINEN	3,19E-09	3700	3800	4,11	A
YLEMPI ITÄINEN	5,24E-09	3800	3900	14,63	C
YLEMPI ITÄINEN	5,42E-09	3900	4000	5,17	B
YLEMPI ITÄINEN	3,19E-09	4000	4100	2,48	A
YLEMPI ITÄINEN	3,19E-09	4100	4200	2,97	A
YLEMPI ITÄINEN	3,07E-09	4200	4300	3,53	A
YLEMPI ITÄINEN	2,49E-09	4300	4400	2,36	A
YLEMPI ITÄINEN	2,49E-09	4400	4500	3,47	A
YLEMPI LÄNTINEN	8E-09	2400	2500	3,90	A
YLEMPI LÄNTINEN	8E-09	2500	2600	2,56	A
YLEMPI LÄNTINEN	8E-09	2600	2700	3,64	A
YLEMPI LÄNTINEN	8E-09	2700	2800	3,25	A
YLEMPI LÄNTINEN	7,35E-09	2800	2900	4,03	A
YLEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	2900	3000	2,45	A
YLEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3000	3100	2,97	A
YLEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3100	3200	2,62	A
YLEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3200	3300	2,12	A
YLEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3300	3400	2,58	A
YLEMPI LÄNTINEN	4,8E-09	3400	3500	2,85	A
YLEMPI LÄNTINEN	4,26E-09	3500	3600	3,28	A
YLEMPI LÄNTINEN	3,19E-09	3600	3700	3,39	A
YLEMPI LÄNTINEN	3,19E-09	3700	3800	4,25	A
YLEMPI LÄNTINEN	4,75E-09	3800	3900	13,44	C
YLEMPI LÄNTINEN	4,44E-09	3900	4000	5,45	B
YLEMPI LÄNTINEN	3,19E-09	4000	4100	2,01	A
YLEMPI LÄNTINEN	3,19E-09	4100	4200	2,51	A
YLEMPI LÄNTINEN	3E-09	4200	4300	2,47	A
YLEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4300	4400	1,87	AA
YLEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4400	4500	1,60	AA

Suunnittelualue 6



Kuva 23. Suunnittelualue 6 korostettuna Sakatin hankkeen geoteknisessä 3D-mallissa

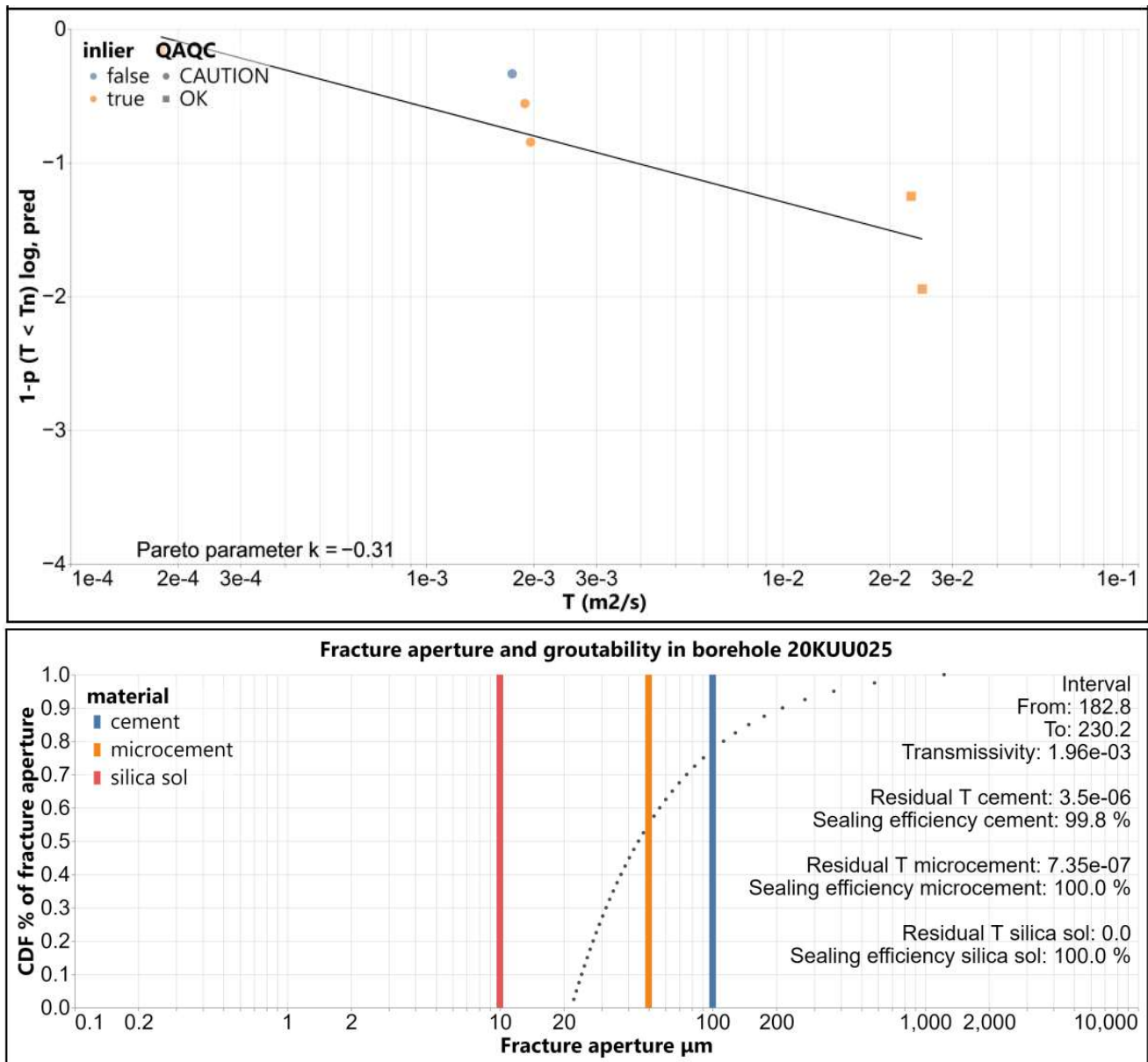
Taulukko 20. Vinotunnelin vuotovesimäärät ja tiivistysluokat suunnittelualueella 6 määritettynä numeerisen pohjavesimallin tuloksista 2 vuotta vinotunnelin louhinnan jälkeen. Vuotovesimäärä ja tiivistystavoite täsmentyvät suunnitelun edetessä.

Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tiivistysluokka
ALEMPI ITÄINEN	2,49E-09	4500	4600	3,25	A
ALEMPI ITÄINEN	1,53E-09	4600	4700	2,60	A
ALEMPI ITÄINEN	2,49E-09	4700	4800	1,88	AA
ALEMPI ITÄINEN	2,15E-09	4800	4900	4,03	A
ALEMPI ITÄINEN	1,31E-09	4900	5000	1,93	AA
ALEMPI ITÄINEN	1,35E-09	5000	5100	1,04	AA
ALEMPI ITÄINEN	1,27E-09	5100	5200	1,05	AA
ALEMPI ITÄINEN	1,31E-09	5200	5300	1,84	AA
ALEMPI ITÄINEN	1,5E-09	5300	5400	0,95	AA
ALEMPI ITÄINEN	1,5E-09	5400	5500	3,28	A
ALEMPI ITÄINEN	1,5E-09	5500	5600	2,08	A
ALEMPI ITÄINEN	9,95E-10	5600	5700	2,41	A
ALEMPI ITÄINEN	9,95E-10	5700	5800	2,02	A
ALEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4500	4600	4,08	A
ALEMPI LÄNTINEN	1,6E-09	4600	4700	2,32	A
ALEMPI LÄNTINEN	1,97E-09	4700	4800	2,31	A
ALEMPI LÄNTINEN	2,09E-09	4800	4900	2,85	A
ALEMPI LÄNTINEN	1,29E-09	4900	5000	3,35	A
ALEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5000	5100	0,70	AA
ALEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5100	5200	0,58	AA
ALEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5200	5300	0,48	AA
ALEMPI LÄNTINEN	1,41E-09	5300	5400	1,02	AA
ALEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5400	5500	1,44	AA

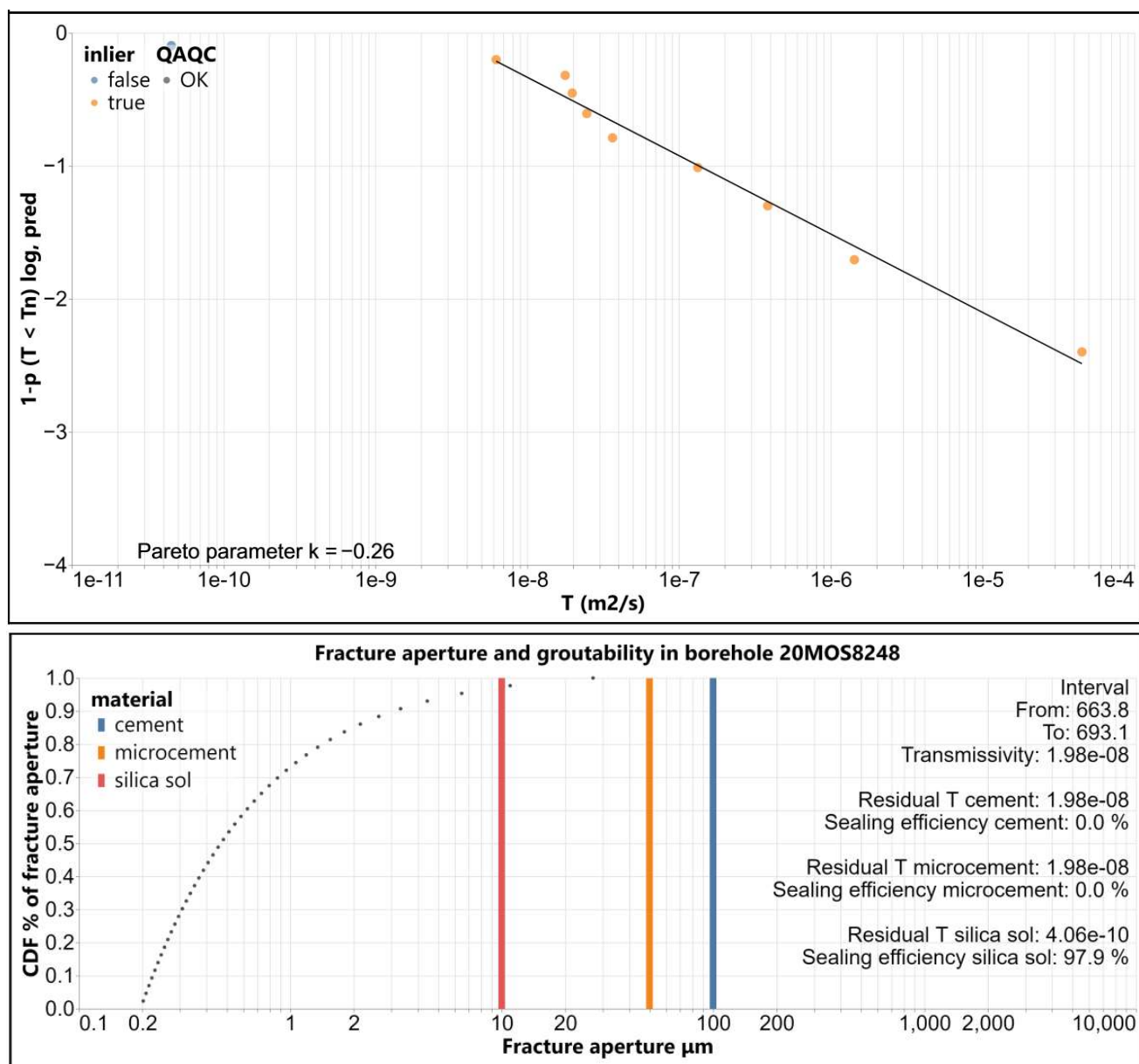
Tunneli	k (m/s)	alku (m)	loppu (m)	Vuoto (l/min/100 m)	Tilivistysluokka
ALEMPI LÄNTINEN	1,35E-09	5500	5600	3,90	A
ALEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5600	5700	0,61	AA
ALEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5700	5800	1,46	AA
ALEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5800	5900	0,57	AA
YLEMPI ITÄINEN	2,49E-09	4500	4600	3,90	A
YLEMPI ITÄINEN	1,47E-09	4600	4700	1,73	AA
YLEMPI ITÄINEN	2,18E-09	4700	4800	2,59	A
YLEMPI ITÄINEN	2,09E-09	4800	4900	5,35	B
YLEMPI ITÄINEN	1,13E-09	4900	5000	2,54	A
YLEMPI ITÄINEN	1,13E-09	5000	5100	1,98	AA
YLEMPI ITÄINEN	1,09E-09	5100	5200	0,69	AA
YLEMPI ITÄINEN	9,95E-10	5200	5300	0,32	AA
YLEMPI ITÄINEN	9,95E-10	5300	5400	0,08	AA
YLEMPI ITÄINEN	9,95E-10	5400	5500	0,42	AA
YLEMPI ITÄINEN	9,95E-10	5500	5600	0,61	AA
YLEMPI ITÄINEN	9,95E-10	5600	5700	1,67	AA
YLEMPI ITÄINEN	9,95E-10	5700	5800	0,45	AA
YLEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4500	4600	1,56	AA
YLEMPI LÄNTINEN	1,53E-09	4600	4700	1,96	AA
YLEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4700	4800	3,06	A
YLEMPI LÄNTINEN	2,49E-09	4800	4900	1,49	AA
YLEMPI LÄNTINEN	1,25E-09	4900	5000	0,54	AA
YLEMPI LÄNTINEN	1,13E-09	5000	5100	0,48	AA
YLEMPI LÄNTINEN	1,11E-09	5100	5200	0,00	
YLEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5200	5300	0,04	AA
YLEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5300	5400	0,02	AA
YLEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5400	5500	0,00	AA
YLEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5500	5600	0,25	AA
YLEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5600	5700	0,55	AA
YLEMPI LÄNTINEN	9,95E-10	5700	5800	1,33	AA

Vinotunnelinlinjauksen hydrogeologista mittausaineistoa analysoitiin vuonna 2023 tunnelinlauksen transmissiviteettijakauman selvittämiseksi (Anglo American, 2023). Käytetty aineisto oli pääosin single packer testausaineistoa, joka ei kaikilta osin vastannut transmissiviteettijakauman ja injektoitavuuden selvittämiseen suositeltua (Kvartsberg et al., 2023) havaintomäärää ja testausintervallia. Sakatin hydrogeologiset tutkimukset ovat tähän asti tähänneet kallion keskimääräisen vedenjohtavuuden selvittämiseen, jotta kaivoksen vuotovesimäärien arviointi ja numeerinen pohjavesimalli toteutettaisiin mahdollisimman edustavalla ja tarkoituksenmukaisella aineistolla. Testausintervallin pituus on tyypillisesti pidempi (> 30 m) kallion keskimääräisen vedenjohtavuuden selvittämiseen tähtäävissä mittauksissa kuin injektoitavuuden arviointiin tähtäävissä mittauksissa (2 m) (Stille, 2015). Transmissiviteettiaineiston tilastollinen käsittely oli kuitenkin mahdollista toteuttaa nykyiselle aineistolle, jotta saataisiin ensimmäinen lähtökohta injektoitavuuden arviointiin.

Injektoitavuuden arvioinnissa jokainen kairareikä, josta transmissiviteettitietoa oli saatavilla, analysoitiin tilastollisesti sovittamalla Pareto-jakauman parametrit aineistoon. Sovitetun tilastollisen jakauman perustella arvioitiin jokaisen testausintervallin hydraulisten rakoavaumien jakaumaa ja injektoitavuutta eri injektointimateriaaleilla. Tulokset kuvaavat tämänhetkistä ymmärrystä Sakatin hankealueen hydrogeologisista olosuhteista. Kallion pintaosissa transmissiviteetti ja rakoavaumat ovat suurempia, joten merkittävä tiivistysvaikutus voidaan saada aikaan tiivistämällä onnistuneesti kaikkein vettä johtavimmat raot. Tiivistyksessä voidaan käyttää pääosin tavallista Portland sementtiä ja mikrosementtiä. Syvemmälle siirryttäessä kallion transmissiviteetti ja rakoavaumat pienenevät, joten on siirryttävä hienompirakeisiin injektointimateriaaleihin, ensin mikrosementteihin ja lopulta kolloidiseen silikaan. Esimerkkituloksia kairareikien injektoitavuuden arvioinnista on esitetty kuvissa 24 ja 25. (AA, 2023)



Kuva 24. Esimerkkitulokset kairareikä 20KUU025 (Suunnittelualue 1) transmissiviteettijakauman arvioinnista Pareto-jakaumaa hyödyntäen sekä injektoitavuuden arviointi eri injektointimateriaaleilla. Merkittävä tiivistysvaikutus voidaan saavuttaa käyttäen Portland-sementtiä.



Kuva 25. Esimerkkitulokset kairareian 20MOS824 (Suunnittelualue 6) transmissiviteettijakauman arvioinnista Pareto-jakaumaa hyödyntäen sekä injektoitavuuden arviointi eri injektointimateriaaleilla. Merkittävä tiivistysvaikutus voidaan saavuttaa ainoastaan käyttäen kolloidista silikaa.

Vinotunnelin tiivistys toteutetaan kriteeripohjaisena esi-injektointina. Tiivistyksen tyyppiprofiili on esitetty liitteessä 4. Injektoinnin arvioidut määrät ja käytettävät materiaalivalinnat suunnittelualueittain täsmentyvät suunnittelun edetessä.

9 Lähdeluettelo

Anglo American, 2023. Grouting Design Basis.

Amberg Engineering, 2022. Finland Sakatti Project – Conceptual TBM Study 2022.

ARUP, 2024. Preliminary Rock Mass Assessment and Tunnel Support Requirements. SALASSA-PIDETTÄVÄ.

Belem, T., Benzaazoua, M., 2008. Design and Application of Underground Mine Paste Backfill Technology. Geotech. Geol. Eng. 26, 147–174. <https://doi.org/10.1007/s10706-007-9154-3>

BY53 (Ed.), 2006. Kalliotilojen injektointi 2006, BY. Suomen betonitieto, Helsinki.

Eloranta, E., 2007. Geofysiikan Kenttäteoria (No. STUK-A198). Säteilyturvakeskus.

EN1997-1:2004, 2004. Eurocode 7. Geotechnical Design.

Gustafson, G., 2012. Hydrogeology for rock engineers. BeFo.

Gustafson, G., 1986. Geohydrologiska förundersökningar i berg. Bakgrund–metodik–användning. Stiftelsen Bergteknisk Forsk. BeFo 84, 86.

Gustafson, G., Stille, H., 2005. Stop criteria for cement grouting. Felsbau Z. Für Geomech. Ingenieurgeologie Im Bauwes. Bergbau 25, 62–68.

Gustafson, G., Stille, H., 1996. Prediction of groutability from grout properties and hydrogeological data. Tunn. Undergr. Space Technol. 11, 325–332.

Haataja, J., Käpyaho, J., Rahola, J., 2002. Numeeriset menetelmät käytännössä. CSC-Tieteellinen laskenta.

Hutchinson, D., 1996. Cablebolting in underground mines.

Kobayashi, S., Stille, H., Gustafson, G., Stille, B., 2008. Real time grouting control method. Development and application using Äspö HRL data.

Kuesel, T., King, E., Bickel, J., 1995. Tunnel Engineering Handbook. Springer.

Kvartsberg, S., Johan, T., Edward, R., Sebastian, A., 2023. Pre-investigation data in grouting design: recommendations regarding fracture transmissivity distributions. Presented at the Nordic Grouting Symposium 2023.

Mathews, K., Hoek, E., Wyllie, D., Stewart, S., 1980. Prediction of stable excavation spans for mining at depths below 1,000 meters in hard rock. Golder Assoc. Rep. Can. Cent. Min. Energy Technol. CAANMET Dep. Energy Resour. Ott. Can.

Mitchell, R.J., Olsen, R.S., Smith, J.D., 1982. Model studies on cemented tailings used in mine backfill. Can. Geotech. J. 19, 14–28.

NGI, 2022. Using the Q-system - Rock mass classification and support design.

Potvin, Y., Hadjigeorgiou, J., 2016. Selection of ground support for mining drives based on the Q-system. Presented at the 8th International Symposium on Ground Support in Mining and Underground Construction.

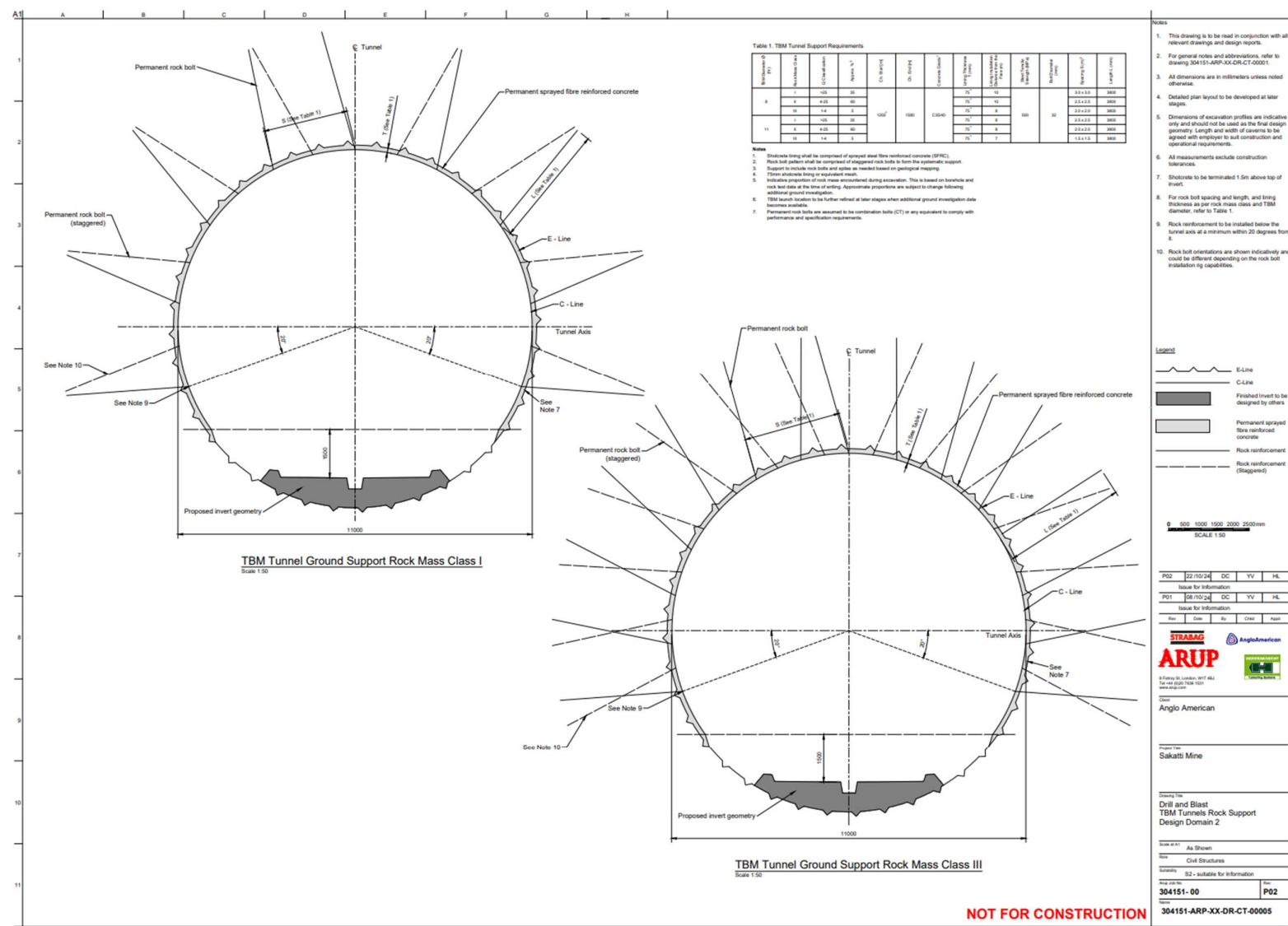
SRK, 2024. Sakatti PFSA Update Groundsupport by Rock Quality. SALASSAPIDETTÄVÄ.

Stille, H., 2015. Rock grouting: theories and applications. BeFo, Rock engineering research foundation.

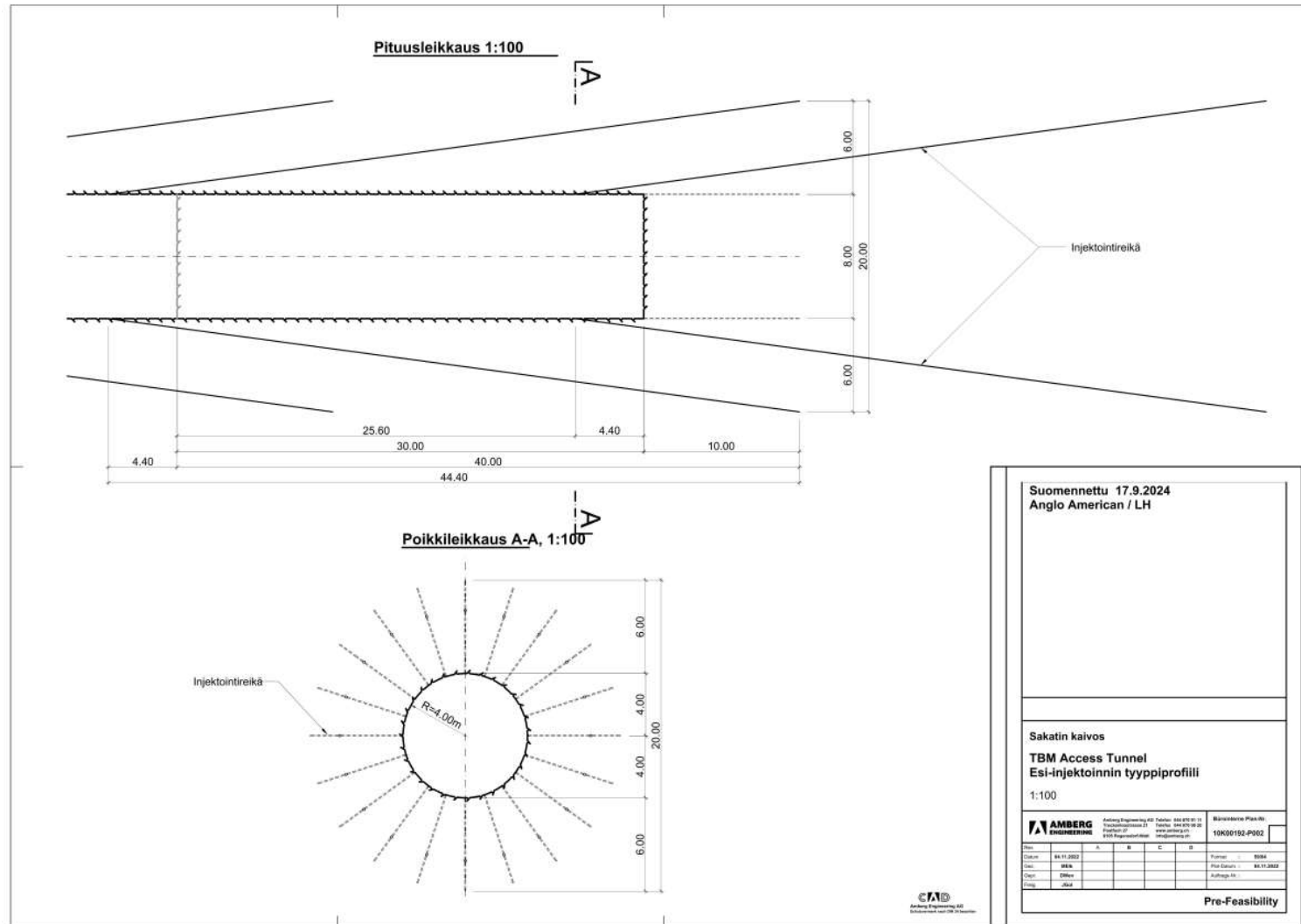
Suorinen, F., 2014. Reflections on empirical methods in geomechanics–The unmentionables and hidden risks. Proc. AusRock.

Tan, Y.Y., Zhang, K., Yu, X., Song, W.D., Wang, J., Hai, C.L., 2020. The mechanical and microstructural properties of composite structures made of a cement-tailing backfill and rock core. Miner. Basel Switz. 10, 159–.

Liite 1: Lujituksen tyypissuunnitelmaesimerkki Vinotunneli



Liite 2: Tiivistystyksen tyypisuunnitelma vinotunneli



The diagram illustrates the two-stage process of tunnel reinforcement in a rock mass with varying RQD (Rock Quality Designation).

RQD LUOKITUS (RQD Classification):

- <25% ERIITTÄIN HEIKKO (Extremely weak)
- 25-40% HEIKKO (Weak)
- 41-75% KOHTUULLINEN (Fair)
- 76-90% HYVÄ (Good)
- 91-100% ERINOMAINEN (Excellent)

INJEKTOINTIVAIHE (Grouting Stage):

This stage shows the initial tunnel profile (Louhittavan tunnelin linja) and the planned grouting pattern (Injektointi). The grouting is performed in two rows: a top row (Ruhjervyöhyke (RQD < 40 = kivenlaatu heikko)) and a bottom row (Kallio Pilarit (RQD > 40)). The grouting is performed in a 5.5m wide zone, with a 10m distance between the grouting rows. The tunnel profile is 5m x 5.5m.

TUENTAVAIHE (Support Stage):

This stage shows the tunnel profile (Tunnelin profiili, L 5m x K 5,5m) and the installed support system (Vaijeripultit). The support system consists of a central support (Tuenta) and a series of cables (Vaijeripultit) extending from the tunnel walls. The support is installed in a 10m wide zone, with a 10m distance between the support rows. The tunnel profile is 5m x 5.5m.

Versio 2 | 16/01/2025