

Veronika Vikstedt

# KOVETTUVAN KAIVOSTÄYTTÖMATERIAALIN OMINAISUUDET SEKÄ YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta  
Kandidaatintyö  
Huhtikuu 2021

# TIIVISTELMÄ

Veronika Vikstedt: Kovettuvan kaivostäyttömateriaalin ominaisuudet sekä ympäristövaikutukset  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Materiaalitekniikka  
Huhtikuu 2021

---

Kovettuva kaivostäyttö on potentiaalinen kaivostäyttömenetelmä täyttölouhintaa käyttävissä kaivoksissa ja se on teknisesti, ekonomisesti ja ekologisesti otollinen tapa tehdä kaivostäyttöä. Tämä työ käsittelee, millaisia ominaisuuksia kovettuvalla kaivostäyttömateriaalilla on ja lisäksi perehdytään kovettuvan kaivostäytön ympäristövaikutuksiin.

Maanalaisia kaivoksia louhittaessa olennainen ongelma on tyhjen tilojen, kuten avarrusten ja onkaloiden synty maan alle ja näistä aiheutuva sortuma- ja maan vajoamisen vaara. Mineraalirikkaita tukirakenteita on täytynyt jättää louhimatta, jotta on voitu säilyttää turvalliset olosuhteet sekä maan alla että pinnalla. Kaivostäyttöä varten on jouduttu myös louhimaan erikseen täyttömateriaalia, ja toisaalta louhinnasta syntyvää rikastusjätettä on täytynyt säilöä maan pinnalle. Kovettuva kaivostäyttö on tarjonnut ratkaisun näihin syntyviin ekonomisiin, ekologisiin ja turvallisuusongelmiin. Kovettuvassa kaivostäytössä käytetään hyödyksi syntyvää rikastusjätettä täyttömateriaalina, kun se sekoitetaan sideaineiden, seosveden ja lisäaineiden kanssa, ja saadaan näin aikaan tiheä ja viskoosinen seos. On myös poikkeavaa, että kovettuvaan kaivostäyttömateriaaliin voidaan käyttää hyödyksi mahdollisesti koko rikastushiekan raekokoskaala. Minimikaivosykli määräytyy täytön vaadittavan lujuuden kehittymiseen kuluvan ajan mukaan.

Työssä perehdytään, miten rikastushiekan ominaisuudet vaikuttavat täytön ominaisuuksiin, millaisia mekaanisia ominaisuuksia täytöllä on ja millaiset tekijät niihin vaikuttavat sekä millaisia ympäristövaikutuksia täytöllä on kaivoksen toiminnan aikana, sekä sen sulkemisen jälkeen. Rikastushiekan raekokojakauma, rakeen muoto ja ominaispaino sekä mineralogia vaikuttavat siihen, kuinka luja ja vakaa lopullinen täyttö on. On myös tärkeää huomioida rikastushiekan reologia, sillä se vaikuttaa olennaisesti täyttömateriaalin kuljetukseen maan alle.

Sementin hydrataatioprosessi on avainasemassa, kun tarkastellaan kovettuvan kaivostäytön mekaanisia ominaisuuksia. Mekaaniset ominaisuudet riippuvat merkittävästi kahdesta päämekanismista: täyttömateriaalin omapainon vaikutuksesta johtuvasta lujittumisesta ja hydrataation aikaansaamasta sisäiskuivumisesta. In-situ-olosuhteet poikkeavat laboratorio-olosuhteista esimerkiksi juuri eksotermisten hydrataatioreaktioiden vuoksi. Mekaaniset ominaisuudet riippuvat voimakkaasti kovettumislämpötilasta ja -ajasta.

Viimeisessä luvussa tarkastellaan kovettuvan kaivostäytön ympäristövaikutuksia. Maanalainen ympäristö vaikuttaa rikastushiekan ja viereisen kiviainesseinämän reaktiivisuuteen, veden ja ilman laatuun sekä pohjaveden virtaukseen. Jos rikastusjäte on hyvin sulfidipitoista, sulfidien hapettuminen kiviainesseinämissä ja täytössä voi aiheuttaa pitkällä aikavälillä epävakautta. Happamien valumavesien syntymistä on minimoitava. On oleellista myös arvioida kaivostäyttömateriaalin kokemia erilaisia hajoamisprosesseja, kuten karbonatisoitumista tai sulfaatista aiheutuvaa hajoamista sekä tarkastella hajoamisen pitkäaikaisvaikutuksia.

Avainsanat: Kovettuva kaivostäyttö, CPB, maanalainen kaivostoiminta, rikastusjäte, ympäristövaikutukset

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. TAUSTATIETOA KAIVOSTOIMINNASTA.....	2
2.1 Kaivostäyttömenetelmiä .....	2
2.2 Kovettuvan kaivostäytön perusominaisuuksia .....	3
3. RIKASTUSHIEKKA CPB:SSÄ.....	6
3.1 Reologia.....	6
3.2 Lujuuteen ja vakauteen vaikuttavat tekijät .....	8
3.2.1 Raekokojakauma .....	8
3.2.2 Rakeen muoto ja ominaispaino .....	10
3.2.3 Mineralogia .....	11
4. MEKAANISET OMINAISUUDET .....	14
4.1 CPB-tekniikka maanpinnan tukena .....	15
4.1.1 Horisontaalinen paine täytetyn avarruksen sivuseinämillä sekä vaadittu lujuus CPB:ssä .....	15
4.1.2 Kaareutumisefekti CPB:ssä .....	17
4.1.3 Täyttömässaseoksen optimointi lujuuden näkökulmasta .....	18
4.2 Kovettumislämpötilan vaikutus leikkauskäyttäytymiseen .....	19
4.2.1 Sementin hydrataationopeuden kasvu lämpötilan vaikutuksesta .....	22
4.2.2 Sisäiskuivumisen kasvu lämpötilan vaikutuksesta.....	23
4.2.3 Kovetuslämpötilan ja -ajan yhteisvaikutus leikkauskäyttäytymiseen rajapinnassa .....	24
4.3 Kemiallinen kutistuma .....	26
5. YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET .....	28
5.1 Maanalainen ympäristö .....	29
5.2 Ilman permeabiliteetti ja veden kylläisyys täyttömateriaalissa .....	30
5.3 Kemiallinen stabiliteetti CPB:ssä .....	32
5.3.1 Karbonatisoituminen .....	33
5.3.2 Sulfaatista aiheutuva hajoaminen .....	33
5.3.3 Hajoamisen pitkäaikaisvaikutukset.....	34
5.4 Sulfidin reaktiivisuus CPB:ssä .....	35
5.5 Sementti ja muut sitovat lisäaineet .....	37
6. YHTEENVETO.....	39
LÄHTEET .....	41

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AMD	Acid mine drainage, hapan valumavesi
ARD	Acid rock drainage, hapan valumavesi
BFS	Blast furnace slag, masuunikuona
CPB	Cemented paste backfill, kovettuva kaivostäyttö
DTG	Differential thermogravimetry, differentiaalinen termogravimetria
EPA	U.S. Environmental Protection Agency, Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto
FA	Fly ash, lentotuhka
MeMi	Mehling Environmental Management Inc.
MEND	Mine Environment Neutral Drainage
MIP	Mercury intrusion porosimetry, elohopeaporosimetria
NP	Neutralization potential, neutralisaatiopotentiaali
NT	Natural tailings, luonnollinen rikastushiekka
NPR	Neutralization potential ratio, neutralisaatio- ja happoa tuottavan potentiaalın suhde
OC	Oxygen consumption, hapenkulutus
OPC	Ordinary Portland cement, tavallinen portlandsementti
ST	Silica tailings, keinotekoinen rikastushiekka (piidioksidia sisältävä)
TG	Thermogravimetry, termogravimetria
UCS	Uniaxial compressive strength, yksiakiaalinen puristuslujuus

# 1. JOHDANTO

Maanalaisesta kovettuvasta kaivostäytöstä on tullut standardikäytäntö monissa täyttö-louhintaa käyttävissä kaivoksissa ja se on kasvavissa määrin maanalaisten kaivosope-raatioiden tärkeä osatekijä [7]. Taloudellisten mineraalien niukkuus maanpinnan lähellä on lisännyt syvempää maanalaista kaivostoimintaa. Turvallisuus- ja ympäristötekijät ovat myös suuressa roolissa kaivosteollisuudessa, mikä on saanut monet kaivosyritykset har-kitsemaan kaivosjätteen käyttöä täyttömateriaalina, jolla vältetään kaivoksen sortuminen myöhemmissä ja syvemmissä louhinnan vaiheissa, maanpinnan vajoaminen kaivoksen sulkemisen jälkeen ja ympäristön saastuminen. [1]

Tässä työssä perehdytään kovettuvan kaivostäytön ominaisuuksiin sekä ympäris-tövaikutuksiin. Kovettuva kaivostäyttömateriaali koostuu pääosin rikastushiekasta, side-aineista, seosvedestä ja lisäaineista, joilla kaikilla on merkittävä vaikutus täytön ominai-suuksiin. Luvussa 3 pohditaan, miten kaivosjätteen eli rikastushiekan käyttö täytössä vaikuttaa sen ominaisuuksiin. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi täyttömateriaalin reolo-gia, rikastushiekan partikkelikokojakauma ja mineralogia. Luvussa 4 on tarkasteltu, mil-laisia mekaanisia ominaisuuksia täytöllä on ja mitkä tekijät niihin vaikuttavat. Oleellisinta on tarkastella täyttömassan lujuutta ja painejakaumaa, joka rakenteeseen syntyy. Työssä keskitytään myös arvioimaan leikkauskäyttäytymistä ja siihen huomattavasti vai-kuttavaa kovettumislämpötilaa.

Viimeisenä katsauksena luvussa 5 pohditaan täyttömateriaalin vaikutuksia ympä-ristöön. Maanalainen ympäristö poikkeaa maanpäällisistä tai laboratorio-olosuhteista ja rikastushiekan ja kiviainesseinämän reaktiivisuuteen, maanalaiseen ilman ja veden laa-tuun sekä maanalaisen veden (kaivosveden ja pohjaveden) virtaukseen on kiinnitettävä huomiota, kun suunnitellaan kovettuvaa kaivostäyttöä. Työssä arvioidaan myös täytön kemiallista stabiliteettia ja syntyviä hajoamisreaktioita sekä sulfidien reaktiivisuutta.

## 2. TAUSTATIETOA KAIVOSTOIMINNASTA

Kaivostoiminta jaetaan avolouhoksiin ja maanalaisiin louhoksiin. Puhuttaessa maanalaisista kaivoksista on tärkeää huomioida louhimisesta aiheutuvien erilaisten tyhjen tilojen syntyminen maan alle, kuten avarrusten, onkaloiden ja aukkojen synty. Nämä maanalaiset tyhjät tilat aiheuttavat louhinnan epävakautta koskevan vaaran, kun louhitaan mineraalirikkaita vierekkäisiä kantavia pilareita. Maanalaisiin kaivoksiin liittyviä muita riskejä ovat maan vajoamisen vaara ja siitä johtuvan vahingon aiheutuminen pinnalla olevalle infrastruktuurille sekä kaivostoiminnan aikana että kaivoksen sulkemisen jälkeen. [1]

Maanalaisten olosuhteiden pitäminen vakaana tarkoittaa myös sitä, että mineraalirikkaita alueita on jätettävä louhimatta tukirakenteiden säilymiseksi. Kovettuva kaivostäyttö tarjoaa mahdollisuuden louhia myös näitä alueita ja hyötyä alueista taloudellisesti samalla taaten turvallisen ja stabiilin ympäristön, kun tukevat rakenteet korvataan täyttömateriaalilla. [4] Maanalaisissa kaivoksissa kaivostäyttö on keskeisessä asemassa yllä mainittujen riskien takia. Nykyään kaivosteknologian kehittymisen johdosta on käytössä monenlaisia menetelmiä maanalaisten tyhjen tilojen uudelleen täyttöön tai kaivostäyttöön. [1]

Aiemmin kaivoksen täyttömateriaalina on hyötykäytetty jättekiviainesta tai karkeaa rikastushiekkaa, johon on sekoitettu vettä ja sideainetta, kuten sementtiä. Hienomman rikastushiekan käyttö on tällöin koettu ongelmalliseksi, eikä sitä ole voitu tästä syystä käyttää. Kovettuvan kaivostäytön kehittyminen on tarjonnut mahdollisuuden käyttää myös rikastushiekan hienompaa jaetta hyväksi täyttömateriaalissa näin vähentäen rikastushiekan ylimääräistä säilöntää. Hienoaineksen lisääminen täyttömassaan saa aikaan tahnamaisen materiaalin, joka vähentää täytön lajittumista sekä ylimääräveden syntymistä kuljetuksen, täytön ja kovettumisen aikana. [4]

### 2.1 Kaivostäyttömenetelmiä

Yleisimpiä kaivostäyttömenetelmiä ovat kiviainestäyttö, hydraulinen täyttö, kovettuva täyttö ja alumiinisilikaattipohjainen täyttö. Nämä menetelmät ottavat huomioon louhinnan taloudellisuuden sekä kaukaisemmat tavoitteet, kuten kaivoksen kehityksen tulevaisuudessa sekä kaivoksen sulkemisen. [1]

Kiviainestäyttö voidaan kuvata tekniikaksi, jossa täyttömateriaalin komponentit, kuten kivi, sora ja kiinteä teollisuusjäte, kuljetetaan työvoiman, painovoiman tai koneiston avulla täytettävään avarrukseen. Yleensä käytetään hyödyksi louhinnassa syntyvää si-

vukiveä, joka murskataan, seulotaan ja sekoitetaan koneellisesti ottaen huomioon rae- koon jakaumamalli, jonka jälkeen seosta voidaan suoraan käyttää maanalaisiin kaivos- täyttöihin ja puristetun täyttöalueen tuottamiseen. Kyseinen täyttömenetelmä on talou- dellinen menetelmä, joka vähentää kaivosjätteen määrää maan pinnalla, vähentää ym- päristön saastumista poistamalla sadeveden kontaktin jätteeseen ja lisää kaivosalueen vakautta. Kiviainestäyttö ei kuitenkaan ole aina toteutettavissa tai sovellettavissa. [1]

Hydraulisen täytön periaatteena on, että se käyttää täyttömateriaalin kuljetusväli- neenä vettä. Täyttömateriaalina käytetään muun muassa rikastejätettä, hydrofiilistä ku- oonaa ja erilaisia hiekkoja, jotka saadaan veden avulla virtaamaan paremmin ja näin ollen kuljetettua paremmin täyttöalueelle. Hydraulisessa täytössä kulkuasemat kaivokseen suljetaan tukiseinämillä ja niihin asennetaan vedenpoistojärjestelmä. Vedenpoistojärjes- telmän tehtävä on kuivattaa täyttöaines, kun se on laskettu täytettävään tilaan. Osa ve- destä kertyy täyttömateriaalin päälle. Vesi poistuu poistojärjestelmän kautta, suoto- tai dekantoituneena vetenä. Täyttömateriaalista poistetaan erittäin pienet partikkelit, jolloin saadaan kasvatettua täyttömateriaalin läpäisevyyttä. Hydraulinen kaivostäyttö voidaan tehdä kovettuvana tai kovettumattomana. Yleisesti ottaen tahnatäytöissä hienoaineksen jae on suurempi kuin hydraulisissa tai sementoiduissa hydraulisissa täytöissä, mutta nii- den kolloidinen jae eli hienempi kuin 2 µm:n jae on merkityksellinen. [1]

Alumiinisilikaattipohjainen täyttö on verrattain uusi tekniikka hydraulisen, kivi- ai- nes- ja pastatäytön rinnalla. Se siirretään täyttöalueelle painovoiman tai matalapaine- pumpun avulla ja suurin ero verrattuna muihin menetelmiin on materiaalin täyteaine. Täyttömateriaali koostuu pääosin polttoaineteollisuuden hiilijätteestä sekä lentotuhkasta, toisin kuin esimerkiksi CPB:ssä täyteaineena käytetään rikastushiekkaa. [11] On tärkeää huomata, että hiilijäte ja lentotuhka käyttäytyvät eri tavoin eri termisissä aktivointilämpö- tiloissa. Termisen aktivointilämpötilan noustessa hiilijätteen virtaavuus ja pozzolaanis- et ominaisuudet paranevat, mutta toisaalta samanaikaisesti lentotuhkan virtaavuus heikke- nee voimakkaan pinnalla tapahtuvan yhteen kasvun vuoksi. Täyteaineen termisen akti- vointilämpötilan optimointi on siis olennaista kyseisessä täyttömenetelmässä. Täyttöma- teriaali on todettu ympäristöystävälliseksi vaihtoehdoksi, sillä se on testattu myrkyllisten huuhtoutumien varalta ja tulokset eivät ylittäneet EPA:n (U.S. Environmental Protection Agency) asettamia rajoituksia. [1]

## 2.2 Kovettuvan kaivostäytön perusominaisuuksia

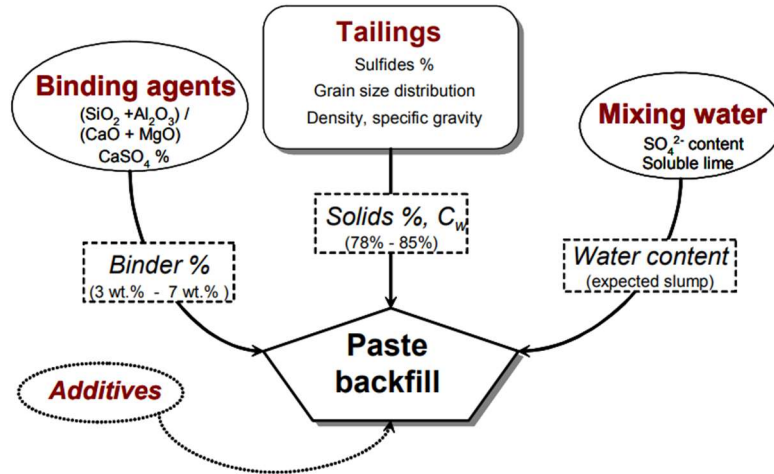
Kovettuva kaivostäyttö eli CPB yhdistää rikastejätteen hyötykäytön kaivostäyttöteknolo- giaan. Näin luodaan taloudellisesti kestävä tapa hoitaa kaivoksen jätehuolto ja turvalliset

työolosuhteet maanalaisissa kaivoksissa, ympäristöhyötyjen lisäksi. CPB:n käyttökustannukset ovat matalammat verrattuna hydrauliseen täyttöön ja pastatäytön käyttö vähentää maanpinnan läheisyyteen loppusijoitettavan rikastusjätteen määrää ja näin ollen rikastushiekan käsittelyyn liittyvät pääomamenot pienenevät [9]. Kovettunut täyttömateriaali muodostaa avarrukseen lujittuneen pylvästyypin maaperän tuen viereiselle kaivosoperaatiolle maanalaisissa kaivosolosuhteissa. [1]

Täyttömateriaali muodostuu suurimmaksi osaksi rikastejätteestä, jota on 70–85 massaprosenttia. Lisäksi seokseen lisätään joko puhdasta tai kaivoksessa prosessoitua vettä niin, että veden ja sementin suhde eli w/c-suhde on 2,5–7 %. Sideaineen osuus on 3–7 % kokonaisuudesta. Yleensä CPB-täyttömateriaali valmistetaan kuivatusta malminrouhimen rikastelietteestä sakeuttamalla tai suodattamalla liete suodinlietekakun aikaansaamiseksi. Tämän jälkeen saadut kiinteät partikkelit voidaan sekoittaa hydrauliseen sideaineeseen eli yhden tai useamman tyyppiseen sementtiin. Sideaineena voi olla esimerkiksi tavallinen portlandsementti, sulfaatinkestävä sementti, jauhettu hienorakeinen masuunikuona tai hienonnettu lentotuhka. Yleensä rakeisen rikastushiekan täytyy sisältää vähintään 15 painoprosenttia 20 µm halkaisijaltaan olevia tai pienempiä partikkeleita, jotta seos säilyttää tarpeellisen kolloidisen veden pastan muodostumisen kannalta [5]. Sulfidipitoisten materiaalien käyttö hydraulisena sideaineena ei ole enää nykyisin suosittua. [1]

Muita lisäaineita voidaan lisätä parantamaan esimerkiksi täyttöaineen pumpattavuutta. Seoskokonaisuuden tyyppi ja raekokojakauma sekä sideaineen, veden ja muiden lisäaineiden suhde sekä tyyppi riippuvat vaadittavasta valmiin CPB:n lujuudesta, tiheydestä ja läpäisevyydestä. Täyttömateriaalin tulisi sisältää tarpeeksi myös hienoainesta, joka estää materiaalin vajoamisen ja erkaantumisen kuljettaessa ainesta loppusijoitukseen maan alle. [1] Kuva 1 on skemaattinen esitys CPB:n laatuun vaikuttavista komponenteista, kuten sideaineista, rikastushiekan mineralogiasta, raekoosta, tiheydestä ja kiintoainespitoisuudesta sekä seosveden kemiallisesta koostumuksesta. [7]





**Kuva 1** Skemaattinen diagrammi CPB:n komponenteista. [7]

Sementin hydrataatio eli veden kemiallinen liittäminen sementtiin saa CPB-lietteen muuttumaan itsekantavaksi, jolloin se saavuttaa jäykkyyttä ja lujuutta. Kun riittävä lujuus on saavutettu, voidaan louhinnassa siirtyä seuraavan kaivauksen tekoon, tehdyn täytön viereen CPB:n tukemana. CPB:n tarpeellisen lujuuden kehittymiseen kuluva aika määrää minimikaivossyklin ilman, että turvallisuusolosuhteet muuttuvat. Jos CPB altistetaan liian aikaisin kuormitukselle, se voi johtaa rakenteen pettämiseen aiheuttaen massan virtaamisen louhoksiin tai louhittavan kiviaineksen murtumisen ilman tarpeellista tukea CPB:stä. Toisaalta aikaisemmin käytetyt CPB sekoitukset ovat olleet konservatiivisia ja niissä on käytetty tarpeettoman suuria sementtipitoisuuksia. On tärkeää ymmärtää materiaalin käyttäytymistä, jotta voidaan suunnitella mahdollisimman tehokkaita CPB sekoituksia optimaalisen suorituskyvyn takaamiseksi sekä sementtipitoisuuden ja siihen liittyvien kustannusten optimoimiseksi samalla minimoiden turvallisuusriskit. [4]

Muista kaivostäytöistä poiketen kovettuvan kaivotäyttömateriaalin vesipitoisuus on huomattavan korkea. Näin korkea vesipitoisuus ei ole edellytys sementtimateriaalin hydrataatiolle, mutta se on välttämätöntä täyttöaineksen sakeudelle ja virtaavuudelle kuljetuksen aikana putkistossa. Täyttömateriaali valmistetaan maanpäällisessä CPB-laitoksessa, josta se johdetaan putkistoa pitkin joko painovoima- tai pumppausavusteisesti maanalaisiin tyhjiin tiloihin loppusijoituspaikalleen. Materiaalin juoksevuus ja virtaavuus ovatkin tärkeitä toiminnallisia tekijöitä tuoreen kaivostäyttömateriaalin kuljetettavuuden kannalta. Toisaalta kyseiset reologiset tekijät vaikuttavat myös putkiston tukkeutumisen ennaltaehkäisyyn. Jos putkistoon aiheutuu tukkeumia täyttömateriaalista, se voi aiheuttaa suuret taloudelliset tappiot kaivostoiminnalle tuotannon viivästymisen vuoksi. [1]

### 3. RIKASTUSHIEKKA CPB:SSÄ

Kovettuva kaivostäytön täyttömateriaali toimii tukirakenteiden lisäksi hyvänä tapana hävittää syntyvää rikastusjätettä ja sitä pidetään sopivana jätehuoltometodina. CPB on teknisesti, ekonomisesti ja ympäristön kannalta edullisempi tapa tehdä kaivostäyttöä verrattuna esimerkiksi hydrauliseen ja kiviainestäyttöön. [5]

Kovettuvan kaivostäytön etuja ovat esimerkiksi seuraavat huomiot. Suuri osa syntyvästä jätteestä voidaan loppusijoittaa maan alle, kun käytetään rikastusjätettä täyttömateriaalina, eikä näin ollen tarvita tilaa jätteenkäsittelylle maan pinnalla. Korvaamalla kannattelevat rakenteet täyttömateriaalilla, saadaan myös suurempi osa malmista louhittua, joka lisää tuottavuutta. Täyttömassan partikkelit eivät lajitu täyttömateriaalissa, minkä vuoksi kokonainen louhittu avarrus voidaan täyttää kerralla estäen ympäröivien seinämien luhistumista. Noin 90 prosenttia prosessoidusta vedestä voidaan ottaa talteen saostamisen ja suodattamisen avulla ennen rikastusjätteen sementtitäyttöä. Täyttömateriaalin permeabiliteetti on tästä syystä alhainen ja kyllästysaste korkea, minkä vuoksi huokosvettä ei vuoda täytön ulkopuolelle, ja toisaalta maanalaista vettä ei tihku täyttöön. Alhainen permeabiliteetti estää myös hapen diffuusiota ja näin ollen vähentää happamien valumavesien (AMD) syntymistä. [5]

Kovettuvassa kaivostäytössä on myös omat haittapuolensa. Pumppuoperaatiot vaativat korkean paineen tiheän täyttömateriaalin siirtämiseen ja tästä seuraa korkeat huolto- ja energiakustannukset. Jos täyttömateriaalin partikkelikoko, tiheys, ominaispaino tai veden määrä vaihtelee, se voi myös aiheuttaa ongelmia kuljetusjärjestelmään. Lisäksi hyvin sulfidipitoinen rikastusjäte voi aiheuttaa pitkäaikaista epävakaisuutta sulfidien hapettuessa hapen ja veden läsnä ollessa. CPB vaatii tarkkaa laskenta- ja suunnittelutyötä. [5]

CPB on joka tapauksessa suhteellisen nopea operaatio johtuen sen nopeasta lujuuden kasvusta tietyllä sideainepitoisuudella. Näin ollen myös kaivossykli on lyhyempi kuin hydraulisessa täytössä. Sementtipitoisuus lisää myös happamien valumavesien neutralisaatiopotentiaalia (NP). Lisäksi CPB:n kuljetus putkistoa pitkin lisää jouhevuuutta verrattuna tavanomaiseen kuljetusjärjestelmään siirreltäville laitteistoilla. [5]

#### 3.1 Reologia

Kaivostäyttömateriaalin reologia eli sen virtaavuus on yksi tärkeimmistä CPB:n ominaisuuksista, sillä se vaikuttaa täyttöaineksen siirtämiseen putkistoa pitkin täytettävään

avarrukseen. Jotta täyttöaineen kuljetus olisi tehokasta ja taloudellista, täytyy täyttöaineen kiintoaineen osuus olla mahdollisimman suuri samalla kun energiakustannukset ovat mahdollisimman pienet. On kuitenkin myös huomattava, että jos kiinteän aineen osuus on kovin suuri, massan virtaavuus heikkenee ja kitkahäviöt kasvavat putkistossa sekä tehokkuus laskee. Tästä syystä virtaavuus on tärkeä täyttöaineen ominaisuus ja siihen vaikuttaa fysikaaliset, kemialliset ja mineralogiset ominaisuudet. [5] Kaivosalan hyväksymä määritelmä CPB:stä toteaa, että CPB:n reologista käyttäytymistä voidaan pitää ei-newtonilaisena [4].

Tekijöitä, jotka vaikuttavat CPB massan nestemäisyyteen ja juoksevuteen ovat pääasiassa kiintoaineen osuus, veden ja sementin suhde, sideaineen tyyppi ja osuus, mineraali- ja kemikaalilisäaineet sekä sideaineen ja rikastushiekan partikkelikokoja-kauma ja partikkeleiden muoto. Myös muita vahvasti vaikuttavia tekijöitä on esimerkiksi rikastushiekan tiheys, sen pinnan ala, kemiallinen ja mineraloginen koostumus sekä muut pintaominaisuudet. [5]

Yleensä CPB massan virtaavuusominaisuudet selvitetään painaumatestauksella. Testauksen tuloksena saadaan painauma-arvo, joka vaihtelee noin välillä 15,24–25,40 cm (6–10 in). Mitä suurempi painauma-arvo on, sitä enemmän CPB seoksessa on vettä ja sitä helpommin seosta pystytään kuljettamaan putkistossa. Ylimäärä vesi aiheuttaa kuitenkin sen, että seoksen kovettumisaika kasvaa ja syntyvän rakenteen lujuus ja kestävyys heikkenevät. Tästä syystä käyttämällä kemiallisia pehmittimiä täyttömateriaaliseoksessa, voidaan pienentää w/c-suhdetta seoksessa ja parantaa CPB:n virtaavuusominaisuuksia, lujuutta ja kestävyyttä. Kahden jälkimmäisen parantuminen selittyy mikrorakenteen huokoisuuden pienenemisellä. [5]

Pienempi w/c-suhde vähentää myös seoksen nesteytymisen riskiä varhaisessa kovettumisen vaiheessa. On siis tärkeää, että seokselle on arvioitu sopiva painauma-arvo, koska se vaikuttaa suuresti massan sulavaan kuljetukseen ja estää esimerkiksi putkiston tukkeumien syntymistä. Oleelliseksi huomioksi nousee myös myötöjännityksen ja viskositeetin vaikutus virtaavuusominaisuuksiin. Myötöjännitys kuvaa sitä jännityksen arvoa, jolla ylitetään nesteen lepokitka. Nesteen viskositeetti on leikkaus- tai vetojännityksen aiheuttama asteittaisen muodonmuutoksen vastus. [5]

**Taulukko 1** Painauma- ja myötöjännitysarvot eri seoksissa. [5]

	Coal tailings	Gold tailings	Lead-zinc tailings
Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	1450	2800	4100
Solids concentration (%)	36	75	75
Slurry density (kg/m <sup>3</sup> )	1120	1930	2310
Slump height (mm)	203	203	203
Yield stress (Pa)	160	275	330

Taulukosta 1 nähdään, että samalla painauma-arvolla saadaan eri myötöjännityksen arvoja eri tiheyden omaaville materiaaleille. Voidaan siis arvioida, että painauman lisäksi on oleellista määrittää myötöjännitys eri partikkelikoon, tiheyden sekä mineralogisen ja kemiallisen koostumuksen rikastushiekoille. [5]

## 3.2 Lujuuteen ja vakauteen vaikuttavat tekijät

Kaivostäytön lujuuteen ja vakauteen vaikuttavat lyhyen ja pitkän aikavälin tekijät voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoihin tekijöihin. Sisäiset tekijät liittyvät pääasiassa rikastushiekan, sideaineen ja seosveden ominaisuuksiin sekä yleisiin sekoitusominaisuuksiin. Tällaisia ominaisuuksia ovat esimerkiksi rikastushiekan partikkelien kokojakauma ja niiden muoto, kemiallisten lisäaineiden käyttö seoksessa, seosveden sulfaattipitoisuus ja pH sekä w/c suhde ja kiintoaineen pitoisuus. [5]

Ulkoiset tekijät ovat kaivostäytön ympäristöön eli in-situ-olosuhteisiin sidonnaisia tekijöitä. Näitä voivat muun muassa olla kovettumislämpötila, omapainon lujittava vaikutus, täytön ja kallion rajapinta, täytön kaareutuvuusefekti ja massan kutistuma, kuivatus- ja pohjavesitilanne sekä avarruksen mitat. [5] Ulkoihin tekijöihin perehdytään luvussa 4.

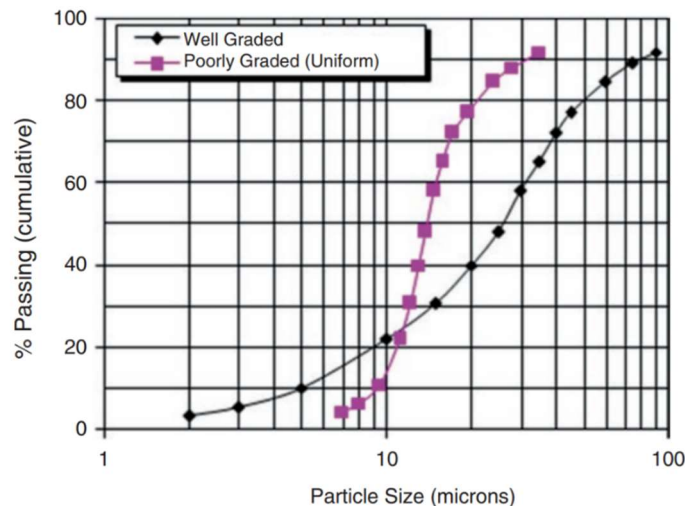
### 3.2.1 Raekokojakauma

Rikastushiekan tärkeimpiä kaivostäytön ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä on partikkelikokojakauma. Rikastushiekka voidaan jakaa kolmeen kokoluokkaan riippuen sen hienoaineksen määrästä, kuten taulukosta 2 nähdään; hieno, keskikokoinen ja karkea tyyppi. Tämä jako riippuu alle 20 µm jakeen osuudesta rikastushiekassa. Hienoaineksen osuudella rikastushiekassa on tärkeä tehtävä materiaalin virtaavuuden kannalta. Mitä isompi osuus hienoainesta on täyttömässä, sitä hankalampaa veden on virrata täyttömateriaalin läpi. Hienoaines auttaa myös lietteen kuljettamisessa, sillä se edistää karkean aineksen virtaavuutta lietteessä, joka ei muuten laskeudu putkistossa. On siis tärkeää, että tietty hienoaineksen osuus on läsnä lietteessä sen koossapysyvyyden kannalta. Yleisesti täyttömateriaalissa halkaisijaltaan alle 20 µm hienoaineksen osuus on oltava vähintään 15 painoprosenttia, kuten taulukosta 2 nähdään. [5]

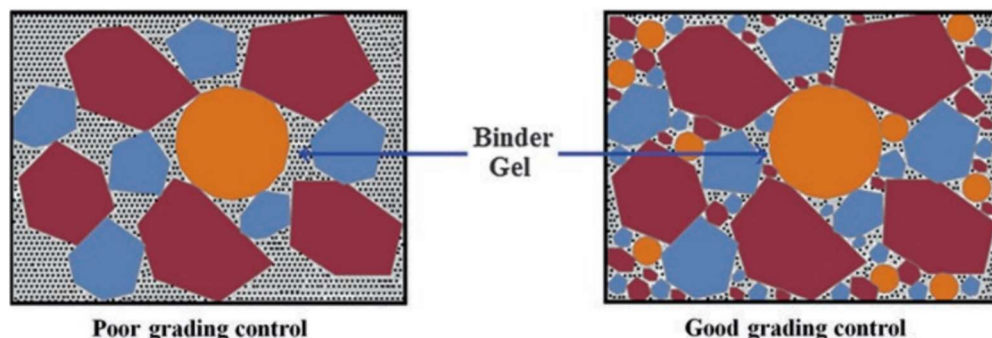
**Taulukko 2** Pastatäytön kokojakaumakategoriat. [5]

Tailings type	Finer than 20 µm content (wt.%)	7 in. slump solid content (wt.%)	Explanation (depending on water-to-cement ratio)
Coarse	15–35	78–85	High strength acquisition
Medium	35–60	70–78	Lower strength acquisition
Fine	60–90	55–70	Poor strength acquisition

Partikkelikokojakaumaa voidaan muokata hydrosyklonien avulla ja se parantaa koko täyttömateriaalin suorituskykyä. Hydrosyklonilla tuotetaan eri raekokoluokkia vastaamaan taulukossa 2 näkyvää kolmea rikastushiekkatyyppiä. Kirjallisuudessa on erimielisyyttä kuitenkin siitä, mitkä olisivat optimin kokojakauman vaatimukset ja mitat täyttömateriaalille. Tämä johtuu suurilta osin siitä, että on otettava huomioon mineralogisen koostumuksen ja vaihtelevuuden vaikutus sementin laatuun ja kuljetusjärjestelmiin. Kuvaaja 1 esittää tyypillistä partikkelikokojakaumaa hyvin lajittuneelle ja heikosti lajittuneelle eli tasarakeiselle jakaumalle. Hyvin lajittunut jakauma sisältää laajan vaihteluvälin eri kokoluokkia, kun taas tasarakeisella jakaumalla vaihteluväli on kapea. Hyvin lajittuneen partikkelikokojakauman omaava täyttöaines mahdollistaa vahvempien sidosten muodostumisen, kun hienoaines täyttää isompien partikkelien väliset tyhjät välit. Vahvempien sidosten muodostumien perustuu geelimäisen sideaineen valtaaman tilavuuden pienenemiseen, kuten kuvassa 2 on esitetty. [5]



**Kuvaaja 1** Tyypillinen partikkelikokojakauma. [5]



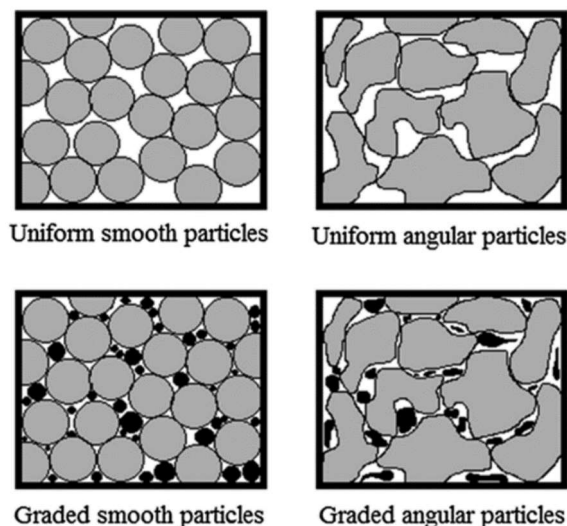
**Kuva 2** Esitys hienojen partikkeleiden eduista täyttömateriaalissa. [5]

Lietteenpoisto aiheuttaa muutoksia rikastushiekan fysikaalisissa, kemiallisissa, mineralogisissa ja virtaavuusominaisuuksissa. Kun tutkittiin rikastushiekan alle 20  $\mu\text{m}$  hienoaineksen osuuden vaikutusta pastatäytön lyhytaikaiseen lujuteen, havaittiin

myönteinen vaikutus lujuudessa vähentämällä lietteenpoistolla hienoaineksen osuutta. Suurin lujuus saavutettiin 25 massaprosentin hienoainespitoisuudella. Liete-erotetun rikastushiekan lujuus oli myös 12–52 % suurempi kuin käsittelemättömän rikastushiekan. Vastaavasti karkeasta rikastushiekasta, joka sisälsi 16–27,7 massaprosenttia alle 20 µm hienoainesta, valmistetut pastatäytenäytteet tuottivat huomattavasti suuremman pitkäaikaisen lujuuden (1,4–4,3-kertaisen) kuin keskikokoisesta eli 49,7–51 massaprosenttia alle 20 µm hienoainesta sisältävästä rikastushiekasta valmistetut näytteet. Lietteenpoistolla voidaan parantaa pastatäytön lujuutta ja vakautta sekä sen todettiin myös vähentävän sideaineen kulutusta 13,4–23,1 %:a riippuen rikastushiekan luontaisista ominaisuuksista. [5]

### 3.2.2 Rakeen muoto ja ominaispaino

Yksi kaivostäytön lujuuteen vaikuttavista sisäisistä tekijöistä on partikkelin muoto. Monesti prosessoinnin tuloksena, kuten räjäytyksissä ja murskauksessa, syntyy kulmikkaita partikkeleita, joiden tekstuuri voi olla hyvin karkea. Jos verrataan kahta saman ominaispainon omaavaa partikkelia, joista toinen on muodoltaan pyöreä ja toinen litteä, jälkimmäinen asettuu huomattavasti hitaammin kuin pyöreä partikkeli, mikä vaikuttaa täyttömateriaalin sakeutumiseen, lujittumiseen ja kuivatusaikaan. Esimerkiksi killemineraalien litteä muoto ja sileä pinta aiheuttavat sen, että sementtitäytön lujuus laskee. Lisäksi sementin on hankala luoda korkean lujuuden omaavia partikkelikertymiä killeen sileän pinnan vuoksi. Partikkelin muoto vaikuttaa myös kuvan 3 mukaisesti syntyviin partikkelien välisiin tyhjiin tiloihin ja niiden välisiin reitteihin, jotka pidättävät ja kuljettavat nesteitä. [5]



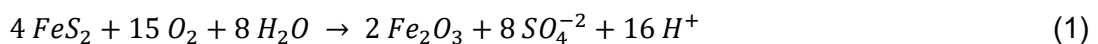
**Kuva 3** Partikkelin muodon vaikutus rikastushiekan keskinäiseen kytkeytymiseen täyttömateriaalissa. [5]

Täyttöaineen lujuuden ja rikastushiekan ominaispainon välillä on lineaarinen yhteys, joka voidaan myös havaita aiemmin esitetyn painaumatetitaulukon 1 tuloksista. Sideaineen lisäys täyttömateriaaliseokseen määräytyy yleensä kiintoainepitoisuuden mukaan, joten mitä suurempi rikastushiekan ominaispaino on, sitä enemmän sideainetta tarvitaan tilavuudeltaan. Kiintoaineen muodostaa rikastushiekka ja sideaine kuivana. On kuitenkin huomioitava, että sideaineen määrän kasvu lisää CPB:n käyttökustannuksia. Rikastushiekan ominaispaino on taipuvainen kasvamaan pienemällä hienoaineksen osuudella, kun sulfidikoostumus kasvaa lietteenpoiston jälkeen. Hienoainepitoisuuden pieneneminen kuitenkin laskee myös rikastushiekan ominaispinta-alaa. Jos rikastushiekan ominaispinta-ala on suuri, myös kostutettavan ja kovetettavan pinnan ala on suuri. [5]

### 3.2.3 Mineralogia

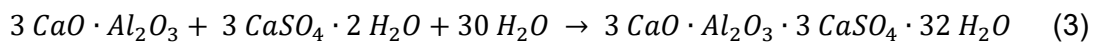
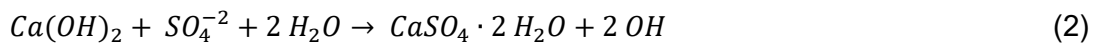
Rikastushiekan mineralogia vaikuttaa paljolti siihen, millaisia ominaisuuksia lopullisella kaivostäytöllä on. Näitä ominaisuuksia ovat esimerkiksi vedensitomiskyky, lujuus, laskeutumisominaisuudet (eng. settling characteristics) ja abrasiivinen vaikutus. Savimineraalit, kiille ja serisiitti parantavat täyttömateriaalin vedensitomiskykyä, kun taas silikaatimineraalit (etenkin kvartsi) aiheuttavat voimakasta abrasiivista kulumista kuljetusputkistoon. Sulfidimineraalit vaikuttavat myös kaivostäytön lujuuteen ja vakauteen. [5]

Sulfidimineraalien reaktiivisuus riippuu siitä, mikä sulfidityyppi on kyseessä ja reaktiivisuus voidaan järjestää esimerkiksi seuraavalla tavalla: magneetikiisu (pyrrotiitti) > arseenikiisu > rikkikiisu (pyriitti) > kuparikiisu (kalkopyriitti) > sinkkivälke (sfaleriitti) > lyijyhohde (galeniitti) > kuparihohde (kalkosiitti). Sulfideista aiheutuvan hapettumisen nopeus kasvaa, kun rikastushiekan ominaispinta-ala, hapen saanti ja lämpötila kasvavat. Rikkikiisu eli pyriitti on altis hapettumiselle hapen ja kosteuden läsnä ollessa muodostaen happoa ja sulfaattia kaavan (1) mukaan. [5]



CPB:ssä on neljä pääasiallista sisäistä lähdettä sulfaattien muodostumiselle, joista merkittävin on sulfaatin muodostuminen suoraan rikastushiekasta. Olennaisin sulfaatti rikastushiekassa on pyriitti, mutta sulfaattityyppi riippuu myös siitä, mitä mineraalityyppejä louhitaan. Jos täytestä esiintyy sulfaattia, se voi johtua esihapettuneen rikastushiekan läsnäolosta. Kun rikasteeseen sekoitetaan sideaine, voidaan todeta rikasteen hapettumisen olevan merkityksetöntä korkeasta kyllästysasteesta johtuen. Korkea kyllästysaste vähentää hapen diffuusiota täytteen läpi. [5]

Toinen sulfaatin lähde on täytemassaan lisättävä vesi, joka voi sisältää vapaita sulfaatti-ioneja. Vesi on peräisin joko esihapettuneesta rikastushiekasta tai se on prosessointivettä. Massaan syntyy vapaita kalsium-ioneja, kun epästabiili portlandiitti ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ja kalsiumaluminaatti ( $\text{C}_3\text{A}$  eli  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ) liukenevat [5, 12]. Rikastushiekan sulfaattirikkaassa vedessä oleva sekä pyriitin hapettumisessa syntyvä sulfaatti reagoi vapaiden kalsium-ioneiden kanssa aiheuttaen sekundäärisen turpoavan kipsin ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ ) ja voimakkaasti laajenevan ettringiitin ( $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$ ) saostumisen kaavojen (2) ja (3) mukaan. Syntyvät kipsi ja ettringiitti voivat laajentua 2,2- ja 2,8-kertaisiksi, jolloin ne aiheuttavat 70–200 MPa sisäisen jännityksen kiteytymispaineen takia. Tämä voi johtaa komponenttien väliseen halkeiluun ja koheesion menetykseen kuvan 4 mukaisesti ja kulminoitua lopulta CPB:n romahtamiseen. [5]



Sulfaatteja voi muodostua täyttömateriaaliin myös rikkidioksidista tai hapesta, joita käytetään syanidin tuhoamiseen kullan louhinnassa. Neljäs sulfaattien lähde liittyy CPB:n pastamassassa käytettävään sementin tyyppiin. Kipsin tai anhyriitin eli kidevedettömän kalsiumsulfaatin lisääminen pastaan mahdollistaa sementin asettumisen paremman kontrolloimisen ja tämä lisäys tuo seokseen myös lisää sulfaattia. [5]



**Kuva 4** Kovettuneen CPB näytteen ulkonäkö a) 28 päivän ja b) 360 päivän jälkeen. Halkeamien muodostuminen johtuen pitkäaikaisista happo- ja sulfaattihiökkäyksistä. [5]



Hapon muodostumisen myötä komponenttien väliset sidosominaisuudet heikentyvät ja tämä voi johtaa CPB:n vakauden menetykseen. Rikastushiekan sulfidin hapettuminen muodostaa happoa, joka voi hyökätä kalsiumhydrosilikaatti-sidoksiin (C-S-H) ja tuhota ne. Syntyvät hydratointituotteet eivät ole stabiileja, jos pH on alle 9. Laboratoriolosuhteissa hapon kehittyminen eli pH:n lasku eri sideainepitoisuuksilla (5–7 massaprosenttia) CPB näytteissä johti seuraavaan tulokseen: mitä suurempi sideaineannos on, sitä vähemmän muodostuu vapaata happoa. Kun sideaineannoksen määrä kasvaa, samalla kasvaa hydratointituotteiden, kalsiumhydroksidin (CH) ja kalsiumhydrosilikaatin (C-S-H), määrä. Tästä seuraa, että komponenttien väliset sidosominaisuudet ja puskurointikyky happohyökkäyksiä vastaan paranevat. Sideaineannoksen nostaminen voi lisätä myös sementin hydratointituotteilla täysin peitetyn rikastushiekan pintaa, jonka johdosta vapaa pinta reaktioille tai hapettumiselle pienenee. [5]

Sulfaatin muodostuminen vaikuttaa CPB:n lujuuteen ja vaikutus riippuu sulfaattikonsentraatiosta täytemassassa, CPB:n kovetusajasta sekä sementin rakenteesta ja sisällöstä. Jotkin tutkimukset ovat myös osoittaneet, että ajan kanssa tapahtuu kemiallista vuorovaikutusta sulfaatti-ionien ja Portland-sementin hydratointituotteiden kanssa, joka johtaa sisäiseen sulfaattihyökkäykseen. Näistä vuorovaikutuksista syntyy sekundääristä ettringiittiä, kipsiä ja monosulfoaluminaattia, jotka ovat erittäin laajenevia ja synnyttävät rakenteeseen voimakkaan sisäisen paineen, joka vähentää CPB:n lujuutta. On myös havaittu, että alle 28 päivän aikana CPB:n lujuus on suurempi alle 2000 ppm sulfaattikonsentraatiolla johtuen sekundääristen hydratointituotteiden saostumisesta, koska saostumat täyttävät CPB:n rakenteessa olevaa tyhjää tilavuutta. [5]

## 4. MEKAANISET OMINAISUUDET

CPB:n mekaanisiin ominaisuuksiin liittyy useampia ilmiöitä, joihin tässä kappaleessa tutustutaan. Kaivostäytön ominaisuudet voidaan johtaa kahteen päämekanismiin, jotka vaikuttavat CPB:n käyttäytymiseen eri olosuhteissa. Nämä mekanismit ovat vedenpoistoon liittyvä täyttömateriaalin omapainon vaikutuksesta johtuva lujittuminen ja hydrataation aikaansaama sisäiskuivuminen. Nämä prosessit toimivat yhtäaikaaisesti, ja jotta materiaaliominaisuuksien kehittymistä CPB:ssa pitkällä aikavälillä voidaan ymmärtää, täytyy ymmärtää näiden mekanismien kehittymisnopeuksia. [4]

Sen lisäksi, että saavutetaan riittävä vakaus, on tärkeää hallita rakennetta sekä täytön että kovettumisen aikana ennen itsekantavien ominaisuuksien kehittymistä. Tämä saadaan aikaan rakentamalla riittävän vahvoja tukiseinämiä pitämään CPB:n kiinteä osuus paikoillaan, mutta toisaalta riittävän läpäiseviä edistääkseen omapainon vaikutuksesta tapahtuvaa lujittumista, kun huokosneste poistuu täytöstä vedenpoistojärjestelmän kautta. Jos huokospaine ei alene rakenteessa, tukiseinämiin kohdistuva paine ei myöskään alene, mutta heti kun huokospaineen lasku alkaa, rakenteeseen kehittyy tehollinen jännitys, joka laskee tukiseinämien kuormitusta ja edistää lujuutta CPB:ssä. Tätä prosessia voidaan edistää lepojaksolla ensimmäisen CPB-kerroksen muodostamisen jälkeen. Tyypillinen lepojako kestää 24 tuntia ja sinä aikana tehollista jännitystä kehittyy huokospaineen laskun vuoksi, mikä vähentää tukiseinämiin kohdistuvaa kokonaispainetta, kun täyttöä jatketaan. Huokospaineen lasku johtuu normaalin omapainon aiheuttamasta lujittumisesta ja sementin sisäiskuivumisesta. [4]

On todettu, että in-situ-olosuhteissa kovetettu CPB saavuttaa huomattavasti suuremman lujuuden kuin laboratoriossa kovetettu ja testattu vastaava CPB-näyte. Tämä eroavaisuus johtuu pääasiassa kahdesta eri lähteestä: syntyvästä tehollisesta jännityksestä ja kohonneesta kovettumislämpötilasta in-situ-olosuhteissa. Kohonnut kovettumislämpötila kasvattaa reaktionopeutta ja sementin hydrataation laajuutta vaikuttaen näin täytön mekaanisiin ominaisuuksiin. Kohonnut lämpötila saavutetaan, kun täyttömateriaalin kovettuessa eksotermiset hydrataatioreaktiot vapauttavat lämpöä ja suuri suljettu tilavuus CPB-massaa saavat aikaan hyvin hitaasti tapahtuvan lämmön hajaantumisen. Kohonnut kovettumislämpötila ja sisäiskuivumisesta johtuva tehollisen jännityksen muodostuminen rakenteeseen aiheuttavat lujuuden kasvun verrattuna laboratorio-olosuhteisiin. [4]

## 4.1 CPB-tekniikka maanpinnan tukena

CPB:n käyttö on yhä tärkeämpi osa maanalaista kaivostoimintaa ja se tarjoaa tukea pilareille ja seinämille, mutta myös ehkäisee sortumisia ja katonsortumaa sekä tehostaa pilarien malmien talteenottoa. Yksi CPB:n eduista on sen käytön joustavuus, joka edesauttaa malmiesiintymän geometrian vaihteluissa eli louhitun avarruksen leveyden, kaateen ja pituuden muutoksissa. Suurissa kaivoksissa kaivosaukot ja paljastuneet täyttöpinnat voivat vaihdella korkeasta ja kapeasta geometriasta matalaan ja leveään. Täytön vakauden analysoinnissa on huomioitava täytön geometriset rajat CPB:n parhaan taloudellisen käytön kannalta. [7]

Lisäksi täytön viereinen kiviainesseinämä voi olla joko jyrkkäkaateinen tai suhteellisen tasainen. Louhintakerrosjärjestys voidaan muokata sellaiseksi, että CPB-täytettyjen avarrusten määrä vähenee tai avarrusten geometrioita voidaan muokata vähentämään CPB-paljastumien tarvittavaa lujuutta. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi kaareutumiseffektin käsite ja sen tärkeys täytettyjen avarrusten vakausanalyysissä, suunniteltu horisontaalinen paine täytetyn avarruksen sivuseinissä ja täyttömaseoksen optimointi lujuuden näkökulmasta. [7]

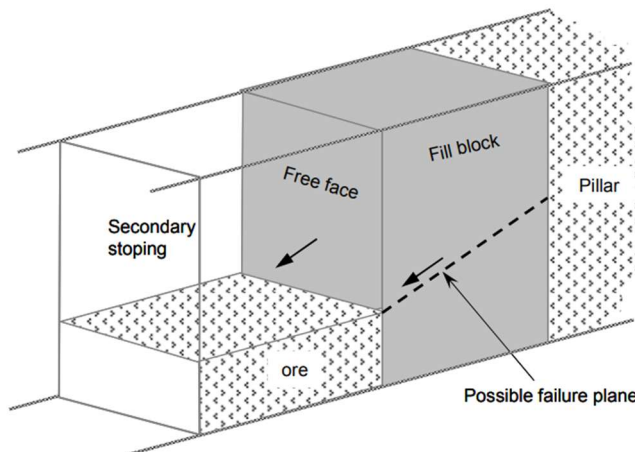
### 4.1.1 Horisontaalinen paine täytetyn avarruksen sivuseinämillä sekä vaadittu lujuus CPB:ssä

Itsekantavat jännitykset hallitsevat yleensä kaivostäytön muotoilua ja perinteisesti kyseessä on ollut vapaasti seisova seinä, joka edellyttää samanarvoisen yksiakiaalisen puristuslujuuden (UCS) kuin mitä ylikuormajännitys on täytetyn avarruksen pohjalla. Täyttömateriaali ja kiviainesseinämä voivat myös tukea toisiaan molemminpuolisesti, jolloin täytön viereinen kiviaines voi itse asiassa tukea täyttöä rajapinnan leikkaus- ja kaareutumiseffektin välityksellä. [7]

On hyvin tavallista, että kaareutumista esiintyy täytetyssä louhoksessa, ja se vaikuttaa olennaisesti myös horisontaalisen jännityksen kehittymiseen täytössä. Vertikaalinen jännitys täytetyn avarruksen pohjalla on pienempi kuin päällä olevan täytön paino (ylikuormapaino). Tämä ilmiö johtuu vaakasuuntaisesta paineensiirrosta ja se on seurausta kitka- ja/tai koheesiovuorovaikutuksesta täytön ja kiviseinän välillä. Kun pilarit tai avarruksen seinämät alkavat muuttua muotoaan täytetyksi avarrukseksi, täyttömassa tuottaa sivusuuntaisen passiivisen vastuksen. Passiivinen vastus määritellään suurimman vastuksen tilaksi, joka aktivoituu, kun voima työntyy täyttömassaa vastaan ja massa vastustaa voimaa. [7]

Horisontaalisesti sivuseinämille siirtyvän jännityksen suuruus voidaan sisällyttää vaadittavan täytön lujuuden suunnitteluun. Täytön kaareutumiseen vaikuttavia horisontaalisia jännityksiä voidaan arvioida neljällä analyyttisellä menetelmällä, jotka ottavat huomioon koheesion olemassaolon täytön ja seinämän rajapinnalla ja/tai kittaliukumisen sivuseinämää pitkin. Näitä analyyttisiä ratkaisuja ovat esimerkiksi Martsonin koheesioton malli ja Terzaghin koheesiomalli. [7]

Vaadittava lujuus CPB:lle riippuu sen suunnittelusta tehtävästä. Maaperän tukena täytön vaadittu UCS, täytyy olla vähintään 5 MPa, kun taas vapaasti seisovan täytön sovelluksissa UCS voi yleisesti olla vähemmän kuin 1 MPa. Aiemmissa tutkimuksissa on havaittu, että täyttömassan UCS voi vaihdella 0,2 MPa:n ja 5 MPa:n välillä, mutta ympäröivän kiviaineksen UCS on luokkaa 5–240 MPa. UCS:n arvoa voidaan arvioida monella tavalla, riippuen millainen täytön muotoilu on ja tätä varten UCS:n laskemiseen on olemassa erilaisia laskukaavoja. [7]

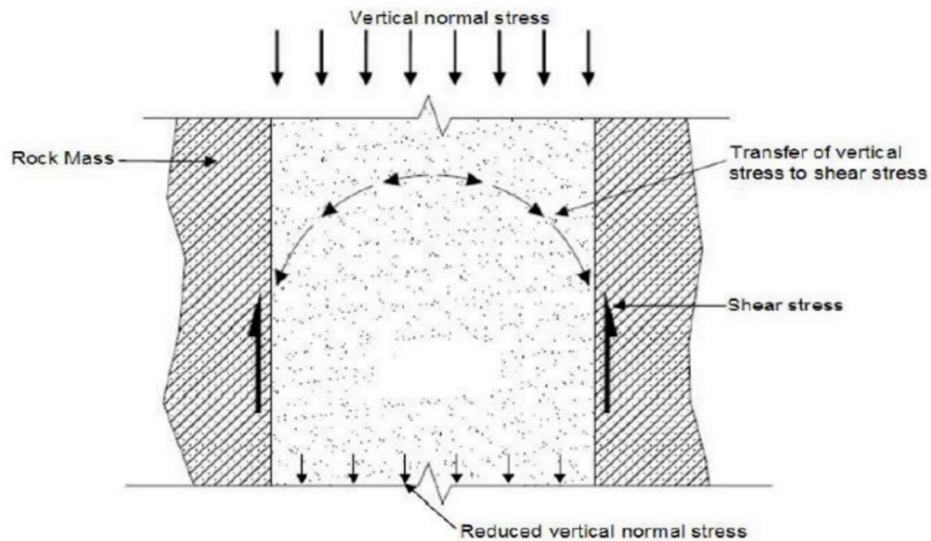


**Kuva 5** Täyttölölkareen aiheuttama virhemekanismi sekundäärisen avarruksen louhinnassa. [7]

On hyvin yleistä, että primäärisen malmin talteenoton jälkeen suoritetaan vielä sekundääristen avarrusten louhintaa eli palataan louhimaan uudestaan samoja malmipiilareita, jotta malmin talteenotto saadaan maksimoitua. Kun jo täytettyjä avarruksia tai niiden vierustaa aletaan louhia uudestaan, tämä paljastaa vapaasti seisovan kaivos-täytön tahkoja uudelleen, minkä vuoksi täytön on oltava vakaa talteenoton aikana. Täytöllä täytyy olla riittävä lujuus, jotta se säilyy vapaasti seisovana pilarina louhinnan aikana sekä sen jälkeen vastustamalla räjäytysvaikutuksia. Kuvassa 5 on esitetty eräs mahdollinen virhemekanismi, joka voi syntyä räjäytyksen aikana. [7]

### 4.1.2 Kaareutumisefekti CPB:ssä

Kun käsitellään geomateriaaleja maanalaisissa olosuhteissa, yksi yleisimmin esiintyvistä ilmiöistä on kaareutumisefekti, joka vähentää rakenteen ylikuormituspainetta. Materiaalin jännitysjaikautumassa tapahtuva muutos aiheuttaa myös muutoksen leikkausvastuksessa, joka pitää myötäävän massan paikallaan. Tämä johtaa jännityksen muutokseen myös myötäävässä osassa ja viereisessä osassa maaperää. Jos myötäävä osa painuu alaspäin, leikkausjännitys toimii ylöspäin työntävänä voimana ja pitää massaa paikallaan. Tällöin myös myötäävän massan pohjan jännitys pienenee, kuten kuvassa 6 on esitetty. Ilmiö toimii myös päinvastoin; jos myötäävä massa nousee ylöspäin, leikkausjännitys toimii alaspäin työntävä voimana estäen massan liikkeen ja myötäävän massan pohjakerroksessa jännitys kasvaa. [1]

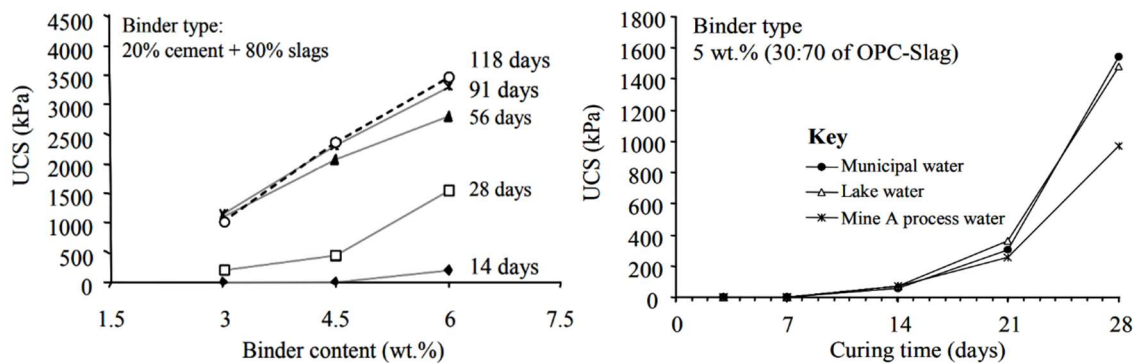


**Kuva 6** Kaareutumisefekti täytetyssä louhoksessa. [1]

Jännityksen uudelleenjakautuminen vaikuttaa ylikuormitetun geomateriaalin, pinnan kuormituksen ja sivusuuntaisen maan paineen aiheuttamaan rakenteen kuormitukseen. Massan ympärillä oleva kiviaines tai muu geomateriaali voi lisätä rakenteen kantokykyä verrattuna rakenteeseen, jonka ympärillä ei ole tukevaa massaa. Horisontaalisen paineensiirron sivuseinämille aiheuttama kaareutuminen on syytä huomioida täytön vaadittavassa lujuudessa. [1] Kaareutumisefekti johtuu siis pääosin CPB:n lujittumisesta sekä täyttömassan ja ympäröivän kivimassan rajapinnassa tapahtuvista muutoksista. Huomioimalla kaareutumiseffektin vaikutus rakenteeseen voidaan vähentää tarvittavan sementin määrää, jonka kustannus voi olla jopa 75 % koko CPB:n kustannuksesta. Näin ollen CPB-kiviaines rajapinnan ominaisuuksien ymmärtäminen ei pelkästään takaa parempaa CPB-rakenteen vakautta, mutta myös mahdollistaa kustannustehokkaamman rakenteen suunnittelun. [6]

### 4.1.3 Täyttömaseoksen optimointi lujuuden näkökulmasta

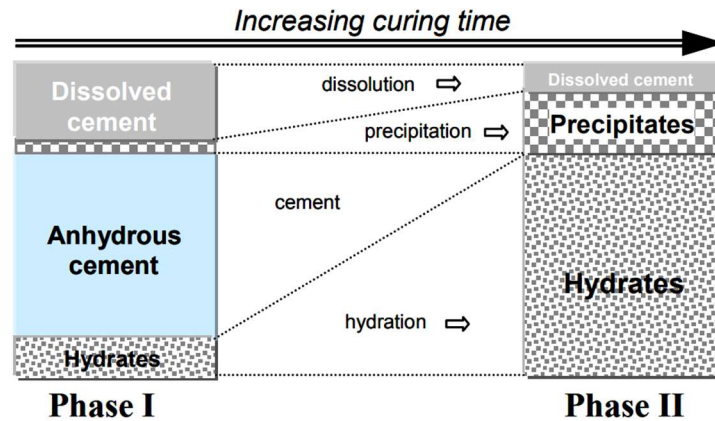
Täyttömaseoksen muuttujia voidaan optimoida tavoitelujuuden saavuttamiseksi, kun täytön vaadittu lujuus on määritetty. Tällaisia muuttujia ovat esimerkiksi sideaineen koostumus ja tyyppi, rikastushiekan raekokojakauma ja mineralogia, kiintoainespitoisuus ja seosveden kemiallinen koostumus. Näitä muuttujia voidaan säätää siten, että saavutetaan tietty UCS:n arvo. [8] Osaa näistä, kuten rikastushiekan ominaisuuksia on käsitelty jo luvussa 3. CPB:n kaikki komponentit vaikuttavat oleellisesti täytön kuljetukseen, perille toimitukseen ja kehittyvään lujuuteen kovetusajan kuluessa [7].



**Kuvaaja 2** Esimerkki UCS:n vaihtelusta sideainekoostumuksen funktiona eri kovetusajoilla (vasen). Seosveden vaikutus lujuuden kehitykseen täyttömaseoksessa (oikea). [7]

Useat laboratoriotestit ovat osoittaneet, että täytön lujuus on sideainepitoisuuden funktio tietyllä kovetusajalla, joka nähdään myös kuvaajasta 2 (vasen) 14, 28, 91 ja 118 päivän kovetusajoilla. [7] Suuremmilla sideainepitoisuuksilla ja pidemmällä kovetusajoilla havaitaan olevan korkeampi UCS:n arvo kuin pienemmillä pitoisuuksilla ja lyhyemmällä kovetusajoilla.

Täytön kovettuminen tapahtuu sidosten muodostuessa täytepartikkelien välille rakenne kosketuspisteissä. Tyypillisin käytetty sideaine on tavallinen portlandsementti (OPC), mutta pozzolaanisten materiaalien sekoituksia käytetään myös hillitsemään kustannuksia, sillä näin tarvittavan portlandsementin määrä vähenee. Lentotuhka (FA) ja jauhettu sulattomasuunikuona (BFS) ovat suosituimpia pozzolaanisia lisäaineita. Sementin liukenemistestien tulokset osoittavat, ettei betonissa tai laastissa kummassakaan pastatäytön kovettumisprosessi johdu pelkästään sementin hydrataatioprosessista, mutta myös hydratoituneiden faasien saostumisesta huokosvedestä kuvan 7 mukaisesti. Pastatäytön kovettuminen tapahtuu kahdessa päävaiheessa: ensimmäistä vaihetta hallitsee liukenemisreaktiot, kun taas toisessa vaiheessa tapahtuu sulfidisaostumisreaktiot ja sideaineen suora hydrataatio. [7]



**Kuva 7** Skemaattinen esitys sideaineen liukenemis- ja saostumisreaktioiden aikariippuvuudesta kovettumisprosessissa. [7]

Jotta täytöstä tulee tarpeeksi luja ja jäykkä, täytyy sementissä tapahtua kunnollinen hydrataatioprosessi. Kun täyttöä tehdään, massa sisältää pumppaamisen ja kuljetuksen takia paljon enemmän vettä kuin mitä hydrataatioprosessi tarvitsee. Tällöin on tärkeintä huomioida veden pH ja sulfaattisuolojen määrä vedessä, sillä hapan vesi ja sulfaattisuolat voivat hyökätä täytön sisäisiin sementin sidoksiin, joka johtaa täytön lujuuden, kestävyuden ja vakauden menetykseen. Kuvaajasta 2 (oikea) nähdään, että käytettäessä samaa sementtikuonaa ja rikastushiekkanäytteitä sekoitettuna kolmeen eri veden lujuuden kehitys näytteissä on erilaista. Kaikilla kolmella näytteellä kehitys on hidasta 14 päivän kovetusajalla. Tämän jälkeen päivään 28 asti lujuuden kehityksessä tapahtuu muutoksia. Sulfaattivapaata vettä sisältävät näytteet (kunnallinen ja järvivesi) saavuttavat 1600 kPa UCS-arvon, kun taas sulfaattirikasta vettä sisältävä näyte (kaivos A prosessivesi) saavuttaa ainoastaan 1000 kPa UCS-arvon. [7]

## 4.2 Kovettumislämpötilan vaikutus leikkauskäyttäytymiseen

Nykyään CPB on yleistynyt laajalti kaivostäyttömenetelmänä ja sitä käytetään eri puolilla maailmaa, kuten Australiassa, Kanadassa, Kiinassa ja Etelä-Afrikassa. Näin ollen CPB:n rakenne on altistunut monenlaisille kaivossyvyyksille ja -olosuhteille sekä erilaisille lämpötiloille. Niin turvallisuuden ja taloudellisuuden kuin CPB:n toimivuuden ja mekaanisen vakauden kannalta on erittäin tärkeää kerätä tietoa CPB:n ominaisuuksista erilaisissa olosuhteissa. Lämpötilalla on merkittävä rooli myös betonin valmistuksessa sementin sideaineen hydraatioon ja betonin ominaisuuksiin, kuten lujuuteen ja muodonmuutosominaisuuksiin. Voidaan havaita, että lämpötila vaikuttaa merkittävästi CPB:n lujuuteen sekä huokosten rakenteen kehitykseen. Lisäksi CPB:n kovetuslämpötila voi potentiaalisesti vaikuttaa täyttömassan ja viereisen kiviaineksen välisen rajapinnan leikkauslujuuteen ja -käyttäytymiseen. [6]

Ottawan yliopistossa tehdyssä tutkimuksessa perehdyttiin kovetuslämpötilan vaikutukseen leikkauskäyttäytymiseen CPB-kiviaines rajapinnassa. Tutkimuksessa käytettiin 2 °C, 20 °C ja 35 °C kovettumislämpötilaa sekä 1, 3, 7 ja 28 päivän kovetusaikaa. Rikastushiekkana oli käytetty kahta erilaista hiekkaa: luonnollista, NT (natural tailings) ja keinotekoista rikastushiekkaa, ST (silica tailings). Luonnollinen rikastushiekka sisältää reaktiivisia komponentteja kuten pyriittiä, joka voi hapettua jo varastoinnin tai valmistuksen aikana, joten tutkimuksessa käytettiin myös keinotekoista rikastushiekkaa monitulkintaisuuden vähentämiseksi. Kummallakin rikastushiekkalla on samanlainen partikkelikokojakauma. Sideaineen ominaisuudet ja käytetty määrä vaikuttavat vahvasti koko kaivostäytön ominaisuuksiin. Tutkimuksessa käytettiin yleisintä CPB:ssä käytettävää sideainetta, Portlandin sementti tyyppi 1:stä, jonka paino-osuus on 4,5 % ja sen hydrataatioprosessi on hyvin tunnettu. Kiviainesnäytteinä käytettiin hiottua graniittia. Yhteenveto kaivostäytön komponenteista on taulukossa 3. [6]

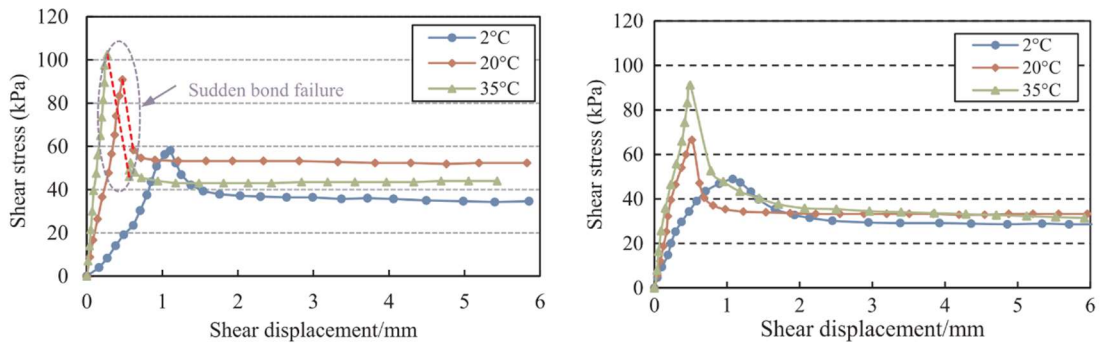
**Taulukko 3** Yhteenveto tutkimuksessa käytetyistä komponenteista. [6]

Komponentti	Komponentin kuvaus	Kemiallinen koostumus/ Pitoisuudet
Rikastushiekka	Luonnollinen	Kloriitti (18,2 %) Talkki (16,4 %) Pyriitti (15,4 %) Kvartsi (11,9 %) Dolomiitti (5,7 %) Magneetiitti (7,6 %) Pyrroitiitti (3,1 %)
	Keinotekoinen	Piidioksidi (99,8 %)
Sideaine	Portlandin sementti, tyyppi I	Rikkiatrioksidi SO <sub>3</sub> (3,83 %) Rauta(III)oksidi Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (2,7 %) Alumiinioksidi Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (4,53 %) Piidioksidi SiO <sub>2</sub> (18,03 %) Kalsiumoksidi CaO (62,82 %) Magnesiumoksidi MgO (2,65 %)
Vesi	Hanavesi	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (88ppm) Ca (46,6 ppm) Na (5,3 ppm) Mg (2,6 ppm) Si (0,64 ppm) Al (0,13 ppm) Fe (0,03 ppm)

Tyypillinen CPB-kiviaines rajapinnan leikkauskäyttäytyminen näkyy kuvaajassa 3 ja siitä nähdään, että eri lämpötilojen leikkausjännityskäyrillä on samanlainen kehitysuunta. Alussa tapahtuu voimakas nousu leikkausjännityksessä huippuarvoon, ja kun

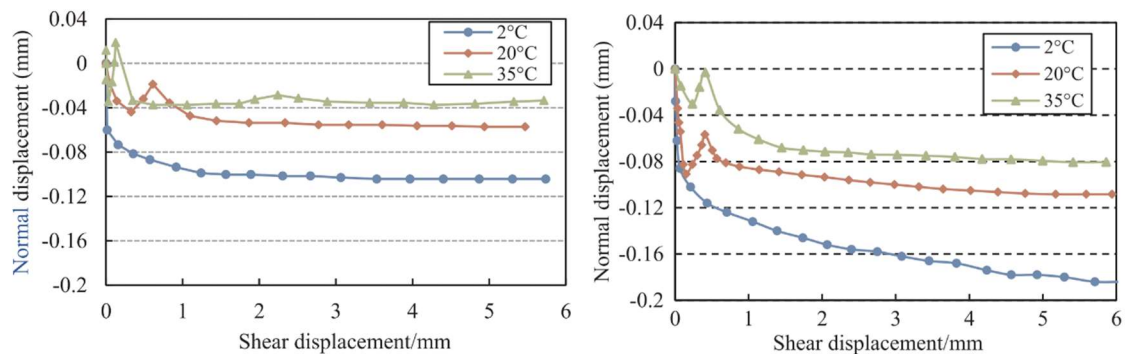


leikkaussiirtymä kasvaa, leikkausjännitys vähenee jäännösjännitykseen. Korkeinta lämpötilaa vastaa myös korkein leikkausjännityshuippu ja matalinta lämpötilaa matalin huippu. ST:tä sisältävän täyttöaineen kuvaajasta nähdään, että lämpötiloissa 20 °C ja 35 °C käyrät kokevat kuitenkin yhtäkkisen sidosmurtuman yhtenäisessä pinnassa. Korkeammilla lämpötiloilla rajapinnan leikkausvoima ja leikkausmoduuli kasvavat myös. [6]



**Kuvaaja 3** Kovettumislämpötilan vaikutus leikkaukäyttäytymiseen CPB-kiviaines rajapinnassa ST:tä (vasen) ja NT:tä (oikea) sisältävällä täyttöaineella. [6]

ST:tä sisältävän täyttöaineen rajapinnan leikkausvoima on yleisesti ottaen suurempi kuin NT:tä sisältävässä täyttöaineessa. Tämä johtuu NT:n sisältämisestä kemiallisista komponenteista (pääasiassa sulfaatti). Kemialliset komponentit estävät sementin hydrataatiota, joka johtuu nesteessä olevien sulfaattianionien ja ettringiitin muodostavan sementin  $C_3A$ -rakeiden välisestä reaktiosta. Ettringiitti muodostaa ohuen kalvon hydratoitumattomista sementtipartikkeleista ja näin estää  $C_3A$  rakeiden nopeaa reagoimista veden kanssa. Hydrataation estävän vaikutuksen tuloksena täyttöaineen asettumisaika on pidempi ja hydratointituotteita muodostuu vähemmän. [6]



**Kuvaaja 4** ST:tä (vasen) ja NT:tä (oikea) sisältävän täyttöaineen normaalisiirtymä-leikkaussiirtymä-käyrät. [6]

CPB-kiviaines rajapinnan vastaavat normaalisiirtymä-leikkaussiirtymä-käyrät kuvaajassa 4 osoittavat, että muodonmuutos rajapinnassa on suurempi matalammilla läm-

pötiloilla. Näytteiden rajapinnat kokevat merkittävän kutistuman heti leikkausjännityskokeen alussa riippumatta kovetuslämpötilasta tai rikastushiekan tyypistä. Kun näytteeseen kohdistetaan normaalijännitys, täyttömateriaalin ja kiviaineksen pinta liikahtavat lähemmäs toisiaan. Kokeen jatkuessa leikkaussiirtymä kuitenkin kasvaa tiettyyn huippuarvoon asti, jonka jälkeen kovetuslämpötiloissa 20 °C ja 35 °C rajapinta kokee laajentuvaa käyttäytymistä. Kovetuslämpötilassa 2 °C rajapinta jatkaa kutistumista. Huippuleikkaussiirtymän jälkeinen leikkausmuodonmuutos jatkuu kutistumana rajapinnassa kaikissa lämpötiloissa. [6]

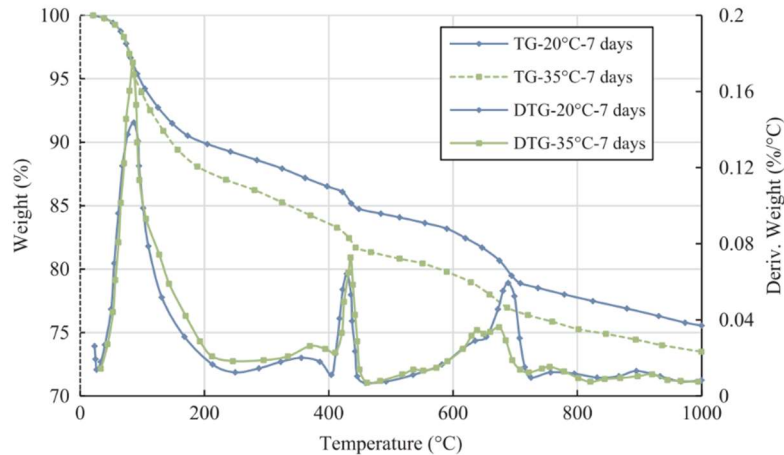
Voidaan havaita, että korkeammassa kovetuslämpötilassa rajapinnassa tapahtuu vähemmän kutistumaa ja suurempi leikkauslaajentuminen samaan aikaan, kun leikkauslujuus ja rajapinnan muut leikkausparametrit kasvavat. Tämä ilmiö johtuu pääasiassa sementin hydrataationopeuden ja sisäiskuivumisen kasvusta lämpötilan vaikutuksesta. [6]

#### **4.2.1 Sementin hydrataationopeuden kasvu lämpötilan vaikutuksesta**

Sementin hydrataatioprosessin päätuote on kalsiumhydrosilikaatti (C-S-H), jonka tiedetään olevan tärkeä sitova faasi kovettuneessa sementissä. On yleisesti tiedossa, että korkeammassa lämpötilassa hydrataatioprosessi kiihtyy ja syntyy enemmän hydratointituotteita. Näin ollen myös kalsiumhydrosilikaatin määrä nousee lämpötilan kasvaessa ja sitova voima lisääntyy CPB-kiviaines rajapinnassa. Myös huippuleikkausjännitys kasvaa sitovan voiman kasvaessa ja täten mahdollisuus merkittävämpiin sidosmurtumiin yhteisellä rajapinnalla kasvaa. Myös sekundäärisiä hydratointituotteita saostuu, kuten ettringiittiä ja kipsiä, ja rajapinnan pinta-ala kasvaa niiden täyttäessä täyttömateriaalin tyhjätkapillaarihuokokset. Tämä johtaa lukittuneeseen rajapintarakenteeseen ja se kasvattaa rajapinnan leikkauslujuutta. [6]

Kuvaajasta 5 nähdään TG eli termogravimetria- ja DTG eli differentiaalinen termogravimetria-analyysit jauhemaisesta sementtipastasta tehdyille CPB näytteille. Lämpötilavälillä 30–105 °C tapahtuva massan menetys johtuu vapaan ja sidotun veden haihtumisesta, kun taas välillä 110–200 °C massahäviö on seurausta veden hydratointituotteiden kuivumisesta. Välillä 400–450 °C ja 600–750 °C tapahtuu kalsiumhydroksidin (CH) ja kalsiitin hajoamista, joka johtaa merkittävään massahäviöön. Vertaamalla eri kovetuslämpötilojen käyriä voidaan havaita, että veden haihtumisesta aiheutuva massahäviö on samankaltainen kummassakin kovetuslämpötilakäyrässä, mutta hydratointituotteiden kuivumisesta johtuvassa massahäviössä on eroja. Kovetuslämpötilassa 35 °C

massahäviö on suurempi, mikä osoittaa, että sementin hydratointituotteita syntyy enemmän tässä kovetuslämpötilassa. [6]



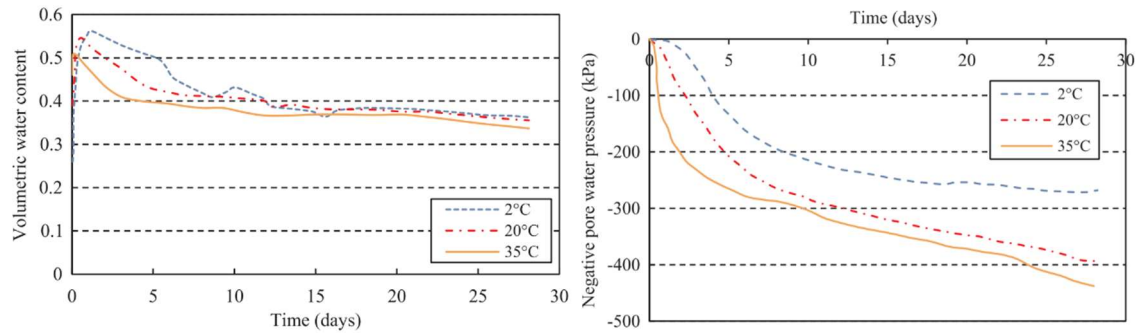
**Kuvaaja 5** TG ja DTG analyysit CPB-kiviaines näytteistä 20 °C ja 35 °C kovettumislämpötilassa 7 päivän ajan. [6]

Matalammissa kovetuslämpötiloissa rajapinnan kutistuma on suurempi johtuen heikommasta sementoitumisesta tai sementin hydrataatiosta. Suuri kutistuma saa aikaan kokoonpuristuvuuden kasvun näytteissä. Korkeammissa kovetuslämpötiloissa tapahtuva rajapinnan laajentuma johtuu pinnankarheuksien suhteellisesta liikkeestä ja se vaikuttaa vahvimmillaan näytteen pinnassa. Voidaan siis päätellä, että CPB:n kovuus kasvaa kovetuslämpötilan kasvaessa, koska korkea lämpötila kiihdyttää sideaineen hydrataatiota ja lisää hydratointituotteiden määrää, joka puolestaan lisää näytteen pinnan pinnankarheuksien määrää. [6]

#### 4.2.2 Sisäiskuivumisen kasvu lämpötilan vaikutuksesta

Sementin sisäiskuivumiseksi kutsutaan ilmiötä, jossa sementin hydrataatio aiheuttaa veden ja kiintoaineksen yhteistilavuuden pienenemisen ja tästä syystä huokosvedenpaine tai kosteuspitoisuus laskee CPB:ssä. Sisäiskuivuminen on hyvin lämpötilariippuvaa. Kun lämpötila nousee, hydrataatioprosessi kiihtyy ja veden kulutus lisääntyy sementtisen materiaalin kapillaarihuokosissa ja tämän seurauksena sisäiskuivuminen tehostuu. [6]

Näin ollen sisäiskuivumisen kasvu lämpötilanvaikutuksesta voi johtaa suuremman imu- tai kapillaaripaineen kehitykseen CPB-kiviaines rajapinnassa, joka puolestaan kasvattaa rajapinnan leikkauslujuutta ja kimmomoduulia. Lukuisat aiemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että korkeampi imupaine voi johtaa huokoisen materiaalin ja maanpinnan välisen rajapinnan leikkauslujuuden ja kimmomoduulin kasvuun. [6]



**Kuvaaja 6** Kovetuslämpötilan vaikutus muutokseen tilavuudellisessa vesipitoisuudessa (vasen) ja perusmassan imupaineessa (oikea). [6]

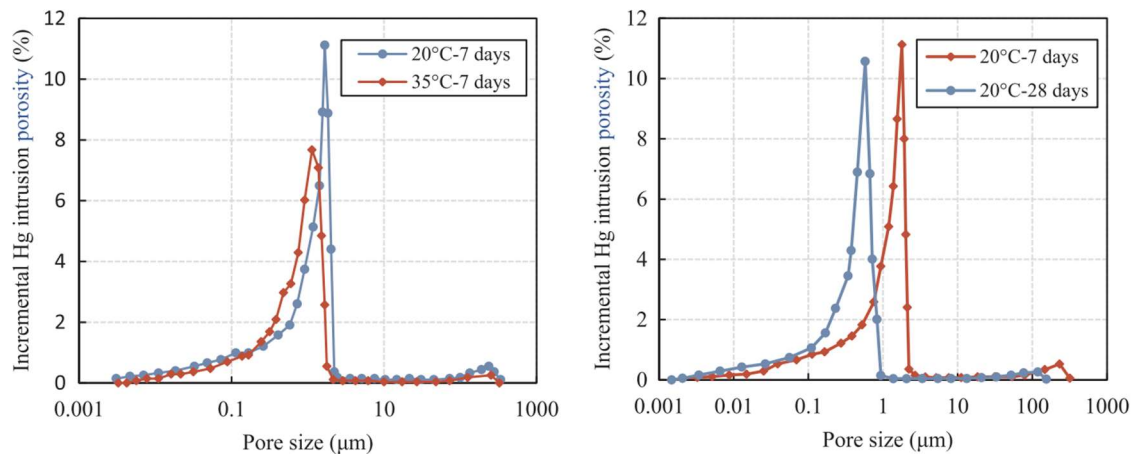
Voitiin myös kokeellisesti todistaa, että tilavuudellisessa vesipitoisuudessa ja perusmassan imupaineessa tapahtuu ajasta riippuva muutos CPB-kiviaines rajapinnassa. Kuvaaja 6 (vasen) esittää aikariippuvaa tilavuudellisen vesipitoisuuden muutosta rajapinnassa. Voidaan havaita, että vesipitoisuus laskee ajan kuluessa ja korkeampi kovetuslämpötila tuotti matalamman tilavuudellisen vesipitoisuuden arvon. Myös perusmassan imupaine rajapinnassa laskee ajan kuluessa, kuten nähdään kuvaajasta 6 (oikea), mutta korkeampi kovetuslämpötila johti korkeampaan imupaineen arvoon varsinkin varhaisessa vaiheessa. Toisin sanottuna korkeampi kovetuslämpötila johti voimakkaampaan sisäiskuivumiseen. [6]

### 4.2.3 Kovetuslämpötilan ja -ajan yhteisvaikutus leikkauskäyttäytymiseen rajapinnassa

Kun tutkitaan kovetuslämpötilan ja -ajan yhteisvaikutusta leikkauskäyttäytymiseen ja erityisesti CPB-kiviaines rajapinnan leikkausjännityshuippuihin, voidaan havaita, että leikkauslujuus kasvaa pidemmillä kovetusajoilla. Kovettumislämpötila vaikuttaa merkittävästi rajapinnan leikkauslujuuden aikariippuviin muutoksiin, kuten kasvunopeuteen. Leikkausjännityksen huippuarvo rajapinnassa kasvaa ensimmäisen päivän arvosta 70 kPa arvoon 142 kPa 28 päivän kovetusajalla. Toisaalta samaan aikaan näytteiden kokoonpuristuvuus laskee huomattavasti ja 28 päivää kovetetut näytteet voivat jopa laajentua. Leikkauslujuuden kasvu ja kokoonpuristuvuuden lasku tietyllä kovetusajalla johtuu kiihtyneestä sementin hydrataatiosta. Kalsiumhydrosilikaatti (C-S-H) kasvattaa partikkelien välistä sitovaa voimaa, kun taas muut saostuvat hydratoitutuotteet (ettringiitti ja kalsiumhydroksidi (CH)) hienontavat huokosrakennetta materiaalissa. Havaittu laajentumiskäytös rajapinnassa pitkälle kehittyneessä kovettumisessa voidaan selittää suuremmilla pinnan karheuksilla. [6]

Kuvaajassa 7 esitetyt MIP (mercury intrusion porosimetry) testauksen tulokset tukevat huokosrakenteen hienontumisen etuja. MIP mittaa huokosten tilavuusjakautumaa

elohopean tunkeuman ja ekstruusion avulla. Kuvaajassa 7 (vasen) on esitetty kahden kovetuslämpötilan (20 °C ja 35 °C) huokoskokojakauma 7 päivän kovetusajalla. Voidaan havaita, että 35 °C:ssa kovetetun näytteen huokosrakenne on hienojakoisempi, joka merkitsee kasvavissa määrin hydratointituotteiden saostumista kapillaarihuokosissa. Tämä lisää kontaktipintaa CPB:n ja kiviaineksen pinnan välillä, joka vuorostaan edistää leikkauslujuuden kasvua rajapinnassa, mitä on jo aikaisemmin tarkasteltu. Kovetusajan vaikutusta huokoskokojakaumaan on tutkittu kahdella eri kovetusajalla (7 ja 28 päivää) kovetuslämpötilan pysyessä 20 °C:ssa ja kuvaajasta 7 (oikea) nähdään, että pidempi kovetusajaka johtaa hienojakoisempaan huokosrakenteeseen. Kovetusajalla 28 päivää näytteen mikrorakenne on tiheämpi ja voidaan tehdä johtopäätös, että hienojakoisempi huokosrakenne pidemmällä kovetusajalla on toinen tekijä, joka vaikuttaa leikkauslujuuden kasvuun rajapinnassa. [6]



**Kuvaaja 7** Kovetuslämpötilan (vasen) ja -ajan (oikea) vaikutus MIP testauksen huokoskokojakaumaan. [6]

35 °C:ssa 28 päivää kovitettu CPB-kiviainesnäytteen rajapinnan matalampi leikkauslujuus (verrattuna 20 °C:ssa kovitettuun näytteeseen) on seurausta risteymävaikutuksesta (ilmiö sementtimateriaalien lujuuteen vaikuttavasta lämpötilainversiosta). Sitä esiintyy pääasiassa korkeamman kovetuslämpötilan ja pitkälle edenneen kovetusajan sementtimäisillä materiaaleilla. Tämä ilmiö laskee sementtimateriaalin mekaanista lujuutta ja sitä ilmenee kolmesta syystä, joista ensimmäisenä on mikrosäröjen muodostuminen. Lämpötilan noustessa näytteiden alkuperäinen vedenpaine ja tyhjä tilavuus kasvavat. Kun jännitys ylittää tietyn vetojännityksen, alkaa mikrosäröjä muodostua CPB:ssä ja fyysiset vauriot laskevat koheesiota ja leikkausjännityshuippuja. Toinen syy on epäyhätenäinen sementin hydratointituotteiden jakautuminen. Korkea lämpötila kiihdyttää yleensä hydrataatioreaktiota, joka tuottaa näin suuria määriä hydratointituotteita. Tuotteiden alhaisen liukoisuuden ja diffuusiokyvyn vuoksi ne eivät voi hajaantua merkittävälle

etäisyydelle materiaalissa. Samalla sementtirakeita tiheästi ympäröivät hydratointituotteet toimivat esteenä diffuusiolle, jotka edelleen estävät tuotteiden kulkeutumista. Näin ollen korkea kovettumislämpötila aiheuttaa karkeamman huokosrakenteen pitkälle edenneellä kovetusajalla. Viimeisenä syynä on ettringiitin epävakaumus. Ettringiitin liukenevuus kasvaa korkeilla lämpötiloilla, mikä myös aiheuttaa huokosrakenteen karkeutumisen. [6]

Kovetuslämpötila ja -aika vaikuttavat myös koheesioon ja kitkakulmaan CPB-kiviaines rajapinnassa. Korkeampi kovetuslämpötila vastaa suurempaa kitkakulman ja koheesio kasvunopeutta. Suurempi kitkakulma ja sen kasvunopeus voidaan katsoa johtuvan kasvaneesta sementin hydrataatiosta korkeammissa lämpötiloissa, mikä johtaa korkeampiin pinnankarheushuippuihin CPB:ssä ja kiviaineksessa, ja näin lisää kitkaa rajapinnassa. Hydratointituotteiden määrän kasvu kasvattaa sitovaa voimaa eli adheesiota rajapinnassa. Pienempi kitkakulma ja rajapinnan koheesio 35 °C:ssa 28 päivää kovetuissa näytteissä (verrattuna 20 °C:ssa kovetettuun näytteeseen) on seurausta risteymävaikutuksesta. [6]

### 4.3 Kemiallinen kutistuma

Kemiallinen kutistuma on sementtimateriaalin kokonaistilavuuden muutoksen mitta. Sitä ilmenee hydrataation aikana johtuen lopullisten hydratointituotteiden tilavuuden pienemisestä verrattuna hydratoimattomiin komponentteihin. Kemiallinen kutistuma on se tilavuuden muutos, joka toimii ajavana voimana sisäiskuivumismekanismille. Kemiallista kutistumaa voidaan mitata kahdella eri tavalla. Tilavuusmenetelmässä näytteeseen imeytyneen veden tilavuus on suora mitta tilavuuden muutoksesta, joka liittyy kemialliseen kutistumaan. Nosteen muutokseen perustuvassa menetelmässä tutkitaan hydratoituvan näytteen nosteen muutosta, kun se upotetaan nesteeseen. [4]

Kokeet osoittivat, että korkeammat w/c-suhteet korreloivat korkeampien normalisoitujen kemiallisten kutistumien kanssa. Rikastushiekkatäyteen lisääminen CPB:hen kasvattaa normalisoitua kemiallista kutistumaa, kun verrataan sitä vain sementtiä sisältäviin pastoihin, joilla on identtinen w/c-suhde. Ylisuolaisella prosessivedellä oli merkittävä vaikutus normalisoidun kemiallisen kutistuman esiintymään. On kuitenkin vaikea arvioida kemiallisen kutistuman tarkkaa vaikutusta CPB:hen. [4]

Kemialliseen kutistumaan kuuluu myös ilmiö itsekehittyvästä kutistumasta, joka on yleisesti mitattu ominaisuus. Tämä ilmiö antaa tietoa halkeilun mahdollisuudesta, kun mitataan suljetussa hydrataatiojärjestelmässä syntyvä suhteellinen tilavuuden muutos. Itsekehittyvää kutistumaa esiintyy kuitenkin vain perinteisessä sisäiskuivumisessa, jossa ei esiinny vapaata vettä systeemin sisällä ja kosteuden kulkeutuminen on estynyt. Sisäiskuivumista esiintyy yleensä silloin, kun w/c-suhde on alle 0,4, vaikkakin tämä arvo

vaihtelee hieman erityyppisillä sementeillä. Tiedetään, että CPB:n w/c-suhde on hyvin korkea, yleensä yli 5, joten voidaan päätellä, että sisäiskuivumista ei tapahdu koskaan täysin. Yleensä sisäiskuivumisella viitataan huokosvedenpaineen alenemiseen. Itsekehittyvää kutistumaa ei siis sellaisenaan tapahdu CPB:n hydrataatiossa. [4]

## 5. YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Kovettuva kaivostäyttö on yleistynyt sen tarjoaman rakenteellisen kantavuuden vuoksi, mutta se myös vähentää tarvetta louhia erikseen täyttömateriaaliin tarvittavaa ainesta. Rikastejätteen käyttö kaivostäyttömateriaalissa vähentää lisäksi tarvetta varastoida jätettä maan pinnalle, mikä pienentää ympäristöön aiheutuvaa ekologista jalanjälkeä. Kaivostäytössä voidaan hyödyntää mahdollisesti koko rikastejätteen raekokoskaala, ja sillä saadaan aikaan tiheä, viskoosinen seos vedestä ja jätteestä. Maanalainen ympäristö voi olla soveltuva sulfidipitoisen rikastejätteen säilömiseen, sillä se voi mahdollisesti toiminnan aikana sekoittua perusteellisesti emäksisten sideaineiden kanssa vähähappisissa olosuhteissa. Jos kaivosta suljettaessa maanalaiset louhokset tulvivat vakituisesti, hapettumisen mahdollisuus sekä jatkuva happamuuden ja metallien vapautuminen hyvin sulfidipitoisesta jätteestä voi vähentyä huomattavasti. [2]

MEND (Mine Environment Neutral Drainage) -ohjelma pyysi MeMi (Mehling Environmental Management Inc.) yhtiötä laatimaan yhteenvedon nykyisistä käytännöistä kovettuvan ja kovettumattoman kaivostäytön geokemiallisessa karakterisoinnissa sekä pinta- ja pohjaveteen kohdistuvien ympäristövaikutusten arvioimiseen käytettävistä menetelmistä. Yksi ohjelman prioriteeteista on tunnistaa maanalaisesta kaivostäytöstä aiheutuvat operatiiviset ja pitkäaikaiset vaikutukset kaivos- ja pohjaveden laadulle. Ympäristöseikkojen arviointi vaatii täyttöaineksen karakterisointia mineralogian, puskuroinnin ja hapon tuottamiskapasiteetin, kineettisten reaktioiden ja metallien suotoliukenemispotentiaalin osalta. Siten voidaan arvioida näiden ominaisuuksien lyhyt- ja pitkäaikaisia vaikutuksia pinta- ja pohjavesiin. [2]

Kovettuvan kaivostäytön ympäristövaikutuksia tarkasteltaessa herää kolme tärkeää kysymystä, jotka sanelevat täytön vaikutuksen kaivoksen veden laatuun. Oletuksena on, että rikastejätteen reaktiivisuus on tutkittu jo. Ensimmäisenä täytyy huomioida, kuinka sakeuttaminen rikastejätteestä pastaksi muuntelee seoksen geokemiallista reaktiivisuutta. Toinen kysymys koskee sitä, miten sideaineet, kuten sementti, vaikuttavat pastan reaktiivisuuteen ja prosessissa syntyviin suotovesituotteisiin. Viimeinen kysymys liittyy siihen, kuinka maanalainen ympäristö vaikuttaa pastan reaktiivisuuteen. Nämä kysymykset koskevat niin kaivosta toiminnan aikana kuin myös kaivoksen sulkemisen jälkeistä aikaa. [2]

Jotta voidaan arvioida metallien ja sekundäärimineraalien liukenemisnopeutta pinta- ja pohjavesiin sekä hapettumisen laajuutta kaivoksen sulkemisen jälkeen, on ym-



märrettävä, miten happi ja vesi liikkuvat kaivostäyttöaineiksessa ja sen ympärillä. Tekijöitä, jotka vaikuttavat hapen ja veden liikkeeseen ovat esimerkiksi pastan raekokojakauma, mineralogia, tiheys, kyllästysaste, hapen ja veden permeabiliteetti, sideaineiden määrä, side- tai lisäaineiden kemiallinen koostumus ja rikastushiekan huokosveden kemiallinen koostumus (erityisesti sen sulfidipitoisuus). Myös tekniset ominaisuudet vaikuttavat syntyvään kutistumaan, särön kehitykseen ja mahdolliseen hajoamiseen. Muita veden ja ilman virtaamiseen liittyviä näkökulmia on esimerkiksi isäntäkiven ominaisuudet, tyhjien tilojen syntyminen isäntäkiven ja täyttömateriaalin väliin sekä pastan säilytysolosuhteet. [2]

CPB:n potentiaaliset edut ympäristövaikutusten suhteen verrattuna muihin täyttömenetelmiin voidaan jakaa kolmeen pääkohtaan. Ensimmäisenä on huomioitava maanpäälliset jäteaineksen määrän vähentäminen ja siksi maanpäällisen ekologisen jalanjäljen pieneneminen. Toisekseen koko mineraalijäte käytetään täyttöainesmassaan sen sijaan, että käytettäisiin karkea raesus perinteiseen hiekkatäyttöön. Tästä seurauksena erinäisten lietevirtausten käsittely vähenee. Viimeinen seikka koskee hapettumisen ja huuhtoutumisen mahdollisuuden pientymistä johtuen maanalaiseen ympäristöön sijoitetun sakeutetun täyttömateriaalin luonteesta. Tätä voidaan perustella muutamilla osasyillä. Kun ympäristössä on vähemmän vapaata vettä, syntyy vähemmän suotovettä ja myös, kun on kyseessä korkeampi kyllästysaste, ympäristössä on vähemmän vapaata happea. Ensisijainen pohjaveden virtaus kulkee täytön ympäriltä enemmän kuin sen läpi, koska täyttöaineiksella on huonompi vedenläpäisevyys. Sementin lisäys lisää myös ylimääräistä neutralisaatiopotentiaalia (NP) ja vähentää tehollista huokoisuutta. Viimeinen osasy on tulvimisen mahdollisuus kaivoksen sulkemisen yhteydessä vähentää sulfidi hapettumista pitkällä aikavälillä. [2]

## 5.1 Maanalainen ympäristö

Maanalainen ympäristö on erilainen verrattuna esimerkiksi laboratorio- tai maanpinnan olosuhteisiin ja täten myös vaikuttaa eri tavalla täyttömassan reaktiivisuuteen. Rikastushiekan sijoittaminen maan alle vaikuttaa rikastushiekan ja kiviainesseinämän reaktiivisuuteen, maanpinnan alaisen veden ja ilman laatuun sekä maanalaiseen veden virtaukseen. Nämä ominaisuudet ovat keskenään vuorovaikutuksessa siten, että yhden tekijän muuttuminen vaikuttaa myös muihin tekijöihin. CPB sijoitetaan yleensä tulvimattomille alueille, sillä pohjaveden pinta pumpataan louhoksien alapuolelle operaatioiden ajaksi. Kun kaivos suljetaan, täyttö voi pysyä tulvimattomalla alueella pohjaveden pinnan yläpuolella tai sijaita alueella, jonka pohjaveden pinta vaihtelee tai on pysyvästi sen alla. [2]

Yleensä oletetaan, että kaivokset tulvivat sulkemisen jälkeen, jolloin pitkäaikainen sulfidien hapettuminen kiviainesseinämissä ja täytössä on merkityksetöntä. Jos kuitenkin pohjavedessä, isäntäkivessä tai täytön kovettuneessa rikastushiekassa on läsnä anioneja muodostavia rakenneosia, kuten antimoneja, arseenia tai seleeniä, voi se aiheuttaa ongelmia sen ohella, että sementtivaikutteisen kaivosveden korkeampi pH lisää rakenneosien liikkuvuutta. Vaikka hapan valumavesi (ARD) minimoitaisiin, pitkäaikainen kaivosveden laatu voi silti aiheuttaa ongelmia. ARD:n neutraloinnissa syntyvät liukenevat sekundääriset mineraalisuolat vaikuttavat toiminnalliseen kaivosveden laatuun ja suuri osa voi jäädä kaivokseen. Kun kaivos tulvii sulkemisen aikana, varastoituneet hapettumistuotteet voivat vapautua uudelleen veteen, ja jos kaivos on kokonaan suljettu, tämä voi johtaa epäpuhtauksien hitaaseen kulkeutumiseen pohjavesijärjestelmään. Ei ole kuitenkaan odotettavissa, että sekundääristen mineraalien alkuperäisen vapautumisen jälkeen tapahtuisi suuria virtauksia korkeilla pitoisuuksilla. Uudelleen tulvineessa kaivoksessa veden seisoessa tai vähetessä liukenevat hapettumistuotteet saattavat jopa saostua vähemmän liukeneviin muotoihin. [2]

Pohjavesi- ja kaivosvesivirrat huuhtovat jatkuvasti liukenevia komponentteja CPB:n paljastuneelta täyttöpinnalta. Sulfaattia on läsnä metallikaivosten esiintymän kanssa kosketuksissa olevassa pohjavedessä tai malmin prosessoinnissa syntyvässä jätevedessä. Happamia valumavesiä (ARD) voi myös esiintyä happamilla liuksilla ja korkeilla sulfaattipitoisuuksilla, jotka syntyvät sulfidimineraalien hapettumisessa. Huuhoutuneet täytön pinnat ovat alttiita happamille hyökkäyksille, sementin lisäaineiden emäksisten mineraalien suotoliukenemiselle ja hajoamista lisäävien paisuvien mineraalien muodostumiselle. [2]

## **5.2 Ilman permeabiliteetti ja veden kylläisyys täyttömateriaalissa**

Hapen kyllästysaste vaikuttaa kaivostäyttömateriaalin reaktiivisuuteen ja sulfidien hapettumiseen. Hapen kyllästysaste kuvaa sitä määrää happea, joka liukenee veteen tietyssä lämpötilassa [3]. Mitä korkeampi kyllästysaste on, sitä vähemmän ilmassa on vapaata happea. Maanalaisissa olosuhteissa vapaata happea voi olla vähemmän tarjolla kuin laboratorio olosuhteissa, jonka vuoksi myös kovettumisolosuhteet voivat poiketa verrattuna maanpäällisiin avolouhoksiin. Tämä laskee reaktiivisuutta ja sulfidien hapettumista. [2] Huokoisten materiaalien, kuten täyttömateriaalin permeabiliteetti ilmaan on huokosten geometrian ja huokosissa olevan veden määrän funktio. Permeabiliteettia merkitään  $k_{nw}$  ja tarkemmin ottaen sillä tarkoitetaan kostuttamattoman faasin permeabiliteettia. Geometriisiin ominaisuuksiin sisältyy huokoisuus, huokostilavuuksien muoto ja dimensiot

sekä virtausreittien mutkittelevuus toisiinsa kytkeytyneiden huokostilavuuksien läpi. Yleensä kaikki nämä ominaisuudet ovat yhdistetty yhteen tekijään, huokoskokoja-kaumaindeksiin,  $\lambda$ . [10]

Veden kylläisyys ilmaistaan yleensä tehollisena huokoisuutena,  $S_e$ , kun tarkastellaan ilman tai veden virtausta ja  $S_e$  voidaan määrittellä niiden tyhjien tilavuuksien jakeena, mistä vesi virtaa läpi eli  $0 \leq S_e \leq 1,0$ . Tehollinen kylläisyys on kapillaaripaineen,  $P_c$ , funktio, ja se voidaan määrittää ilman ja veden paineen välisenä erona huokostilavuuksissa, mikä vuorostaan on huokosgeometrian funktio. Se murto-osa kokonaishuokostilavuudesta, joka ei edistä virtausta ( $S_e = 0$ ) määrittellään jäännöskylläisyytenä,  $S_r$ . Tämä jäännöskylläisyys vaihtelee välillä 0,05–0,40 ja se saavutetaan, kun vettä sisältävien huokosten koko on pienempi kuin valtaosa huokosista. Suuremmat  $S_r$ :n arvot ja pienemmät  $\lambda$ :n arvot liittyvät yleensä hienojakoisempaan materiaaliin. [10]

Kun täyttö kuivuu sijoituksen jälkeen, kylläisyys on suunnilleen yhtä suuri kuin  $S_r$ . Jos vesi jatkaa virtaamistaan isäntäkivestä täyttöön, tehollinen kylläisyys kasvaa ja  $k_{nw}$  laskee. Ilman permeabiliteetti laskee nopeasti, kun  $S_e$  kasvaa ja se laskee tavallisilla materiaaleilla kertoimella 10, kun  $S_e = 0,6$ . Kun  $S_e = 1,0$ , ilman permeabiliteetti saavuttaa arvon nolla. Sulfidien hapettuminen katkaistaan tehokkaasti, koska täyttöön tulevaan veteen liuenneen hapen määrä on hyvin pieni. [10]

Monilla huokoisilla materiaaleilla on hyvin selvästi erikokoiset huokokset, joiden kylläisyys, permeabiliteetti ja virtausominaisuudet ovat erilaisia. Tästä hyvä esimerkki on halkeillut kivi, jonka läpi vesi virtaa primääristen huokosten ja/tai sekundääristen säröjen kautta. Kyllästyneissä oloissa vesi virtaa ensisijaisesti säröverkoston läpi, mutta kun  $S_e$ :n arvo tippuu alle 1,0:n, suuremmat murtumat ovat ensimmäisiä, jotka kuivuvat. Jollain  $S_e$ :n väliarvolla ( $0 \leq S_e \leq 1,0$ ) virtauksesta primäärihuokosten läpi tulee vallitseva, ja kun  $S_e$  lähestyy nollaa, vesi pysyy primäärihuokosissa ja säröt pysyvät kuivina. [10]

Veden kulkeminen rikastushiekan läpi tulisi vähentyä rikastushiekan permeabiliteetin laskiessa ja samalla vähentäen liukenevien epäpuhtauksien kulkeutumista täyttömateriaalista. Täyttöainekseen sisältyy suhteellisen homogeenisesti myös rikastushiekan pienemmät raekoot ja se laskee veden permeabiliteettia verrattuna sakeuttamattomaan rikastushiekkään. Sementin lisäys laskee myös permeabiliteettia, koska hydratoituneet sementtimineraalit eristävät täyttöaineksen huokosia ja tämän seurauksena tehollinen huokoisuus laskee. Maanalaisissa louhoksissa käytettävän minkä tahansa täyttöaineksen tulisi laskea veden permeabiliteettia, lisätä pohjaveden pinnankorkeutta sekä vähentää hapettumista ja epäpuhtauksien vapautumista pitkällä aikavälillä. Jos kuitenkin kaivos tulvii ja isäntäkiven vedenjohtavuus on huono, täytetyt alueet voivat silti muodostaa ensisijaisen virtausreitit. [2]

Ehjällä täyttörakenteella sekä sekundäärisillä halkeamilla ja aukoilla on erilainen vaikutus ilman permeabiliteettiin ja kyllästysasteeseen, ja nämä vaihtelevat sen mukaan, kuinka paljon isäntäkivestä virtaa vettä täyttömateriaalin sisään. Jos täyttömateriaali sisältää sekundäärisiä kutistumahalkeamia ja -aukkoja kallion ja täytteen rajapinnoissa, sen käyttäytyminen vastaa säröisen, huokoisen kiven käyttäytymistä veden virratessa läpi. [2]

Kuivissa olosuhteissa rakenteessa oleva vesi pysyy ehjässä rakenteessa ja sekundääriset halkeamat ja aukot pysyvät kuivina ja voivat mahdollistaa osittaisen hapettumisen ehjillä alueilla ja täyden hapettumisen murtumapinnoilla. Kosteammassa olosuhteissa ja esimerkiksi tulvimisen aikana kaivoksen sulkemisen jälkeen virtaus kulkee pääasiassa sekundäärisissä halkeamissa ja aukoissa, ja pinta-alaa hapettumiselle ei ole yhtä paljon tarjolla. Toisaalta näissä olosuhteissa kutistumahalkeamien ja -aukkojen muodostuminen kasvaa, mikä puolestaan luo hapettuvaa pinta-alaa lisää, kun olosuhteet ovat jälleen kuivemmat. [2]

### 5.3 Kemiallinen stabiliteetti CPB:ssä

Tässä luvussa tarkastellaan portlandsementtipohjaisen betonin kemiallisen stabiiliuden kautta sementin, ja näin ollen CPB:n kemiallista stabiiliutta. Yleisesti betoni valmistetaan täyteaineista, tavallisesta portlandsementistä ja vedestä. Täyteaineiden tehtävä on vähentää veden imeytymistä ja lisätä fyysistä kestävyyttä. Niiden on oltava geokemiallisesti inerttejä, jotta fysikaaliskemialliset ominaisuudet eivät muutu rapautumisprosessien vuoksi. Joidenkin kiinteiden faasien läsnäolo täyteaineissa voi vaikuttaa näihin prosesseihin ja niiden läsnäoloa on syytä minimoida. Tällaisia kiinteitä faaseja ovat esimerkiksi sulfaatit, sulfidit ja amorfinen piidioksidi. [8]

Betonin permeabiliteetti riippuu sen huokosten koosta, jakautumisesta ja kytkeytymisestä toisiinsa, mikä vuorostaan riippuu w/c-suhteesta ja sementtipastan hydratoitumisasteesta. Sementtipasta muodostuu kiteisistä faaseista, kuten portlandiitista, monosulfaatista ja ettringiitistä, sekä geelifaaseista, kuten kalsiumhydrosilikaatista. Huokoisuus jakaantuu suurempiin kapillaarihuokosiin (halkaisija luokkaa 1000 nm) ja pienempiin geelihuokosiin (halkaisija luokkaa 150nm). Kapillaarihuokokset ovat seurausta suurista w/c-suhteista ja vesi virtaa niiden kautta helpommin. Tästä syystä sementtipastat ovat jopa 100 kertaa läpäisevämpiä kuin sementti itsessään, sillä sementtipasta sisältää sekä kapillaari- että geelihuokosia, kun taas sementti pelkkiä geelihuokosia (eli sementin w/c-suhde on alhainen). [8]

Portlandsementistä valmistettu betoni voi veden ja kiintoaineksen vuorovaikutusreaktioiden takia kokea erilaisia hajoamisprosesseja. Perehdytään seuraavaksi tyypillisimpiin hajoamisprosesseihin, joita ovat karbonatisoituminen ja sulfaatista aiheutuva hajoaminen sekä pitkäaikaisen hajoamisen vaikutuksiin. [8]

### 5.3.1 Karbonatisoituminen

Karbonatisoitumisessa ilmakehän hiilidioksidi liukenee sementtipastan huokosten liuokseen ja näin syntyy karbonaatti-ioneja,  $\text{CO}_3^{2-}$ . Kun nämä ionit reagoivat  $\text{Ca}^{2+}$  -ioneiden kanssa, syntyy kalsiittia,  $\text{CaCO}_3$ . Karbonatisoitumisreaktiossa kuluu portlandiittia,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , joka on yksi sementin hydrataatioreaktion tuotteista. Toisesta sementin hydratoitutuotteesta, kalsiumhydrosilikaatti-geelistä (C-S-H) poistuu kalkki ja se hajoaa, kun  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  alkaa ehtyä. Myös ettringiitti ja monosulfaatti reagoivat muodostaen karbonaattifaaseja. Täydellisen karbonatisoitumisreaktion lopputuotteita ovat kalsiitti, amorfinen piidioksidi, hydrokarboaluminaatti ja eri Al- ja Fe-hydroksidit. Ensin  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ :n kuluessa, pH-arvo laskee lähelle 12,4:ää. C-S-H-geelien aiheuttama muutos koostumuksessa ja monosulfaatin sekä myöhemmin ettringiitin yhteisvaikutus saa pH-arvon laskemaan lopulta 8–9:ään, kun käytetään puskurina kalsiittia. [8]

Karbonatisoitumisprosessin nopeutta määrittää ilman pääsy huokosveteen. Kapillaarihuokosten suhteellinen kosteus määrää pääasiassa prosessin nopeuden, mutta muita siihen vaikuttavia parametrejä on myös: avoin huokoisuus, permeabiliteetti sekä w/c-suhde. Kuivassa sementtipastassa hiilidioksidikaasu pääsee kulkeutumaan syvälle kapillaarisysteemiin ja karbonatisoitumisnopeus on suuri. Kun sementtipasta on kostea, hiilidioksidikaasun kulkeuma tapahtuu lähinnä diffuusion avulla veden täyttämiin kapillaarihuokosiin ja nopeus on huomattavasti pienempi. [8]

Sementtipastan koostumus voi muuntua alhaisen epäorgaanisen hiilipitoisuuden vaikutuksesta. Karbonaatti-ioni  $\text{CO}_3^{2-}$  voi korvata sulfaatti-ionin  $\text{SO}_4^{2-}$  tietyissä hydrataatioprosessin vaiheissa, josta esimerkkinä on thaumasiitin muodostuminen. Sitä muodostuu normaalissa sementtipastassa sulfaattireaktioiden seurauksena, mutta se tarvitsee karbonaattitäyteaineita, jonka vuoksi sitä voidaan pitää yhtenä sulfaattihyökkäyksen muotona. [8]

### 5.3.2 Sulfaatista aiheutuva hajoaminen

Sulfidien ja sulfaattien läsnäololla rikastushiekassa on taipumusta olla haitallinen vaikutus sementin asettumiseen ja pitkäaikaiseen kestävyYTEEN. Sakeutetussa rikastushiekassa ja täytön ympäristössä oleva jäännösprosessivesi sisältää monesti korkeita sul-

faattipitoisuuksia. Sulfaatit reagoivat hydratoituneen sementin kanssa muodostaen laajenevia mineraaleja, kuten kipsiä, ja voivat johtaa materiaalin säröilyyn. Muita lisäaineita, kuten kuonaa, lisätään seokseen parantamaan vastustuskykyä sulfaattiliuoksia vastaan minimoimalla seoksen riippuvuutta portlandiitista sideaineena. [2]

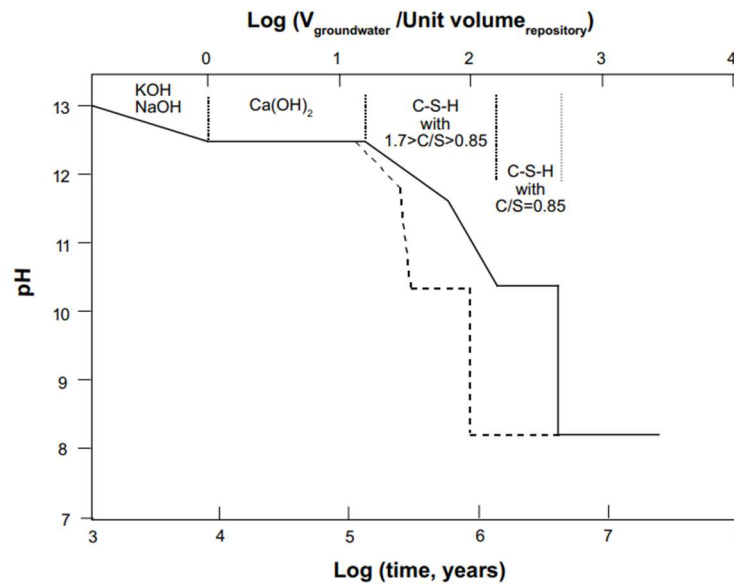
Tavallinen portlandsementti sisältää pari prosenttia kalsiumsulfaatteja eli pääasiassa kipsiä, joka hallitsee betonin hydrataation aikaista kovettumisaikaa. Sulfaatti voi muodostaa monosulfaattia ja ettringiittiä. Sementin hydrataation alkuvaiheessa muodostuva ettringiitti on yksi päämineraaleista betonissa. Varhainen ettringiitti reagoi jäljellä olevan aluminaatin kanssa ja muodostaa monosulfaattia, kun huokosvesi on kulunut loppuun sulfaatissa. Ettringiitti muuttuu epävakaaksi alhaisilla sulfaattipitoisuuksilla, kun taas korkeilla sulfaattipitoisuuksilla ettringiitin muodostuminen lisääntyy ja lopulta kipsi voi saostua. Ettringiitin ja kipsin muodostuminen liittyy myös tilavuuden kasvuun, joka voi lopulta johtaa murtumisprosesseihin. Koska ettringiitti tarvitsee alumiinia muodostukseen, sulfaattirikkaissa ympäristöissä alumiinipitoisuus on pidettävä matalana. [8]

Ettringiitin ja monosulfaatin stabiilius on pH:n säätelemä. Potentiometriset mittaukset osoittavat ettringiitin ja monosulfaatin häviämisen, kun pH laskee alle 10,7 ja tällöin ainoastaan kipsi ja alumiini säilyi. Ettringiitin ja monosulfaatin vakauteen vaikuttavat kuitenkin myös emäspitoisuus ja lämpötila. Matalammissa lämpötiloissa (20 °C) ettringiitti on vakaa faasi, mutta lämpötilan noustessa yli 60 °C:een reaktion suunta vaihtuu. Erittäin korkeissa lämpötiloissa (70–80 °C) ettringiitti muuttuu epävakaaksi. [8]

### 5.3.3 Hajoamisen pitkäaikaisvaikutukset

Huokosliuoksen kemiallinen koostumus määrittää kovettuneen sementtipastan hydratointituotteiden stabiiliuden. Kun huokosvesi reagoi vesipitoisten ympäristöjen kanssa, hydratointituotteiden stabiilius ilmenee vyöhykkeinä jatkuvan muutoksen sijaan. Vyöhykemallissa eri kiintoainespitoisuus-alueiden rajalla ilmenee suhteellisen jyrkkiä muutoksia. Rajatussa tarkastelupisteessä eri hajoamisprosessit, kuten sementtifaasien liukeneminen, liuenneiden kemiallisten lajien kuljetus ja sekundääristen mineraalien uudelleen saostuminen, seuraavat toisiaan, koska reaktiivinen rintama liikkuu ajan kuluessa. [8]

Havaitut tekstuuriset yhteydet viittaavat siihen, että kemiallinen hyökkäys aiheutuu tihkuveden kulkureittinä toimivista rakenteen läpäisevistä epäyhdenäisyyksistä. Pitkäaikaisia prosesseja, kuten suotoliukenemista ja sulfaattimineraalien muodostumista on havaittu kaikissa tutkituissa tunnelirakenteissa, joissa ruiskubetoni on kosketuksissa pohjaveden kanssa. Muodostuneista sulfaattimineraaleista etenkin thaumasiittia on löydetty sisäisiltä reiteiltä ja vuorauksen rajapinnalta ja thaumasiitti onkin hyvin yleinen löydös maanalaisissa rakennustöissä. [8]

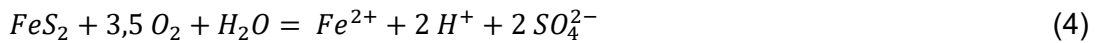


**Kuvaaja 8** pH:n kehitys sementin hydratoituneiden faasien hajoamisen funktiona. [8]

Tasapainotilan huokosvesi betonissa on hyvin emäksistä ja sen pH arvo on noin 13. Tiettyjä vaihteluja pH arvossa voidaan olettaa riippuen betonin ominaisuuksista, ja näin ollen pH arvojen avulla voidaan seurata betonin hajoamista. Betonin laatu riippuu siten ei pelkästään koostumuksesta vaan myös ympäristöolosuhteista. Kuvaaja 8 esittää muutoksia pH arvoissa ajan kuluessa ja siitä nähdään, että pH:n kehitys betonin huokosvedessä voidaan jakaa viiteen päävaiheeseen. Huokosliuoksen alkuperäinen pH pysyy noin 13:ssa, kunnes ulkoinen neste on kosketuksessa betonifaasin kanssa ja pH alkaa laskea. Kalsiumhydrosilikaattifaasi (C-S-H) muodostaa viimeisen suojaavan esteen betonin hajoamista vastaan. Kun CSH-faasi on hajonnut kokonaan, kalsiitti ja piidioksidigeeli ovat jäljelle jäävät merkittävimmät kiinteät faasit, jotka hallitsevat systeemin kemialla. [8]

## 5.4 Sulfidin reaktiivisuus CPB:ssä

Sulfidimineraalit hapettuvat hapen ja veden läsnä ollessa muodostaen rikkihappoa. Tällaisia reaktiivisia sulfidimineraaleja ovat esimerkiksi pyrroitiitti ja pyriitti, ja niiden hapettuminen laskee suotoveden pH:ta. Tämä puolestaan kasvattaa useiden alkuaineiden, kuten isäntäkivestä peräisin olevien metallien, liukoisuutta ja pitoisuutta. Happopitoisuuden ja liuenneiden alkuaineiden yhteisvaikutus voi lisätä jäteveden myrkyllisyyttä, joka voi olla epäsuotuisaa läheiselle ekosysteemille. Vaikka kirjallisuudesta löytyy selvitystä sulfidinin hapettumismekanismista, vaatii aihe vielä lisää tutkimusta. Pyriitin globaali kemiallinen hapettumisreaktio voidaan ilmaista yksinkertaistetusti kaavan (4) mukaan. [9]

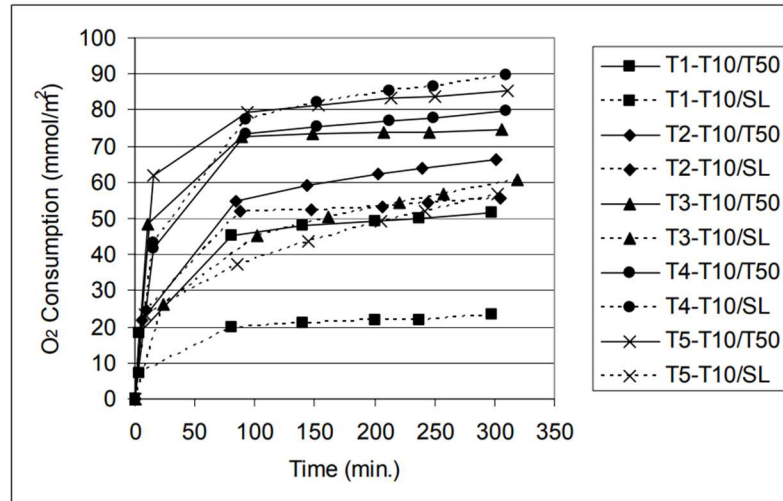


Kaivostoiminnassa on kehitetty erilaisia strategioita, joilla varmistetaan, ettei hapan valumavesi (AMD) vaikuta merkittävästi ympäristöön. Yksi vaihtoehtoinen lähestymistapa rikastushiekan hallinnan parantamiseksi on käyttää CPB-tekniikkaa täyttömenetelmänä. Täyttömateriaalin pinnalla on vain pieni määrä vapaata vettä, joka pienentää vettä sisältävien rakenteiden kokoa. Lisäksi CPB:ssä tapahtuu vähemmän partikkelien lajittumista ja rikastushiekan hydrogeotekniset ominaisuudet ovat vakaampia. Hydraulisen sideaineen lisääminen pinnalle täyttöpastaan lisää täytön lujuuden ja kestävyuden lisäksi hapon neutralointipotentiaalia. Sementoituminen voi myös stabilisoida pastatäyttömatriisin epäpuhtauksia. Huolimatta edellä mainituista eduista, CPB:n käyttöön liittyy huomattavia epävarmuustekijöitä pastatäytön ympäristökäyttäytymisen suhteen. [9]

CPB:n ympäristövaikutuksia tutkittaessa voidaan eritellä ainakin seuraavat edut koskien CPB:n hyödyntämistä maanalaisissa avaruksissa: i) CPB:n neutralisaatiopotentiaali on suurempi, ii) hapettuminen vähenee pienentämällä sulfidimineraaleille altistettua pinta-alaa ja rajoittamalla ilman diffuusiota ennen tulvimista ja iii) hapettuminen alentaa CPB:n hydraulista johtavuutta, mikä sallii täytön säilyttää metalli-ioneja. Seuraavaksi esitellään tutkimustuloksia hapenkulutustesteistä (OC) eri sulfidijätteiden reaktiivisuuden arvioimiseksi. Tutkimus tehtiin tuoreelle rikastushiekalle eri kyllästysasteilla ja CPB:ssä olevalle rikastushiekalle. Louvicourtin kaivoksesta peräisin olevasta aineksesta valmistettiin rikinpoiston jälkeen rikastushiekkaa, joka sisälsi noin 4, 12, 22, 34 ja 74 painoprosenttia pyriittiä. Rikastushiekasta tehtiin CPB-näytteitä, joihin sekoitettiin 4,5 % kahden tyyppistä sideainetta: suhteella 50:50 tyyppi-10 (T10) ja tyyppi-50 (T50) portlandsementtiä sekä suhteella 20:80 tyyppi-10 portlandsementtiä ja granuloitua jauhettua masuunikuonaa (SL). Hanavettä lisättiin painauma-arvon säätämiseksi arvoon 17,5 cm ± 0,5. Hapenkulutustestaus tehtiin neljällä eri kovetusajalla, 14, 28, 45 ja 60 päivää. [9]

Tulokset näyttivät, että rikastushiekan hapenkulutus on pyriitin määrän ja kyllästysasteen funktio. CPB-näytteiden reaktiivisuus riippuu pyriitin pitoisuudesta seuraavasti: hapenkulutus kasvaa, kun pyriitin osuus rikastushiekassa kasvaa. Kuitenkin hapenkulutus voidaan rajoittaa mataliin arvoihin rikastushiekalla, joka sisältää pyriittiä jopa 75 %, kun kyllästysaste on korkea. Tämä johtuu hapen tehollisen diffuusiokerroimen,  $D_e$ , pienemisestä kyllästysasteen kasvaessa. Diffuusiokerroin liittyy hapen virtaukseen materiaalin läpi ja sitä voidaan kuvata matemaattisesti Fickin ensimmäisellä ja toisella lailla. Tietyn seoksen reaktiivisuus ei myöskään kasva (voi jopa pienentyä) 28 päivän kovetusajan jälkeen. [9]





**Kuvaaja 9** CPB-näytteiden hapenkulutus 45 päivän kovetusajan jälkeen. [9]

Sideaineen tyypillä on myös selvä vaikutus hapen kulutukseen. Tulokset osoittivat myös, että CPB-näytteet ovat vähemmän reaktiivisia kuin vastaava valmistettu tuore rikastushiekka (ilman sideainetta) alle 70 % kyllästysasteella. Kuvaajasta 9 nähdään, että sideaine T10/SL on yleisesti ottaen tehokkaampi pienentämään reaktiivisuutta näytteissä kuin sideaine T10/T50. Ero johtuu näiden kahden sideainetyypin avulla saaduista sementtimatriisin tiheyseroista. Sideaineella T10/SL saatu matalampi reaktiivisuus voidaan osittain selittää paremmalla sementin hydrataatiolla tästä sideaineesta valmistetussa pastatäytössä. Mittaamalla näytteiden UCS:n arvoa kaikilla kovetusajoilla havaittiin, että lujuuden kehitystä parannetaan T10/SL-sideaineella. Suurempi puristuslujuus saavutetaan paremmalla hydrataatiolla, jäykemmällä sementtimineraaleilla ja pienemmällä huokoisuudella. Tämän vuoksi pastan mikrorakenteen laatu onkin hyvä osoitus sen ympäristökäyttäytymisestä. Kun otetaan huomioon, että sideaineen hydrataatio laskee hydraulista johtavuutta ja vedenpidätyskyky kasvaa, CPB-tekniikan pitäisi olla käytökelpoinen tapa vähentää pinnalle sijoitetun sulfidijätteen reaktiivisuutta (rikastushiekka pysyy korkeammassa kyllästysasteessa, jolloin hapenkulutus vähenee). [9]

## 5.5 Sementti ja muut sitovat lisäaineet

Sementtiä ja muita sitovia lisäaineita, kuten lentotuhkaa ja kuonaa, lisätään seokseen, jotta kovetetun materiaalin lyhyt- pitkäaikainen lujuus kasvaa. Muita sitovien lisäaineiden etuja ovat esimerkiksi päämassan läpäisevyyden pieneminen, suotovesien muodostumisen ja/tai loppusijoitetun täytön vuotamisen pieneminen ja alun perin emäksisten ympäristön mahdollistaminen, mikä vähentää monien metalli-ionien liukoisuutta. Myös lisäaineeseen liittyvän ylimääräisen neutralisaatiopotentiaalin (NP) lisääminen puskuroi

pastan sulfideista muodostuneita happamia hapettumistuotteita ja/tai neutraloi kaivoksen muilla reaktiivisilla alueilla syntynyttä ARD:tä. Perusteellisella massan sekoituksella NP:n lisääminen voi mahdollisesti vähentää jätteen hapettumisnopeutta. [2]

Vaikka pastalle saadaan ylimääräistä NP:tä lisäämällä sementtiä, se harvoin riittää muuttamaan NP:n ja happoa tuottavan potentiaalın suhdetta (NPR) tai täyttömateriaalin hapontuottoluokitusta. Hydratoituneen sementin komponentit ovat myös helposti liukenevia, joten vaikka tehokkaat puskurointimineraalit kasvattavat NP:tä kaivoksen eliniän alkuvaiheessa, ne luultavasti kuluvat loppuun nopeasti. Täysin kovettunut pasta kestää paremmin sideainemineraalien menetystä, joten on hyödyllistä sijoittaa tuore pasta kuiville alueille, missä suovesiliuokset eivät ole välittömässä kosketuksessa pastaan. Tutkimukset osoittavat, että pastatäytön esteettömät pinnat (täytön reunat, jotka ovat kosketuksessa veteen) altistuvat todennäköisimmin sideaineiden menetykselle. Pastatäyttö muuttuu asteittain kehittyvissä samankeskisissä kerroksissa, missä ydinosaat kokevat muutosta vähiten. Sidemineraalien, kuten portlandiitin, ehtyminen johtaa kasvaneeseen huokoisuuteen, mikä laskee pastan lujuutta ja kaivoksessa olevat nesteet (pohjavesi ja ARD) voivat tunkeutua helpommin massaan. [2]

## 6. YHTEENVETO

Kovettuva kaivostäyttö on yleistynyt kaivosteollisuuden täyttölouhintaa käyttävissä kaivoksissa täyttömenetelmänä ja sillä on huomattavia etuja verrattuna muihin menetelmiin. CPB:n käyttökustannukset ovat yleensä matalammat verrattuna hydrauliseen täyttöön ja lisäksi rikastushiekan käsittelyn kustannukset ovat pienemmät, kun rikastushiekkaa ei sijoiteta maanpinnan läheisyyteen. Tietyllä sideainepitoisuudella CPB:n lujuus kasvaa suhteellisen nopeasti, joten kaivossykli on lyhyempi kuin esimerkiksi hydraulisella täytöllä. Koska täyttömässan partikkelit eivät lajitu, voidaan kokonainen avarrus täyttää kerralla.

Täyttömateriaalin permeabiliteetti on alhainen ja kyllästysaste korkea, koska noin 90 % prosessoidusta vedestä voidaan ottaa talteen ennen sementtitäyttöä ja tällöin huokosvettä ei tihku täyttöön. Rikastushiekan reologia vaikuttaa oleellisesti täyttömateriaalin kuljetukseen maan alle. Reologisia ominaisuuksia voidaan mitata painaumatestauksella. Täytön lujuuteen ja vakauteen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoisiin tekijöihin. Sisäisiä tekijöitä ovat esimerkiksi raekokojakauma, rakeen muoto ja ominaispaino sekä mineralogia. Täyttömässassa tulisi olla tietty osuus hienoainesta (alle 20 µm jaetta) täytön virtavuuden ja koossapysyvyyden kannalta. Hyvin lajittunut partikkelikokojakauma takaa lujempien sidosten muodostumisen rakenteeseen. Partikkelin muoto vaikuttaa sen asettumiseen, partikkelien välisten tyhjien tilojen syntymiseen ja niiden välisiin reitteihin, jotka pidättävät ja kuljettavat nesteitä CPB:ssä. Täytön mineralogia vaikuttaa laajalti täytön ominaisuuksiin. Sulfaattikonsentraatio vaikuttaa täytön lujuuteen ja vakauteen. Esimerkiksi vapaat sulfaatti-ionit voivat tuottaa laajenevaa kipsiä ja ettringiittiä, jotka puolestaan voivat aiheuttaa rakenteeseen voimakkaan sisäisen paineen tuloksena rakenteen halkeilua ja koheesion menetyksiä. Toisaalta myös kovetus aika voi aiheuttaa lujuuden kasvua tietyllä sulfaattikonsentraatiolla, kun hydratointituotteiden saostumat täyttävät rakenteen tyhjää tilavuutta.

Lujuuteen ja vakauteen vaikuttavia ulkoisia tekijöitä ovat esimerkiksi kovettumislämpötila, omapainon lujittava vaikutus, täytön ja kallion rajapinta ja täytön kaareutuvuussefekti. Mekaaniset ominaisuudet ovat seurausta kahdesta päämekanismista: täyttömateriaalin omapainon vaikutuksesta johtuvasta lujittumisesta ja hydrataation aikaansaamasta sisäiskuivumisesta. CPB tarjoaa tukirakenteen maanalaisille seinämille ja sen geometriaa voidaan muokata joustavasti. Yleensä CPB:n muotoiluna käytetään vapaasti seisovaa seinää, joka tarvitsee samanarvoisen UCS:n arvon kuin mitä ylikuormajännitys täytetyn avarruksen pohjalla on. Louhokseen muodostuva horisontaalinen jännitys ja

kaareutuminen ovat merkittäviä tekijöitä CPB:n suunnittelussa. Kaareutumisefekti vähentää täytön pohjaa kohdistuvaa painetta, kun CPB-kiviaines rajapinnan leikkausjännitys toimii tukevana voimana täytölle. Täyttömässaseos voidaan optimoida tietyn lujuuden saavuttamiseksi, sillä täytön lujuus tietyllä kovetusajalla on sideainepitoisuuden funktio. Täytön kovettuminen voidaan jakaa kahteen päävaiheeseen, joista ensimmäistä hallitsee liukenemisreaktiot ja toista sulfidin saostumisreaktiot ja sideaineen suora hydrataatio.

Kovettumislämpötila vaikuttaa merkittävästi rajapinnan leikkauskäyttäytymiseen. Korkeammalla kovetuslämpötilalla leikkauslujuus kasvaa sekä rajapinnan leikkauslaajentuminen on suurempi ja kutistuma vähäisempää. Korkeammassa lämpötilassa sementin hydrataatioprosessi kiihtyy, joka johtaa rajapinnan kytkeytyneeseen rakenteeseen ja näin ollen leikkauslujuus kasvaa. Myös sisäiskuivuminen kasvattaa leikkauslujuutta ja kimmomoduulia. Yleisesti ottaen leikkauslujuus kasvaa pidemmällä kovetusajalla, mutta risteymävaikutus voi myös alentaa CPB:n mekaanista lujuutta pitkällä kovetusajalla ja korkealla kovetuslämpötilalla. Kovetuslämpötilan ja -ajan yhteisvaikutus voi kasvattaa koheesiota ja kitkakulmaa rajapinnassa. Kemiallinen kutistuma on sisäiskuivumismekanismien ajava voima.

Maanalainen ympäristö vaikuttaa itsessään CPB:n ympäristövaikutuksiin. Rikastushiekan sijoitus maan alle aiheuttaa muutoksia rikastushiekan ja kiviainesseinämän reaktiivisuuteen. Lisäksi se muokkaa maanpinnan alaisen veden ja ilman laatua sekä maanalaiseen veden virtausta. Kun rikastushiekan permeabiliteetti laskee, tulisi myös veden virtaus täyttömässan läpi vähentyä ja näin veden kuljettamien liukenevien epäpuhtauksien kulkeutuminen sekä AMD:n syntymisen vähentyä. Hienoaineksen määrä rikastushiekassa ja sementin lisäys massaan laskevat permeabiliteettia. CPB:itä vaaditaan myös kemiallista stabiiliutta. Työssä tutkittiin yleisimpiä portlandsementin kokemia hajoamisprosesseja, kuten karbonatisoitumista, sulfaatista aiheutuvaa hajoamista ja pitkäaikaisen hajoamisen vaikutuksia. Karbonatisoitumisessa kuluu sementin hydratoitutuotteita, kuten portlandiittia, kun se reagoi ilmakehän hiilidioksidin kanssa. Tuloksena sementtipastan kemiallinen koostumus voi muuntua ja se voi heikentää CPB:tä.

Myös sulfideilla ja sulfaateilla on haitallinen vaikutus täytön pitkäaikaiseen kestävyteen, sillä sulfaattireaktiot voivat aiheuttaa CPB:n säröilyä. Hydratoitutuotteiden stabiiliutta voidaan kuvata pH:n mukaan vyöhykkeinä. C-S-H-faasi suojaa viimeisenä massaa hajoamiselta ja sen hajottua kalsiitti ja piioksidigeeli säätelevät systeemin kemialla. Sulfidien muodostama rikkihappo puolestaan laskee suotoveden pH:ta ja kasvattaa isäntäkiven metallien liukoisuutta. CPB on hyvä tapa vähentää sulfidijätteen reaktiivisuutta, sillä sideaineen hydrataatio laskee hydraulista johtavuutta ja massan vedenpidätyskyky kasvaa.

# LÄHTEET

- [1] M. Sheshpari, "A Review of Underground Mine Backfilling Methods with Emphasis On Cemented Paste Backfill", 2015, vsk. 20, pp. 5183–5208.
- [2] Mehling Environmental Management Inc. ja Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program, "Paste Backfill Geochemistry – Environmental Effects of Leaching and Weathering MEND Report 10.2". Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program, 2006.
- [3] J. Mutanen, "Veden laadun tutkiminen". Biotieteiden opetuksen keskus, Helsingin yliopisto, 2016, Viitattu: marras 08, 2020. [Verkossa]. Saatavissa: [https://blogs.helsinki.fi/biopop-keskus/files/2017/08/veden\\_laatu.pdf](https://blogs.helsinki.fi/biopop-keskus/files/2017/08/veden_laatu.pdf).
- [4] M. L. Walske, "An Experimental Study of Cementing Paste Backfill", *The University of Western Australia*, 2014, 189 p.
- [5] B. Ercikdi, F. Cihangir, A. Kesimal, & H. Deveci, "Practical Importance of Tailings for Cemented Paste Backfill", E. Yilmaz & M. Fall (ed.), in *Paste Tailings Management*, Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 7–32.
- [6] K. Fang & M. Fall, "Effects of curing temperature on shear behaviour of cemented paste backfill-rock interface", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vsk. 112, pp. 184–192, joulu 2018, doi: [10.1016/j.ijrmms.2018.10.024](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.10.024).
- [7] M. Benzaazoua & T. Belem, "An overview on the use of paste backfill technology as a ground support method in cut-and-fill mines", E. Villaescusa & Y. Potvin (ed.), in *Ground Support in Mining and Underground Construction*, CRC Press, 2004, pp. 637–650.
- [8] M. Luna, D. Arcos, & L. Duro, "Effects of grouting, shotcreting and concrete leachates on backfill geochemistry", *Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co*, 2006, 51 p.
- [9] S. Ouellet, B. Bussière, M. Benzaazoua, M. Aubertin, M. Fall, & T. Belem, "Sulphide Reactivity within Cemented Paste Backfill: Oxygen Consumption Test Results", 2003, 9 p.
- [10] R. L. Levens, A. D. Marcy, & C. M. K. Boldt, "Environmental Impacts of Cemented Mine Waste Backfill", *United States Department of the Interior*, 1996, 23 p.
- [11] Y. Yao & H. Sun, "A novel silica alumina-based backfill material composed of coal refuse and fly ash", *Journal of Hazardous Materials*, vsk. 213–214, pp. 71–82, huhti 2012, doi: [10.1016/j.jhazmat.2012.01.059](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.01.059).
- [12] I. Janotka & S. C. Mojumdar, "Degree of hydration in cement paste and C3A-sodium carbonate-water systems", *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vsk. 90, nro 3, pp. 645–652, joulu 2007, doi: [10.1007/s10973-007-8517-6](https://doi.org/10.1007/s10973-007-8517-6).