



# OPAS UUSIOMATERIAALIEN HYÖDYNTÄMINEN KAIVOSTEN SUOJARAKENTEISSA



LIFE12 ENV/FI/000592 UPACMIC



**OPAS  
UUSIOMATERIAALIEN  
SUOJARAKENTEISSA**

**HYÖDYNTÄMINEN**

**KAIVOSTEN**

Projekti **UPACMIC**  
Projekti nro **151006900-017**  
Asiakirjatyyppi **Opas**  
Päivämäärä **25.09.2022**  
Laatija **Pyry Potila**  
**Emmi Ilonen**  
Tarkastaja **Harri Jyrävä**

## SISÄLTÖ

<b>1.</b>	<b>Johdanto</b>	<b>3</b>
<b>2.</b>	<b>Lähtökohta</b>	<b>4</b>
2.1	Koerakentaminen ja muutosten hyväksyttäminen	4
2.2	Uusien materiaalien luvitus	5
<b>3.</b>	<b>Materiaalitestaus</b>	<b>6</b>
3.1	Peruskokeet	6
3.2	Tekninen testaus	6
3.3	Soveltuvuuden testaus	7
3.4	Ympäristökelpoisuus	8
3.5	Adsorptiomateriaalien testaus	8
<b>4.</b>	<b>Materiaalikartoitus</b>	<b>9</b>
4.1	Kaivospiirin omien materiaalien hyödyntäminen	9
<b>5.</b>	<b>pohja- ja peiterakenteet uusiomateriaaleista</b>	<b>11</b>
5.1	Pohjarakenne	11
5.2	Peiterakenne	11
<b>6.</b>	<b>Reaktiiviset rakenteet</b>	<b>13</b>
<b>7.</b>	<b>laadunvarmistus ja seuranta</b>	<b>13</b>
<b>8.</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>14</b>

Liite 1. Pohjarakenteen pilotointisuunnitelma, kuitusavirakenne, Orivesi

Liite 2. Pintarakenteiden pilotointi, Pyhäjärvi Pyhäsalmen kaivos

Liite 3. Kuitusavi-pintarakenteen pilotointi, Hitura

Liite 4. Ylijäämäsavi-pintarakenteen pilotointi, Nivala Hituran kaivos

Liite 5. Pystyysterakenteen pilotointi, Kuopio Sorsasalon teollisuusjätealue

Liite 6. Reaktiivisten rakenteiden pilotointi: uusiomateriaalit, Nivala Hituran kaivos

Liite 7. Reaktiivisten rakenteiden pilotointi: kaupallisen toimijan matot, Nivala Hituran kaivos

## TERMIT

Adsorbentti	Materiaali, joka useimmiten sähkökemiallisen reaktion avulla vetää puoleensa kationeja tai anioneja.
Adsorptio	Partikkelien kiinnittyminen adsorbentin pinnalle kemiallisella sidoksella.
Kuitusavi	Paperinkierrätyksessä muodostuva sivutuote.
Neitseellinen materiaali	Raakamateriaali, joka ei uusiudu esimerkiksi moreeni.
Redox-potentiaali	Mittava arvo, joka kuvaa mittaushetkellä vallitsevaa ympäristö olosuhdetta eli kuinka hapettava tai pelkistävä mitattu ympäristö on. Yksikkö millivoltti mV.
Sivutuote	Päätuotannon yhteydessä muodostuva sivuvirta.
Uusiomateriaali	Jäte ja/tai sivutuote, joka hyödynnetään tavanomaisen materiaalina korvaajana hävittämisen sijaan.
Vedenläpäisevyys	Veden materiaalin läpi suotautumisnopeus. Arvoa kuvaa k symboli ja sen yksikkö on m/s.
Ylijäämämaa	Kaivuutöistä muodostuva poistettava maa-aines, jota ei voida hyödyntää kohteessa.

# 1. JOHDANTO

UPACMIC (Utilization of by-products and alternative construction materials in new mine construction) on EU-Life rahoitteinen hanke, jossa selvitettiin teollisuuden sivutuotteiden ja maarakennuskelpoisten jätteiden soveltuvuutta kaivosalueen pinta-, pohja- ja reaktiivisiin rakenteisiin. Vaihtoehtoisten materiaalien käyttö mahdollistaisi monissa tapauksissa merkittävät säästöt luonnonvarojen käytön osalta ja vähentäisi hankkeiden CO<sub>2</sub>-päästöjä.

UPACMIC-projektin tarkoituksena on löytää kaivosympäristössä toimivia rakenneratkaisuja, jotka hyödyntävät mahdollisimman paljon kaivosalueella valmiina olevia materiaaleja. Näiden materiaalien ominaisuuksia voidaan parantaa mm. hyödyntämällä jättemateriaaleja niiden jalostamisessa. Jättemateriaalit voivat olla esimerkiksi voimalaitoksen lentotuhka, paperiteollisuuden kuitusavi tai vaikkapa rakennustöistä syntyvä ylijäämää.

Tämä opas käsittelee tavanomaisten materiaalien korvaamista uusiomateriaaliratkaisuilla hankevaiheittain ja siinä yhteydessä huomioitavia asioita. Hankkeen alkuvaiheissa lähiseudun maarakentamiskelpoisten materiaalien ja niiden saatavuuden selvittäminen sekä ominaisuuksien määrittäminen ovat lähtökohta hankkeen materiaali- ja kustannustehokkaalle toteutukselle. Tämän jälkeen ennakkotestauksen ja ympäristökelpoisuuden perusteella voidaan selvittää kohdekohtainen soveltuvuus ja lupatarve uudentyypisille materiaali- ja rakenneratkaisuille. Massiivirakenteissa jo pienellä uusiomateriaaliosuudella voidaan säästää luonnonvaroja ja kustannuksia, jotka ovat syytä huomioida niin hankkeen imagon kannalta kuin kokonaisvaikutustenkin näkökulmista.

Jokainen kaivos on yksilöllinen tuottamiensa sivukivien, rikastushiekan, rikastettavien metallien sekä materiaalien ja ympäristölupansa osalta. Tämä opas on yleispätevä, jolloin osa esitettävistä asioista ei koske kaikkia kaivoksia, eikä ohje huomioi kaikkia eri kaivosalueiden erityispiirteitä.

Uusien kaivoksien kohdalla olisi hyvä pyrkiä huomioimaan ja nostamaan esille mahdolliset uusiomateriaaliratkaisut jo suunnittelu- ja lupaprosessin alkuvaiheessa. Vaihtoehtoiset ratkaisut kannattaa huomioida ainakin pohja- ja pintasuojarakenteisiin, suoja-/meluvalleihin, penkereisiin, täyttöihin sekä vesienkäsittelyratkaisuihin liittyvän valmistelun yhteydessä.

## 2. LÄHTÖKOHTA

Kaikki kaivostoiminnan vaiheet kuluttavat suuria määriä luonnonresursseja kiviaineksen sekä suojamateriaalien muodossa. Samaan aikaan teollisuudessa ja muissa rakentamistoimissa muodostuu runsaasti maarakennuskelpoisia materiaaleja. UPACMIC-hankkeen tavoitteena on kehittää rakenneratkaisuja, joilla erilaiset maarakennuskelpoisen materiaalin tuottajat voisivat osaltaan vastata kaivosympäristön massiivirakenteiden materiaalitarpeeseen.

Kaivoksen laajuudesta ja tyypistä riippuen, myös niiden ympäristövaikutukset vaihtelevat. Kaivostoiminta voi aiheuttaa runsasta kuormitusta ympäröivälle luonnolle niin pölyämisen, melun, värinän kuin vesistökuormituksen osalta. Kaivannaisjätteet kuten rikastushiekka, poistettavat maa-ainekset ja sivukivet, rikastusprosessin ja/tai vesienkäsittelystä muodostuvien sakkujen varastointi vaativat suuria varastointialueita, jotka aiheuttavat myös maisemavaikutuksia. Kaivoslain (621/2011) luvun 15 mukaan *”on kaivostoiminnan harjoittajan viimeistään kahden vuoden kuluttua kaivostoiminnan päättymisestä saatettava kaivosalue ja kaivoksen apualue yleisen turvallisuuden vaatimaan kuntoon, huolehdittava niiden kunnostamisesta, siistimisestä ja maisemoinnista sekä suoritettava kaivosluvassa ja kaivosturvallisuusluvassa määrätyt toimenpiteet.”* Sulkemistoimet riippuvat jätteen vaarallisuudesta, johon vaikuttaa useimmiten jätteen sulfidimineraalin määrä. Sulfidimineraali reagoi helposti hapen vaikutuksesta muodostaen rikkihappoa. Sulfidimineraaleja sisältävistä kaivannaisjätteistä aiheutuneet happamat, metalli- ja sulfaattipitoiset valumavedet voivat aiheuttaa vesistökuormitusta. Kuormittava vaikutus ei lopu, vaikka kaivostoiminta keskeytyisi tai päättyisi. Peittämättömät jättekasat voivat aiheuttaa maaperän pilaantumista ja/tai happamoitumista pölyn ja suotovesien mukana leviävien haitallisten aineiden vaikutuksesta. Sulfidipitoiset kiviainekset on peitettävä materiaalilla, joka mahdollistaa hapettoman tilan muodostumisen jätteen ympärille. Vaarattomat jätteet tulee maisemoida siihen soveltuvalla materiaalilla.

Vedenhallinta tulee ottaa huomioon erityisesti uusia kaivosalueita perustettaessa. Asianmukaisesti rakennetuilla pohja- ja patorakenteilla sekä lopullisilla peiterakenteilla pienennetään valuma- ja suotovesien määrää ja pyritään minimoimaan happaman ja metallipitoisen veden pääsy luontoon. Pitkäaikainen toimivuus on avaintekijä ympäristön suojelussa. Toimivuus voidaan varmistaa riittävällä monitoroinnilla. Huonosti suojatun altaan pohjan pettäessä pohjaveteen aiheutuva kuormitus ei välttämättä näy heti, ja voi olla hyvinkin merkittävä myöhemmin. Ympäristöluvassa ja sulkemissuunnitelmassa on asetettu reunaehdot kaivostoiminnan jälkeen tehtäville suojarakenteille. Näistä löytyvät eri jätteille ja jätealueille vaaditut rakennekerrokset ja -tyypit sekä rakenteilta vaaditut parametrit. Eli käytännössä esimerkiksi suojarakenteille asetetut vedenläpäisevyysvaatimukset.

### 2.1 Koerakentaminen ja muutosten hyväksyttäminen

Monilla kohteilla ympäristölupa ja sulkemistoimenpidesuunnitelma eivät välttämättä ole enää ajan tasalla, joten koerakentaminen ja sen avulla toteutettava rakenteiden hyväksyttäminen on syytä aloittaa jo mahdollisimman aikaisessa vaiheessa prosessia. Uusien rakenneratkaisuiden hyväksyntä voi vaatia runsaasti aikaa. Koerakentamisessa on syytä käyttää vertailupari tekniikkaa, jossa uutta rakenneratkaisua verrataan joko olemassa olevan suunnitelman mukaiseen tai tavanomaisesti käytettävään vaihtoehtoon. Vertailtavien rakenteiden on syytä olla samankokoisia ja riittävän isoja, jotta niistä tutkittavat ominaisuudet saataisiin selville. Vertailtavia rakennevaihtoehtoja voi olla samalla kertaa useampia. Vertailupareja rakennettaessa on syytä kiinnittää huomiota myös materiaalien välisiin eroihin rakennettavuuden kannalta. Niitä ovat esimerkiksi mahdollisen sekoituksen helppous, tiivistämisen vaatima työmäärä ja rakenteen tasalaatuisuus.

Vertailupareista voidaan mitata esimerkiksi vedenläpäisevyyttä, läpäisseen veden ominaisuuksia ja/tai hapen kulkeutumista rakenteen läpi. Muita tapauskohtaisesti seurattavia ominaisuuksia voivat olla kantavuus, eroosioherkkyys tai lujittuminen, työsaavutus, sopiva kalusto ja työtavat, saavutettava tekninen laatu ja laatuvaihtelu. Vertailuparien pitkäaikaisseuranta antaa arvokasta tietoa rakenteiden pitkäaikaiskäyttäytymisestä kuten esimerkiksi ominaisuuksien säilymisestä pitkällä tähtäimellä todellisissa käyttöolosuhteissa, routakäyttäytymisestä, rakenteen vedenläpäisyominaisuuksista, kantavuudesta sekä muodonmuutoskäyttäytymisestä. Pitkäaikaisseurannan tuloksilla voi olla suuri vaikutus uuden rakenneratkaisun hyväksyttämässä.

## **2.2 Uusien materiaalien luvitus**

Joidenkin materiaalien hyödyntäminen voi vaatia ilmoitusmenettelyä tai ympäristöluvan hakemista. MARA-ilmoitusmenettelyn alaisia materiaaleja ovat MARA-asetuksessa (843/2017) (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa) määritellyt materiaalit. Ympäristölupaa vaativien materiaalien lupamenettelystä saa lisätietoa paikalliselta ELY-keskukselta (Elinkeino, liikenne ja ympäristökeskus) ja AVI:sta (aluehallintovirasto). Tapauskohtaisesti toiminta voi olla mahdollista esimerkiksi koetoimintaluvalla tai pima-ilmoituksella (Ilmoitus pilaantuneen maaperän puhdistamisesta). Myös hyödynnettävien materiaalien tonnimäärä vaikuttaa lupamenettelyyn. Käytännöt voivat kuitenkin vaihdella alueella toimivan viranomaisen mukaan, joten paikalliseen viranomaiseen on syytä ottaa yhteyttä. Paikallinen valvontaviranomainen antaa tarkempia tietoja käytännöistä ja muista huomioitavista asioista.

## 3. MATERIAALITESTAUS

Materiaaleilta vaaditaan, suunnitellusta rakenteesta riippuen, tiettyjen teknisten ja ympäristökelpoisuuteen liittyvien ominaisuuksien täyttymistä, jotta ne soveltuvat käytettäväksi rakenteeseen. Lisäksi ratkaisujen täytyy olla myös kustannustehokkaita vaihtoehtoja. Tässä osiossa esitellään yleisimmin tehtäviä teknisiä ja ympäristökelpoisuuteen liittyviä tutkimuksia, joiden perusteella materiaalin soveltuvuutta rakenteeseen voidaan arvioida. Tarvittaessa materiaalia testataan vielä koe- tai pilot-rakenteiden avulla, materiaalin toimivuuden varmistamiseksi ns. todellisissa olosuhteissa, ennen varsinaista rakentamista. On huomioitava, että materiaalitestaus on aina suunniteltava kohdekohtaisesti eikä tässä esitetty menettely sovellu sellaisenaan käytettäväksi kaikkiin kohteisiin.

### 3.1 Peruskokeet

Materiaalin teknisen testauksen alkuvaiheissa materiaalin perusominaisuudet selvitetään standardisoiduilla menetelmillä, joiden perusteella voidaan jo alustavasti arvioida materiaalin tiiveysominaisuuksia ja soveltuvuutta rakenteeseen sekä materiaalien ja/tai hyödynnettävien materiaaliseosten laatuvaltelulle asetettavia kriteereitä. Yleisimmin käytettyjä peruskokeita ja tutkimusmenetelmien standardiesimerkkejä ovat:

- **Vesipitoisuus** kertoo materiaalin sisältämän veden määrän, ja on oleellinen tieto tiivistymisen kannalta. Menetelmän esimerkkistandardi SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-1:fi.
- **Materiaalin raekokojakauman määrittäminen**, karkeille materiaaleille pesu- ja/tai kuivaseulonalla, hienommille materiaaleille areometrikokeella. Rakeisuuden perusteella määritellään maalaji, jonka erikokoisten rakeiden prosentuaalisesta määrästä kertoo rakeisuuskäyrä. Menetelmän esimerkkistandardi SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-4:fi.
- **Hehikutushäviön** määrittäminen eli materiaalin sisältämän orgaanisen aineksen määrän. Menetelmän esimerkkistandardi SFS-FI 1997-2.
- **pH-määrittäminen**, saadaan tietoa materiaalin soveltuvuudesta esimerkiksi neutralointitehosta. Menetelmän esimerkkistandardit: ISO 4316 tai ISO 10390.

### 3.2 Tekninen testaus

Pohjarakenteelta vaaditaan hyvää paineen/kuorman kestävyyttä esimerkiksi rikastushiekkakerroksen alla, jonka lisäksi veden suotautuminen pohjarakenteen läpi on oltava vähäistä. Pohjarakenteeksi suunnitelluista materiaaleista tyyppillisesti tutkittavia parametrejä ovat peruskokeiden lisäksi puristuslujuus ja vedenläpäisevyys. Myös ominaisuuksien säilyminen pitkällä tähtäimellä sekä rakentamisvaiheen aikaisten kuormitustekijöiden mahdollisten vaikutusten selvittäminen on syytä huomioida (esimerkiksi rakenteen mahdollinen jäätyminen ennen varsinaista käyttöönottoa ja sen vaikutus laatuun). Vastaavia ominaisuuksia vaaditaan joissain määrin myös peite-/pintarakenteisiin suunnitelluilta materiaaleilta. Edellä mainittujen lisäksi tutkittavia ominaisuuksia ovat mm. routivuus ja jäätyminen-sulamis-kestävyys sekä edellisten mahdolliset vaikutukset rakenteen ominaisuuksiin pitkällä tähtäimellä. Pohja- ja peiterakenteissa erilaisten kuormitusolosuhteiden lisäksi myös kosteus- ja lämpöolosuhteet vaihtelevat, mikä tulee huomioida rakenteen ja materiaalien soveltuvuuden testauksessa. Teknisen testauksen perusteella määritellään materiaaleille tai materiaaliseoksille tavoiteltavat tiheystasot sekä tiivistämisen kannalta optimaalinen vesipitoisuus, joita noudattaen materiaalit saavuttavat rakenteelta vaaditut ominaisuudet kuten vedenläpäisytaidot. Mitä tiiviimpi rakenne, sitä pienempi vedenläpäisevyys. Lisäksi testauksen yhteydessä on syytä tarkastella käytettävän materiaalin herkkyyttä ainakin vesipitoisuuden ja tiiveysasteen vaihteluille, seossuhteen vaihteluille sekä mahdollisten lisäkomponenttien määrän vaihtelulle, joiden perusteella määritellään lopulliset laadunvalvonnan kriteerit.



Materiaalien tiivistymiseen ja sitä kautta lopputuloksen laatuun liittyy oleellisesti hyödynnettävien materiaalien vesipitoisuuden hallinta. Materiaalin optimivesipitoisuus eli se vesipitoisuus, jossa materiaali saavuttaa maksimaalisen kuivatiheydensä, voidaan määrittellä laboratoriossa Proctor-kokeen avulla. Proctor-koe voidaan toteuttaa esimerkiksi standardia SFS-EN 1997-2 5.10 mukailten. Tulosta käytetään apuna tiivisrakenteiden rakentamisessa, jolloin voidaan tarvittaessa esimerkiksi kastella materiaalia levityksen yhteydessä tiiviimmän lopputuloksen saavuttamiseksi. Sen sijaan materiaalin kuivaaminen ei yleensä ole käytännössä mahdollista toteuttaa enää rakennusvaiheessa, ja lopputuloksen heterogeenisuus voi lisäksi aiheuttaa laadunvaihtelua lopullisessa rakenteessa. Optimivesipitoisuuden määrittämisen tärkeys korostuu erityisesti joidenkin uusiomateriaalien, kuten lentotuhkan kohdalla. Tuhka ei tiivisty kunnolla liian kuivana ja tiivistystulos heikkenee huomattavasti myös liian märkää tuhkaa käytettäessä. Optimivesipitoisuudessa tiivistäminen tarvitsee vähemmän työtä, jolloin saavutetaan aika- ja kustannussäästöjä sekä ennen kaikkea laadukkaampi lopputulos.

Materiaalin routimisherkkyyttä voidaan tutkia routanousukokeella, jossa vedellä kyllästetty materiaali altistetaan jäätymiselle routalaitteiston avulla. Testauksen yhteydessä on suositeltavaa selvittää myös jäätyminen tai mahdollisen routimisen vaikutukset ainakin vedenläpäisevyyden ja lujuuden säilymiseen sekä sitä kautta pitkäaikaiskestävyyteen.

### **3.3 Soveltuvuuden testaus**

Reaktiivisissa rakenteissa käytettävien materiaalien reaktiivisuutta voidaan tutkia laboratoriossa esimerkiksi määrittämällä materiaalin sisältämän neutraloivan aineen kuten kalkin pitoisuus. Lisäksi voidaan erilaisin menetelmin testata materiaalin potentiaalia, esimerkiksi materiaalin läpi suotautuneen veden pH-muutosta, liuenneiden aineiden konsentraatioita, sähkönjohtavuutta, lämpötilaa tai redox-potentiaalia seuraten. Testimenetelmät valitaan lopullisen rakenteen tavoitteiden mukaisesti, ja reaktiivisen rakenteen toimivuutta on monitoroitava säännöllisesti.

Tuhkien osalta voidaan tutkia reaktiivisuutta sen lämmönmuodostuksen perusteella. Testimenetelmä ei ole standardisoitu, mutta lämmönmuodostumisen on todettu korreloivan hyvin lujuuskehityksen kanssa. Eli mitä voimakkaampaa lämmönmuodostus on, sitä enemmän lujuuskehitystä tapahtuu, erityisesti silloin, kun tuhkaa käytetään pienehkö määrä seoskomponenttina. Voimakas reagointi saattaa joissain tapauksissa myös heikentää lopputulosta eli on tärkeää selvittää aina tapauskohtaisesti käytettävän tuhkan ominaisuudet. Varsinainen testi toteutetaan lisäämällä huoneenlämpöiseen tuhkaan vakioitu määrä huoneenlämpöistä vettä, jonka jälkeen seos sekoitetaan tasaiseksi ja sen lämmönkehitystä seurataan kalorimetrissä noin 6 tunnin ajan.

Aktiivisen kalkin määrittelyllä voidaan arvioida materiaalin neutralointitehoa. Analyysia voidaan käyttää esimerkiksi seosmateriaalivaihtoehtojen vertailussa, kun tavoitteena on pH:n muutos. Neutraloivan rakenteen mitoitus suunniteltaessa analyysi on välttämätön, jotta voidaan valita oikea tuote myös kuljetus/varastointikapasiteetin näkökulmista. Määrittely voidaan tehdä esimerkiksi standardien SFS 5188 tai SFS-EN 12945:2014 + A1:2016 mukaisesti.

Materiaalia ja/tai materiaaliseoksia ja niiden toimivuutta voidaan tutkia läpivirtaustestinä, jolla saadaan tietoa materiaalista läpisuotautuneen veden ominaisuuksista ja määrästä sekä materiaalin/materiaaliseoksen toimivuudesta ja todennäköisestä vaikutus-/toimivuusajasta. Testissä materiaalia tai vaihtelevia materiaalikerroksia asetetaan kolonniin, jonka läpi suotautunutta vettä tutkitaan. Vedestä voidaan mitata esimerkiksi pH:ta, sähkönjohtavuutta ja redox-potentiaalia, jotka kertovat jo jonkin verran veden ominaisuuksien muuttumisesta läpisuotautumisen aikana. Suotovedelle tehtävillä liuenneiden metallien kokonais- ja/tai liukoisten

pitoisuuksien analyyseilla voidaan tuottaa tietoa veteen liukenevista haitallisista aineista, ja menetelmää voidaan käyttää myös ympäristökelpoisuuden arvioinnin apuna.

### **3.4 Ympäristökelpoisuus**

Ympäristökelpoisuuteen liittyen voidaan materiaaleille tehdä erilaisia haitta-aineiden liukoisuuteen liittyviä kokeita. Yleisimpiä ovat esimerkiksi kaatopaikkakelpoisuuden määrittelemiseksi tehtävä 2-vaiheinen ravistelutesti, jossa tietyssä liuos-kuiva-aine -suhteessa (usein L/S=10) analysoidaan materiaalista liukenevia haitta-aineita. Liukoisuutta voidaan tutkia myös läpivirtaustestinä, jossa materiaalin tai erilaisten materiaalikerrosten läpi johdetaan vettä, ja läpäisseestä vedestä tietyn L/S-suhteen välein otetusta vesinäytteestä analysoidaan liuenneiden aineiden konsentraatiot.

Materiaalien ympäristökelpoisuutta voidaan tutkia laboratorioanalyyseissä myös määrittelemällä materiaalien sisältämien haitallisten aineiden kokonaispitoisuudet. Pitoisuuksien perusteella voidaan jo joissain määrin arvioida materiaalista liukenevia haitta-aineita. Esimerkiksi tuhkat sisältävät pieniä määriä raskasmetalleja, joiden esiintymiseen vaikuttaa poltettu materiaali. Käytettäväksi suunniteltavan materiaalin tutkimukset eivät kuitenkaan kerro, minkälaisia yhteisvaikutuksia tai haitta-ainepitoisuuksia on peitettyllä materiaalilla ja peittokerrokseen käytetyllä materiaalilla/seoksella.

### **3.5 Adsorptiomateriaalien testaus**

Adsorptiomateriaaleja on monenlaisia ja kaikki eivät sovellu samoihin olosuhteisiin. Adsorpti ominaisuuksiin vaikuttavat esimerkiksi puhdistettavan veden pH ja ionijakauma. Seuraavassa käsitellään vesiympäristöön soveltuvan adsorptiomateriaalin testausta. Adsorptiomateriaalien soveltuvuuden testaaminen on syytä aloittaa adsorbentin ja puhdistettavan veden välisillä ravistelukokeilla. Mikäli vettä ei ole sellaisenaan saatavilla, voidaan se valmistaa synteettisesti esimerkiksi seurantatietoja käyttäen vastaamaan haitta-ainepitoisuuksiltaan todellista vettä. Ravistelutesteillä saadaan selville adsorptiokapasiteetti. Adsorptiokapasiteetti kertoo materiaalin maksimikapasiteetin vallitsevissa olosuhteissa. Tämän perusteella voidaan joko jatkaa adsorbentin kehittämistä tai karsia soveltumattomat pois jatkotutkimuksista.

Seuraava vaihe adsorbenttitutkimuksissa on tarvittavan kontaktiajan selvittäminen. Kontaktiaika kertoo, kuinka kauan adsorptiomateriaalin tulee olla kosketuksissa veden kanssa, jotta haluttu haitta-aineiden väheneminen vedestä saavutetaan. Tämä voidaan selvittää, joko käyttäen läpivirtaustestiä tai ravistelutestejä. Läpivirtauskoe toistetaan eri virtausnopeuksilla ja ravistelutesti pysäytetään eri ajan kuluttua. Kontaktiajan perusteella voidaan määrittää tarvittavan materiaalin määrä kohdeveden virtauksen mukaan.

Lopuksi selvitetään vielä materiaalin pitkäaikaiskäyttäytyminen. Tämä voidaan suorittaa esimerkiksi tekemällä kenttäkokeita pienessä mittakaavassa erottamalla osavirtaus todellisesta virtauksesta. Materiaaliin tulevaa ja lähtevää vettä seuraamalla voidaan selvittää materiaalin käyttäytymistä todellisissa olosuhteissa. Samalla voidaan seurata esimerkiksi materiaalin mahdollista rapautumista tai tukkeutumista.

## 4. MATERIAALIKARTOITUS

Materiaalitarpeen ja materiaaleilta vaadittujen ominaisuuksien mukaan voidaan aloittaa sopivien materiaalien kartoittaminen. Tiiviskerroksen materiaaleilta vaaditaan huomattavasti enemmän ominaisuuksia kuin esimerkiksi vaarattoman sivukivikasan maisemointiin käytettävältä materiaalilta. Ominaisuuksiltaan sopivan materiaalin ohjaaminen oikeaan paikkaan on tärkeää rakenteen laatua ja hintaa optimoitaessa. Hinnan ja laadun lisäksi on syytä huomioida myös eri materiaalien aiheuttama vaihteleva ympäristökuormitus. Kuormitusta muodostuu materiaalien tuottamisesta, kaivamisesta ja kuljetuksista, sekä mahdollisesta esikäsitteystä. Toisaalta taas materiaalin hyödyntäminen pienentää kyseisen materiaalin loppusijoittamisesta aiheutuvaa ympäristökuormitusta. Materiaalin ominaisuuksien lisäksi suojattavien alueiden laajuus ja korkotiedot on syytä kartoittaa, jotta tiedetään materiaalitardeet.

Materiaalikartoitusta tehtäessä uusiomateriaalien hyödyntäminen mahdollisimman läheltä rakentamispaikkaa on syytä ottaa huomioon. Uusiomateriaaleilla voidaan korvata neitseellisiä rakennusmateriaaleja, ilman että rakenteen laadusta tarvitsisi tinkiä. Yksinkertaisuudessaan uusiomateriaali voi olla ylijäämämaata toiselta rakennuskohteelta tai rikastushiekka-altaiden tieltä kaivettuja maamassoja. Jo osittainen neitseellisen materiaalin korvaaminen säästää luontoa ja voi vaikuttaa hankkeen kokonaiskustannuksiin sekä kasvihuonekaasupäästöihin. Lisäksi on mahdollista hyödyntää esimerkiksi sellaisia materiaaleja, jotka eivät sellaisenaan täytä asetettuja laatuksiteerejä mutta hallitusti jalostettuna niiden hyödyntäminen on mahdollista. UPACMIC-projektin puitteissa saatujen tulosten perusteella esimerkiksi vedenläpäisevyysominaisuuksiltaan heikkolaatuista moreenia voidaan monissa tapauksissa jalostaa tuhkalisäyksellä vaatimukset täyttäväksi. Materiaalitestauksen tuloksia on esitetty tarkemmin raportissa *"A3 final report of materials 2022"*.

Materiaalikartoitusvaiheessa selvitettäviä asioita ovat mm. materiaalien ominaisuudet, saatavuus, kuljetusmatka, hinta sekä muut mahdolliset materiaaliikohtaiset erityispiirteet kuten välivarastointitarve ja välivarastoinnin mahdollisuudet kohteella tai tuottajan toimesta. Ominaisuudet määrittelevät sen, mihin rakenteisiin materiaalia voidaan hyödyntää. Saatavuus määrittelee, kuinka suuren osan tarpeesta voi kullakin materiaalilla täyttää. Materiaalin saatavuuteen vaikuttaa mm. sen tuotantomäärä ja vaadittava välivarastointitapa sekä mahdollisen välivarastoinnin vaikutus materiaalin ominaisuuksiin. Mikäli materiaalia ei esimerkiksi voi varastoida kasalla ilman peittämistä/suojaamista, on suuren määrän saatavuus kertaluonteisena yleensä rajoittunutta. Kuljetusmatka vaikuttaa suurelta osin materiaalien hintaan sekä hankkeesta aiheutuviin päästöihin, jotka molemmat voivat rajoittaa hyödynnettävyyttä merkittävästi. Pitkät kuljetusmatkat voivat aiheuttaa myös aikataulullisia haasteita. Näin ollen materiaalikartoitus on syytä aloittaa kohteen lähiseuduilta ja laajentaa tarpeen mukaan, huomioiden pitkän kuljetusmatkan vaikutukset hankkeen kokonaisvaikutuksiin niin kustannusten kuin päästöjen näkökulmista. Uusiomateriaalit ovat halvempia tai jopa maksuttomasti saatavissa, joten niiden neitseellistä maa-ainesta pidemmän kuljettamismatkan kustannukset ovat kompensoitavissa tiettyyn pisteeseen asti huokeamman materiaalin hinnalla. Lisäksi jätemateriaalien hävittäminen aiheuttaa tuottajalle kustannuksia verojen sekä loppusijoituksen ja kuljetusten muodossa, jolloin tuottajan osallistumishalukkuus kuljetuskustannuksiin on varsin todennäköistä.

### 4.1 Kaivospiirin omien materiaalien hyödyntäminen

Kaivospiirin alueelta voi löytyä hyödyntämiskelpoisia materiaaleja, kuten moreenia, savea, silttiä tai sivukiviä ja hyödyntämisen etuna on erittäin lyhyt kuljetusmatka. Materiaali voi olla esimerkiksi kaivosalueelta poistettua pintamaata, sivukiveä, alueen ylijäämämassoja tai esimerkiksi kaivoksen lähialueelta saatavissa olevaa materiaalia, joka ei sellaisenaan sovellu hyödynnettäväksi, mutta sopivasti käsiteltyä on mahdollista hyödyntää. Myös rikastushiekkaa voidaan joissain tapauksissa

hyödyntää rakentamisessa joko sellaisenaan tai lisäkomponenteilla paranneltuna. Materiaalin lisättävillä seoskomponenteilla voidaan vaikuttaa esimerkiksi materiaalin kantavuuteen, käsiteltävyyteen ja/tai vedenläpäisevyyteen, joiden lisäksi materiaalin hapontuottavuutta voidaan vähentää seostamalla sitä emäksiseen materiaaliin kuten tuhkaan tai kalkkiin. Materiaaliseosten hyödyntäminen vaatii reseptiikan suunnittelua sekä testausta ennen täysimittaista hyödyntämistä, mikä tulee huomioida jo hankkeen alkuvaiheessa.

## 5. POHJA- JA PEITERAKENTEET UUSIOMATERIAALEISTA

### 5.1 Pohjarakenne

Pohjarakenteiden vaatimukset ovat samankaltaiset kuin peiterakenteiden, mutta oikeanlaisten vedenläpäisevyyssominaisuuksien lisäksi pohjarakenteen tulee kestää enemmän kuormitusta. UPACMIC-hankkeen pilotoinneissa ei testattu pohjarakenteita, mutta hankkeen aikana suunniteltiin esimerkiksi kuitusavesta toteutettu pohjarakennerratkaisu. Suunniteltu rakenne ja sen poikkileikkauskuva on esitetty liitteessä 1. Kuitusaven kimmoisuus ja tiivistyminen olisivat hyödynnettävissä myös pohjarakenteessa, ja sen oletetaan kestävän myös kuormitusta.

Tuhkilla, kalkkikivellä, valimotuotteilla sekä kipsillä on myös lujittumisominaisuuksia, joita voidaan hyödyntää pohjarakenteissa. Esimerkiksi materiaalitestausvaiheessa moreeniin seostettuna materiaaleilla saavutettiin niin lujuuden kuin vedenläpäisevyyden suhteen hyviä tuloksia, joita voidaan hyödyntää uudentyypistä pohjarakennetta suunniteltaessa. Lujuuden kasvaessa rakenteen jäykkyys kasvaa eli muodonmuutoskestävyys pienenee (kovempi ja hauraampi rakenne), ja rakenne on herkempi erilaisten rakenteessa tapahtuvien muodonmuutosten/liikkeiden aiheuttamille halkeilulle. Toisaalta pohjarakenteiden yhteydessä riski merkittävälle rakenteessa tapahtuville muodonmuutoksille on selvästi pienempi kuin pintarakenteissa. Toteutettavat ratkaisut vaativat kuitenkin vielä lisätutkimuksia.

Pohjarakenteen sijaan UPACMIC-hankkeen aikana rakennettiin erotusrakenne. Erotusrakenteilta vaaditut ominaisuudet painottuvat vedenläpäisevyyteen, sillä rakenteen tehtävänä on estää veden suotautuminen rakenteen läpi. Vertikaalinen eristeseinä rakennettiin Kuopioon ylijäämäsavesta muotin avulla tiivistäen. Rakenne ja sen poikkileikkauskuva on esitelty tarkemmin liitteen 5 case-esimerkissä.

### 5.2 Peiterakenne

Hankkeessa tutkittiin useita pintasuojarakennemateriaaleja, joista toteutetut pilotoinnit on esitelty tarkemmin raportissa *"B1 Final technical report on piloting 2022"*. Tuhkan ja kipsin käyttöä pintarakenteissa testattiin Pyhäsalmen kaivoksella pintarakennepilotoinnissa, jonka case-esimerkki on esitelty liitteessä 2. Liitteessä 2 on esitetty rakennekerrokset ja materiaaliseosten seossuhteet. Kipsirakennetta suunniteltaessa on huomioitava kipsin mahdollinen matala pH <3, jolloin sen käyttö voi ainakin aluksi muodostaa happamia suotovesiä. Kipsillä voidaan osittain korvata neutraalisia luonnonvaroja kuten moreenia, mutta hyödyntäminen vaatii vielä lisätutkimuksia. Moreeni-tuhka seosrakenteita ei testattu pilotoinnin lisäksi massiivirakentamisessa hankkeen aikana, materiaalitestausvaiheessa testattiin useiden erilaisten uusiomateriaaliseosten ominaisuuksia.

Hankkeen aikana myös kuitusaven todettiin soveltuvan tiiviskerroksen materiaaliksi, ja oikein tiivistettynä sillä voidaan saavuttaa jopa parempi rakenne kuin perinteisillä moreeniratkaisuilla. Kuitusaven hyödyntämistä tiiviskerroksessa esitellään liitteen 3 case-esimerkissä, jossa on nähtävissä Hiturassa toteutetun rakenteen poikkileikkauskuva sekä materiaalikerrokset. Kuitusavi on tavanomaisia maamateriaaleja kevyempää, mikä tulee huomioida kuljetuksia suunnitellessa. Keveys mahdollistaa tavanomaisen maamateriaalin kuljettamiseen käytettyä kalustoa kuljetustilavuudeltaan suuremman kaluston hyödyntämisen kuten esimerkiksi turve- tai hakerekat. Tiiviskerroksen rakentaminen kuitusavella voidaan suorittaa tavanomaisella maarakennuskalustolla. Vaaditun tiheyden (ja vedenläpäisevyyden) saavuttamiseen tarvittavat työtavat voidaan selvittää esimerkiksi koetiivistyksen avulla ennen lopullista rakentamista. Eri tuottajien kuitusavien ominaisuudet vaihtelevat jonkin verran, joten kohde- ja materiaalikohtainen testaus on välttämätöntä ennen varsinaisen rakenteen toteuttamista.

Kaivosalueelta poistettuja maamassoja voidaan niiden ominaisuuksien mukaan hyödyntää erilaisissa suojarakenteissa, ja tarvittaessa ominaisuuksia voidaan parantaa käyttäen uusiomateriaaleja. Ylijäämämaiden saatavuus vaihtelee, mutta niiden hyödyntäminen massiivirakenteissa vähentää rakenteen neitseellisten luonnonvarojen kulutusta ja voi vaikuttaa positiivisesti myös hankkeen kustannuksiin. Ylijäämämaiden hyödyntämisen case-esimerkki on esitelty liitteessä 4, jossa on nähtävissä toteutetun savipeiterakenteen poikkileikkauskuva ja materiaalikerrokset.

Valimohiekalla ja -pölyllä on saatu laboratoriotestauksessa (*A3 Final report of materials 2022*) hyviä tuloksia vedenläpäisevyyden pienentämisessä esimerkiksi moreeniin seostettuna, mutta ratkaisujen hyödyntäminen suuressa mittakaavassa vaatii vielä lisätutkimuksia. Valimohiekkojen ominaisuudet ympäristökelpoisuuden suhteen vaihtelevat syntypaikan mukaan, mikä on huomioitava rakenteen suunnittelussa. Myös kalkkituotteita on laboratoriotestauksen perusteella mahdollista käyttää pinta- ja pohjarakenteissa seostettuna muihin maa-aineksiin niiden lujittumisominaisuuksien ansiosta. Kalkkituotteiden käyttö voi vaikuttaa myös vedenläpäisevyysominaisuuksiin, ja lisäksi sen emäksisyys tulee huomioida seossuhteita ja ympäristövaikutuksia arvioitaessa.

## 6. REAKTIIVISET RAKENTEET

Reaktiivisia rakenteita suunniteltaessa on huomioitava erityisesti käsiteltävän suotoveden määrä ja ominaisuudet sekä sen sisältämät haitalliset aineet ja pitoisuudet. Passiivisia reaktiivisia rakenteita voidaan käyttää kaivosalueella erityisesti pistemäisen vesistökuormituksen vähentämiseen. Uusiomateriaalivaihtoehdoista kalkkituotteet ovat jo yleisesti käytettyjä pH:n säätöön. pH:n säätämisessä pyritään saamaan happaman veden pH neutraalille tasolle, jolloin voidaan estää happamissa olosuhteissa liukenevien metallien liukeneminen. Hiturassa toteutetun pilotoinnin perusteella kalkkikivipato poisti suotoveden nikkeliä, jonka pitoisuus oli lähtötilanteessa >5 mg/l, ja muita metalleja tehokkaasti noin 1,5 kuukautta. Pilottirakenne ja sen periaatekuva on esitelty liitteen 6 case-esimerkissä ja vielä tarkemmin seurantatuloksineen raportissa *"B1 Final technical report on piloting 2022"*. Kalkkirakenteet voidaan toteuttaa tavanomaisella maanrakennuskalustolla, mutta materiaalin emäksisyys on huomioitava työturvallisuuteen vaikuttavana tekijänä sekä mahdollisessa välivarastoinnissa.

Tulevaisuuden reaktiivisiin rakenteisiin käyttökelpoinen ratkaisu voi olla myös geopolymeerin tyyppinen pH:n säätöön ja adsorptioon perustuva materiaaliratkaisu, joka on mahdollista muokata kohdekohtaisesti pistekuormitukseen sopivaksi adsorbentiksi sivuvirta-/jättemateriaaleista. Hiturassa testattu adsorbentti toimi siihen saakka, kunnes sen adsorptiokapasiteetti loppui. Geopolymeerin hyödynnettävyyden kannalta on kuitenkin vielä selkeitä kehitystarpeita erityisesti reagoivan adsorbentin riittävän pitkän toimivuusajan varmistamisessa sekä materiaalin valmistusprosessissa ja saatavuuden varmistamisessa. Liitteen 6 case-esimerkissä on esitelty geopolymeerin pilotoinnin periaatekuva ja geopolymeerikaivon rakennekuva. Kaupalliset adsorbenttituotteet kuten adsorptiomatto olisi mitoittamisen ja toimivuuden puolesta yksinkertaista arvioida kohdekohtaisesti. Hankkeen pilotoinnissa matot kestivät noin kaksi kuukautta, jonka jälkeen niiden uusiminen tuli ajankohtaiseksi riittävän adsorptiokapasiteetin turvaamiseksi. Mattopilotin rakenne ja poikkileikkauskuva on esitelty liitteen 7 case-esimerkissä. Adsorbenttien kehitys on tärkeä tulevaisuuden tutkimuskohde tehokkaiden, selektiivisten ja ympäristöystävällisten kaivosvesien käsittelyratkaisujen kehittämiseksi.

## 7. LAADUNVARMISTUS JA SEURANTA

Rakentamisen aikainen laadunvarmistus on vielä tavanomaista rakentamistakin tärkeämmässä asemassa uusiomateriaaleilla rakennettaessa. Laadunvarmistus voidaan toteuttaa pääosin tavanomaisilla välineillä/laitteilla, esimerkiksi kuitusavirakenteiden tiheystavoitteiden toteutumista voidaan useimmiten seurata Troxler-mittarilla. UPACMIC-hankkeessa kerättiin tietoa myös olosuhteiden vaikutuksesta rakentamiseen, ja edellisen yhteydessä todettiin mm. se, että rankka vesisade vaikeuttaa oleellisesti kuitusavirakentamista. Hankkeessa kirjattiin rakentamisvaiheen aikaisia kokemuksia liittyen materiaalien rakennettavuuteen, sekä havaintoja erilaisten materiaaliseosten valmistamisesta ja valmiin seoksen koostumuksesta.

Reaktiivisissa rakenteissa olosuhteet, kuten lämpötila ja hapen määrä sekä viipymä/reagointiaika vaikuttavat tapahtuviin reaktioihin. Vesienkäsittelyssä huomioitavaa on myös kausittain vaihtelevat vesimäärät, jolloin rakenteen kuormitus vaihtelee kausiluontoisesti. Laboratoriossa ennakkoon testatun materiaalin toimivuus onkin tärkeä varmistaa ennen varsinaista rakentamista myös maasto-olosuhteissa. Adsorbenteissa ja haitta-aineita pidättävissä rakenteissa tulee huomioida myös materiaalin adsorptiokapasiteetin täyttyminen, jolloin ajoittaiset vaihtotoimenpiteet ja toimenpiteiden aikataulu on selvitettävä. Reaktiivisten materiaalien mitoitus on aina kohdekohtaista, joten seuranta on suunniteltava jokaiselle kohteelle erikseen.

## 8. YHTEENVETO

UPACMIC-hankkeessa testattiin useiden uusiomateriaalien käyttöä uudentyypisissä kaivosalueiden pinta- ja pohjasuojarakenteissa sekä reaktiivisissa rakenteissa. Hankkeen laajamittaisen laboratoriotestauksen perusteella voitiin valita lopullisiin pilotointeihin potentiaalisimmat ja toisaalta myös tutkimuksen kannalta mielenkiintoisimmat materiaalit. Materiaalitestaus koostui materiaalien perusominaisuuksien selvittämisen lisäksi vedenläpäisy- ja lujuuskokeista, sekä routivuustutkimuksista. Lisäksi analysoitiin materiaalien ympäristökelpoisuutta liukoisuusominaisuuksien ja läpivirtaustestien perusteella, sekä reaktiivisten materiaalien tehokkuutta. Edellä mainitulla testikokonaisuudella saadaan jo hyvin tietoa uuden materiaalin ominaisuuksista ja soveltuvuudesta suunniteltuun rakenteeseen.

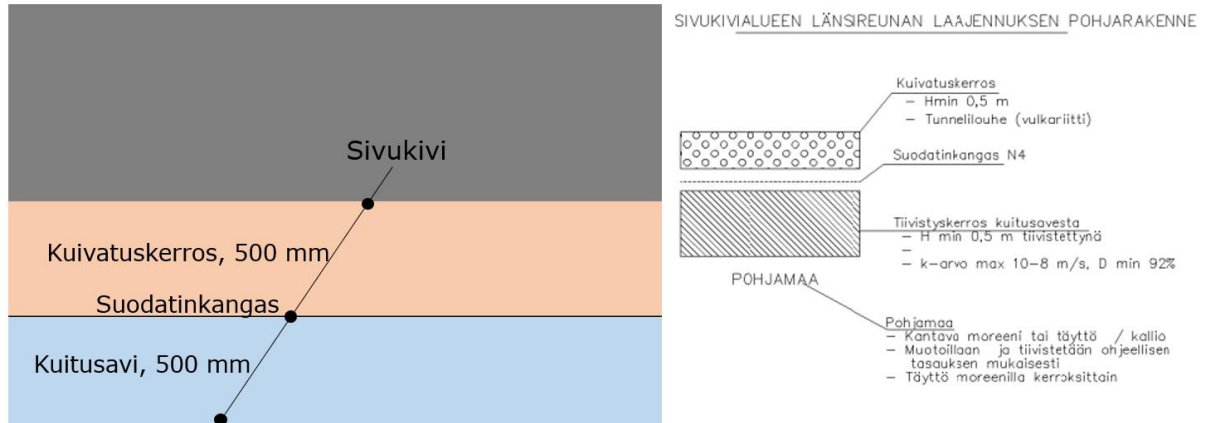
Ennakkotestauksen ja materiaalien saatavuuden perusteella voidaan valita käyttökelpoisimmat materiaalit niin kustannustehokkuuden kuin teknisen laadun ja ympäristövaikutusten näkökulmista. Suunnittelussa on suositeltavaa ottaa huomioon myös useimpien vaihtoehtoisten materiaaliratkaisujen perinteisiä ratkaisuja matalammat materiaalikustannukset, sillä jätteiden ja sivutuotteiden hankintakustannukset koostuvat pääasiassa vain lastaus- ja kuljetuskustannuksista. Hankkeessa syntypaikan etäisyys hyödyntämiskohteesta todettiin uusiomateriaalien käyttömahdollisuuksia eniten rajoittavaksi tekijäksi niin kustannusten kuin muodostuvien päästöjenkin osalta. Toisaalta jätemateriaaleja hyödynnettäessä jätteentuottaja säästyy jäteverolta, sekä mahdollisilta välivarastointiin ja loppusijoitukseen liittyviltä kustannuksilta.

Uudentyyppisten ratkaisuiden uskotaan hankkeen perusteella olevan yksi osaratkaisu tulevaisuuden päästötavoitteisiin pääsemiseksi sekä materiaalien tehokkaaseen hyödyntämiseen maarakentamisessa myös kaivossektorilla. Lisäksi materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa yleisesti kaivostoimintaan liitettävän negatiivisen ympäristökuvan muuttamiseksi resurssiviisaaksi toiminnaksi. Myös toiminnan päättymisen jälkeinen oikeanlainen maisemointi ja jälkitoiminnan suunnittelu kaivosalueelle on koettu tulevaisuudessa tärkeäksi, jotta laajat alueet eivät jäisi käyttämättömiksi. Aikaisemmin luonnonvaroja kuluttaneen kaivoksen laajojen peitettyjen rikastushiekka-altaiden tehokas uudelleen hyödyntäminen muuttaisi merkittävästi myöhemmin alueeseen kohdistuvia mielikuvia.



**Liite 1.** Pohjarakenteen pilotointisuunnitelma, kuitusavirakenne, Orivesi

Hankkeen yksi pilottikohde oli suunniteltu Orivedelle Dragon Mining Oy:n kaivosalueelle, jonka länsireunan laajennusosan päivitetyssä yleissuunnitelmassa pohjarakenteen moreeni olisi korvattu kuitusavella. Pilotoinnin tarkoituksena olisi osoittaa kuitusaven toimivuus myös pohjarakenteen materiaalina. Suunnitellun rakenteen poikkileikkauskuva on esitetty kuvassa 1. Rakenteeseen suunnitellulle kuitusavimateriaalille annettiin vedenläpäisyvaatimus  $< 1 \times 10^{-8}$  m/s. Kaivostoiminta kuitenkin keskeytettiin, ennen kuin pilottirakenne ehdittiin toteuttaa.

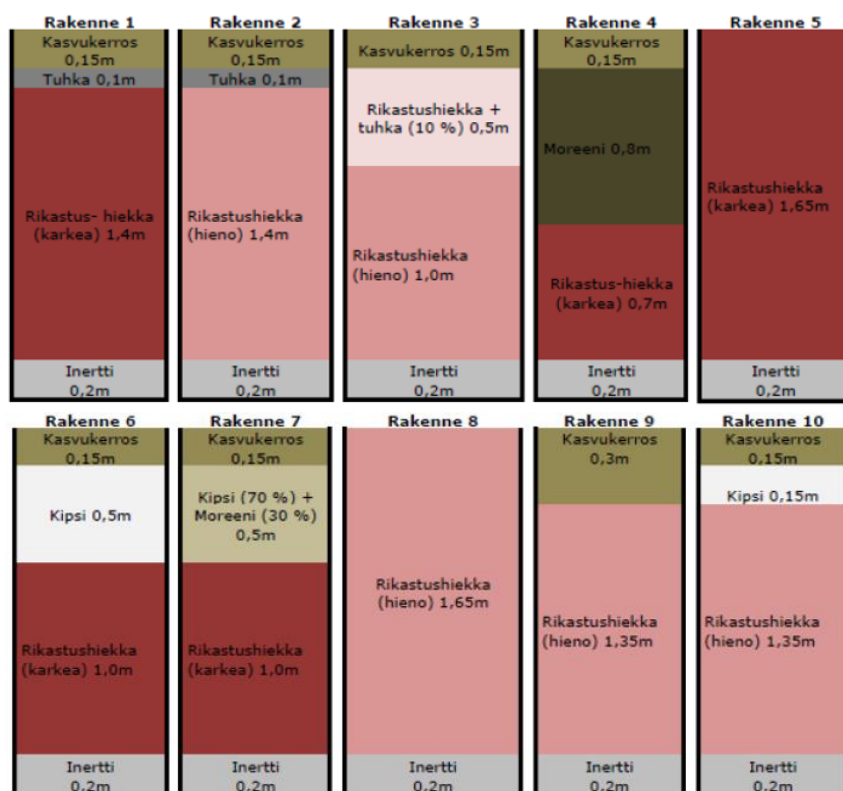


**Kuva 1.** Suunnitellun pohjarakenteen poikkileikkauskuva.

## Liite 2. Pintarakenteiden pilotointi, Pyhäjärvi Pyhäsalmen kaivos

Pyhäsalmen kaivosalueella pilotoitiin pintarakenneratkaisuja, joissa uudentyyppisinä materiaaleina testattiin kipsiä ja kasatuhkaa. Vertailurakenteina toimi perinteinen moreenirakenne, jonka päällä oli kasvukerros. Lisäksi seurattiin kahta erilaista peittämätöntä rikastushiekkakerrosta. Tutkimusta tehtiin lysimetrien avulla, ja seurannan yhteydessä analysoitiin sekä kerrosrakenteiden läpi suotautuneen veden laatua että määrää. Veden määrän sekä perusmittausten (redox-potentiaali, pH ja sähkönjohtavuus) lisäksi vedestä analysoitiin säännöllisesti liuenneiden aineiden pitoisuuksia. Pilotoinnin purkuvaiheessa tutkittiin myös rakenteiden materiaalien pH-tasoa kerroksittain, jolloin saatiin arvioitua sulfidipitoisen rikastushiekan mahdollinen hapettuminen ja happamoituminen, sekä hapettumisrajan eteneminen rakenteessa. Pyhäsalmen pilotoinnin materiaalikerrokset on esitetty kuvassa 2 ja rakenne kuvassa 3.

Pintarakennekerroksissa käytettyjä materiaaleja/materiaaliseoksia testattiin ennen pilotointia teknisen soveltuvuuden näkökulmasta, jonka lisäksi kaikista käytettävistä materiaaleista tehtiin ympäristökelpoisuuteen liittyviä haitta-aineiden liukoisten pitoisuuksien analyyseja. Peitetty rikastushiekka sisälsi suuria määriä sulfaattia, sekä jonkin verran kuparia, nikkeliä ja sinkkiä. Peittorakenteilla pyrittiin vaikuttamaan happoa tuottavan rikastushiekan happamoitumiseen, jolloin myös metallien liukeneminen suotoveen vähenisi.



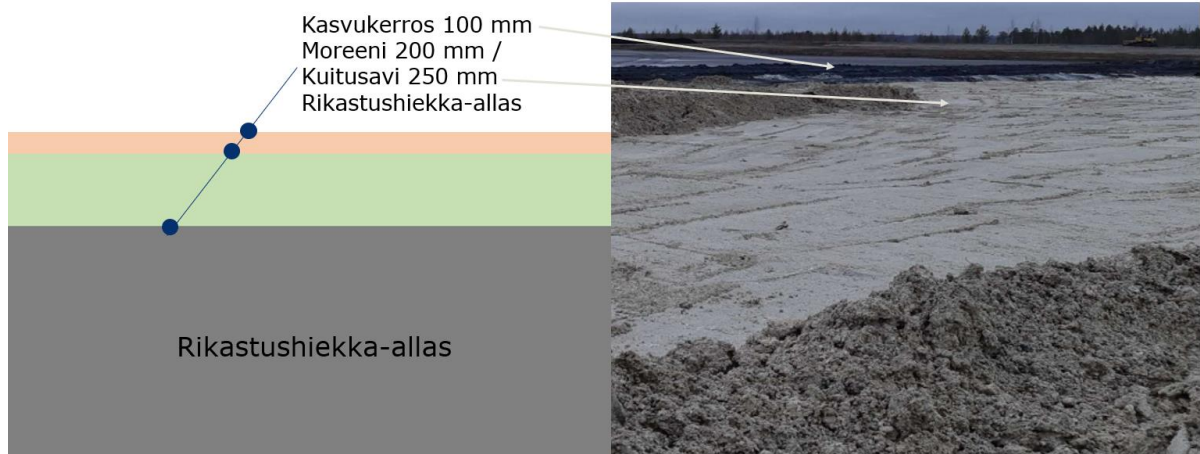
Kuva 2. Pyhäsalmen pilotoinnin materiaalikerrokset.



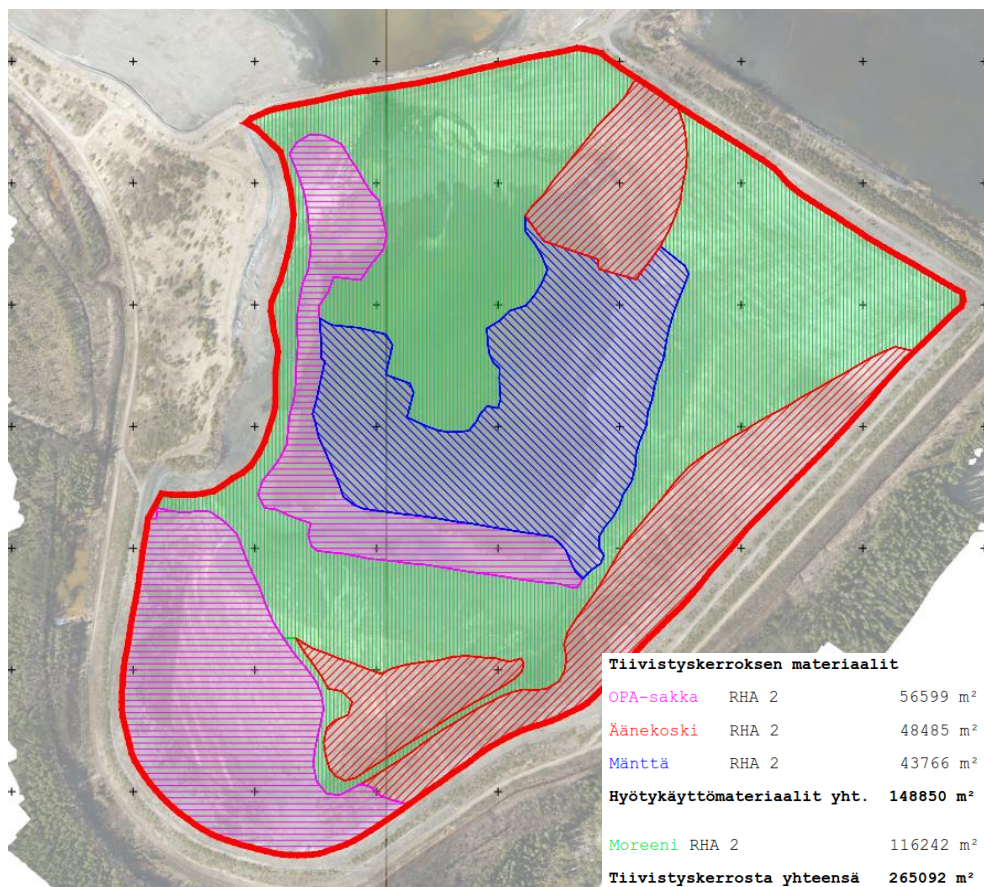
Kuva 3. Koesäiliö asennettuna vasemmalla ja rakennekerrokset purkuvaiheessa oikealla.

### Liite 3. Kuitusavi-pintarakenteen pilotointi, Nivala Hituran kaivos

Hituran kaivoksen toisen rikastushiekka-altaan peittorakenteet toteutettiin Fortumin toimesta kuitusavella ja moreenilla. Tiivistyskerroksen tuli olla homogeeninen ja vedenläpäisevyydsarvon  $k < 1 \times 10^{-8}$  m/s. Rakenteen paksuus oli vähintään 200 mm moreenilla ja 250 mm kuitusavella. Tiivistyskerroksen päälle tuli 100 mm kasvukerros. Rakenteen poikkileikkaus ja toteutettu rakenne on esitetty kuvassa 4.



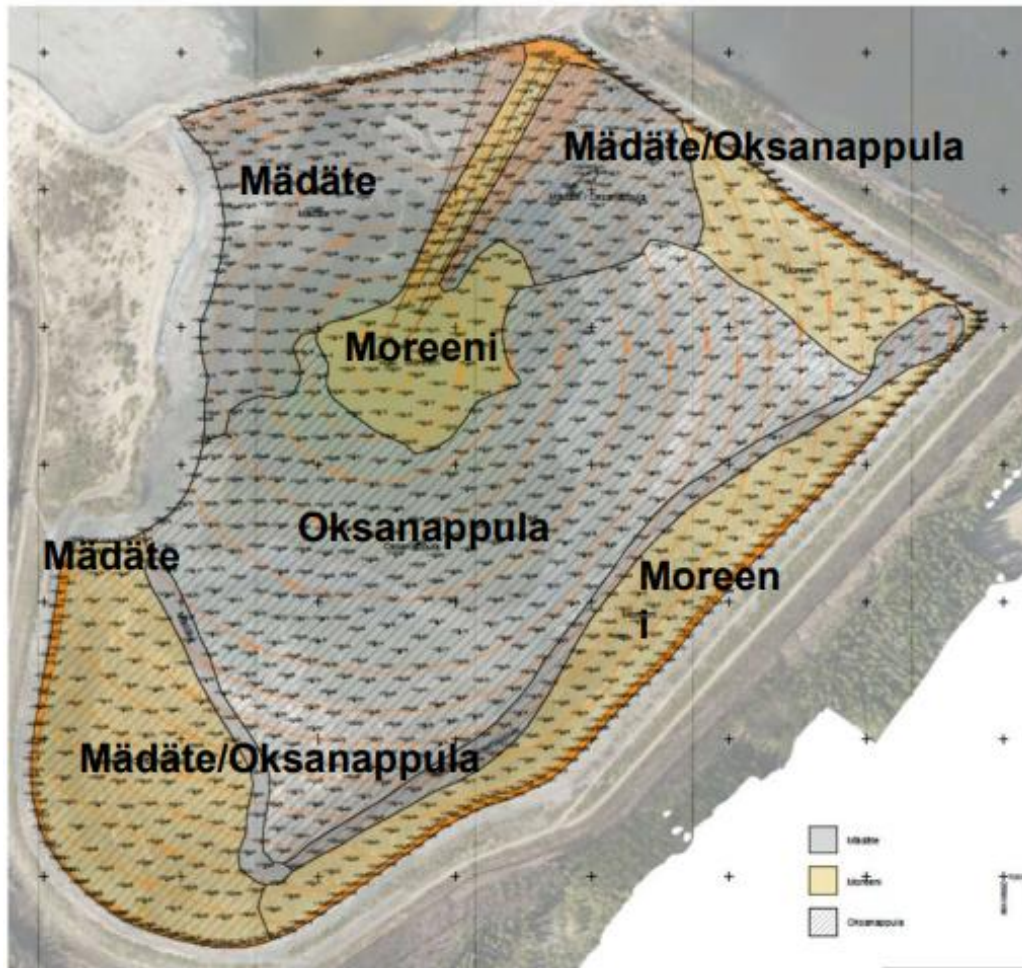
Kuva 4. Peitterakenteen poikkileikkaus kuva vasemmalla ja valmista rakennetta oikealla.



Kuva 5. Tiivistyskerroksen materiaalit.

Kuitusavimateriaali saatiin kolmelta eri tuottajalta, jotka olivat Metsä Tissue Mänttä, Stora Enso Oyj Oulu ja Metsä Board Oyj Äänekoski. Ennen varsinaista rakentamista jokaista kuitusavilaatua käyttäen rakennettiin koekenttä, ja tulosten perusteella kuitusavet hyväksyttiin käytettäväksi peitekerkeissä vedenläpäisevyys- ja ympäristökelpoisuustutkimusten perusteella. Peitekerrosten laajuus eri materiaaleilla on nähtävissä kuvasta 5. Tiiviskerros tiivistettiin kolmeen kertaan yliajaen telakaivinkoneella. Tiivistämisen jälkeen kerrospaksuus kuitusavirakenteissa oli minimissään 250 mm, jolloin pystyttiin varmistamaan riittävän kerrospaksuuden toteutuminen myös kuitusaven biohajoaminen huomioitaessa. Rakentamisvaiheessa peitekerroksen laadunvarmistus tehtiin Troxler-mittauksilla. Rakenteiden valmistumisen jälkeen peitekerroksien toimivuutta monitoroitiin lysimetreillä.

Tiiviskerroksen pintaan rakennettiin kasvukerros Hituran ylijäämämaasta seulotun moreenin lisäksi osittain Äänekosken biotuotetehtaan kompostoidulla mädätteellä ja Stora Enson tehtaalta saadulla oksanappulalla (kuva 6).



Kuva 6. Kasvukerroksen materiaalit.

**Liite 4.** Ylijäämäsave-pintarakenteen pilotointi, Nivala Hituran kaivos

Hituran kaivosalueella rakennettiin peitekerros ylijäämäsavesta noin 3,4 ha laajuisen esimurskausaluen peittämiseksi. Rakenne koostui 500 mm savikerroksesta ja 100 mm kasvukerroksesta, rakenne on nähtävissä kuvissa 7 ja 8. Peitekerroksen tavoitteena oli alueen maisemointi, joten rakenteelle ei ollut asetettu vedenläpäisevyydestavoitetta. Peitekerroksen tuli olla homogeeninen, eikä kerroksen pintaan saanut muodostua vettä kerääviä painanteita. Rakentamisen aikana kerrospaksuutta seurattiin koneohjauksen avulla. Pilotin tarkoituksena oli todentaa paikallisten ylijäämämaiden hyödyntämismahdollisuuksia ja siihen liittyviä kysymyksiä, kuten vähäpäästöisyys tavallisesti käytettyihin ratkaisuihin verrattuna.



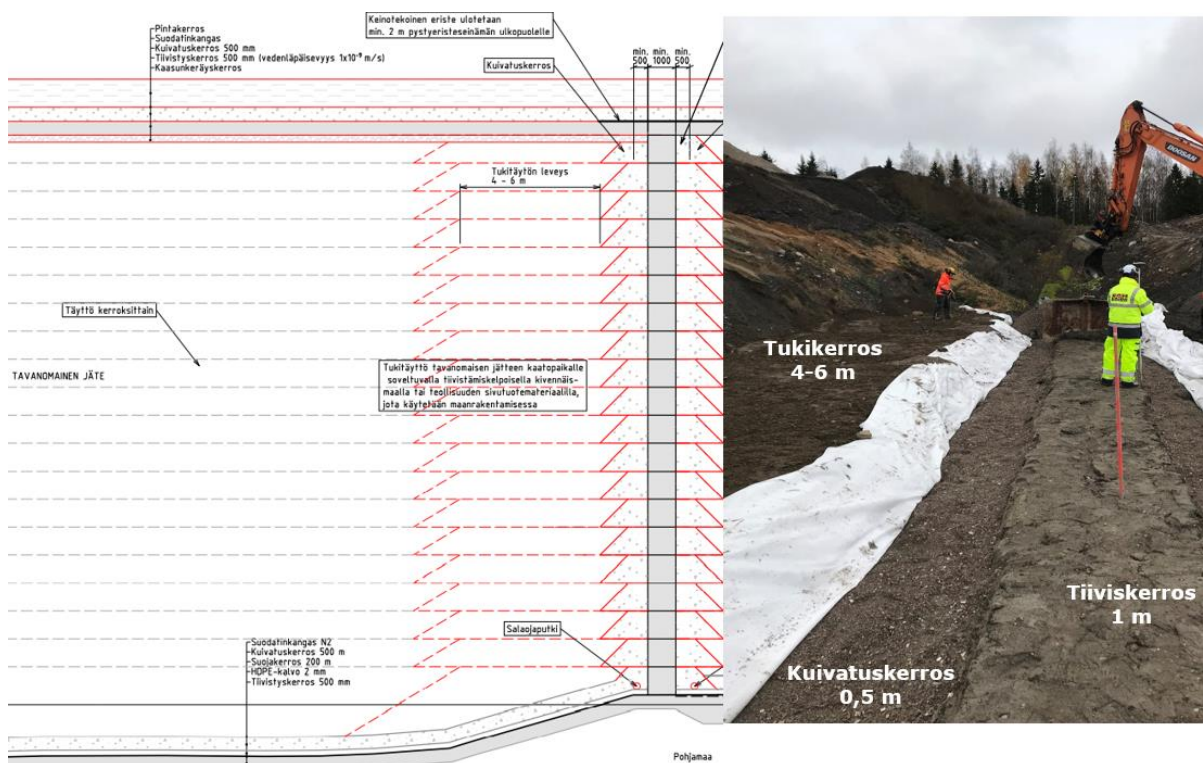
**Kuva 7.** Savipeiterakenteen poikkileikkauskuvat vasemmalla ja valmis rakenne oikealla.



**Kuva 8.** Savipeitekerroksen rakentamista vasemmalla ja keskellä, oikealla valmista rakennetta.

**Liite 5.** Pystyeristerakenteen pilotointi, Kuopio Sorsasaloon teollisuusjätealue

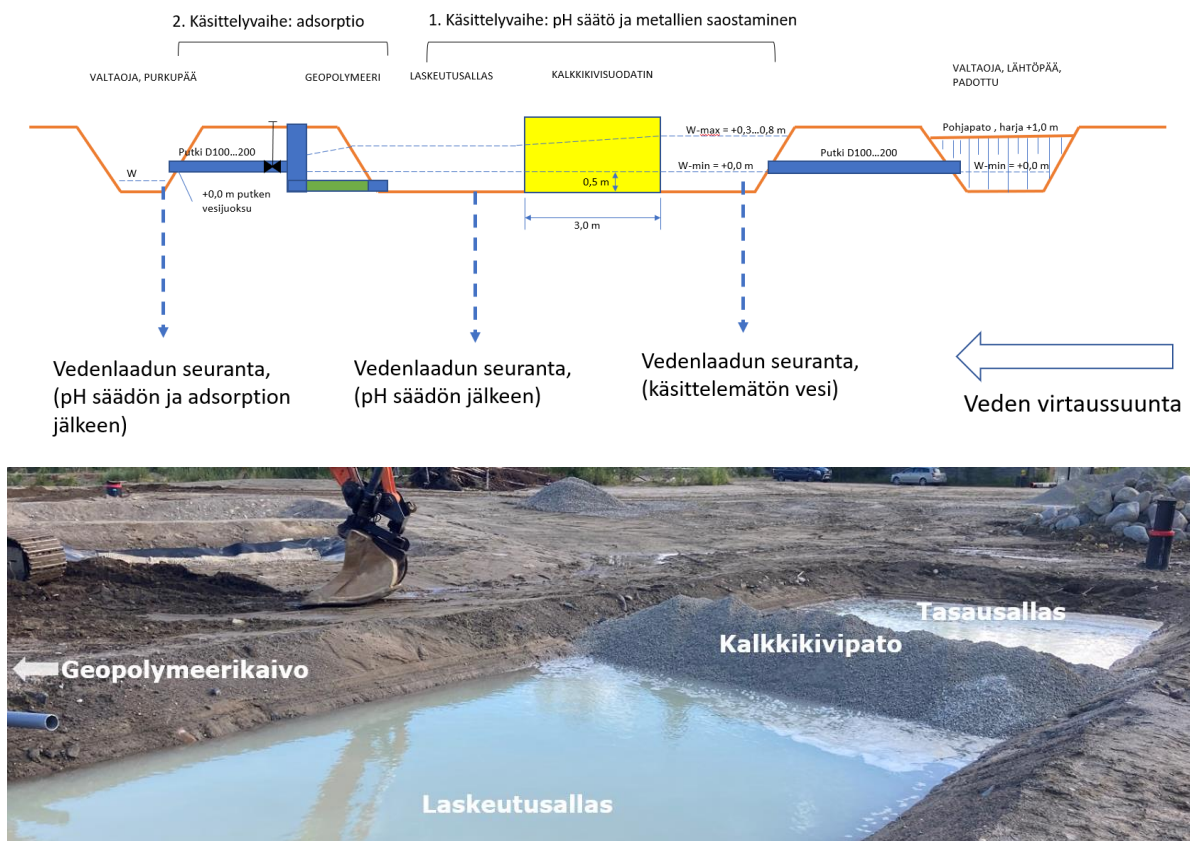
Kuopion Sorsasaloon Fortumin jätekeskuksen alueelle rakennettiin pystyeristysseinämä estämään suotoveden ja sen mukana haitta-aineiden kulkeutuminen vaarallisen jätteen sijoitusalueelta tavanomaisen jätteen sijoitusalueelle. Ylijäämäsavesta rakennetulta tiiviskerrokselta vaadittu vedenläpäisyarvo oli  $k \leq 1 \times 10^{-9}$  m/s ja paksuus  $>1$  m. Seinämän tiivistyksessä käytettiin apuna muottia, joka mahdollisti käytetyn saven tehokkaan ja hallitun tiivistämisen ja sitä kautta vaaditun k-arvon saavuttamisen. Noin 0,5 m levyisessä kuivatuskerroksessa käytettiin karkeaa pohjatuhkaa. Vesi kulkeutuu rakenteessa pohjatuhkakerrosta pitkin pystysuunnassa rakenteen alaosaan, josta se johdetaan salaojien kautta pois rakenteesta. Molemmiin puolin uloin kerros oli noin 4-6 m paksuinen tukikerros, joka rakennettiin alueelle läjitetyistä jättemateriaaleista, ja sen tarkoitus on tukea seinämää. Poikkileikkauskuva ja seinämän rakennekerrokset on esitetty kuvassa 9.



**Kuva 9.** Kuopion pystyeristeseinämän poikkileikkauskuva ja rakennekerrokset.

## Liite 6. Reaktiivisten rakenteiden pilotointi: uusiomateriaalit, Nivala Hituran kaivos

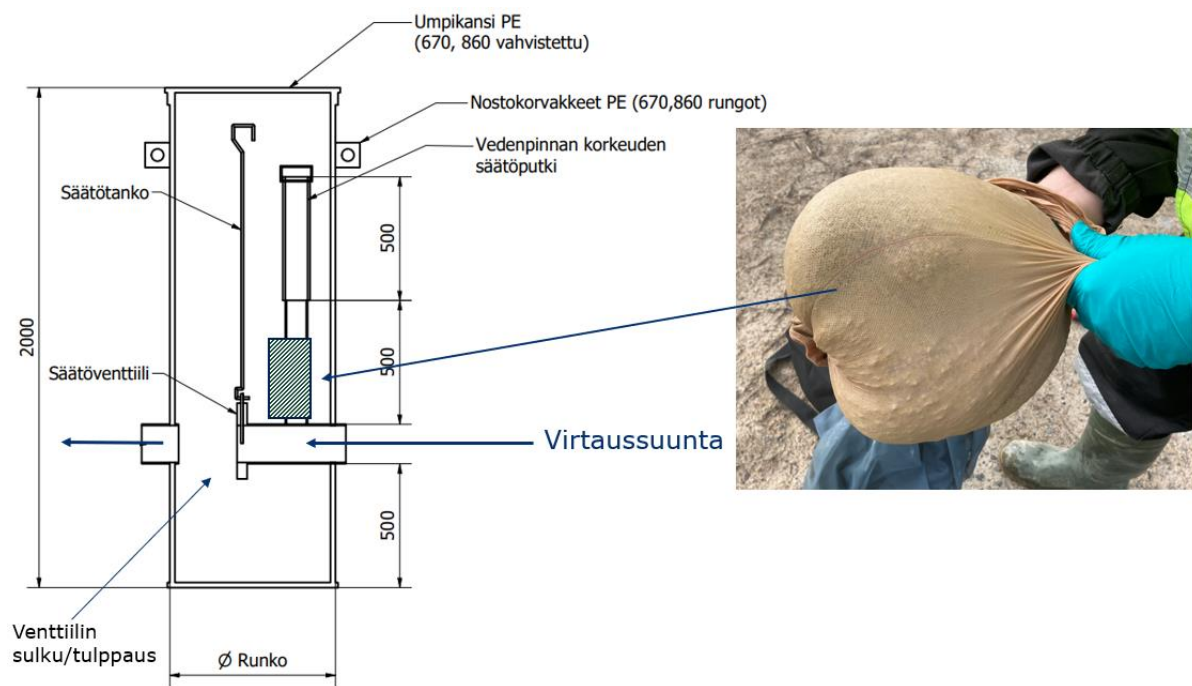
Reaktiivisia rakenteita pilotoitiin Hituran kaivosalueella kiillegneissikasasta suotautuvan happaman ja nikkeli-pitoisen veden käsittelyssä noin puolen vuoden ajan. Testauksessa käytettyjä uusiomateriaaleja olivat kalkkikivikaivoksen raekoon 2-20 mm ylijäämäkalkkikivi sekä teollisuusjätteistä valmistettu geopolymeeri. Vesi virtasi rakenteessa passiivisesti ilman ulkoista energiantarvetta. Vesi otettiin suotovesiojasta, patomalla ja ohjaamalla se putkea pitkin pilottirakenteeseen. Virtausnopeus oli säädetty noin tasolle 4 m<sup>3</sup>/päivässä putkissa olevien säätöventtiilien avulla. Rakenne on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Ylhäällä uusiomateriaalien pilottirakenteen sivuleikkauskuvaa ja alhaalla toteutunut pilottirakenne.

Uusiomateriaalien pilotoinnin ensimmäisessä vaiheessa suotoveden pH-tasoa säädettiin kalkkikivipatoa käyttäen, jolloin veteen liuenneet metallit saostuivat pH muutoksen vaikutuksesta patorakenteeseen ja sen jälkeiseen laskeutusaltaaseen. Laskeutusaltaasta vesi virtasi geopolymerikaivoon, jossa metallit pidätyivät kaivon adsorbenttirakeiden pinnalle. Geopolymerikaivon toimintaa on havainnollistettu kuvassa 11. Rakenteiden toimivuutta monitoroitiin vesinäytteillä, jotka otettiin rakenteisiin tulevasta vedestä, kalkkipadon läpi suotautuneesta vedestä ja geopolymerikaivon läpi kulkeutuneesta vedestä.

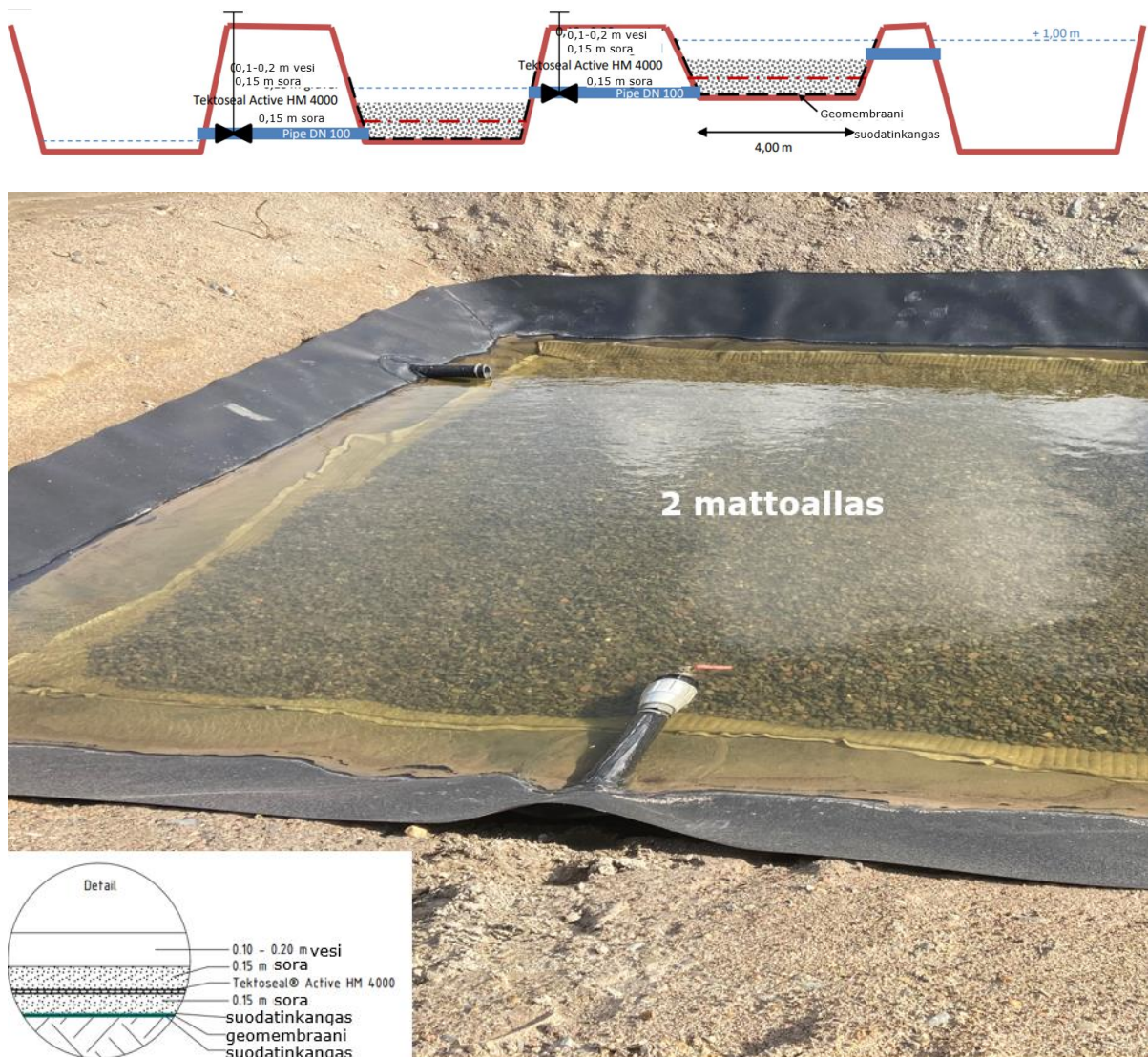




**Kuva 11. Geopolymeerikaivo ja adsorptiomateriaali.**

## Liite 7. Reaktiivisten rakenteiden pilotointi: kaupallisen toimijan matot, Nivala Hituran kaivos

Hituran toisessa reaktiivisten rakenteiden pilotissa tutkittiin kaupallisen toimijan mattorakennetta, jossa metallien poisto perustui mattojen sisältämään adsorbenttirakeeseen. Pilottirakenne koostui kahdesta identtistä, peräkkäin olevasta mattoaltaasta, joiden läpi käsiteltävä vesi ohjattiin. Vesi liikkui rakenteessa painovoimaisesti ensin toisessa altaassa sorakerrosten välissä olevan maton läpi ja sen jälkeen edelleen toiseen altaaseen ja siellä sorakerrosten välissä olevan toisen reaktiivisen maton läpi. Virtausnopeus pidettiin vakiona (noin 4 m<sup>3</sup>/päivässä). Suotautumisen aikana metallit adsorboituivat mattorakenteen sisällä olevien adsorbenttirakeiden pinnalle. Mattoja seurattiin Hituran kaivosalueilla vajaan vuoden, jolloin sekä altaisiin tulevasta vedestä että mattojen läpi suotautuneesta vedestä otettiin vesinäytteitä. Matot uusittiin kertaalleen seurannan aikana, pilotointi on nähtävissä kuvassa 12.



Kuva 12. Ylhäällä reaktiivisten mattojen pilottirakenteen sivuleikkauskuva ja alhaalla toteutunut allasrakenne.