



TEKNISET SUOSITUKSET

TEKNISESTI KÄYTTÖKELPOISIMMAT RATKAISUT JA TOIMINTATAVAT



LIFE12 ENV/FI/000592 UPACMIC



LOPPURAPORTTI HANKKEEN PERUSTEELLA PARHAIMMIKSI HAVAITUISTA KÄYTÄNNÖISTÄ (B2 TECHNICAL RECOMMENDATIONS DOCUMENT)

Projekti **UPACMIC**
Projekti nro **151006900**
Asiakirjatyyppe **Loppuraportti**
Päivämäärä **5.10.2022**
Laatija **Emmi Ilonen**
Tarkastajat **Marjo Koivulahti**
Harri Jyrävä

SISÄLTÖ

Summary 4

1.	Johdanto	5
2.	Pintarakenneratkaisut	6
2.1	Materiaalitestauksen perusteella potentiaalisimmat ratkaisut	7
2.2	Logistiikka ja varastointi	7
2.3	Rakentaminen	8
3.	Eristysrakenne	9
3.1	Logistiikka ja varastointi	9
3.2	Rakentaminen	9
4.	Reaktiiviset rakenteet	10
4.1	Logistiikka ja varastointi	10
4.2	Rakentaminen	10
5.	Pohjarakenne	10
6.	Työvoima	11
7.	Yhteenveto	11

SUMMARY

Technical recommendations are presented in all the phases in construction project, started from designing process and also in final structure's monitoring process. Recommendations based on knowledge from laboratory testing and pilots, only bottom structure aren't tested in real applications/pilots. Main properties that are demanded from bottom structure are low water permeability and high compression strength, so materials suitability could be evaluated based on laboratory testing results and knowledge from other pilot structures. Based on above mentioned fiber clay is tight and can handle well compression, so it can be suitable in bottom structures. Also, ash and foundry sand and dust have properties against compression, which are necessary in high pressures conditions such as under tailings.

There are many suitable materials for the cover structures. Based on the pilots and laboratory testing ash, gypsum and fiber clay are suitable materials for the cover layers. Also, tight enough surplus soils are usable. Foundry sands and dust, and limestone products are potential new materials based on laboratory testing but there haven't done research in real pilot conditions.

Limestone is already used in neutralizing in reactive structures, and it's seemed to be working also in mine conditions. There must note that using in long period it need maintenance like material change or cleaning. Geopolymer using in reactive structures need more research, because amount of adsorbent was too small in pilot. Adsorption mats also need more research. Based on the pilot mats worked well in Finnish weather conditions until adsorption capacity was used.

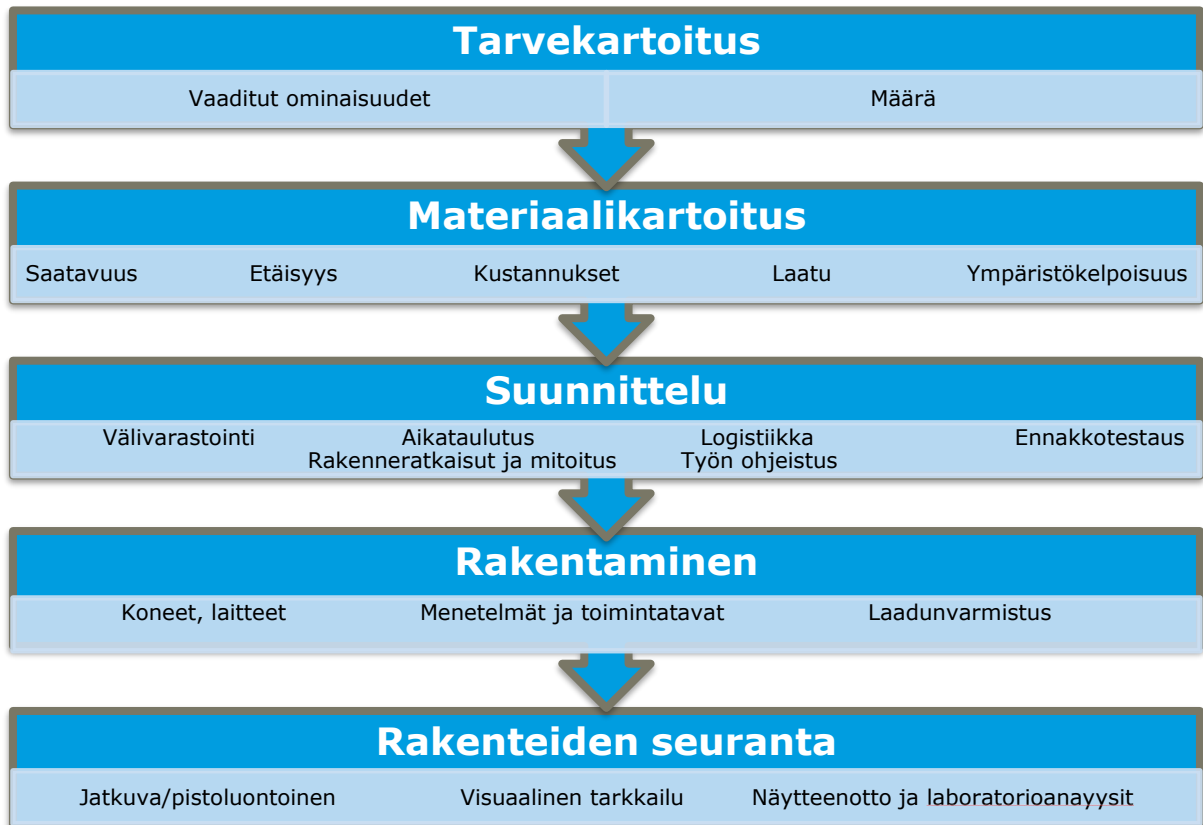
Clay material is usable in sealing structure. Based on the pilot in Sorsasalo, vertical sealing barrier demanded water permeability ($k \leq 1 \times 10^{-9}$ m/s) have achieved by clay when it is compressed with mould. However, surplus soils are usable in many cases, and their properties can improve with different mixtures based on demands in final structure.

1. JOHDANTO

UPACMIC (Utilization of by-products and alternative construction materials in new mine construction) on EU-Life rahoitteinen hanke, jonka tavoitteena on hyödyntää teollisuuden sivuvirtoja ja maarakennuskelpoisia jätteitä kaivosalueiden pinta- ja pohjarakenteissa sekä reaktiivisissa vesienkäsittelyrakenteissa. Hankkeen aikana pilotoitiin uusiomateriaaleista rakennettuja pinta-, eriste- ja reaktiivisia rakenteita. Pilotointien ja laboratoriotutkimusten perusteella parhaiksi arvioidut materiaalit ja rakentamistavat on koostettu tähän raporttiin. Pohjarakenneratkaisut eivät toteutuneet hankkeen aikana, joten niiden arviointi perustuu materiaalitestausvaiheen sekä muiden rakenneratkaisujen tuloksiin. Materiaalien vertailussa on huomioitu uusiomateriaalien soveltuvuus rakenteisiin niin teknisen soveltuvuuden kuin ympäristökelpoisuuden näkökulmista.

Vaihtoehtoisten materiaalien käyttöön liittyviä hyväksi havaittuja menetelmiä on esitetty useassa eri rakentamishankkeen vaiheessa alkukartoituksesta lopullisen rakenteen toimivuuden seurantaan. Hankkeen yhteydessä toteutettujen pilotointien avulla on kerätty tietoja kaikista hyödyntämisprosessin vaiheista ja esiin tulleista ongelmista, joiden perusteella suositellut menetelmät ja materiaalit on rakennekohtaisesti valittu. Kokonaisuudessaan materiaalivaihtoehtojen arviointia on helpottanut hankkeen alkuvaiheen laaja-alainen materiaalitestaus, jonka perusteella voitiin karsia jo hyvissä ajoin suunniteltuihin rakenteisiin keskimääräistä heikommin sopivat materiaalivaihtoehdot ja toisaalta etsiä parhaimpien vaihtoehtojen välisiä eroja tarkemmilla tutkimuksilla. Rakentamishankkeen toteutuksessa materiaalivalintoihin vaikuttaa oleellisesti myös materiaalin saatavuus ja tuotannon etäisyys rakennuskohteesta, sekä hyödynnettävien materiaalien käsittelyyn ja väli-varastointiin liittyvät reunaehdot ja vaatimukset.

Rakennushankkeen tyypillinen etenemisprosessi on esitetty kuvassa 1. UPACMIC-hankkeen pilotointien edetessä vaihtoehtoisia rakenneratkaisuja on arvioitu useista näkökulmista kaikissa esitetyissä hankevaiheissa. Tehdyillä tutkimuksilla ja analyyseillä pyritään vähentämään ennakkoluuloja uudentyyppisiin rakenneratkaisuihin, sekä tuomaan esille jäte-/sivutuotemateriaalien käytön hyödyt niin hankkeen toteuttajan kuin materiaalintuottajan näkökulmista. Tässä teknisien suositusten yhteenvedossa ei oteta kantaa rakenteiden viranomaishyväksyntään. Rakenteiden vaatimat luvat vaihtelevat suuresti sen mukaan mihin rakennetta ollaan sijoittamassa, lisäksi hankkeen aikataulutusessa on huomioitava aikaa vievä lupamenettely.



Kuva 1. Rakennushankkeen vaiheet.

2. PINTARAKENNERATKAISUT

Pyhäsalmen kaivosalueella pilotoitiin karkean ja hienon rikastushiekan peitorakenteissa kipsin ja tuhkan käyttöä. Pilottirakenteissa käytetyt materiaalmäärät olivat huomattavasti pienempiä kuin mitä todellisissa massiivirakenteissa tulotisiin käyttämään. Tämän kohteen osalta johtopäätökset perustuvat arvioon siitä, kuinka testatut vaihtoehtoiset peiterakenteet tulisi toteuttaa todellisissa massiivirakenteissa.

Pitkäaikaisseurannan tulosten perusteella moreenin ja kasvukerroksen lisäksi paras vaihtoehtoinen peiterakennusratkaisu oli kipsi-moreeniseos (70 %-30 %). Kipsi-moreenikerroksella säästettäisiin massiivirakenteessa huomattava määrä neitseellisiä raaka-aineita, kun yli puolet peitemateriaalista korvattaisiin kipsillä. Kipsisovellutuksissa tulee huomioida kipsin vedenläpäisevyys sekä matala pH-taso, jolloin sen ominaisuudet paranevat seostettuna muuhun maa-ainekseen.

Reaktiivisessa peitekerroksessa käytetty Oulun energian kostutettu tuore lentotuhka ei estänyt rikastushiekan hapettumista 100 mm peitekerroksena eikä rikastushiekkaan seostettuna. Tuhkaratkaisuja arvioitaessa on kuitenkin huomioitava tuhkan vaihtelevat reaktiiviset ominaisuudet, jolloin eri tuottajan ominaisuuksiltaan erilainen tuhka saattaisi toimia rakenteessa paremmin. Peitekerrossovellutuksissa myös tuhkamäärä oli kaikissa rakenteissa sama. Tuhkan valintaan vaikuttaa kohteesta riippuen myös hankkeen sijainti. Ympäristökelpoisuusanalyysien perusteella tuhkien sisältämät haitta-aineet ja niiden liukeneminen vaikuttavat myös sen käyttömahdollisuuksiin.

Hituran toinen rikastushiekka-allas peitettiin osittain ≥ 250 mm kuitusavikerroksella, jonka päälle rakennettiin 100 mm kasvukerros paikallisen moreenin lisäksi sivuvirtana muodostuvasta oksanappulasta ja biotuotetehtaan mädätteestä. Peiterakenteelle oli annettu vedenläpäisevyysvaatimus $k < 1 \times 10^{-8}$ m/s. Jo materiaalitestausvaiheessa kuitusavella todettiin olevan tiivistysrakenteen kannalta erinomaiset vedenläpäisevyysominaisuudet. Hituran rakenteiden laadunvalvontatulosten perusteella tiiveystavoitteet oli saavutettu kaikkien kolmen eri tuottajan kuitusavimateriaalien osalta.

Peitekerroksia rakennettiin Hituraan hankkeen aikana myös ylijäämäsavella. Materiaalitestausvaiheessa savien vedenläpäisevyydet olivat tasoa $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s, joka estää hyvin sadeveden kulkeutumisen peitekerroksen alapuolelle. Savimaaperä ei ole esimerkiksi infrarakentamisen kannalta ideaali rakennusmateriaali, jolloin esimerkiksi tiehankkeista voi massanvaihdon yhteydessä muodostua suuriakin määriä tiiviskerroksiin soveltuvaa ylijäämämaata. Soveltuvuus on kuitenkin aina varmistettava kohdekohtaisesti.

2.1 Materiaalitestauksen perusteella potentiaalisimmat ratkaisut

Laboratoriossa toteutetun laajamittaisen materiaalitestauksen perusteella löydettiin useampi potentiaalinen ratkaisu, jota voisi hyödyntää tiivistysrakenteissa sopivissa olosuhteissa/kohteissa. Hyödyntämisen näkökulmasta on huomioitava, että suunniteltu materiaali täyttää rakenteelle asetetut vaatimukset ympäristökelpoisuuden ja teknisten ominaisuuksien näkökulmista.

Suhteellisen tiiviitä seoksia saatiin laboratoriotutkimusten perusteella käyttäen seosaineena valimohiekkaa tai -pölyä (hiekkaa 5-10 % ja pöly 3-5 %) moreeniin seostettuna, jolloin materiaaliseoksen vedenläpäisevyys arvo oli noin $1...5 \times 10^{-9}$ m/s. Pelkällä tuhalla (10%) alun perin heikkolaa-tuisen moreenin jalostamisella saatiin myös tiivistysrakenteiden suhteen positiivisia tuloksia vedenläpäisevyyden kannalta, k-arvo noin 5×10^{-8} m/s. Myös rikastushiekan vedenläpäisevyyteen voitiin vaikuttaa seuraavilla lisäkomponenteilla: tuhka (10-15 %) k-arvo 5×10^{-7} m/s ja tuhka + valimohiekka (10-15 % + 3-5 %) k-arvo 1×10^{-7} m/s, jolloin parhaimmillaan voisi ajatella hyödynnettävän peitettävää materiaalia osana suojarakennetta.

2.2 Logistiikka ja varastointi

Pyhäsalmeilla käytetyt uusiomateriaalit kuljetettiin noin 150 kilometrin päästä, mikä aiheuttaa materiaalien käytölle massiivirakenteissa kohtuuttoman suuret kustannukset verrattuna paikallisten maa-ainesten käyttämiseen. Myös kuitusaven käytön yhteydessä kuljetusmatkat olivat pitkiä, sillä materiaalintuotannosta matkaa Hituraan kertyi 150-300 km. Kuitusaven kuljettamiseen käytettiin hankkeen aikana hakkeen ja turpeen kuljettamiseen tarkoitettua kalustoa, jonka lavojen laidat ovat tavallista maansiirtokalustoa huomattavasti korkeammat. Näin saatiin kuljetettua tavanomaista maa-ainesta kevyempää kuitusavea täysiä kuormia vajaiden kuormien sijaan. Kuitusaven käytön kustannukset arvioitiin hankkeen päätyttyä noin puolet suuremmiksi kuin paikallisen moreenin.

Hankkeessa arvioitiin, että uusiomateriaalin kuljetusetäisyys ei saisi olla yli 1,3-kertainen tavanomaiseen materiaaliin verrattuna, kun tarkastellaan ainoastaan kuljetuskustannusten ja hiilidioksidipäästöjen vaikutusta rakentamiseen. Kuljetuskustannusten vaikutusta materiaalien hyödyntämiselle voitaisiin yrittää kompensoida, mikäli uusiomateriaalia tuottava laitos osallistuisi nousseiden kuljetuskustannusten kattamiseen. Jätteen hyötykäyttö kaatopaikalle sijoittamisen sijaan

säästää materiaalintuottajan jäteverolta, jolloin tuottajan kanssa olisi todennäköisesti hyvin monissa tapauksissa mahdollista sopia osallistumisesta kuljetuskustannuksiin. Lisäksi jätteen/sivuvirran loppusijoituspaikaksi rakennettavan läjitysalueen rakentaminen ja ylläpito, sekä tavaran kuljetus läjitysalueelle ja alueen lopetustoimet aiheuttavat kustannuksia ja päästöjä, joilta vältytään sivuvirran/jätteen hyötykäytöllä.

Kostutetun tuhkan kuljettaminen on mahdollista tavanomaisella lava-autokalustolla, kunhan lava on peitetty. Kostutettaessa tuhkaa sen suotuisat ominaisuudet heikkenevät varsinkin, jos sitä ei voida käyttää heti, mutta toisaalta kostutetun tuhkan välivarastointi on helpompaa. UPACMIC-hankkeen tuhkan käyttösovellutuksissa ei kuitenkaan vaadita tuhkalta ns. "maksimiominaisuuksia", mutta esimerkiksi stabilointikohteissa sideaineena käytettävän tuhkan ominaisuuksien heikkeneminen tulee huomioida.

Kuitusaven käyttöä rajoittaa kohtuuttoman pitkät kuljetusmatkat, sillä tuotantolaitoksia on vain harvassa. Kuitusaven käyttö massiivirakenteissa vaatii välivarastointia, jotta rakentaminen olisi tehokasta. Hituran kohteella hyväksi todettu ratkaisu oli varastoida materiaalia kentälle talvisiikaan, kun alueen pohja oli jäässä. Teiden talvikunnossapidon vaatimat resurssit vaikuttivat kuitenkin jonkin verran hankkeen kokonaiskustannuksiin.

Kipsin saatavuus on hyvä ympäri vuoden, jolloin parhaimmillaan logistiikka voidaan järjestää niin, että materiaali tuodaan suoraan käyttökohteelle rakentamisvaiheessa. Näin vältytään myös erilliseltä kuljetuskaluston käytöltä materiaalin siirtelyyn rakennettaessa. Menettely vaatii kuitenkin hyvän suunnittelun, sillä huomioitavia asioita ovat teiden kunnossapito ja logistiikan toteutus turvallisesti.

Paikalliset puhtaat ylijäämämaat ovat kustannustehokas ratkaisu massiivirakenteisiin, mutta niiden saatavuus ja ottamisen ympäristövaikutukset täytyy kartoittaa huolellisesti. Myös tehokas hyödyntäminen heti ylijäämämassojen syntyvaiheen yhteydessä vaatii tarkkaa aikataulutusta, mutta eri rakennushankkeiden yhteensovittaminen tuo hyötyjä kuljetuskustannusten ja varastointitarpeen pienentyessä. Välivarastointia rakennuspaikalla ei tarvita, kun materiaali tuodaan oikea-aikaisesti kohteelle suoraan rakenteessa käytettäväksi.

2.3 Rakentaminen

Vaihtoehtoisilla materiaaleilla rakentaminen voidaan toteuttaa pääosin perinteisellä maarakennuskalustolla. Materiaaliseosten käyttömahdollisuuksien ja teknisten ominaisuuksien alustavan arvioinnin yhteydessä materiaalseoksia voidaan valmistaa esim. käyttäen traktorin perään kiinnitetävää betonin sekoituskalustoa tai erilaisia seulukauhoja. Edellä mainitun kaluston kapasiteetti ei ole riittävä varsinaista massiivirakentamista ajatellen, mutta se soveltuu käytettäväksi materiaali-kehitysvaiheen testaustoiminnassa (mm. oikean seossuhteen löytäminen) ennen varsinaisen rakentamisen aloittamista.

Mikäli päädytään materiaaliseosten käyttöön, suurten massamäärien sekoittamista varten on hankittava joko asemasekoitin tai aumasekoitin. Keskisuurien määrien sekoittaminen onnistuu seulukauhalla. Ohuiden kerrosten sekoittaminen onnistuu jyrskikalustolla, mutta tämä menetelmä vaatii sekoitettavan kerroksen alapuoliselta kerrokselta koneen painoa kestävä kantavuuden.

Peittokerrosten tiivistäminen voidaan suorittaa kaivurin kauhalla painaen, tai halutusta tiiveydestä ja materiaalista riippuen, rakenteen yli ajamalla tela-alustaisella kaivinkoneella tai muulla työmaalla käytössä olevalla koneella (joissain tapauksissa onnistuu myös pyöräalustaisella koneella). Joillain materiaaleilla myös jyräkaluston (sorkkajyrä, kumipyöräjyrä, valssijyrä tms.) käyttö on mahdollista – mutta menetelmä ei sovellu esimerkiksi kuitusavelle. Kuitusavirakenteissa peiterakenteelta vaadittu tiiveystavoite saavutettiin kaikilla materiaaleilla kolmeen kertaan yli ajamalla telakaivinkoneella.

Tavoitetiiveyden saavuttamiseksi vaaditun kaluston ja työtapojen määrittäminen koeruuduissa toteutettiin ennen rakentamista hyväksi menetelmäksi. Esitestauksessa vertailupari-menetelmä on hyvä keino tutkia materiaalin ominaisuuksia verrattuna perinteiseen ratkaisuun. Kuitusavikerros puristuu kokoon ja tiivistyy rakenteessa, jolloin tarvittava materiaalmäärä ja lopullinen kerrospaksuus arvioitiin koeruutujen perusteella. Tiivisrakenteen päälle muodostettu kasvukerros jouduttiin jyräämään heti siementen levityksen jälkeen, jotta siemenet eivät lentäneet suurella aukealla kentällä kovan tuulen mukana. Jyräämällä voitiin vaikuttaa myös alueen pölyhaittoihin. Rakentamisen aikainen laadunvalvonta toteutettiin kuitusavirakenteessa troxler-mittalaitetta. Ylijäämäsavipeitteen paksuutta seurattiin koneohjauksella sekä pistoluontoisilla mittauksilla. Rakenteita tarkkailtiin myös visuaalisesti, jotta vettä kerääviä painanteita ei muodostuisi. Kuitusavirakenteiden vedenläpäisyominaisuuksia seurattiin rakenteiden valmistumisen jälkeen tiiviskerroksen läpi suotautuneen veden keräävillä lysimetreillä.

3. ERISTYSRAKENNE

UPACMIC-hankkeen vertikaalinen eristysrakenne toteutettiin usealla ylijäämä-/jättemateriaalilla. Metrin levyinen tiivistyskerros rakennettiin ylijäämäsavesta, jonka vedenläpäisevyysvaatimus oli $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s. Savimateriaalin ominaisuudet testattiin koekentillä useista näytteistä ja materiaalin tiheyttä seurattiin myös rakentamisvaiheessa. Kuivatuskerroksen materiaali oli karkea ja seulottu pohjatuhka, joka todettiin laboratorioissa hyvin vettä läpäiseväksi. Uloin rakennekerros oli tukikerros, jossa hyödynnettiin oman alueensa (vaarallinen tai tavanomainen jäte) maarakennuskelpoisia materiaaleja. Kaikki materiaalit todettiin kerroksissaan hyvin toimiviksi ja kustannustehokkaiksi ratkaisuksi, koska materiaalit saatiin hyödynnettyä loppusijoituspaikassaan eikä neitseellisiä luonnonmaa-aineksia tarvittu.

3.1 Logistiikka ja varastointi

Massiivirakenteissa päästään logistiikan ja varastoinnin osalta parhaisiin tuloksiin, kun voidaan hyödyntää paikan päällä valmiina olevia materiaaleja. Pystyeristerakenne on erinomainen esimerkki kustannustehokkaasta ja myös ympäristönäkökulmasta toimivasta rakenneratkaisusta, sillä rakenteessa käytettiin pääosin jätekeskukseen valmiiksi tuotuja materiaaleja. Vastaavan rakenteen toteuttaminen soveltuu monenlaisiin kohteisiin, joissa on käytettävissä erilaisia materiaali- vaihtoehtoja kuten maankaatopaikoilla ja niiden läheisyydessä.

3.2 Rakentaminen

Pystyeristerakenne toteutettiin tavanomaisella maarakennuskalustolla. Tiiviskerroksen rakentamisessa hyödynnettiin muottia, jonka avulla savi saatiin tiivistettyä kaivurin kauhalla vedenläpäisytaavoitteiden mukaiseen tiheyteen. Muotin käyttö tiiviskerroksen rakentamisessa todettiin toimivaksi menetelmäksi savimateriaalien tiivistämiseen hallitusti. Laadunvalvonnassa käytettiin

troxler-mittalaitetta. Seinän rakentamisessa tarvittavien materiaalien kuljettamisessa käytetyn kauston liikkumista työmaa-alueella hyödynnettiin ohjaamalla autojen kulkureitti rakennettavan tukikerroksen päälle, jolloin erillistä tiivistystyötä ei tarvittu. Lisäksi tukikerros toimi kaivurin työskentelyalustana.

4. REAKTIIVISET RAKENTEET

Hankkeessa testatuilla reaktiivisilla rakenteilla saatiin poistettua kaivosveden sisältämiä haitallisia metalleja ja samalla nostettua alueen happamien suotovesien pH-tasoa. Uusiomateriaaleista testattiin kalkkikivimursketta sekä teollisuuden jätteistä muodostettua geopolymeeria, lisäksi pilotoinnissa oli mukana kaupallisen toimijan reaktiivinen matto. Adsorptioon ja pH:n säätöön perustuvat käsittelymenetelmät toimivat Hituran happaman ja nikkelpitoisen suotoveden käsittelyssä hyvin. Geopolymeerin ja reaktiivisten mattojen osalta tuotekehitys on kuitenkin vielä alkuvaiheessa, joten niiden osalta tarvitaan vielä lisää tutkimustietoa, ennen kuin laajamittainen hyödyntäminen on mahdollista.

Erilaisia kalkkikiviratkaisuja käytetään jo nykyisin esimerkiksi happamista sulfaattimaista aiheutuvien happamien ja metallipitoisten vesien käsittelyyn, ja pilotoinnin perusteella menetelmä on toimiva myös kaivosolosuhteissa. Huomioitavaa on se, että kalkkikivirakenne vaatii uusimista ja/tai huoltoa käytön aikana. Testatussa pilottirakenteessa kalkkikivipadon teho heikkeni nikkelin pidättämisen osalta noin puolentoista kuukauden seuranta-ajan jälkeen. Materiaalitestauksen perusteella hienorakeinen kalkki soveltuu lujittumisominaisuuksiensa ansiosta myös peitto- ja pohjarakenteisiin muihin maa-aineksiin seostettuna.

4.1 Logistiikka ja varastointi

Kalkkikivimurskeen saatavuus on yleisesti hyvä, mutta massiivirakenteita ajatellen tuotantolaitoksia ei ole kovin monessa paikassa, jolloin kuljetusmatkat aiheuttavat haasteita hyötykäytölle. Kuljetus onnistuu tavallisella kuljetuskalustolla eikä vaadi erityistoimenpiteitä. Hienomman jakeen kuljetuksessa tulee huomioida materiaalin pölyäminen. Välivarastointi kohteella vaatii varastorakenteita tai peittämistä, jotta emäksinen valunta ympäristöön voidaan estää.

4.2 Rakentaminen

Kalkkikivellä rakentaminen onnistuu tavanomaisella maarakennuskalustolla ja karkearakeinen kalkkimateriaali on lähes pölyämätöntä. Reaktiivisen materiaalin käsittelyssä tulee kuitenkin huomioida työturvallisuus ja käyttää tarvittavia suojarusteita. Rakenteen toimivuutta seurattiin vesinäytteillä neljän kuukauden ajan. Kaivosympäristössä kalkkikiven hävittäminen voi tietyin reunaehdoin olla mahdollista esimerkiksi vedellä täytettyyn avolouhokseen, jolloin sen loppukin saostamiskapasiteetti tulisi hyödynnettyksi.

5. POHJARAKENNE

Hankkeen aikana pohjarakenteita ei varsinaisissa pilotoinneissa testattu, mutta materiaalitestauksien sekä toteutuneiden pilottikohteiden perusteella voidaan suositella myös pohjarakenteisiin soveltuvia materiaaliratkaisuja. Kuitusavella on suotuisat vedenläpäisevyysominaisuudet ja kimmoisuutensa ansiosta se todennäköisesti kestäisi myös pohjarakenteessa. Hankkeen puitteissa kuitusavesta oli suunniteltu 500 mm paksuinen pohjarakenne, jonka vedenläpäisevyysarvoksi

arvioitiin $k \leq 1 \times 10^{-8}$ m/s. Todellisuudessa rikastushiekan aiheuttama paine tiivistää kuitusavea en-
tisestiään ja vedenläpäisevyys pienenee, mitä enemmän massaa tulee kuitusavikerroksen päälle.
Lisäksi työtekniikkaa valittaessa ja kerrospaksuutta mitoittaessa on huomioitava kuitusaven bio-
hajoavuus.

Moreeni-tuhkaseoksen vedenläpäisevyysominaisuudet olivat paremmat kuin pelkällä moreenilla,
joten oikeassa seossuhteessa paikallista huonolaatuista moreenia voitaisiin parantaa tuhalla ja
samalla vähennettäisiin neitseellisten luonnonvarojen käyttöä pohjarakenteissa. Tuhkan käytössä
tulee kuitenkin huomioida tuhkan reaktiiviset ominaisuudet, joten materiaaliseokset tulee tutkia
aina tapauskohtaisesti. Ympäristökelpoisuuden kannalta tulee huomioida myös tuhkan sisältämät
haitta-aineet ja niiden liukoisuus.

Puristuslujuuksien perusteella laboratoriossa tutkituista materiaaliratkaisuista myös pohjaraken-
teisiin soveltuisi nikkelikastushiekka suurella määrällä (30 %) reaktiivista lentotuhkaa (puristus-
lujuus >500 kPa). Lisäksi moreeni + lentotuhka -seoksilla päästään lujuuksiin 200...350 kPa tuh-
kalaadusta ja määrästä riippuen. Lisättäessä moreeni + tuhka (10 %) -seokseen vielä 2-luokan
kalkkia (5 %) saavutettiin 660 kPa lujuus.

6. TYÖVOIMA

Hankkeen aikana havaittiin, että paikallisten luotettavien urakoitsijoiden käyttäminen on projektin
kannalta hyödyllistä, koska heillä on valmiina tietoa alueesta ja hyviä kontakteja. Lisäksi paikalliset
tietävät, mistä kannattaa hankkia tarvittavat materiaalit sekä ketkä ovat hyvät yhteistyökumppanit
hankkeen toteutusta ajatellen.

7. YHTEENVETO

Uudentyyppisiä maanrakennuskelpoisia materiaaleja on käytettävissä valtavia määriä, mutta ma-
teriaalien hyödyntämiseen vaikuttaa eniten pitkät kuljetusmatkat. Lisäksi hyötykäyttöä edeltävä
lupaprosessi voi aiheuttaa hankkeelle aikataulullisia haasteita. Uusien materiaalien käytössä huo-
mioitavaa on myös kohdekohtaisuus, jolloin materiaalien ennakkotestaus on välttämätöntä ennen
varsinaista rakentamista.

Kiertotalous on kuitenkin yksi aikamme vallitseva trendi maapallomme neitseellisten luonnonvaro-
jen ehtyessä, jolloin materiaalien kierrättämiseen pyritään vaikuttamaan lainsäädännöllisin keinoin
ja suunniteltuja rakennushankkeita arvioidaan myös ympäristövaikutusten näkökulmasta. Jäte-
/ylijäämämateriaalien tuotannon päästöttömyys voikin antaa rakennushankkeelle vihreän kehityk-
sen mukaisen ympäristöystävällisen imagon.

UPACMIC-hankkeen puitteissa on tuotettu tietoa uusiomateriaalien hankinnasta, rakennettavuus-
desta ja toimivuudesta erilaisissa kohteissa monesta eri näkökulmasta. Laboratoriotestauksen li-
säksi materiaaleja tutkittiin pilottirakenteissa todellisissa käyttöolosuhteissa. Tietojen perusteella
voidaan tulevaisuudessa arvioida uusien materiaalien hyötykäyttöä uudentyyppisissä rakennerat-
kaisuissa rakenteen laadusta tinkimättä, kun ennakkotietoa on jo jonkin verran saatavilla. Hank-
keen puitteissa tutkittujen vaihtoehtoisten materiaalien ominaisuudet rakennusvaiheittain on
koottu taulukkoon 1.

Taulukko 1. Tutkittujen materiaalien ominaisuudet eri rakenneratkaisuissa ja hankevaiheissa.

Rakenne	Materiaali	Saatavuus	Kuljetus	Välivarastointi	Rakentaminen	
Peittora- kenne	Tuhka	Hyvä	Voi vaatia erillistä kalustoa Pitkät kuljetusmatkat	Varastorakennus/peittäminen	Tavallinen maarakennuskalusto tai seoksissa	
	Kipsi	Hyvä	Pitkät kuljetusmatkat	Ei tarvetta	Tavallinen maarakennuskalusto ja/tai sekoitin	
	Kuitusavi	Kausittainen	Pitkät kuljetusmatkat	Kasavarastointi	Tavallinen maarakennuskalusto	
	Ylijäämämaat	Selvitettävä	Etäisyys vaihteleva	Ei tarvetta	Tavallinen maarakennuskalusto	
	Valimohiekka ja -pöly	Ei ole tutkittu pilottikohteissa. Laboratoriotestauksen perusteella potentiaalisia materiaaleja, joiden käyttökelpoisuus tulisi selvittää lisätutkimuksilla.				
	Kalkkituotteet	Ei ole tutkittu pilottikohteissa. Laboratoriotestauksen perusteella potentiaalisia materiaaleja, joiden käyttökelpoisuus tulisi selvittää lisätutkimuksilla.				
Pysty- eriste- rakenne	Ylijäämäsavei	Selvitettävä	Etäisyys vaihteleva	Ei tarvetta	Tavallinen maarakennuskalusto	
	Karkea pohjatuuhka	Hyvä	Voi vaatia erillistä kalustoa Pitkät kuljetusmatkat	Varastorakennus/peittäminen	Tavallinen maarakennuskalusto	
	Jätemaat	Selvitettävä	Etäisyys vaihteleva	Ei tarvetta	Tavallinen maarakennuskalusto	
Reaktiiviset rakenteet	Kalkkikivi	Hyvä	Pitkä kuljetusmatka	Varastorakennus/peittäminen	Tavallinen maarakennuskalusto	
	Geopolymeeri Reaktiivinen matto	Tarvitaan lisätutkimuksia.				
Pohja- rakenne	Kuitusavi	Ei ole tutkittu pilottikohteissa. Laboratoriotestauksen perusteella potentiaalisia materiaaleja, joiden käyttökelpoisuus tulisi selvittää lisätutkimuksilla.				
	Tuhka					
	Valimohiekka ja -pöly					