



MATERIAALITESTAUKSEN YHTEENVETORAPORTTI

TEKNISET OMINAISUUDET JA YMPÄRISTÖKEL- POISUUS



LIFE12 ENV/FI/000592 UPACMIC

Yhteenvedoraportti toteutetusta materiaalitestauksesta (action A3 final technical report)
LIFE12 ENV/FI/000592 UPACMIC

Päivämäärä **10.5.2022**

Kirjoittaja **Emmi Ilonen**

Tarkastajat **Ari Mäkinen**

Harri Jyrävä

Kuvaus **Laboratoriotutkimusraportti**

SISÄLTÖ

Summary	5
1. Johdanto	6
2. Tutkimusmenetelmät	7
2.1 Vesipitoisuus	7
2.2 Hehkutushäviö	7
2.3 pH	7
2.4 Rakeisuus	7
2.5 Reaktiivisuus/lämpenemistesti	7
2.6 Aktiivisen kalkin määrittäminen	7
2.7 Tiivistyskokeet	8
2.8 Koekappaleiden valmistus ja säilytys	8
2.9 Vedenläpäisevyysskokeet	8
2.10 1-aksiaalinen puristuslujuus	9
2.11 Routanousukokeet	9
2.12 Liukoisuustestit	9
2.13 Suotautumiskokeet	9
3. Tutkimuksissa käytetyt lähtömateriaalit	10
4. Materiaalitestauksen ensimmäinen vaihe	13
4.1 Nikkelirikastushiekka runkoaineena	13
4.2 Moreeni runkoaineena	15
4.3 Kultarikastushiekka runkoaineena	18
4.4 Sivutuoteseokset	18
4.5 Ensimmäisen vaiheen potentiaalisimmat seokset	20
5. Materiaalitestauksen toinen vaihe	21
5.1 Nikkelirikastushiekka runkoaineena	22
5.2 Moreeni runkoaineena	23
5.3 Sivutuoteseokset	25
5.4 Materiaaliseosten tekniset ominaisuudet	26
6. Ympäristökelpoisuus	28
6.1 Kolonnitestit	28
6.2 Suotovesikokeet	30
6.3 pH-seuranta	34
6.4 Vedenläpäisevyysskokeiden suotovedet	36
6.5 Yhteenveto	36
7. Sideainemateriaalien jauhatus	37
8. Pilotointiin liittyvä materiaalitestaus	39
8.1 Pyhäsalmi, pintarakennatkaistut	39
8.2 Hitura, kuitusavi läjitysalueen peitekerroksessa	44
8.3 Kuopio, Sorsasalon pystyterä rakenne	47
8.4 Hitura, vesienkäsittelyrakenteet	58
9. Johtopäätökset	61
10. Viiteraportit	63

LIITTEET

LIITE 1. TEKNISEN MATERIAALITESTAUKSEN TOISEN VAIHEEN TULOKSIA

LIITE 2A KOLONNITESTIEN SUODOSTEN TULOKSET (L/S 10)

LIITE 2B. KOLONNITESTIEN SUODOSTEN KAIKKIEN FRAKTIOIDEN LIUKOISET PITOISUUDET

LIITE 3. SUOTOVESIKOKEEN TULOKSET

LIITE 4. PYHÄSALMEN MATERIAALIEN KOKONAISPITOISUUDET

LIITE 5A. KUITUSAVIEN KOKONAISPITOISUUDET

LIITE 5B. OULUN JA ÄÄNEKOSKEN KUITUSAVIEN LIUKOISET PITOISUUDET

LIITE 5C. KUITUSAVIEN UUTTOTESTIEN TULOKSET

LIITE 6. PYSTYERISTYSSEINÄMÄN POIKKILEIKKAUSKUVA

SUMMARY

Before the piloting, projects materials are tested in laboratory from technical and environmental sights. Material testing produced important knowledge from materials' suitability for the mining sites' bottom, cover and reactive structures. Based on the results can be selected the most promising and potential materials, which can be utilized in new structures. In first testing phase there were researched materials' technical and leaching properties. There were also tested reactive barrier's properties and ability adsorb hazardous materials. The main objective in 2nd phase of material testing was research how different materials from different producer effects constructing quality and its variation. Based on the results low quality soils properties can be improved by adding and mixing extra component in it. The extra component can be for example: fly ash, lime, bentonite dust from foundry sand and foundry sand.

There has been tested four different fiber clay, and low water permeability results enables the use of those in cover and bottom structures. Water permeability $< 1 \times 10^{-8}$ m/s was achieved with all tested materials. Low water permeability can be problematic for reactive barriers as the water need to flow freely through the material. The similar material's properties vary between different producers therefore the material tests are essential before use.

Various fly ash grades were tested for cover structure purposes. Fly ash was tested alone as well as mixed with enrichment sand and moraine. Fly ash mixed with moraine showed good results with water permeability, so soil properties can be improved by ash. The water permeability for all tested fly ash mixtures were above 10^{-8} m/s, which may prevent the use of material in bottom structures. In the original ash water content needed to be increased, and while water content was around 15 % compressing became difficult and the content remained loose. The alkaline fly ash can function as neutralizer for acid mine drainage if used in cover layers or reactive barriers and it can precipitate many metals. The environmental properties and possible joint effects need to be researched case by case as leachability of certain heavy metals can increase with some fly ashes. In addition, the technical suitability needs to be studied case by case as there were a lot of variety in the results with different fly ash grades.

Piled fly ashes were in general less reactive than dry stored fly ashes. So, the technical suitability depends on the application and possible material mixture and it needs to be verified case by case. The leaching of inorganic components from pile stored fly ashes usually decreases over time which increases the environmental suitability.

Tested foundry sands contained bentonite. Mixing of foundry sands (10%) with moraine it was possible to achieve lower water permeability compared to moraine itself. Achieved permeability values of moraine-foundry sand mixtures varied in laboratory tests between $5,4 \times 10^{-9}$ m/s - $2,0 \times 10^{-10}$ m/s. The environmental suitability of foundry sand varies between different foundries and it needs to be verified case by case. Tested gypsum waste was found out to be suitable for cover structures. The k-value for material itself is relatively high (10^{-3} - 10^{-4} m/s) and its pH-value is low (<3) which are need consider in design. Lime waste was found out to be suitable material, usually mixed with other materials, for all tested applications. Lime has neutralizing and consolidation properties.

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 sivutuotteita ja maarakennuskelpoisia jätteitä kaivosalueiden pinta- ja pohjarakenteissa sekä reaktiivisissa rakenteissa. Rikastushiekka-alueiden sulkemisessa edellytetään lähtökohtaisesti joko tiivistä kalvora-kennetta tai perinteisempää moreenipeittoa kasvukerroksin. Vaadittavat rakenteet voivat olla huomattavan kalliita toteuttaa ja neitseellisiä luonnonkiviaineeksi kuluttavia. Uusiomateriaalien käyttö erilaisissa kaivosalueen happamien ja raskasmetallipitoisten vesien laatua parantavissa rakenteissa säästää merkittävästi luonnonvaroja, voi vaikuttaa passiivirakenteiden CO₂-päästöihin niitä madaltavasti ja vähentää kaivosten negatiivisia ympäristövaikutuksia.

Hankkeen tavoitteiden edellyttämänä on tehty uusiomateriaalien tekniseen soveltuvuuteen ja ympäristökelpoisuuteen liittyvää materiaalitestausta. Lisäksi materiaalitestausta on käytetty koerakenteiden toteutusvaiheessa laadunvarmistamisen työkaluna. Tähän raporttiin on koottu 5/2022 mennessä valmistuneet materiaalitestaukset ja niiden keskeisimmät tulokset. Materiaalitestausta on edennyt vaiheittain suhteellisen laajan aikaikkunan sisällä, jolloin materiaalitestauksen tavoitteet ja suuntaukset ovat jonkin verran muuttuneet matkan varrella. Ensimmäisen ja toisen vaiheen materiaalitestaukset kohdentuivat Hituran kaivosalueelle suunniteltuihin pohja-, pinta- ja ojarakenteisiin. Lopullisia pilottirakenteita toteutettiin Hituran lisäksi Pyhäsalmen kaivosalueelle sekä Kuopion Sorsasalonsa teollisuusjätekeskuksen alueelle.

Ensimmäisen vaiheen aikana teknisten tutkimusten rinnalla tutkittiin materiaalien liukoisuusominaisuuksia ja erityisesti materiaalien liukoisuuksien yhteisvaikutusta pintarakenteissa. Lisäksi testattiin kokeellisesti kaivosalueella hyödynnettävän reaktiivisen seinämän tai ojarakenteen ominaisuuksia ja vaikutuksia haitta-aineiden pidättäytymisessä. Testausta tarkennettiin toisessa testivaiheessa kohteen kannalta suunniteltua hyödyntämistä ajatellen kiinnostavimpiin materiaaliratkaisuihin, joiden käyttäytymistä oli tarkoitus testata laboratoriotestauksen jälkeen maasto-olosuhteissa, lopullisia rakenteita pienemmissä pilottirakenteissa. Toisen vaiheen päätavoitteena oli selvittää eroja eri materiaalien tuottajien sivutuotteiden käytön vaikutuksista rakentamisen laatuun ja laatuvaihteluun, jolloin voitiin arvioida myös yksittäisten sivutuotteiden käyttöpotentiaalia. Tutkimusten toisessa vaiheessa on optimoitu materiaalien potentiaalisimpia seossuhteita ja tuotettu tarkempaa tietoa yksittäisten materiaalien käyttömahdollisuuksista Hiturassa.

Laboratoriossa testattujen materiaalien rakennettavuudesta (tekniset tutkimukset) sekä materiaaleissa ja niiden läpi suotautuneissa vesissä tapahtuvista muutoksista (ympäristökelpoisuus) maasto-olosuhteissa tuotettiin tietoa pilotointivaiheessa. Pilotointiin valittiin laboratoriossa testatuista materiaaleista potentiaalisimmat ja toisaalta ne, joista tarvitaan lisätietoa laajempien rakenteiden suunnittelua varten. Osa pilotoinneista toteutettiin alkuperäisestä suunnitelmasta poiketen Pyhäsalmen kaivosalueella, jolloin materiaalien käyttö vaati lisätutkimuksia rikastushiekan ominaisuuksien muuttuessa.

Parhaimmillaan hankkeessa tutkitut uusiomateriaalit voivat mahdollistaa uudentyyppisiä neitseellisiä luonnonvaroja säästäviä pohjarakenneratkaisuja rikastushiekoille, pintarakenneratkaisuja olemassa olevan nikkeli-rikastushiekan peittämiseen, sekä perinteisistä ratkaisuista poikkeavia käsittelytapoja kaivosalueelta suotautuville ja ympäristöön purkautuville vesille.

2. TUTKIMUSMENETELMÄT

2.1 Vesipitoisuus

Materiaalien vesipitoisuus (w) määritettiin uunikuivauksella 105 °C lämpötilassa. Kipsin vesipitoisuus määritettiin lisäksi 60 °C lämpötilassa. Vesipitoisuus laskettiin geoteknisen periaatteen mukaisesti eli näytteen sisältämän veden massan suhteena näytteen kuivamassaan (SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-1:fi).

2.2 Hehkutushäviö

Hehkutushäviö (Hh) määritettiin kuivapolttomenetelmällä hehkutusuunissa (800 °C). Hehkutushäviö laskettiin kuivattua näytettä hehkutettaessa hävinneen massan suhteena näytteen alkuperäiseen kuivamassaan (SFS-FI 1997-2).

2.3 pH

pH-mittausta varten näytteisiin lisättiin ionivaihdettua vettä siten, että veden ja kuiva-aineen massasuhteeksi tuli 5:1 (L/S=5). Seosta sekoitettiin viiden minuutin ajan. Tämän jälkeen sen annettiin seistä 2–4 tuntia, minkä jälkeen näyte sekoitettiin uudelleen huolellisesti ennen pH-mittausta. pH mitattiin sekoitetusta näytteestä kalibroidulla pH-mittarilla.

2.4 Rakeisuus

Mineraalisista näytteistä määritettiin raekokojakaumat käyttäen pesuseulontaa, kuivaseulontaa ja areometrikoetta. Määritykset tehtiin SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-4:fi mukaisesti.

2.5 Reaktiivisuus/lämpenemistesti

Kuivien lentotuhkien reaktiivisuutta arvioitiin niin sanottua lämpenemistestiä käyttäen. Testissä huoneenlämpöiseen tuhkaan lisätään huoneenlämpöistä vettä siten, että näytteen vesipitoisuudeksi tulee 30 %. Vesi sekoitetaan tuhkaan tasaisesti, minkä jälkeen näytteeseen työnnetään lämpötila-anturi, ja näyte suljetaan tiiviisti solumuovieristeestä valmistettuun laatikkoon. Näytteen lämpötilan kehitystä seurataan tavallisesti 6 tunnin ajan. Testissä saadaan selville tuhkassa tapahtuneista reaktioista aiheutuva lämmön nousu ja maksimilämpötila. Lopuksi määritetään näytteen vesipitoisuus, jolloin saadaan selville, kuinka paljon vesipitoisuus muuttuu reaktioiden vaikutuksesta. Testimenetelmä ei ole standardoitu.

2.6 Aktiivisen kalkin määrittäminen

Hiilidioksidittomaan tislattuun veteen sekoitetaan tutkittavaa materiaalia, minkä jälkeen näytteeseen lisätään kiehuvaa hiilidioksidittomaa vettä ja seos kuumennetaan levyllä, jotta kalkki hydratoituu. Kalkin hydraamisen jälkeen jäähtyneeseen liuokseen sekoitetaan sokeria. 10–20 minuutin reaktioajan jälkeen liuokseen lisätään fenoliftaleiini-indikaattoria. Liuos titrataan suolahapolla. Aktiivisen kalkin määrä lasketaan suolahapon kulutuksesta kemikaalien ja kalkin moolimassojen perusteella. Aktiivisen kalkin määrittäminen tehtiin standardin SFS 5188 mukaisesti.

2.7 Tiivistyskokeet

Tiivistyskokeet toteutettiin modifioituina Proctor-sullontoina (parannettua Proctor-koetta SFS-EN 1997-2 5.10 mukailleen, toteutuksessa erona vain madallettu tiivistystyömäärä, parannettu Proctor 5x25 iskua eli tiivistys viitenä kerroksena ja jokaiseen kerrokseen 25 Proctor-tiivistysvasaran iskua vs näissä tutkimuksissa modifioidussa Proctor-sullonnassa käytetty 5x10 iskua, joka on arvioitu tässä yhteydessä käytännön sovellutuksissa saavutettavissa olevaksi tiivistystyömääräksi). Tiivistys tehtiin käyttäen parannetussa Proctor-kokeessa käytettävää vasaraa ja muottia. Muotin halkaisija oli 102 mm ja korkeus 116 mm. Tiivistetty näyte punnitaan ja kuivataan. Yhden tiivistyksen perusteella voidaan laskea näytteen kuivairtotiheys ja vesipitoisuus. Useamman eri vesipitoisuustasolla toteutetun tiivistyksen tulosten perusteella voidaan piirtää kuvaaja tiivistyshetken vesipitoisuuden ja toteutuneen tiiveyden välisestä yhteydestä. Tehdyistä modifioiduista Proctor-sullonnoista muodostettujen kuvaajien avulla voidaan arvioida/määrittellä kunkin materiaaliseoksen tiivistämisen kannalta optimaalisen vesipitoisuuden tasoa ja siinä saavutettavissa olevaa kuivairtotiheyttä (Huom. nämä eivät ole sama asia kuin parannetun Proctor-kokeen perusteella määritettävä optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtotiheys).

2.8 Koekappaleiden valmistus ja säilytys

Materiaaliseoksista valmistettiin koekappaleita mm. vedenläpäisevyys-, puristuslujuus- ja routakokeita varten. Materiaaliseosten laskelmissa käytettiin materiaalien märkämassoja. Koekappaleita varten materiaaliseokset valmistettiin pääasiassa tiivistämisen kannalta optimaaliseksi arvioidussa vesipitoisuudessa, joka oli määritetty tiivistyskokeiden avulla. Mahdollisimman pienen vedenläpäisevyyden saavuttamiseksi testikappaleiden tiivistysvaiheessa käytettyä vesipitoisuutta korotettiin vielä 1 %-yksiköllä tiivistyskokeiden perusteella arvioidusta optimitasosta. Niillä seoksilla, joille ei tehty tiivistyskoesarjoja, sopiva vesipitoisuus arvioitiin. Runsaasti kuitusavea sisältäviä seoksia ei kuivattu, vaikka seosten vesipitoisuus kosteista lähtöaineista johtuen olikin korkeahko ja selvästi optimitason yläpuolella. Seosten valmistamisen jälkeen ne tiivistettiin noin tunnin kuluttua, paitsi lentotuhka A:ta sisältävät seokset hitaan reagoinnin vuoksi vasta seuraavana päivänä.

Pääosa koekappaleista tiivistettiin Proctor-vasaralla Proctor-muottiin viitenä kerroksena, kukin kerros 10 iskulla. Käytetty tiivistystyömäärä valittiin siten, että vastaava lopputulos on huolellista työtappaa käyttäen saavutettavissa myös todellisissa käyttötilanteissa. Routanousukokeita varten kappaleet tiivistettiin muottiin, jonka halkaisija oli 104 mm ja korkeus 100 mm. Tiivistys tehtiin 4 kerroksena siten, että saavutettu tiheys vastasi muita koekappaleita. Valmiit koekappaleet säilytettiin testien aloittamiseen saakka tiiviisiin muovipusseihin suljettuina huoneenlämpötilassa (n. +20 °C).

2.9 Vedenläpäisevyyskokeet

Materiaaliseosten (lujittumisaika 21 d) vedenläpäisevyyttä tutkittiin joustavaseinämäisen testilaitteiston avulla. Kokeessa testikappale asetetaan membraanikalvon sisälle kolmiakksiaaliseen paineeseen testiselliin. Testikappaleen läpi johdatetaan vettä alhaalta ylöspäin, ja kappaleen läpi virranneen veden määrä aikayksikössä mitataan. Vedenläpäisevyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$k = \frac{Q * L}{A * t * H}$$

jossa k= vedenläpäisevyys [m/s]; Q = testikappaleen läpi menneen veden tilavuus [m³]; L = testikappaleen korkeus [m]; A = testikappaleen poikkileikkauksen pinta-ala [m²]; t = aika [s]; H = hydraulinen paine-ero [m]. Vedenläpäisevyyskokeet (SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-11:fi) tehtiin vakio painekokeena.

2.10 1-akselialinen puristuslujuus

Vedenläpäisevyyskokeiden jälkeen koekappaleiden puristuslujuudet määritettiin 1-akselialisella puristuskokeella, pääosin 28 vuorokauden kuluttua kappaleiden valmistamisesta. Näissä testisarjoissa käytettiin samaa koekappaletta, joka oli jo ollut vedenläpäisytestissä. Puristukset tehtiin kuormitusnopeudella 1 mm/min. Lujuustuloksia ei korjattu muotokertoimella (mukailtu SFS 179-2 – CEN ISO/TS 17892-7:fi).

2.11 Routanousukokeet

Materiaalien routimisherkkyttä tutkittiin routanousukokeilla. Lujittumisajan (28 d) jälkeen koekappaleet asetettiin routakoelaitteiston selleihin ja aluksi niitä kuormitettiin 1 vuorokauden ajan 20 kPa pystykuormalla kyllästäen ne samalla vedellä. Tämän jälkeen, varsinaisen koevaiheen alussa, pystykuormitus laskettiin 3 kPa:iin ja vedenpinnat selleissä asetettiin hieman kappaleiden alapään yläpuolelle. Testin aikana kappaleiden yläosan jäädytyslämpötila oli -3°C samaan aikaan kun alaosat pidettiin sulina (+1-2°C). Koejärjestelyssä kappaleet pystyivät koko kokeen ajan imeämään vettä alaosastaan alapuolellaan olevan huokoskiven kautta eli testissä pyrittiin aiheuttamaan routimista ajatellen mahdollisimman edulliset olosuhteet. Testin aikana mitattiin kappaleiden lämpötilajakaumaa sekä routanousua. Mittausten perusteella voitiin laskea materiaalien routivuutta kuvaavat segregatiopotentiaalain arvot. Routanousuarvio segregatiopotentiaalista perustuu kirjallisuuslähteeseen Konrad: Frost Heave Mechanics, Ph.D.Thesis, University of Alberta 1980.

2.12 Liukoisuustestit

Käytetyt kolonnit olivat halkaisijaltaan 50 tai 100 mm ja pituudeltaan 280 mm. Verrattuna tilanteeseen maastossa, kolonnissa materiaalit pakattiin päinvastoin alhaalta ylöspäin, eli siten että vedenvirtaussuunta kerrosten läpi on sama luonnossa ja kolonnissa. Kolonnitestissä tutkittavan näytemateriaalin läpi virtaa ionivaihdettu vesi, josta analysoidaan liuenneet aineet. Veden läpivirtausnopeus määräytyy kolonnin koon perusteella. Kolonnitestit suoritettiin standardin CEN/TS 14405 (Jätteiden karakterisointi. Liukoisuustestit. Läpivirtaustesti ylöspäin (määritellyissä olosuhteissa)) mukaisesti.

2.13 Suotautumiskokeet

Koejärjestelyssä tiettyyn fraktioon murskatun materiaalin läpi pumpataan vettä (suunnitellun testikohteen ojavesi) kolonnitestilaitteistolla (alhaalta ylöspäin) virtausnopeudella <1 l/h. Kolonnin yläosasta ulostulevasta vedestä kerätään 0,5-1,0 litran fraktioita, josta mitataan pH, sähkönjohtavuus ja redox-potentiaali.

3. TUTKIMUKSISSA KÄYTETYT LÄHTÖMATERIAALIT

Tutkimuksissa oli mukana hyvin erityyppisiä tuhkamateriaaleja useilta eri toimittajilta ja erilaisista polttoprosesseista. Näytteet olivat kuivia tuhkia sekä kasavarastoituja kosteita tuhkia, joiden sisältämä veden määrä, polttoprosessi (polttoainelaatu, -jakauma ja polttotapa) sekä varastointiaika vaihtelivat, joten myös tuhkien lähtöominaisuudet ja sitä kautta niiden avulla rakenteissa saavutettavat ominaisuudet vaihtelivat merkittävästi. Tutkimuksissa käytettyjen tuhkamateriaalien tuottajat olivat Alholhmens Kraft, Stora Enso Oulu, Oulun Energia, Äänevoima, Pohjolan Voima, Laanilan Voima, Kanteleen Voima ja Mäntän Energia.

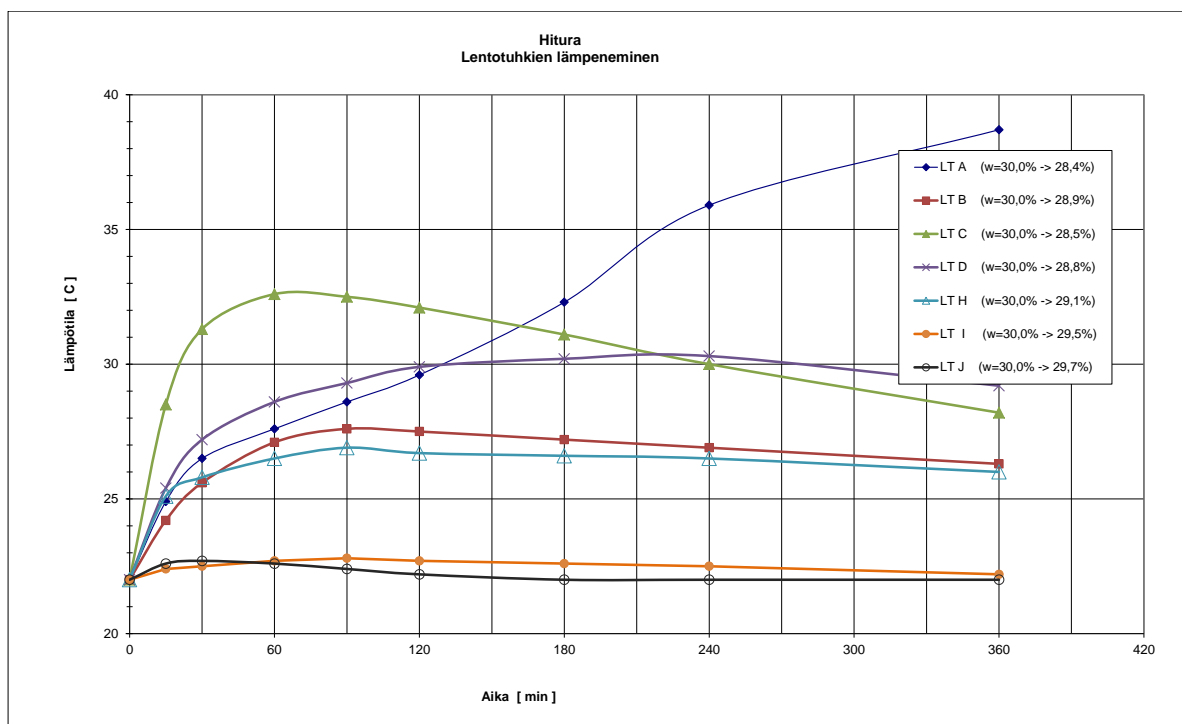
Kuitusavi on kuitu- ja täyteainepitoista lietettä, jota muodostuu sivutuotteena massa- ja paperiteollisuudessa. Tutkimuksissa käytetyt kuitusavinäytteet olivat peräisin Metsä Tissuelta Mäntästä, Stora Enso Oyj:ltä Oulusta, Metsä Board Oyj:ltä Äänekoskelta ja SCA:lta Nokialta (nykyään Essity Finland Nokia).

Valimohiekat ja -pölyt ovat metalliteollisuuden sivutuotteita, jotka koostuvat pääosin kvartsihiekaista. Tutkimuksissa käytetyt bentoniittipitoiset hiekat olivat peräisin Componenta Finland Oy:ltä Porista ja Componenta Castings Oy:ltä Karkkilasta.

Tutkimuksissa oli mukana Yaran toimittamaa kipsiä ja biotiittiä. Kipsi muodostuu fosforituotannon sivutuotteena. Biotiitti on hidasliukoinen maanparannusaine, joka koostuu kaliumista, magnesiumista ja kalsiumista.

Outokummun Tornion terästehtaalla valmistetaan teräskuonasta oheistuotteena OKTO-filleriä. OKTO-filleri valmistetaan teräskuonien tuotteistuksen hienoimmasta jakeesta, jonka raekoko on säädeltävissä.

Lisäksi tutkimuksissa käytettiin Finnsementti Oy:n Plussementtiä (PlusSe, CEM II/B-M (S-LL) 42,5N) sekä SMA Mineral Oy:n Kalkmix-kalkkia (myöhemmin 2-kalkki). Raportissa esitetyt tutkimusten lähtömateriaalit ja niiden luokitteluominaisuudet on esitetty taulukossa 1. Lisäksi kuvassa 1 on esitetty tutkimuksissa käytettyjen tuhkien lämpenemistestien tulokset. Lähtömateriaalien raakeisuuskäyrät ja Niton-mittausten (röntgenfluoresenssianalysaattori, jolla voidaan määrittää suuntaantavasti materiaalin alkuaineiden kokonaispitoisuuksia) tulokset on esitetty viiteraportin *Hitturan Life-hankkeeseen liittyvä materiaalitestaus tekniset ominaisuudet (2/2014)* liitteissä.



Kuva 1. Lentotuhkien lämpeneminen.

Lämpenemistitulosten perusteella (kuva 1):

- Lentotuhkat I ja J eivät kostutuksen jälkeen reagoineet ja lämmenneet käytännössä lainkaan.
- Lentotuhkat B, D ja H lämpenivät jonkin verran.
- Tuhka C lämpeni selvästi nopeimmin verrattuna muihin tuhkalatuuihin.
- Lentotuhka A reagoi ja lämpeni voimakkaimmin, mutta hitaasti, useiden tuntien aikana.

Lämpenemistestien perusteella tuhkien reaktiivisuudessa esiintyi suhteellisen selviä eroja, jotka voivat vaikuttaa niiden hyödyntämisominaisuuksiin. Erot on syytä huomioida tuhkien käyttöä suunniteltaessa. Reagointi korreloi normaalitilanteessa suhteellisen hyvin käytettävän tuhkan lujittumispotentiaalin kanssa eli mitä voimakkaampaa lämmönmuodostus on, sitä enemmän lujuuskehitystä todennäköisesti tapahtuu. Näin erityisesti silloin, kun tuhkaa käytetään pienehkö määrä seoskomponenttina. Toisaalta voimakas reagointi voi joissakin tapauksissa jopa heikentää lopputulosta (erityisesti massiivirakenteena käytettäessä, ei niinkään seoskomponenttina), mikäli asiaa ei huomioida ja materiaali tiivistetään rakenteeseen liian pian veden lisäämisen jälkeen.

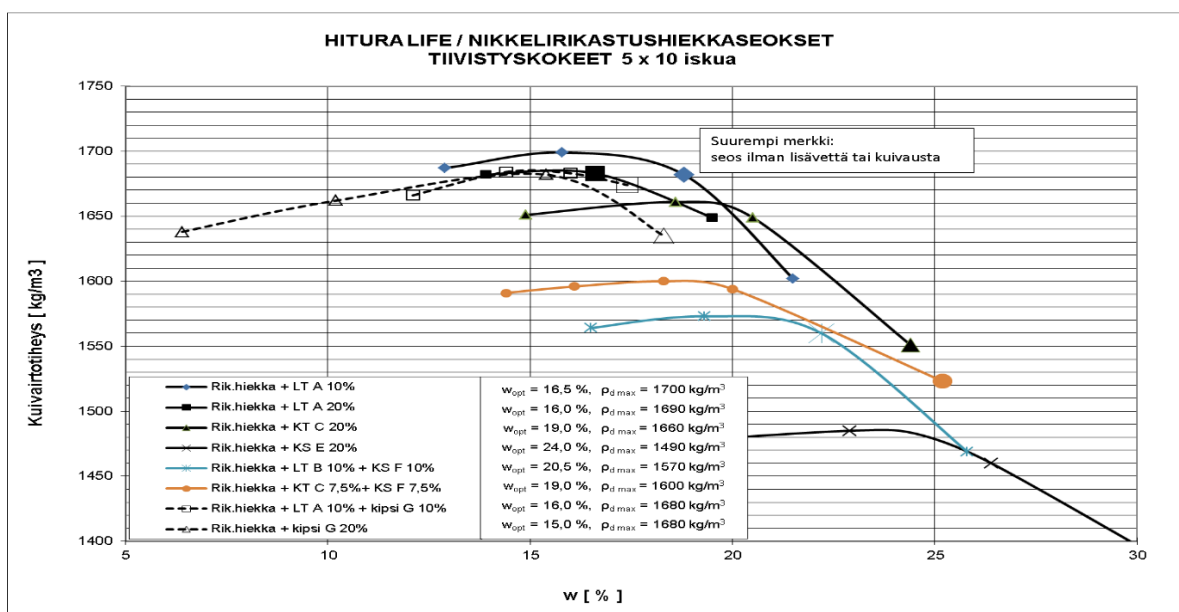
Tutkimuksissa käytettyjen tuhkien ominaisuudet vaihtelivat suuresti. Vesipitoisuuksien vaihteluväli oli kasatuhkilla 12,7...83,4 % ja lentotuhkilla 0...7 %. Hehkutushäviöiden vaihteluväli oli kasatuhkilla 1,8...8,7 % ja lentotuhkilla 0...4,3 %. Lisäksi tuhkien pH:t vaihtelivat välillä 9,1-12,9. Laatuominaisuuksien suuret vaihtelut vaikuttavat materiaalien hyödynnettävyyteen. Oleellista onkin materiaalien laatuominaisuus ja materiaalien mahdollisten laatuvihtelujen vaikutus rakenteissa saavutettiin ominaisuuksiin.

4. MATERIAALITESTAUKSEN ENSIMMÄINEN VAIHE

Materiaalitestauksen ensimmäisessä vaiheessa on painotettu Hituran kaivosalueelle suunniteltuja rakenteita ajatellen keskeisimpiä osa-alueita, jotka olivat vedenläpäisevyys, lujuusominaisuudet sekä materiaalien käsiteltävyys (tiivistyskoe). Tutkimuksilla tuotettiin tietoa materiaalien laadusta ja erityisesti materiaalien keskinäisistä eroista testauksen jatkovaiheessa toteutettavaksi kaavailtujen potentiaalisimpien ratkaisuvaihtoehtojen optimointivaiheen tueksi. Tutkimuksissa käytettiin runkoaineina kaivosalueelta valmiina löytyviä nikkelikastushiekkoja ja moreenia, joiden hyödyntämismahdollisuuksia testattiin ajatellen alueelle suunniteltuja peitto- ja tiivisrakenteita. Lisäksi tutkittiin koerikastuksesta muodostuneen kultarikastushiekan ominaisuuksia lähinnä teknisen testauksen rinnalla käynnissä olevien ympäristötutkimusten tueksi. Materiaalitestauksessa tutkittiin myös useita muualta Hituran alueelle tuotavia sivutuotemateriaaleja ja niiden käyttökelpoisuutta suunnitelluissa massiivirakenteissa. Tutkimuksissa massojen tiivistysominaisuuksien kannalta sopivaa vesipitoisuustasoa tutkittiin niin, että massoja ei kuivattu missään tilanteessa, koska sitä on erittäin hankala toteuttaa hallitusti käytännön rakentamistyössä. Seuraavassa on esitetty keskeisimmät tulokset ensimmäisen vaiheen materiaalitestauksesta. Lisää ensimmäisen vaiheen testituloksia ja niiden analysointia on raportissa *Hituran Life-hankkeeseen liittyvä materiaalitestaus: tekniset ominaisuudet 2/2014*.

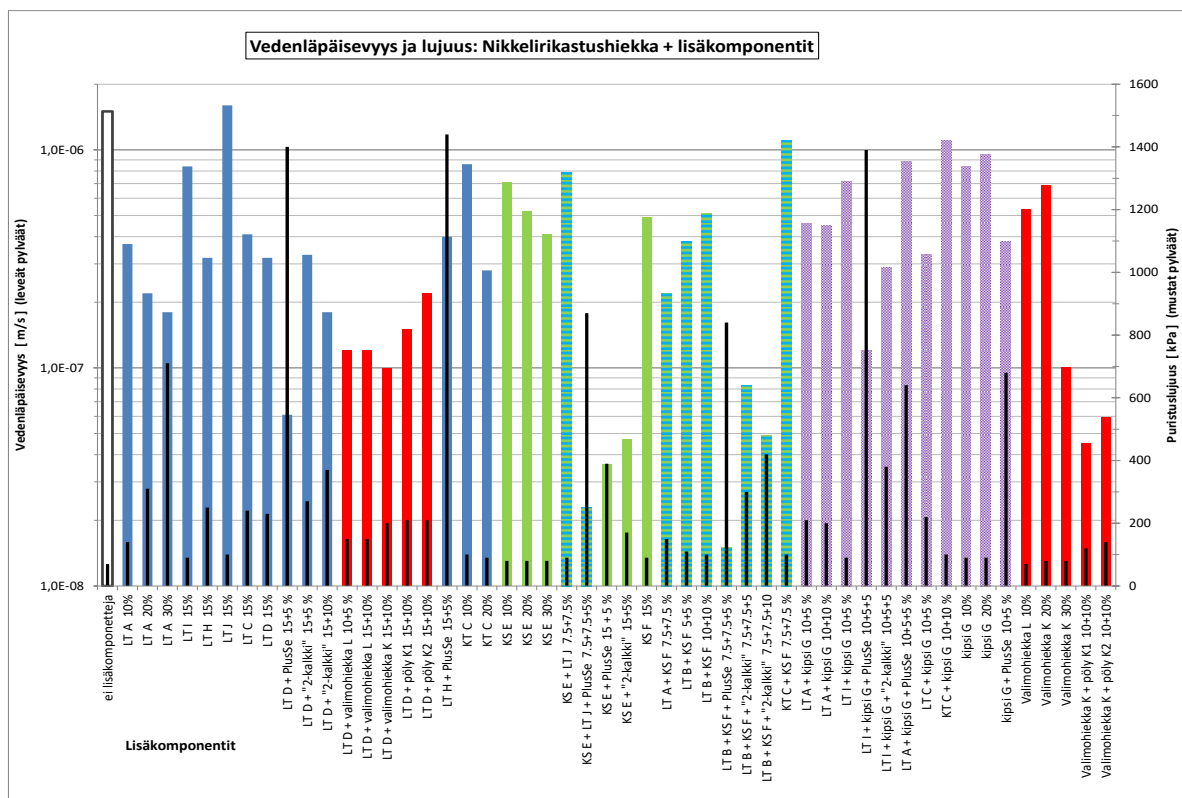
4.1 Nikkelirikastushiekka runkoaineena

Teknisten tutkimusten tavoitteena oli nikkelikastushiekan osalta testata materiaalin jalostamiseen soveltuvia lisäkomponentteja, joilla voidaan pienentää materiaalin vedenläpäisevyyttä ja vaikuttaa sen lujuusominaisuuksiin. Runkoaineena käytettiin kuuden Hituran varastoaltailta otetun nikkelikastushiekan näytteen seosta, jossa oli kutakin näytettä märkämässana punnittuna yhtä paljon. Runkoaineeseen seostettiin mm. erilaisia tuhkia, valimoteollisuuden sivutuotteita, kuitusavia sekä kipsiä. Seostettavien komponenttien määrä pyrittiin valitsemaan siten, että lisäyksellä olisi selkeä vaikutus mitattaviin ominaisuuksiin, mutta samalla määrä ei olisi materiaalin saatavuutta tai muodostuvia kustannuksia ajatellen liian suuri. Seoksissa käytettyjen lisäkomponenttien määrät olivat 10-30 % nikkelikastushiekan märkämässana.



Kuva 2. Nikkelirikastushiekkaseosten tiivistyskokeiden kuvaajat

Tiivistyskokeilla pyrittiin löytämään eri seosten tiivistämisen kannalta optimaalinen vesipitoisuus-alue ja samalla saatiin yleiskäsitys tutkittujen vaihtoehtojen toteutuvasta tiheystasosta rakenteessa sekä tietoa seosten käsiteltävyydestä. Sullontasarjojen perusteella valittiin eri testejä varten valmistettavissa koekappaleissa käytettävä materiaali-kohtainen tiivistysvesipitoisuus. Tiivistyskokeiden tulokset on esitetty kuvassa 2, jossa lähtömateriaaleilla alkuperäisessä vesipitoisuudessa sullottaessa toteutuva vesipitoisuus on eroteltu käyrillä suurikokoisemmilla merkeillä.



Kuva 3. Nikkelirikastushiekkaseosten vedenläpäisevyys- (leveät pylväät/vasen asteikko) ja lujuus-testien tulokset (mustat pylväät/oikea asteikko).

Nikkelirikastushiekan vedenläpäisevyys sellaisenaan tiivistettynä (kuva 3, valkoinen pylväs) on hiekan tasoa 1×10^{-6} m/s suurempi ja nikkelirikastushiekasta muodostetun koekappaleen puristuslujuus noin 70 kPa. Tutkimustulosten perusteella käytettäessä nikkelirikastushiekkaa runkoaineena on sekä materiaalin vedenläpäisevyyteen että lujuusominaisuuksiin mahdollista vaikuttaa positiivisesti käyttämällä erilaisia seoskomponentteja.

Vedenläpäisevyys saadaan suhteellisen monia vaihtoehtoja käyttäen noin tasolle 1×10^{-7} m/s ja samalla vaikutetaan positiivisesti myös lujuuteen. Seosaineena pelkästään tuhkaa sisältävien seosten vedenläpäisevyydet (kuva 3, siniset pylväät) ovat välillä 2×10^{-7} ... 1×10^{-6} m/s. Sementin käyttö (LT D + PlusSe 15+5 %) vaikuttaisi pienentävän läpäisevyyttä selvästi ja testatussa tapauksessa päästiin jo selvästi alle tason 1×10^{-7} m/s. Myös läpäisytaaso $2 \dots 4 \times 10^{-8}$ m/s on saavutettavissa testattuja ratkaisutyyppisiä käyttäen, mutta tällöin on käytettävissä jo selvästi pienempi määrä vaihtoehtoja, ja useimmissa tapauksissa tarvitaan seosaineen lisäksi myös sideainetta.

Tuhkaseosten lujuudet vaihtelivat laajasti alle 100 kPa:sta noin 1400 kPa:iin. Selvästi lujimpia olivat odotetusti sementtiä tuhkan lisäksi sisältävät seokset, 2-kalkki lisäksi lujuutta huomattavasti

vähemmän. Lentotuhkalla A testattu tuhkamäärän vaikutus lujuuteen oli huomattava (tutkituilla määrillä tuhkamäärän kasvattaminen 10 %-yksiköllä kaksinkertaistaa lujuustason).

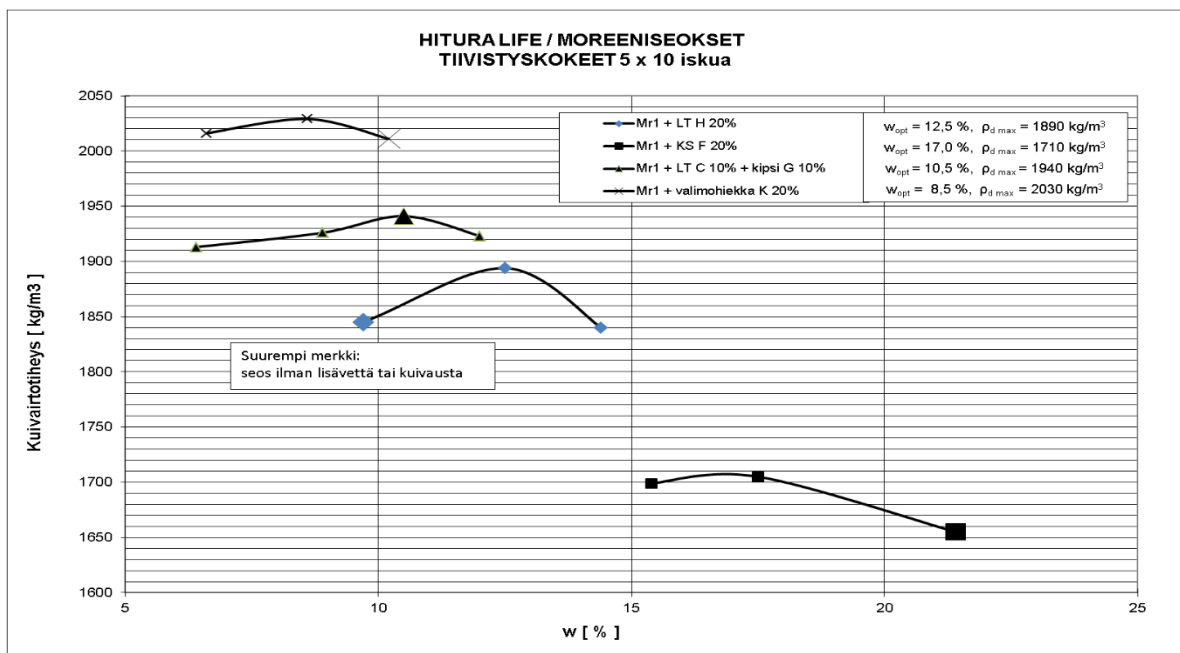
Nikkelirikastushiekan seosaineena valimohiekkaa ja valimohiekkaa+tuhkaa käytettäessä saavutettiin tutkimuksissa läpäisevyystaso 1×10^{-7} ... 1×10^{-6} m/s, johon valimohiekan laadulla ei ollut tutkimuksissa tapauksissa suurta vaikutusta. Kun seoksessa käytettävästä valimohiekasta korvattiin puolet valimopölyllä, pieneni läpäisevyys selvästi ollen välillä 1×10^{-8} ... 1×10^{-7} m/s. Valimohiekoja ja -pölyjä sisältävien seosten lujuudet olivat suuruusluokkaa 70–200 kPa.

Seosaineena pelkkää kuitusavea sisältävien seosten läpäisevyys (kuva 3, vihreät pylväät) oli hiekan yli 1×10^{-7} m/s tasoa. Läpäisevyyteen kuitusaven määrällä tai laadulla oli vain vähän vaikutusta (tutkituilla määrillä kuitusavimäärän kasvattaminen 10 %-yksiköllä pienentää läpi menevän veden määrää 20-30 %). Sementin tai 2-kalkin lisäyksellä nikkelirikastushiekka-kuitusavi -seosten vedenläpäisevyys laski noin kymmenesosaan ($2 \dots 5 \times 10^{-8}$ m/s). Tuhka+kuitusavi -seosten lujuudet vaihtelivat runsaasti käyttömäärästä ja sideaineen käytöstä riippuen. 2-kalkki lisäsi lujuutta, mutta selkeästi suurimman lujuustason saavutti sementtiä sisältävä seos. Käytettäessä pelkkää kuitusavea seosaineena lujuustasot olivat < 100 kPa, 2-kalkin kanssa noin 200 kPa ja sementin kanssa noin 400 kPa. Ilman sideaineen käyttöä saavutettiin noin 100 kPa puristuslujuustaso.

Tutkimusten perusteella lujuusominaisuudet eivät todennäköisesti muodostu nikkelirikastushiekka-seosten käyttöä rajoittavaksi tekijäksi allasalueen pintatiivisrakenteissa, vaan ratkaisuvaihtoehtojen teknisen käyttöpotentiaalin ja keskinäisen vertailun lähtökohdaksi muodostuu todennäköisemmin saavutettava/vaadittava vedenläpäisevyystaso. Tutkimuksen ensimmäisen vaiheen yhteydessä kipsiseoksia käyttäen saadut tulokset eivät olleet kovinkaan hyviä läpäisevyyksien osalta (4×10^{-7} ... 1×10^{-6} m/s). Kipsin käytön osalta on kuitenkin mahdollista, että käyttömäärän kasvattaminen ensimmäisessä vaiheessa tutkitusta johtaa parempaan lopputulokseen. Routanousukokeiden perusteella sellaisenaan routimattoman nikkelirikastushiekan lisäkomponenttien myötä hienoainespitoisuus kasvaa, mikä johtaa tutkittujen viiden seoksen lievää routimiseen (routivuustulokset on esitetty liitteessä 1). Testattujen seosten keskinäiset erot olivat routivuuden suhteen käytännössä vähäisiä.

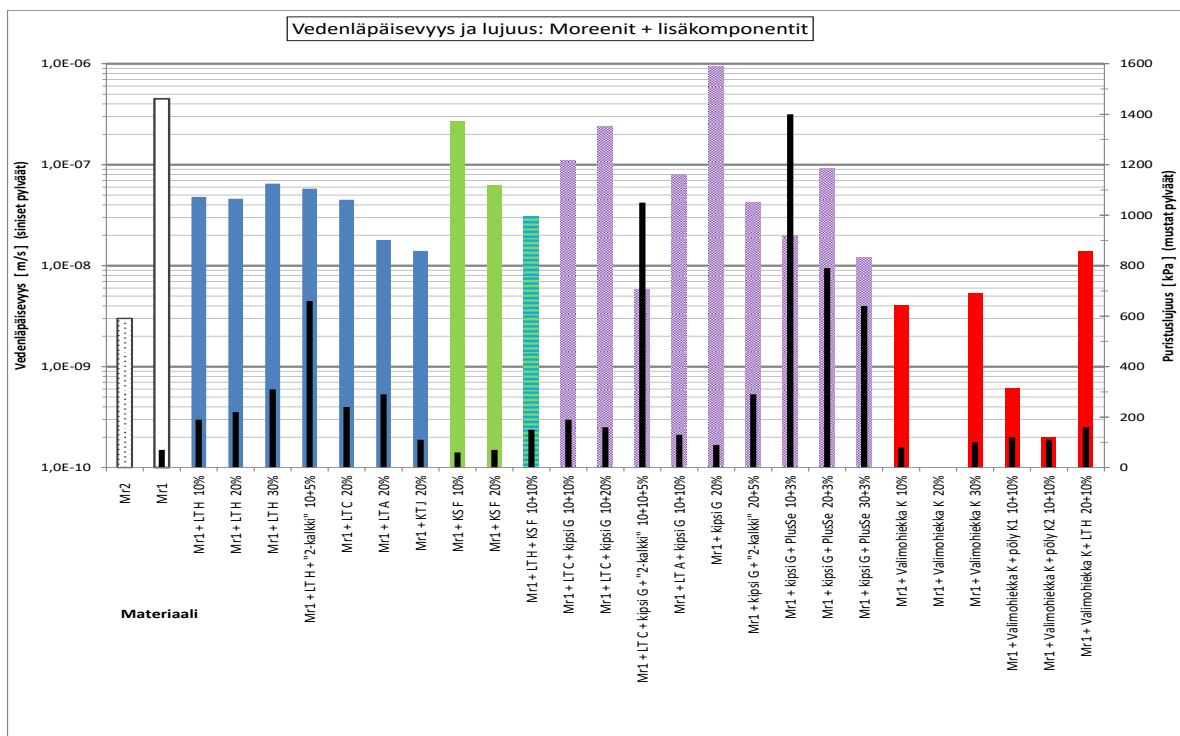
4.2 Moreeni runkoaineena

Hituran kaivosalueella sijaitsevien moreenien mahdollista hyödyntämistä suunniteltujen uusien altaiden tiivisrakenteissa sekä vanhojen altaiden peittorakenteissa tutkittiin myös ensimmäisen vaiheen teknisissä laboratoriotutkimuksissa. Moreenin laatu vaihtelee alueella hienoainespitoisuuden ja vedenläpäisevyyden suhteen suuresti, jolloin materiaalia tutkittiin alueelle varmemmin toteutettavan altaan läheisyydestä otetulla näytteellä (moreeninäyte 1). Lisäksi moreenia 1 olisi kaivosalueella käytettävissä runsaasti. Runkomateriaalin valintaan vaikutti myös läpäisevämmän materiaalin suurempi jalostustarve.



Kuva 4. Moreeniseosten tiivistyskokeiden kuvaajat.

Moreeniseosten tiivistysvesipitoisuus valittiin madallettua tiivistymäärää käyttäen tehtyjen ns. ”modifioitujen Pr-sullontojen” perusteella. Mahdollisimman hyvän vedenläpäisevyytuloksen saavuttamiseksi testikkapaleiden tiivistysvaiheessa käytettyä vesipitoisuutta korotettiin vielä 1 %-yksiköllä tiivistyskokeiden perusteella arvioidusta optimitasosta. Lisätietoa seosten alkuperäisen vesipitoisuuden suhteesta optimaaliseen vesipitoisuustasoonsa on nähtävissä kuvassa 4 esitetyistä tiivistyskokeiden (modifioidut Proctor-sullonnot) tulokäyristä, joissa kunkin testatun seoksen alkuperäisessä vesipitoisuudessa tiivistetty näyte on esitetty suurikokoisemmalla merkillä.



Kuva 5. Moreeniseosten vedenläpäisevyys- (leveät pylvää/vasen asteikko) ja lujuustestien tulokset (mustat pylvää/oikea asteikko).

Kuvasta 5 nähdään, että moreeni 2 on sellaisenaan melko tiivistä (3×10^{-9} m/s, valkoinen pylväs mustilla pisteillä) ja siihen verrattuna moreeni 1 (4×10^{-7} m/s, valkoinen pylväs) läpäisee vettä noin 140-kertaisesti.

Ainakin läpäisevämpien moreenilaatujen vedenläpäisyominaisuuksien (ja lujuusominaisuuksien) parantaminen on mahdollista pelkkää tuhkaa moreeniin seostamalla. Tuhkaa käyttäen päästään todennäköisesti myös läpäisevämmillä moreeneilla lähelle vedenläpäisytaasoja 10^{-8} m/s (siniset pylväät). Puristuslujuudet vaihtelivat kasatuhkaa sisältävän seoksen 110 kPa:sta myös 2-kalkkia sisältävän seoksen 670 kPa:iin.

Valimohiekkaa ja -pölyjä sisältävät seokset olivat moreenia jalostettaessa testatuista lisäkomponenteista tiiveimpiä: läpäisevyydet olivat pääosin $< 5 \times 10^{-9}$ m/s tasoa ja erityisesti valimohiekka + pöly -seosten läpäisevyys oli erittäin matala ($< 1 \times 10^{-9}$ m/s) (kuva 5, punaiset pylväät). Sen sijaan valimohiekka-tuhka seoksen käyttäminen moreenin jalostamisessa ei johtanut toivottuun tulokseen vedenläpäisevyyden pienenemisen osalta. Kokonaisuutta arvioitaessa on pohdittava mahdollisuutta optimoida valimohiekkojen ja -pölyjen käyttö määrää alaspäin, sillä materiaalin saatavuus rajoittaa sen käyttöä. Lisäksi tutkimusten seuraavassa vaiheessa runkomateriaalina tulisi käyttää myös läpäisyominaisuuksiltaan parempilaatuista (=tiiviimpää) moreenia.

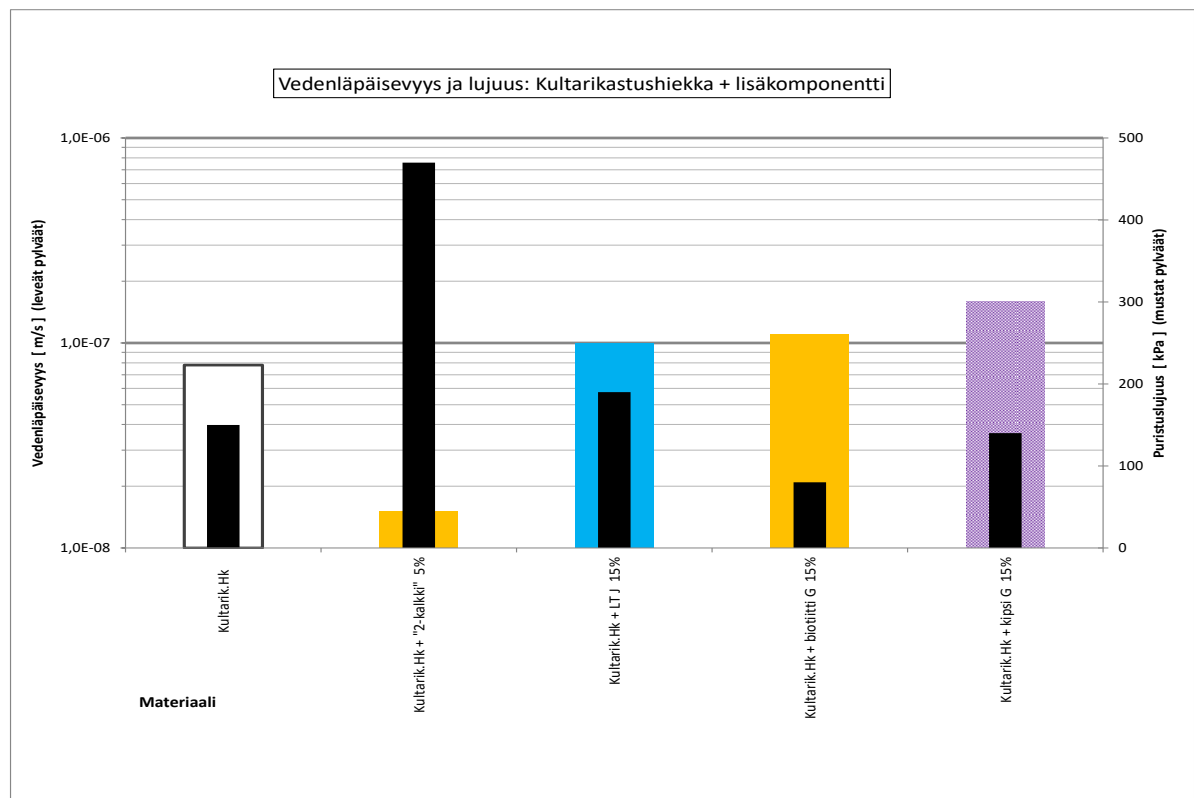
Kuitusaven kanssa seostettuna moreenin läpäisevyydet (kuva 5, vihreät pylväät) olivat käytetyillä kuitusavi-määrillä 1×10^{-7} m/s molemmiin puolin, ja puristuslujuudet < 100 kPa. Kuitusavea ja tuhkaa sisältävän seoksen läpäisevyys (sinivihreä pylväs) oli hieman pelkän kuitusaven käyttämistä matalammalla tasolla noin 3×10^{-9} m/s.

Pelkän kipsin lisääminen moreeniin ei vaikuta juurikaan läpäisevyyteen, mutta kaupallisten sideainesten kanssa seostettuna myös kipsiä käyttäen on mahdollista pienentää moreenin läpäisevyyttä. Kipsiä sisältävien seosten vedenläpäisevyys (kuva 5, violetit pylväät) vaihteli laajasti, enimmäkseen välillä 1×10^{-8} ... 1×10^{-6} m/s. Käytettäessä kipsiä tuhkan kanssa kombinoituna läpäisevyys jopa kasvaa pelkän tuhkan käyttöön verrattuna. Lisättäessä moreeniin 2-kalkkia tuhkan ja kipsin kanssa samanaikaisesti, muuttui tilanne ainakin testatussa yksittäistapauksessa ratkaisevasti ja vedenläpäisevyys laski selvästi $< 1 \times 10^{-8}$ m/s eli selkeästi matalammalle tasolle kuin pelkästään tuhkaa tai tuhka-kipsi -seosta lisäkomponenttina käytettäessä. Kipsiratkaisujen puristuslujuudet vaihtelivat hyvin laajasti alle sadasta yli 1000 kPa:iin ja suurimmat lujuudet saavutettiin käyttämällä seoksissa sementtiä tai kalkkia.

Tavoiteltavasta vedenläpäisytaasosta riippuen tiivisrakennekerroksen rakentaminen voisi ainakin tietyissä tilanteissa olla mahdollista jopa pelkkää moreenia käyttäen, mutta laadultaan paremmin vettä läpäisevän moreenin käyttö runkomateriaalina ja/tai erittäin tiiviiden rakenteiden muodostaminen edellyttää joka tapauksessa jalostamista erilaisia lisäkomponentteja käyttäen. Tiiviimpien rakenteiden muodostamiseksi on joko käytettävä tehokkaammin moreenin läpäisyominaisuuksiin vaikuttavia lisäkomponentteja tai pyrittävä käyttämään laadukkaampaa moreenia runkomateriaalina. Ensin mainitussa tapauksessa kyseeseen tulevia lisäkomponenttivaihtoehtoja olivat ensimmäisen vaiheen testauksien perusteella ainakin tuhka-kipsi-kalkki-seokset sekä valimohiekkoja ja -pölyjä sisältävät ratkaisut. Moreenien käyttökelpoisuuteen allasrakenteissa vaikuttavat myös niiden lujuusominaisuudet.

4.3 Kultarikastushiekka runkoaineena

Materiaalitestauksen ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin myös Belvederen toimittamaa koerikas-tuksessa muodostunutta kultarikastushiekkaa. Kultarikastushiekan osalta ensimmäisen vaiheen tutkimuksissa selvitettiin kultarikastushiekan läjittämismahdollisuuksia vanhalle allasalueelle sinne jo varastoidun nikkeliirikastushiekan päälle. Tutkimusten tavoitteena oli tuottaa tietoa päällekkäin läjitettyjen rikastushiekkojen käyttäytymisestä sekä tällä tavoin toteutetun läjityksen vaikutuk-sesta suotovesiin. Materiaalien läpäisyominaisuuksien lisäksi lisäkomponenteilla voidaan pyrkiä vaikuttamaan myös materiaalin pH-tasoon.

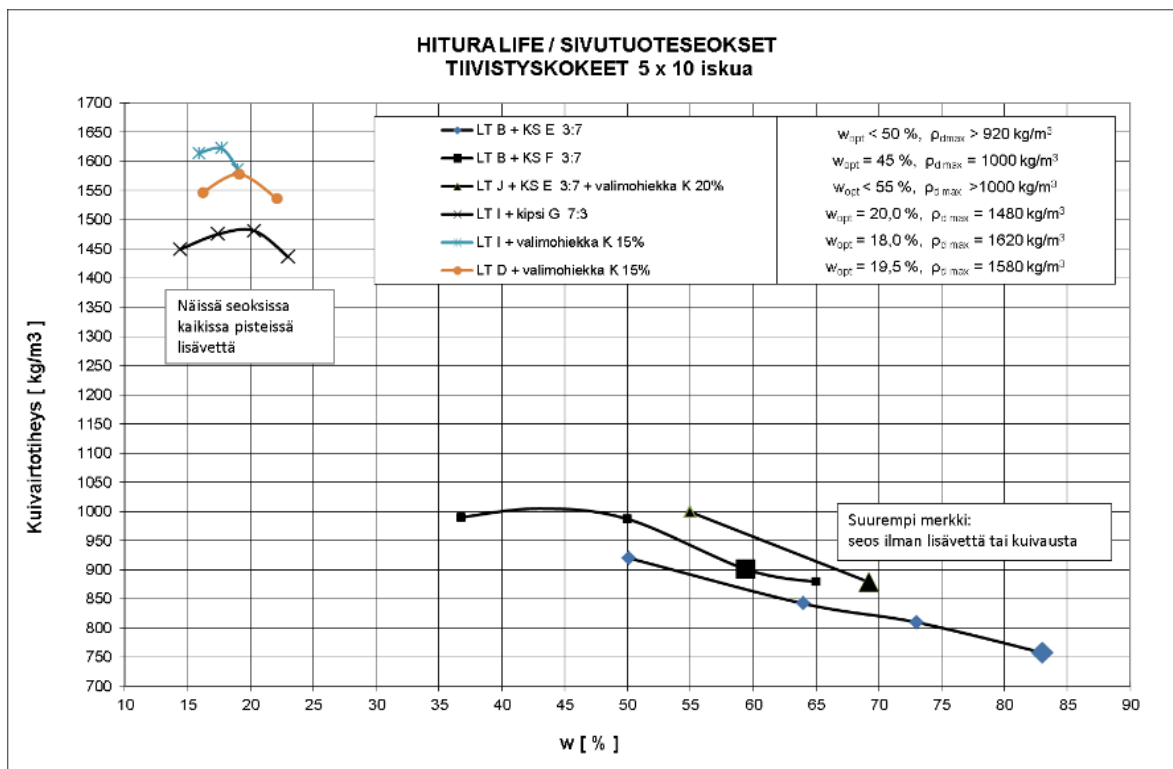


Kuva 6. Kultarikastushiekan vedenläpäisevyys- (leveät pylväät/vasen asteikko) ja lujuustestien tulokset (mustat pylväät/oikea asteikko).

Kultarikastushiekan vedenläpäisevyys ilman lisäkomponentteja on hieman $< 1 \times 10^{-7}$ m/s ja vastaava puristuslujuus 150 kPa. Kuvasta 6 on nähtävissä, että lentotuhkan, biotiitin tai kipsin lisääminen kultarikastushiekkaan (testeissä lisättävä määrä oli 15 % kultarikastushiekan massasta) ei merkittävästi vaikuttanut materiaalin läpäisevyyteen, joka oli myös näissä tapauksissa noin 1×10^{-7} m/s. Myös puristuslujuus oli näillä seoksilla samassa suuruusluokassa eli 80-190 kPa. 2-kalkin käyttö vaikutti huomattavasti sekä kultarikastushiekan vedenläpäisevyyteen että lujuusominaisuuksiin: 5 % määrä pudotti vedenläpäisevyyden viidesosaan alkuperäisestä lähelle tasoa 1×10^{-8} m/s ja samalla puristuslujuus kasvoi > 400 kPa:iin (kolminkertaistui).

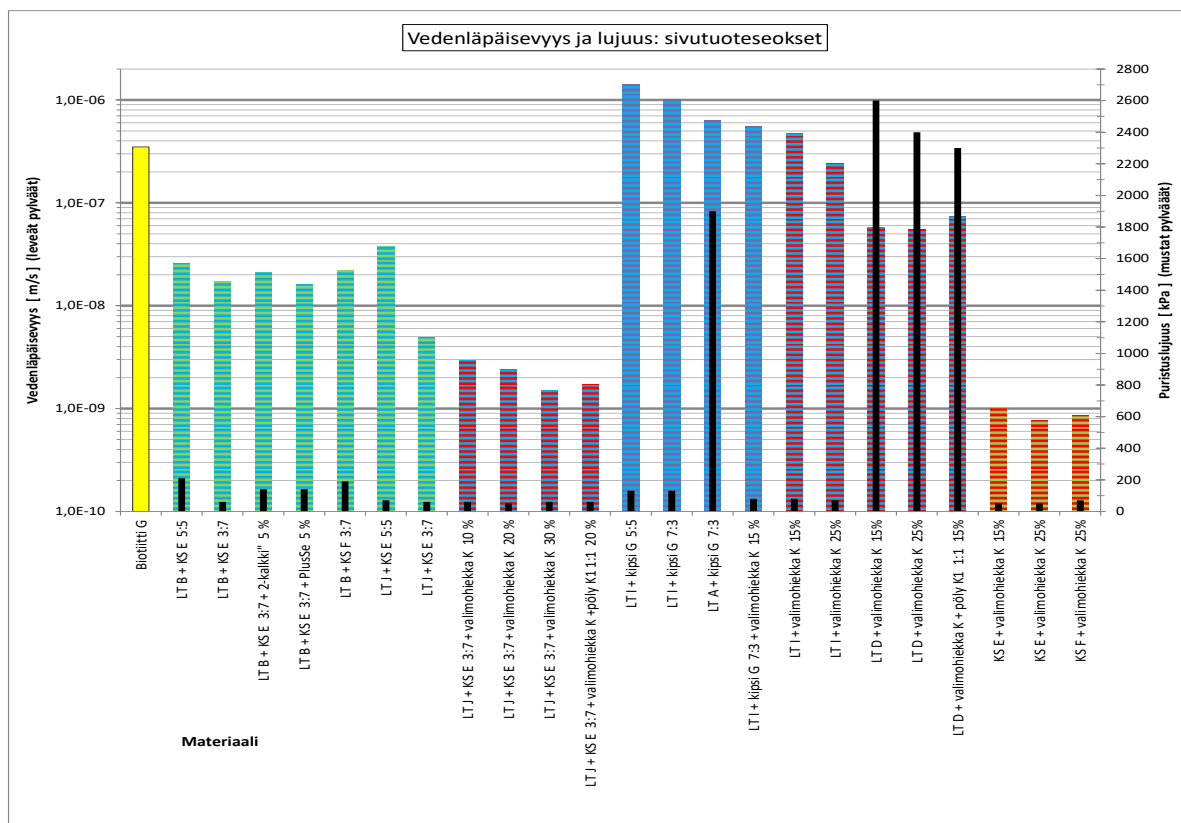
4.4 Sivutuoteseokset

Sivutuotemateriaalien käyttö massiivirakenteissa on teknisten ominaisuuksien puolesta mahdollista, mutta massiivirakenteissa suurten massamäärien ympäristökuormitus, kuljetuskustannukset sekä materiaalien saatavuus on huomioitava materiaalien käyttökelpoisuutta arvioitaessa.



Kuva 7. Sivutuoteseosten tiivistyskokeiden kuvaajat.

Massojen tiivistystestauksella (kuva 7) selvitetiin erityisesti massojen tiivistämisen kannalta sopivaa vesipitoisuustasoa sekä arvioitiin materiaalien käsiteltävyyttä.



Kuva 8. Sivutuoteseosten vedenläpäisevyys- (leveät pylväät/vasen asteikko) ja lujuustestien tulokset (mustat pylväät/oikea asteikko).

Useilla sivutuotemateriaalivaihtoehdoilla voidaan saavuttaa noin 1×10^{-8} m/s vedenläpäisyvaatimuksen täyttävä rakenne. Sen sijaan taso 1×10^{-9} m/s saavutettiin testeissä ainoastaan valimohiekkaa tai -pölyjä osakomponenttina käyttäen.

Biotiitin vedenläpäisevyys sellaisenaan (kuva 8, keltainen pylväs) oli $> 1 \times 10^{-7}$ m/s. Läpäisytaaso on suhteellisen korkea tiivisrakennesovellutuksia ajatellen ja materiaalin käyttö tuleekin kysymykseen lähinnä vain niissä tapauksissa, joissa sillä katsotaan olevan selvästi positiivista vaikutusta ympäristöllisiin ominaisuuksiin.

Lentotuhka+kuitusavi -seosten (=kuitutuhka) vedenläpäisevyys ilman muita lisäkomponentteja (kuva 8, sinivihreät pylväät) vaihtelee 1×10^{-8} m/s molemmin puolin. Sementin tai 2-kalkin lisääminen ei vaikuttanut tulokseen juuri lainkaan. Lujuudet vaihtelevat välillä 60-210 kPa. Testeissä seoksessa käytetyn tuhkan laatu vaikutti lopputulokseen käytetyn kuitusaven laatua voimakkaammin.

Valimohiekan lisääminen kuitutuhkaseokseen pienentää läpäisevyyttä (kuva 8, sinipunaiset vasemmanpuoleiset 4 pylvästä) ja testatussa yksittäistapauksessa (LT J + KS E 3:7) päästiin jopa lähelle tasoa 1×10^{-9} m/s. Valimohiekan määrän kasvattamisella saavutettava lisähyöty on pienehkö määrän noustessa 10 % yläpuolelle. Lujuus näillä seoksilla oli 50–60 kPa. Saavutettavat ominaisuudet riippuvat huomattavasti myös seoksessa käytettävän tuhkan laadusta: testatussa tilanteessa käytetty tuhka oli laadultaan, kuitutuhkaseosten läpäisevyyttä ajatellen, selvästi tuhkien keskiarvotasoa parempaa eli esitetyn kaltainen läpäisytaaso ei todennäköisesti ole saavutettavissa kaikkia tuhkalaatuja käyttäen.

Kaikkien testattujen kipsiä sisältävien sivutuoteseosten läpäisevyys oli $> 1 \times 10^{-7}$ m/s (kuva 8, sinivioletit pylväät) eli käyttö Hiturassa ei ole tältä osin perusteltua ainakaan pelkästään saavutettavien teknisten ominaisuuksien perusteella.

Tuhkan ja valimohiekan/-pölyn seosten läpäisevyys (kuva 8, sinipunaiset oikeanpuoleiset pylväät) vaihteli 1×10^{-7} m/s molemmin puolin, ja lujuudet olivat tuhkalaadusta riippuen laajalla välillä 70–2600 kPa.

Kuitusaven ja valimohiekan seokset (kuva 8, punavihreät pylväät) olivat testatuista vaihtoehdosta selvästi tiiveimpiä: läpäisevyyskertoimet olivat noin 1×10^{-9} m/s. Puristuskokeessa nämä kappaleet eivät saavuttaneet murtopistettä ja murtuneet vaan ne käyttäytyivät myötä lujittuvasti (15 % kokoon puristumaa vastaava puristusjännitys oli 50–70 kPa). Valimohiekan määrä vaikutti jonkin verran läpäisevyyteen, mutta ero käyttömäärien 15-25 % välillä ei kuitenkaan ollut kovin suuri. Myös kuitusaven laadun vaikutus oli testatuilla materiaaleilla vähäinen.

4.5 Ensimmäisen vaiheen potentiaalisimmat seokset

Tutkimuksissa parhaat tulokset lujuuden suhteen käyttäen runkoaineena nikkelirikastushiekkaa saatiin seostamalla siihen sementtiä ja tuhkaa. Jatkotutkimuksia ajatellen nikkelirikastushiekkaa runkoaineena sisältävien seosten käyttöä rajoittavat todennäköisesti vedenläpäisevyysominaisuudet, joista parhaimmat tulokset saatiin kuitusavi ja valimohiekka+valimopöly -seoksilla. Vastavasti moreenia 1 runkoaineena käyttäen parhaimmat tulokset vedenläpäisevyyden suhteen saatiin

valimohiekka+valimopöly -seoksilla. Vedenläpäisevyys- ja lujuusominaisuuksien parantaminen voitiin tehdä myös lisäämällä moreeniin 1 pelkkää tuhkaa. Yksittäistapauksessa moreeni+tuhka+kipsi+kalkki -seoksella päästiin niin vedenläpäisevyyden kuin puristuslujuuden osalta hyviin tuloksiin. Kultarikastushiekan lujuus- ja vedenläpäisevyydestä voitiin vaikuttaa positiivisesti seostamalla runkoaineeseen 2-kalkkia. Laboratoriotutkimusten ensimmäisen vaiheen tulosten perusteella potentiaalisimmat seokset on koottu taulukkoon 2.

Taulukko 2. Ensimmäisen vaiheen tutkimusten potentiaalisimmat seokset ja niiden vedenläpäisevyys- ja puristuslujuustulokset.

Runkoaine	Seoskomponentit	Vedenläpäisevyys (m/s)	Puristuslujuus kPa
Nikkelirikastushiekka	Lentotuhka+sementti (15+5 %)	$<10^{-7}$	≈ 1400
Nikkelirikastushiekka	Kuitusavi (10-30 %)	hieman $>1 \times 10^{-7}$	<100
Nikkelirikastushiekka	Valimohiekka+pöly (10 + 10 %)	$1 \times 10^{-8} \dots 1 \times 10^{-7}$	70–200
Moreeni 1	Valimohiekka+pöly (10+10 %)	$<1 \times 10^9$	100
Moreeni 1	Tuhka (10-30 % laatu- vaihtelua)	lähes 1×10^{-8}	100-300
Moreeni 1	Tuhka+kipsi+kalkki (10+10+5 %)	$< 1 \times 10^{-8}$	1000
Kultarikastushiekka	2-kalkki (5 %)	lähes 1×10^{-8}	>450

5. MATERIAALITESTAUKSEN TOINEN VAIHE

Materiaalitestauksen toiseen vaiheeseen valittiin tulevia käyttötarpeita ajatellen kiinnostavimmat ratkaisut tutkimusten ensimmäisessä vaiheessa tuotetun tiedon perusteella. Materiaalitestauksen lähtökohtana toisessa vaiheessa oli tehokas uusiomateriaaliratkaisujen käyttö Hituran kaivosalueella sekä pyrkimys, mahdollisuuksien mukaan, tarvittavien suojarakenteiden toteuttamiseen tietyissä tilanteissa jopa ilman tiivistyskalvojen käyttöä. Tutkimusten yksi päätavoite oli selvittää eri materiaalityyppien sivutuotteiden käytön vaikutuksia rakentamisen laatuun ja laatuvaihteluun. Tutkimuksilla pyrittiin arvioimaan käyttöpotentiaalia myös yksittäisten sivutuotteiden tasolla. Toisessa testausvaiheessa keskityttiin edellä mainittujen tekijöiden selvittämiseen siten, että lopullisen rakenteen laatu ja mahdolliset laatuvaihtelut voidaan hahmottaa ja hallita riittävällä tarkkuudella.

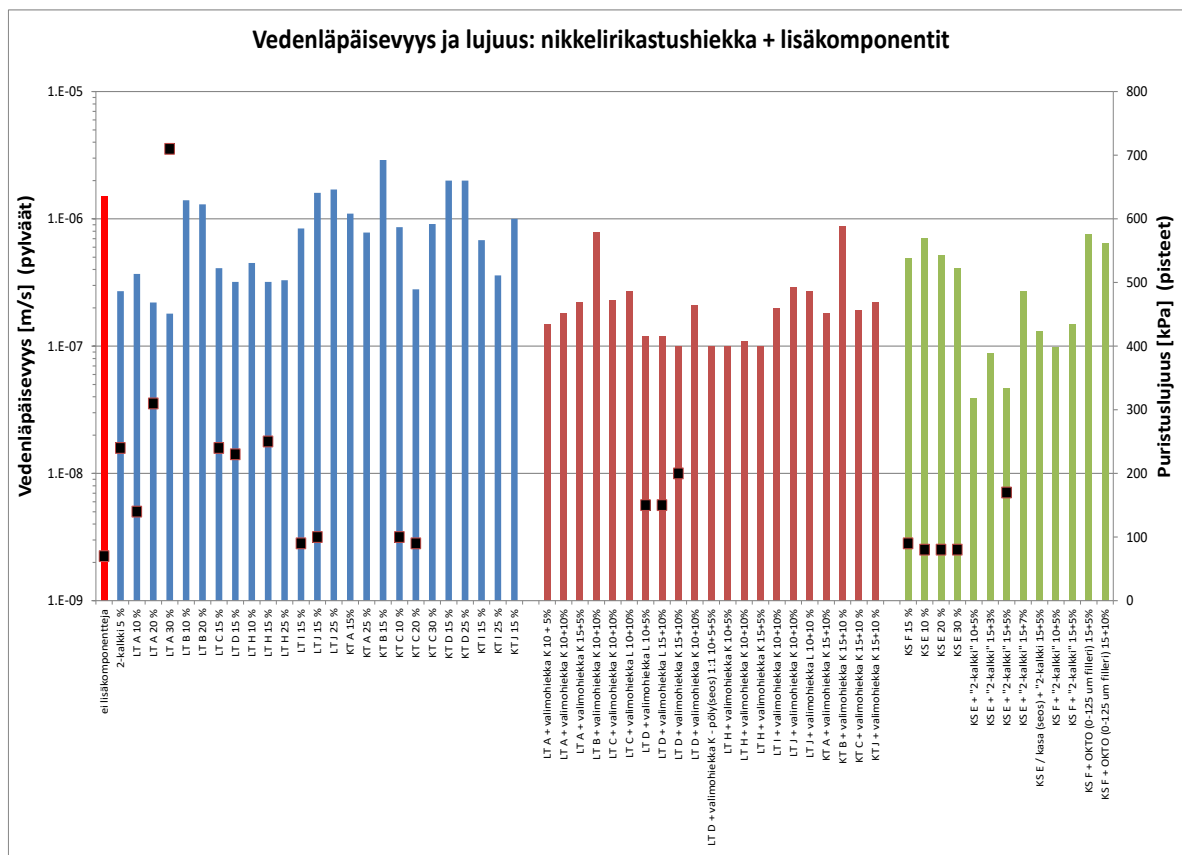
Lisäksi tutkimuksilla pyrittiin luokittelemaan rakentamisessa hyödyntämiskelpoisia materiaali-eräitä, mikä mahdollistaa rakentamiseen käytettävissä olevien sivutuotteiden massamäärien arvioinnin. Jatkotestaukseen valittiin monentyyppisiä ratkaisuvaihtoehtoja, jolloin voitiin tuottaa tietoa mahdollisimman laajalla ominaisuusalueella ja arvioida materiaalien käyttömahdollisuuksia erilaisissa rakenneratkaisuissa ja käyttökohteissa. Tässä raportissa on esitetty teknisten tutkimusten toisen vaiheen keskeisimmät tulokset. Toisen testivaiheen tuloksia on koottu liitteeseen 1. Tarkempia

tietoja toisen vaiheen materiaalitestaukseen liittyen on esitetty raportissa *Hituran Life-hankkeen liittyvä materiaalitestaus: tekniset ominaisuudet, tutkimusten toinen vaihe tarkentavat testit ja eri materiaalien keskinäiset erot 12/2014*.

5.1 Nikkelirikastushiekka runkoaineena

Tutkimuksissa käytetty nikkelirikastushiekka on kuudelta allasalueelta otetun rikastushiekkanäytteen seos, jossa kutakin näytettä on märkämassasuhteessa yhtä paljon. Ensimmäisen vaiheen tulosten perusteella valittiin toisen vaiheen testeihin mielenkiintoisimpia ja käytännön rakentamista ajatellen potentiaalisimpia vaihtoehtoja, ei pelkästään pienintä läpäisevyysarvoa edustavia materiaalseoksia. Tutkimuksissa runkoaineena toimivan nikkelirikastushiekan jalostavina seoskomponentteina käytettiin:

- lentotuhkaa (LT)
- kasatuhkaa (KT)
- lentotuhkaa + valimohiekkaa (VH) (+pölyä) (VP)
- kasatuhkaa + valimohiekkaa (+pölyä)
- kuitusavea (KS)
- kuitusavea + "2-kalkkia" (2-kalkki)
- kuitusavea + OKTO (0-125 µm) -filleriä (OKTO)



Kuva 9. Nikkelirikastushiekkaseosten vedenläpäisevyys- (leveät pylväät/vasen asteikko) ja lujuus-testien tulokset (mustat pisteet/oikea asteikko).

Kuvasta 9 on nähtävissä, että nikkelirikastushiekka-runkoaineena on mahdollista päästä sivutuote-seosaineita hyödyntäen vedenläpäisevyytasolle 1×10^{-7} m/s tai jonkin verran sen alapuolelle,

saavutettavan lujuustason vaihdellessa pääosin välillä 100-300 kPa. Näiltä ominaisuuksiltaan nikkelikastushiekkaratkaisut ovat hyödynnettävissä monissa tiivisrakennesovellutuksissa tietyn edellytyksin kohteen vaatimustasosta riippuen.

Seosaineena pelkästään tuhkaa sisältävien seosten vedenläpäisevyydet (kuva 9, siniset pylväät) ovat suuruusluokkaisesti välillä 2×10^{-7} ... 3×10^{-6} m/s. Pienin vedenläpäisevyys oli seoksella nikkelikastushiekka + LT A 30 % ja suurimmat läpäisevyydet mitattiin kasatuhkia käytettäessä. Myös lentotuhkia LT B, I ja J käytettäessä läpäisevyys oli keskiarvotasoa korkeampi.

Tuhkaseosten lujuudet vaihtelevat suuresti välillä 90-710 kPa. Korkeimmat lujuudet olivat lentotuhkalla LT A, kun lentotuhkan osuus oli 20-30 %. Lentotuhkista nikkelikastushiekan seosaineena parhaiten toimivia olivat tuhkat LT A, LT C, LT D ja LT H, lisäkomponenttina myös 2-kalkki todettiin toimivaksi. Vedenläpäisevyys pieneni selvästi ja puristuslujuus nousi kaikkia edellä mainittuja seosmateriaaleja käytettäessä. Kokonaisuutta ajatellen voidaan arvioida, että tyypillisimmissä tapauksissa 10-15 % tuhkamäärän käyttö parantaa riittävästi nikkelikastushiekan ominaisuuksia. Tuhkamäärän kasvattamisella voidaan parantaa lopputuloksen laatua mutta määrää kasvattaessa muutoksella saavutettava suhteellinen hyöty jää pienemmäksi. Tutkimustulosten perusteella kasatuhkan seostaminen nikkelikastushiekkaan ei ole rakentamisen kannalta järkevää. Lisäksi osalla testatuista lentotuhkista vaikutus vedenläpäisevyyteen jäi pienehköksi.

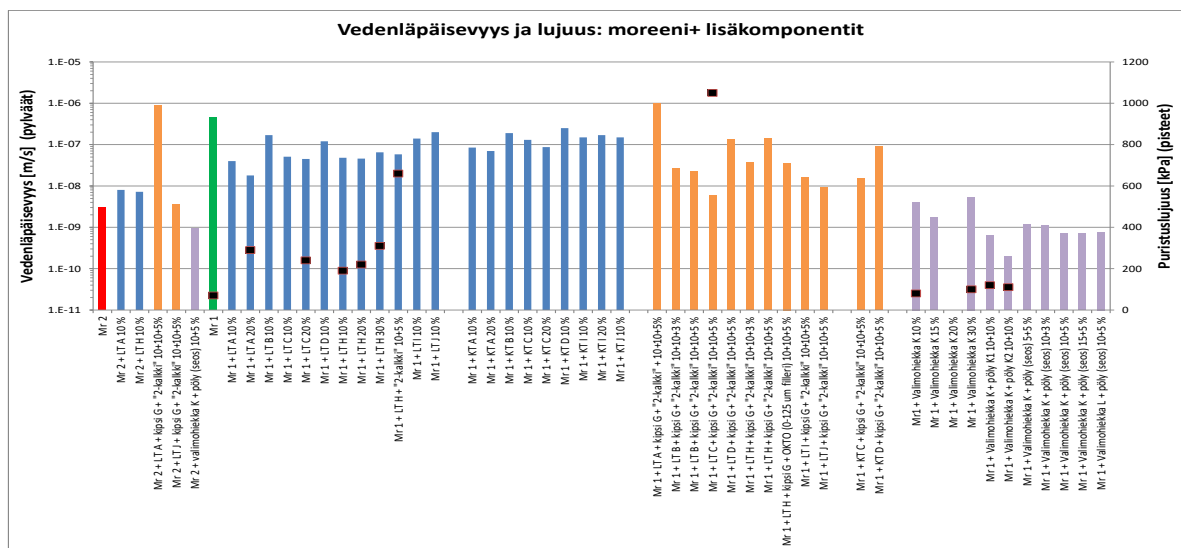
Seoksilla, joissa runkoaineeseen lisättiin tuhkaa sekä valimohiekkaa (kuva 9, punaiset pylväät), vedenläpäisevyydsarvot olivat matalampia kuin pelkästään tuhkaa jalostuksessa käytettäessä, läpäisytaaso vaihteli tällöin suuruusluokkaisesti välillä 9×10^{-8} ... 9×10^{-7} m/s. Parhaiten toimivat lentotuhkalaadut olivat LT D ja LT H, myös lentotuhkaa LT A voi tältä osin pitää mahdollisena tuhka-vaihtoehtona. Puristuslujuus testattiin kolmesta näytteestä, se oli suuruusluokaltaan tasoa 150-200 kPa. Lentotuhkien ja kasatuhkien väliset erot olivat valimohiekan kanssa sekoitettuna pienempiä kuin pelkkiä tuhkia vertailtaessa. Tutkimusten perusteella sopiva lentotuhkamäärä olisi 10 % luokkaa ja valimohiekkamäärä noin 5 %, sillä liian suuri valimohiekkamäärä hieman laskee puristuslujuutta ja lentotuhkan määrän kasvattamisella saavutettava suhteellinen hyöty jää vähäiseksi.

Lisäämällä nikkelikastushiekkaan kuitusaven ja kalkin seosta, saatiin parhaat vedenläpäisevyydsarvot noin tasoa 4×10^{-8} m/s, samalla myös riittävä puristuslujuustaso säilytettiin. Nikkelirikastushiekka-kuitusavi-seoksilla puristuslujuus oli 80-90 kPa. Lisättäessä vastaavaan seokseen myös "2-kalkkia", puristuslujuus noin kaksinkertaistui (nikkelirikastushiekka + KS E + "2-kalkki" 15+5 %). Kuitusavi ei toiminut yksinään nikkelikastushiekkaan seostettuna eikä myöskään OKTO-filleri tuonut tutkimuksissa lisäarvoa saavutettaviin ominaisuuksiin.

5.2 Moreeni runkoaineena

Tutkimukset painottuivat ensimmäisen vaiheen mukaisesti moreeniin 1., jota on Hituran kaivosalueen lähistöllä runsaasti, mutta sellaisenaan sen vedenläpäisevyysominaisuudet eivät täytä kailta osin tavoiteltua tasoa. Toisen vaiheen tutkimusten tavoitteena oli tuottaa lisätietoa alueelta otettujen moreeninäytteiden jalostusmahdollisuuksista. Ensimmäisen vaiheen tutkimustulosten perusteella potentiaalisimmat ja kiinnostavimmat lisäkomponentit olivat tuhkan, tuhka-kipsi-kalkki seoksen sekä valimotuotteiden käyttö moreenin jalostamisessa. Toisen vaiheen tutkimuksissa moreenia käytettiin runkoaineena seuraavasti:

- Runkoaineena moreeni 1, jonka jalostamisessa on käytetty lentotuhkaa, kasatuhkaa, lentotuhkaa + kipsiä + 2-kalkkia, kasatuhkaa + kipsiä + 2-kalkkia, valimohiekkaa sekä valimohiekkaa + pölyä.
- Runkoaineena moreeni 2, jonka jalostamisessa on käytetty lentotuhkaa, lentotuhkaa + kipsiä + 2-kalkkia tai valimohiekkaa + pölyä. Moreenin 2 (tiivimpi moreenilaatu alueella) osalta testaus on toteutettu varsin suppeassa laajuudessa



Kuva 10. Moreeniseosten vedenläpäisevyys- (leveät pylväät/vasen asteikko) ja lujuustestien tulokset (mustat pisteet/oikea asteikko).

Moreenin 2 jalostaminen erilaisia tuhkaratkaisuja (kuva 10, siniset pylväät) käyttäen oli erittäin haastavaa erityisesti vedenläpäisevyysominaisuuksien osalta eikä se todennäköisesti olisi taloudellisesti järkevää. Lisäämällä moreeniin 2 valimohiekkaa K + pölyä (seos) 10+5 % (kuva 10, violetti pylvä) saadaan sen vedenläpäisevyys laskemaan jopa $< 1 \times 10^{-9}$ m/s. Moreenin 2 kaltaisen tiiviin materiaalin jalostaminen on kuitenkin hankalaa ja edellyttää ”järeitä” sekoitus-/rakentamistekniikoita, jolloin hyöty-kustannus-suhde jäisi tulevaisuuden rakenteita ajatellen heikohkoksi.

Moreenin 1 vedenläpäisevyyttä oli suhteellisen yksinkertaista saada pienemmäksi ja jalostukseen sopivia ratkaisuja löydettiin useita. Pelkästään tuhkaa moreenin jalostamisessa käytettäessä, lentotuhkan määrällä tai 2-kalkin käytöllä tuhkan rinnalla ei ollut tutkituilla käyttömäärillä merkittävää vaikutusta saavutettavaan vedenläpäisevyyteen (kuva 10, siniset pylväät). Sopiva lentotuhkamäärä oli noin 10 %, jolloin tuhkalaadusta riippuen vedenläpäisevyys laskee tasolta 5×10^{-7} m/s tasolle $1 \times 10^{-7} \dots 5 \times 10^{-8}$ alkuperäisestä. Lentotuhkalaaduista parhaiten toimivia olivat LT A, LT C ja LT H, kun tarkasteltavana tekijänä oli saavutettava tiiveys. Vedenläpäisevyys pieneni myös kasatuhkia käytettäessä, mutta vaikutus oli tuoretuhkien käyttöä pienempi (5×10^{-7} m/s \rightarrow 1×10^{-7} m/s). Puristuslujuudet vaihtelivat pelkästään lentotuhkaa sisältävän seoksen 190 kPa:sta myös 2-kalkkia sisältävän seoksen 670 kPa:iin.

Tuhkan lisäksi seokseen kipsiä ja kalkkia lisättäessä sopiva kalkkimäärä oli noin 3 % (kasvattaminen 5 %:iin ei tuonut merkittävää lisähyötyä) – kipsin osalta ei tässä yhteydessä suoritettu määräoptimointia vaan kaikki testit tehtiin kipsimäärällä 10 % (kuva 10, oranssit pylväät). Seoksilla, jotka sisälsivät tuhkan lisäksi kipsiä ja 2-laadun kalkkia, pienimpään vedenläpäisevyysarvoon,

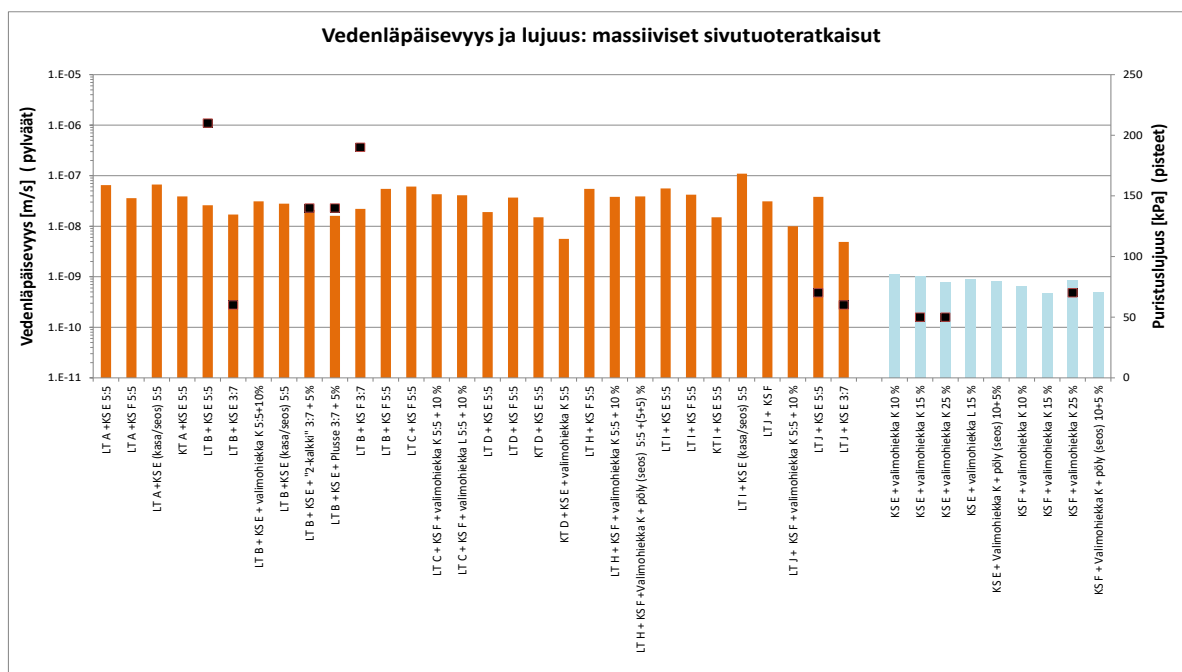
6×10^{-9} m/s, päästiin seoksella LT C + kipsi G + 2-kalkki 10+10+5 %. Tällä seoksella myös puristuslujuus oli erittäin korkea, 1050 kPa. Noin 1×10^{-8} m/s vedenläpäisevyyteen, samoilla seossuhdeilla (10+10+5 %), päästiin myös tuhkia LT I ja J käyttäen.

Valimohiekkaa ja -pölyjä sisältävät seokset olivat moreenia jalostettaessa testatuista tiiveimpiä: läpäisevyydet olivat pääosin $1 \dots 5 \times 10^{-9}$ m/s tasoa ja erityisesti valimohiekka-pöly-seosten läpäisevyys oli erittäin matala (selvästi $< 1 \times 10^{-9}$ m/s) (kuva 10, violetit pylväät). Puristuslujuudet näillä seoksilla olivat määritellyiltä osin 80-120 kPa. Valimohiekkamäärä 10-15 % oli tutkituilta osin optimaalinen sekä saavutetun lujuuden että läpäisevyyden kannalta. Pölyn käyttö korvaten sillä osa valimohiekkasta parantaa tulosta, kun seoksessa oli valimohiekkaa 5-10 % ja valimopölyä 3-5 %.

5.3 Sivutuoteseokset

Tutkimusten toisessa vaiheessa keskityttiin ensimmäisen testivaiheen perusteella seuraavien sivutuoteseosten ominaisuuksien tutkimiseen:

- lentotuhka + kuitusavi
- lentotuhka + kuitusavi + valimohiekka
- kasatuhka + kuitusavi
- kasatuhka + kuitusavi + valimohiekka
- kuitusavi + valimohiekka (+pöly)



Kuva 11. Sivutuoteseosten vedenläpäisevyys- (leveät pylväät/vasen asteikko) ja lujuustestien tulokset (mustat pisteet/oikea asteikko).

Tuhka+kuitusavi-pohjaisilla seoksilla vedenläpäisevyydestien tulokset olivat pääosin noin suuruusluokkaa 5×10^{-8} m/s, puristuslujuuden vaihdella noin välillä 70-200 kPa (kuva 11). Tuhka+kuitu seossuhde, käytettävä tuhkalaatu sekä edellisten lisäksi käytettävät muut komponentit vaikuttavat huomattavasti saavutettavaan lujuustasoon. Valimohiekan tai sementin lisäämisellä ei saavutettu järjestelmällisesti lisähyötyä vedenläpäisevyyden suhteen.

Kuitusavi+valimohiekka -seosten vedenläpäisevyys (kuva 11, siniset pylväät, taso 1×10^{-9} m/s tai hieman alle) oli selvästi pienempi verrattuna tuhka+kuitusavi -seoksiin (kuva 11, oranssit pylväät, suuruusluokka noin 1×10^{-8} m/s). Puristuskokeessa kuitusavi+valimohiekka -koekappaleet eivät murtuneet (15 % kokoon puristumaa vastaava puristusjännitys oli 50–70 kPa). Valimohiekan määrän kasvattaminen vaikutti jonkin verran läpäisevyyttä pienentävästi, mutta käyttömäärän kasvataminen kovin paljoa yli 10 %:iin ei todennäköisesti olisi perusteltua.

Lentotuhkaan seostettuna kuitusavilaadulla ei ollut ratkaisevasti merkitystä (KS E vs. KS F). Valimohiekan kanssa seostettuna KS F:n käyttäminen taas johti alhaisempiin läpäisevyysarvoihin kuin KS E:n käyttäminen. Sivutuoteratkaisujen ensimmäisen ja toisen vaiheen teknisen laboratoriotestauksen tuloksia on esitetty kootusti liitteessä 1.

5.4 Materiaaliseosten tekniset ominaisuudet

Materiaalitestauksen toisessa vaiheessa tutkituista seoksista massiivisiin tiivisrakennekerroksiin soveltuvia ratkaisuja oli toisen testivaiheen perusteella useita. Tutkimustulosten perusteella materiaaliseokset voidaan karkeasti luokitella vedenläpäisevyyden ja puristuslujuuden perusteella, lisäksi materiaaliratkaisuja voidaan arvioida ratkaisutyypeittäin. Materiaalien luokittelu vedenläpäisevyyden ja puristuslujuuden perusteella on esitetty taulukossa 3 ja arvio potentiaalisimmista materiaaliratkaisuista taulukossa 4. Tuloksia tarkastellessa tulee huomioida, että kaikki jalostetut nikkelikastushiekkaratkaisut olivat alustavien testien perusteella lievästi routivia. Materiaalitestauksen toisen vaiheen tarkempia testituloksia on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 3. Saavutettavat vedenläpäisevyys- ja lujuusominaisuudet seuraavaa pilotointivaihetta ajatellen mielenkiintoisimpien materiaalien osalta

Vedenläpäisevyys k (m/s)	Materiaaliseos
$\approx 5 \times 10^{-7}$	<ul style="list-style-type: none"> nikkelirikastushiekka jalostettuna lentotuhkalla
$\approx 1 \times 10^{-7}$	<ul style="list-style-type: none"> nikkelirikastushiekka jalostettuna tuhka+valimohiekalla moreeni jalostettuna kasatuhkalla
$\approx 1 \times 10^{-7} \dots 5 \times 10^{-8}$	<ul style="list-style-type: none"> nikkelirikastushiekka jalostettuna kuitusavi-kalkki seoksella moreeni jalostettuna lentotuhkalla
$\approx 1 \times 10^{-8}$	<ul style="list-style-type: none"> moreeni jalostettuna tuhka-kipsi-kalkki seoksella
$\approx 1 \times 10^{-8} \dots 10^{-9}$	<ul style="list-style-type: none"> moreeni jalostettuna valimohiekalla
$\leq 1 \times 10^{-9}$	<ul style="list-style-type: none"> moreeni jalostettuna valimohiekka-pöly seoksella kuitusavi jalostettuna valimohiekalla
Puristuslujuus (kPa)	
50-100	<ul style="list-style-type: none"> kuitusavi (+valimohiekka), murto > 15 %
100-300	<ul style="list-style-type: none"> moreeni + valimohiekka nikkelirikastushiekka jalostettuna lentotuhkalla, valimohiekalla tai kuitusavi-kalkki seoksella moreeni + lentotuhka
>500	<ul style="list-style-type: none"> nikkelirikastushiekka jalostettuna suurella määrällä reaktiivista lentotuhkaa moreeni jalostettuna lentotuhka-kalkki seoksella tai lentotuhka-kipsi-kalkki seoksella

Taulukko 4. Arvio potentiaalisimmista materiaaliratkaisuista ratkaisutyypeittäin.

Runkoaine	Hyvin soveltuvat materiaalit	Keskiarvoa heikot materiaalit / huomioita
Nikkeliri-kastus-hiekkaan seostetuna	<p><u>Tuhkalisäys</u> (k noin 5×10^{-7} m/s): -LT A, LT C, LT D, LT H -sopiva LT-määrä 10(...15) %, määrän nostolla ei merkittävää vaikutusta</p> <p><u>Tuhka + valimohiekka</u> (k $\approx 10^{-7}$ m/s): -LT D ja LT H, LT A rajoituksin -LT ja KT välinen ero on pienempi valimohiekan kanssa seostettuna kuin ilman sitä -sopiva lentotuhkamäärä 10(...15) % ja valimohiekkamäärä 3...5 %</p> <p><u>Kuitusavi + kalkki</u> (k noin $5...10 \times 10^{-8}$ m/s): -molemmat kuitusavilaadut KS E ja KS F soveltuvia -sopiva kuitusavimäärä on noin 10 % ja kalkkimäärä noin 3...5 %</p>	<p><u>Tuhkalisäys</u> (k noin 10^{-6} m/s): -LT B, LT I, LT J sekä kasatuhkat</p> <p><u>Tuhka + valimohiekka</u> (k $\approx 5 \times 10^{-7}$ m/s) -LT B (heikoimmat tulokset), LT C, LT I ja LT J</p> <p><u>Kuitusavi + kalkki</u> (k yli 10^{-7} m/s): -kasavarastoidun kuitusaven käyttäminen kasvattaa jonkin verran läpäisevyyttä</p>
Runkoaine	Hyvin soveltuvat materiaalit	Keskiarvoa heikot materiaalit / huomioita
Moreeniin seostetuna	<p><u>Tuhkalisäys</u> (k noin 5×10^{-8} m/s): -LT A, LT C, LT H hyviä -sopiva tuhkamäärä noin 10 % tasoa</p> <p><u>Tuhka + kipsi + kalkki</u> (k noin 10^{-8} m/s): -LT C, LT I, LT J hyviä, LT B tietyin rajauksin - sopiva tuhkamäärä noin 10 %, kalkkimäärä 3(...5) % (kipsin osalta ei ole tehty määräoptimointia, käyttömäärä 10 %)</p> <p><u>Valimohiekka</u> (k $1...5 \times 10^{-9}$ m/s): -VH hyvä 10(...15) % lisäyksellä</p> <p><u>Valimohiekka + -pöly</u> (k $\leq 10^{-9}$ m/s): -valimotuotteiden kokonaismäärä 10-15 %, josta VH 5-10 % ja pöly 3-5 % -eri tuottajien materiaaleissa ei ratkaisevia eroja</p>	<p><u>Tuhkalisäys</u> (k noin 10^{-7} m/s): -LT B, LT D, LT I ja LT J -kasatuhkien käyttäminen nostaa hiekan läpäisevyyttä, mutta vaikutus ei kovin suuri</p> <p><u>Tuhka + kipsi + kalkki</u> (k $10^{-7}... 10^{-8}$ m/s): -LT D ja LT H -tietyin rajauksin myös kasatuhkien käyttö on todennäköisesti mahdollista - LT A ei sovellu</p> <p><u>Valimohiekka:</u></p> <p><u>Valimohiekka + pöly:</u></p>

<p>Sellaise- naan</p>	<p><u>Tuhka + kuitusavi (+valimohiekka):</u> (k vaihtelee välillä 10^{-7}...10^{-8} m/s) -erot eri tuhkalaatujen välillä hallittavissa (myös KT) kun suunnittelussa huomioidaan läpäisevyyden osalta tutkimuksissa määritelty vaihtelu -myöskään kuitusavien välillä ei merkittäviä eroja</p> <p><u>Kuitusavi + valimohiekka (+pöly)</u> ($k \leq 10^{-9}$ m/s): -molemmat KS-laadut ja valimohiekat soveltuvat - VH/VP sopiva käyttömäärä 10(...15) % luokkaa</p>	<p><u>Tuhka + kuitusavi (+VH):</u></p> <p><u>Kuitusavi + valimohiekka (+pöly):</u> -tuottajakohtaiset erot pienehköjä/hallittavissa</p>
----------------------------------	---	---

6. YMPÄRISTÖKELPOISUUS

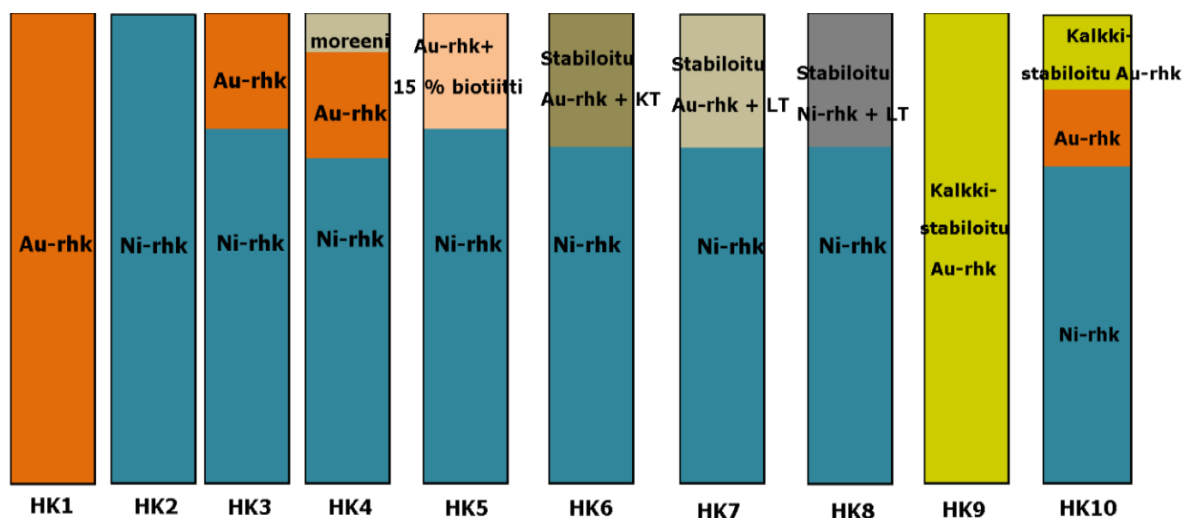
Materiaalien ympäristökelpoisuutta on testattu teknisen testauksen rinnalla kahdessa vaiheessa Ramboll Finland Oy:n laboratoriossa. Testaus perustui Hituraan suunniteltujen rakenteiden materiaalien ympäristöllisiin vaikutuksiin ja rikastushiekasta suotautuvan veden laadun parantamiseen. Materiaalitestauksista ympäristökelpoisuuteen liittyen tehtiin myös pilotointien suunnittelu- ja toteutusvaiheissa mm. Fortumin toimesta. Näitä tuloksia esitellään raportissa myöhemmin. Ensimmäisen vaiheen tavoite oli selvittää materiaalien liukoisuusominaisuuksia ja erityisesti eri materiaalien liukoisuuksien yhteisvaikutusta pintarakenteissa sekä kokeellisesti testata kaivosalueella hyödynnettävän reaktiivisen seinämän tai ojarakenteen ominaisuuksia ja vaikutuksia haitta-aineiden pidentymisessä. Ensimmäisessä vaiheessa tutkittiin pelkät rikastushiekat, jolloin saatiin selville rikastushiekkojen liukoiset pitoisuudet. Näihin liukoisuuksiin tulisi pystyä vaikuttamaan peittorakenteilla, mikäli käytettäväksi rakenteeksi valitaan vettä läpi suotava rakenne.

Toisessa vaiheessa selvitettiin samaan kolonniin pakattujen eri materiaalien yhteisvaikutusta läpi suotautuvan veden pitoisuuksiin. Testissä käytetyt materiaalit olivat moreeni, biotiitti, kasavarastoitu lentotuhka ja tuore lentotuhka. Tutkimustuloksia on vertailtu Valtioneuvoston asetuksen 331/2013 (VNa 331/2013) mukaisiin liukoisten pitoisuuksien raja-arvoihin. Vertailun avulla pyrittiin selvittämään, milloin liukoisuuksissa on jouduttu pitoisuusalueille, joilla on merkitystä lopullisia ratkaisuja mietittäessä. Kyseiset raja-arvot ovat kaivosalueella vain viitteellisiä. Tutkimustuloksia on hyödynnetty seuraavaksi toteutettavien pilottikokeiden rakennemateriaalien ja seurattavien parametrien valinnassa. Tässä osuudessa on esitetty ympäristökelpoisuuteen liittyvän materiaalitestauksen keskeisimmät tulokset. Ympäristökelpoisuustestauksen tarkemmat tiedot ja tulokset löytyvät raportista *Hitura laboratoriotestien tulokset raportti (Ympäristökelpoisuus) 12/2014*.

6.1 Kolonnitestit

Kolonnitestien tavoitteena oli selvittää nikkeli- ja kultarikastushiekkojen liukoisuudet sekä peittorakenteessa käytettävien materiaalien yhteisvaikutuksia ja eroja. Lisäksi etsittiin materiaalien funktionaalisia ominaisuuksia ja selvitettiin alustavasti, voidaanko rikastushiekka-aldaiden peittorakenteissa hyödyntää uusiomateriaaleja. Testeissä käytetyt materiaalit olivat moreeni, biotiitti, kasavarastoitu lentotuhka ja tuore lentotuhka.

Lähtökohtaisesti biotiitin odotettiin pidättävän kultarikastushiekan haitta-aineita, tuhkien säätävän läpivirtaavan veden pH-tasoa korkeammalle. Kun pH-taso nousee, osa haitallisista metalleista saostuu, jolloin materiaaleista läpisuotautuvan veden laatu paranee. Biotiittia käytettiin kolonnitessissä seostettuna kultarikastushiekan kanssa. Tuhkia ei käytetty kolonnitessissä sellaisenaan, vaan seostettuna joko kulta- tai nikkelikastushiekkään. Kerroksittain testattujen materiaalien määrissä pyrittiin simuloimaan tilannetta todellisissa mittasuhteissa ja järjestys määräytyi veden virtausuunnan mukaisesti. Suhteita ja kerrosjärjestystä on havainnollistettu kuvassa 12. Kolonnitessissä käytetyt materiaalit ja niiden tunnuksat on esitetty taulukossa 5.



Kuva 12. Kolonneissa käytetyt materiaalit ja niiden suhteet kolonneissa.

Taulukko 5. Kolonnitessissä käytetyt materiaaliseokset ja näytetunnukset.

Näyte-tunnus	Materiaali (vesipitoisuus %)	Materiaalin korkeus kolonnissa	Kolonnin halkaisija (mm)
HK1	Au-rhk=kultarikastushiekka (0,2)	28 cm	50
HK2	Ni-rhk=nikkelirikastushiekka (20,4)	28 cm	50
HK3	Au-rhk (0,2) Ni-rhk (15,2)	6,9 cm 21,1 cm	100
HK4	Moreeni (12,6) Au-rhk (0,2) Ni-rhk (20,4)	2,4 cm 6,3 cm 19,3 cm	100
HK5	Au-rhk (0,2) + 15 % biotiittia (4,1) Ni-rhk (20,4)	7,5 cm 17,5 cm	100
HK6	stabiloitu Au-rhk + KT 15 % (22,4) Ni-rhk (15,7)	8,0 cm 18,0 cm	100
HK7	stabiloitu Au-rhk + LT 15 % (22,0) Ni-rhk (15,7)	8,0 cm 18,0 cm	100
HK8	stabiloitu Ni-rhk + LT 15 % (16,5) Ni-rhk (15,7)	8,0 cm 18,0 cm	100
HK9	stabiloitu Au-rhk + kalkki 5 %	27,5 cm	50
HK10	stabiloitu Au-rhk + kalkki 5 % Au-rhk Ni-rhk	4,3 cm 4 cm 17,9 cm	100

Taulukko 6. Kolonnitesteissä materiaalien läpi virranneiden vesien liukoiset pitoisuudet (mg/kg ka.) vertailtuna kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoihin

Haitta-aine	Kaatopaikkojen raja-arvot, L/S=10 l/kg, asetus 331/2013			kumulatiivinen L/S = 10 l/kg									
	Pysyvä jäte	Tavanomainen jäte	Vaarallinen jäte	HK1	HK2	HK3	HK4	HK5	HK6	HK7	HK8	HK9	HK10
Sulfaatti, SO ₄	1000	20000	50000	87	6146	5777	3706	6641	9808	11802	14893	24,8	9182
Kloridi, Cl	800	15000	25000	30	849	875	485	937	1120	1358	1668	24,8	1079
DOC	500	800	1000	104	90	39	25	28	16,8	22	16,8	105,4	29,9
Fluoridi	10	150	500	5,0	5,0	5,0	5,0	4,9	14,7	14,8	14,9	9,9	9,9
Barium, Ba	20	100	300	0,054	0,100	0,085	0,072	0,211	0,188	0,175	0,212	0,86	0,421
Sinkki, Zn	4	50	200	0,050	0,054	0,505	0,431	0,198	0,388	0,015	0,398	0,308	0,115
Kupari, Cu	2	50	100	0,017	0,015	0,015	0,015	0,015	0,016	0,016	0,015	0,015	0,016
Arseeni, As	0,5	2	25	17	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,085	0,005
Kromi, Cr	0,5	10	70	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,02	0,02	0,02	0,023	0,02
Molybdeeni, Mo	0,5	10	30	0,101	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,353	0,011
Lyijy, Pb	0,5	10	50	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,026	0,005
Nikkeli, Ni	0,4	10	40	0,012	0,676	0,838	0,524	0,770	1,31	1,38	1,24	0,01	1,03
Seleen, Se	0,1	0,5	7	0,023	0,024	0,025	0,019	0,035	0,039	0,061	0,05	0,05	0,08
Antimoni, Sb	0,06	0,7	5	0,063	0,005	0,203	0,114	0,313	0,11	0,198	0,238	0,005	0,009
Kadmium, Cd	0,04	1	5	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Elohopea, Hg	0,01	0,2	2	0,005	0,005	0,005	0,01	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005

Taulukossa 6 esitetyt tulokset on vertailtu VNa 331/2013 raja-arvoihin, jotka perustuvat fraktioon L/S=10. Kolonnitesteiden suodosten kaikki tulokset (L/S=10) on esitetty liitteessä 2A ja liukoisten pitoisuuksien tulokset fraktioittain on esitetty liitteessä 2B. Esitettyjen tulosten perusteella kultarikastushiekkan arseenin liukoisuus oli suuri, mutta kerrosrakennevaihtoehdoissa HK3, HK4, HK5, HK6, HK7, HK8, HK9, HK10 arseenin liukoinen pitoisuus alitti pysyvän jätteen liukoisuusraja-arvon tai määritysrajan. Muissa kerrosrakennevaihtoehdoissa arseeni todennäköisesti pidättäytyi nikkelikastushiekkaan. Kultarikastushiekkan stabilointi kalkilla (taulukko 6, HK9) pääasiassa pienensi liukoisuuksia käsittelemättömään kultarikastushiekkaan verrattuna, sillä kaikki pitoisuudet pysyvät raja-arvojen alapuolella. Rikastushiekkojen läjittäminen päällekkäin (HK3) ei muuta kummankaan rikastushiekkan kaivannaisasetuksen mukaista luokitusta.

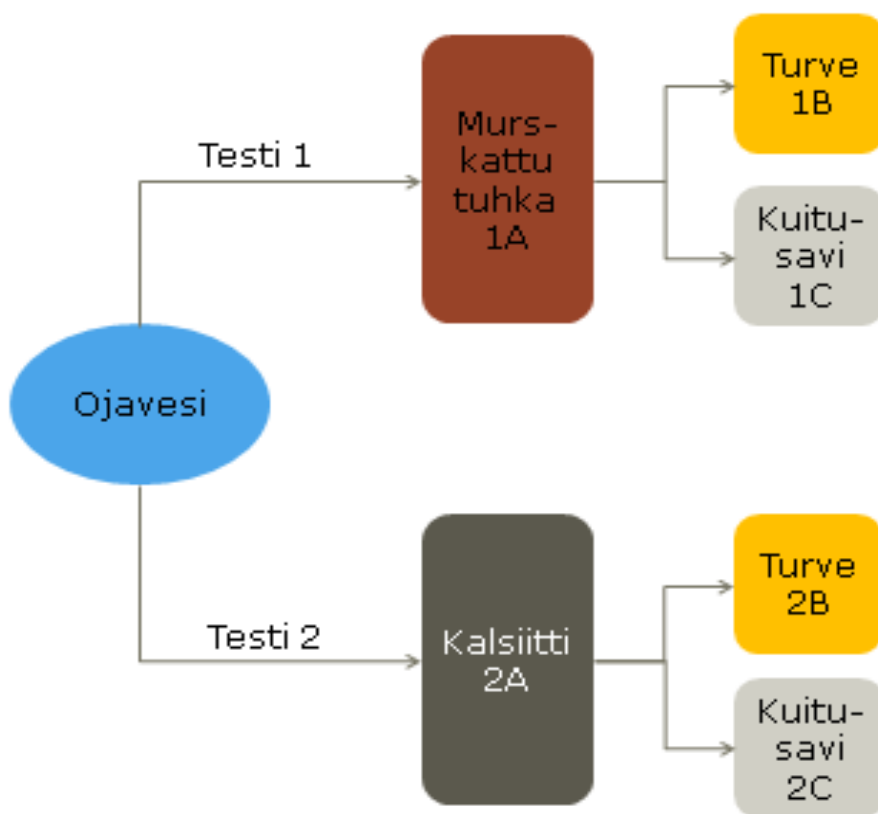
Nikkelinrikastushiekkaa sisältävillä kerrosrakenteilla (HK2, HK3, HK4, HK5, HK6, HK7, HK8, HK10) ei voitu erilaisilla seosmateriaaleilla tai stabiloinnilla vaikuttaa nikkelikastushiekasta liukenevan nikkelin määrään. Kultarikastushiekkaa sisältävät kerrosrakenteet sekä tuhalla stabiloitu nikkelikastushiekka lisäsivät nikkelin liukoisuutta. Rakenteen HK8 osalta nikkeli liukenee todennäköisesti stabiloinnissa käytetystä tuhasta. Nikkelin liukoisuus kuitenkin vähenee testin edetessä ja väheneminen jatkuu L/S 20 saakka (liite 2B). Tuhkaa tai kalkkia sisältävät kerrosrakenteet (HK6-HK10) lisäävät strontiumin liukoisuutta, nousu < 1 mg/kg tasolle 2,-11,7 mg/kg (liite 2A). Strontiumin liukoisuuden kasvaminen aiheuttaa todennäköisesti pH-olosuhteet tai materiaalien strontiumpitoisuudet.

6.2 Suotovesikokeet

Hiturassa kaivostoiminnan lisäksi alueen happamat sulfaattimaat muodostavat ojavesien happamuutta sekä kohonneita haitta-ainepitoisuuksia. Suotovesikokeiden tarkoituksena oli selvittää, kannattaako alueella muodostuvien suotovesien laatuun vaikuttaa jo pelkistyneessä tilassa ennen

kuin vedet ovat purkautuneet ojiin, vai perinteisemmin, pyrkiä käsittelemään ojiin purkautuneet happamat vedet. Tutkimusten ensimmäisessä vaiheessa metalleja saostettiin säätämällä veden pH-tasoa emäksisemmäksi kalsiitin ja tuhkan avulla. Toisessa tutkimusvaiheessa osa ongelma-komponenteista pyrittiin sitomaan turve-/kuitusavikerroksen avulla.

Korvaavien materiaalien koejärjestelyissä (myöhemmin Testi 1) tuhka murskattiin 10 mm fraktioon koetta varten. Perinteisten materiaalien koejärjestelyissä (myöhemmin Testi 2) käytettiin kalsiittisoraa. Vettä kerättiin kolonneista yhteensä 9 fraktiota, joista fraktiosta 1 ja 9 otettiin 300 ml näytteet ja analysoitiin metallit suppealla analyysipaketilla. Kaikista fraktioista koostettiin kokoomanäyte (9x35 ml), josta analysoitiin metallit laajalla analyysipaketilla. Tuhkan ja kalsiittisoran läpi suotautuneet vedet jaettiin yhteensä neljäksi osanäytteeksi (kaksi osanäytettä kummastakin koejärjestelystä), jotka pumpattiin edelleen turpeen tai kuitusaven läpi. Tästä vaiheesta kerättiin kuusi puolenlitran fraktioita, joista mitattiin pH, sähkönjohtavuus ja redox-potentiaali. Ensimmäisestä ja viimeisestä fraktiosta otettiin 300 ml näytteet ja analysoitiin metallit suppealla analyysipaketilla. Kaikista fraktioista yhdistettiin kokoomanäyte (300 ml) josta analysoitiin metallit laajalla analyysipaketilla. Koejärjestelyä ja tutkimuksessa käytetyt materiaalit on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Suotovesikokeen koejärjestelyt ja tutkittavat materiaalit

Taulukko 7. Suotovesikokeen tulokset vaiheista 1A (tuhka) ja 2A (kalsiitti).

			Testi I	Testi II
			Tuhka	Kalsiitti
Haitta-aine	yksikkö	Ojavesi, lähtötilanne	RSO-1A kokooma	RSO-2A kokooma
pH		4,0	9,8 (ka)	7,4 (ka)
Elohopea	µg / l	<0,1	<0,5	<0,5
Alumiini	µg / l	27400	<50	<50
Arseeni	µg / l	1,8	3,5	0,81
Barium	µg / l	11,3	85	21,9
Kadmium	µg / l	4,7	<0,2	1,5
Koboltti	µg / l	336	<0,5	243
Kromi	µg / l	0,88	245	<2
Kupari	µg / l	279	<1,5	12,4
Rauta	µg / l	136	<25	<25
Mangaani	µg / l	4950	<2	4280
Molybdeen	µg / l	<0,05	350	1,6
Nikkeli	µg / l	7860	1,9	6750
Lyijy	µg / l	3,2	<0,5	<0,5
Antimoni	µg / l	<0,05	25,8	4,8
Seleeni	µg / l	2,3	18	1,8
Vanadiini	µg / l	<0,15	59,3	<1,5
Sinkki	µg / l	2190	<5	724
Uraani	µg / l	6,3	<0,1	5,1
Fluoridi	mg / l	1,5	<1	<1
DOC	mg / l	4	1,6	4
Kloridi	mg / l	27,3	182	32,9
Sulfaatti	mg / l	3030	2660	2990
				nouseva
				laskeva
				ei muutosta

Taulukossa 7 esitetyistä tuloksista on nähtävissä, että tuhkan avulla saatu pH-tason muutos oli korkeampi kuin kalsiittisoran läpi suodatuneen veden pH:n muutos. Suodatuksessa tapahtuneet muutokset on esitetty taulukossa keltaisella värillä, kun pitoisuus on noussut ojaveden alkuperäisestä pitoisuudesta ja vastaavasti harmaalla, kun pitoisuus on laskenut suodatuksessa. Todennäköisesti tuhkan hienomman raekoon ansiosta sillä on suurempi reaktiopinta-ala ja näin ollen myös suurempi vaikutus läpi suodatuvan veden laatuun.

Korkeammalla pH-tasolla haitta-aineet pidättyivät paremmin alkuperäisestä ojavedestä. Tuhkan käyttö nostaa kalsiittia enemmän tuhkasta tyypillisesti liukenevien aineiden (As, Ba, Cr, Mo, Sb,

Se, V ja Cl⁻) pitoisuuksia. Suotovesikokeiden alustavien tulosten perusteella tuhkasuodatus saosti parhaiten ojavesissä ongelmallisina pitoisuuksina esiintyneitä alumiini-, rauta-, mangaani- ja nikkelipitoisuuksia. Myös kadmiumin, koboltin, kuparin, lyijyn, sinkin ja uraanin pitoisuudet laskevat alle määräysrajatason.

Taulukko 8. Suotovesikokeen tulokset vaiheista 1B ja 2B, sekä 1C ja 2C (1=tuhka ja 2=kalsiitti).

Haitta-aine	yksikkö	Ojavesi, lähtötilanne	Turve		Kuitusavi	
			RSO-1B kokooma	RSO-2B kokooma	RSO-1C kokooma	RSO-2C kokooma
pH		4,0	3,3 (ka)	3,7 (ka)	7,5 (ka)	7,6 (ka)
Elohopea	µg / l	<0,1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Alumiini	µg / l	27400	3970	2700	<50	<50
Arseeni	µg / l	1,8	14	15,8	3,1	3,4
Barium	µg / l	11,3	126	230	91,7	148
Kadmium	µg / l	4,7	2,5	3,6	<0,2	<0,2
Koboltti	µg / l	336	13,7	39,3	1,4	32,8
Kromi	µg / l	0,88	6,2	<2	82,5	<2
Kupari	µg / l	279	6,5	10	5,4	12,8
Rauta	µg / l	136	324	303	68,9	172
Mangaani	µg / l	4950	935	3410	35,2	517
Molybdeeni	µg / l	<0,05	<0,5	<0,5	211	22,9
Nikkeli	µg / l	7860	24,5	107	4,9	937
Lyijy	µg / l	3,2	7,2	6,1	<0,5	<0,5
Antimoni	µg / l	<0,05	1,5	3,3	15,7	4,1
Seleeni	µg / l	2,3	13,5	1,7	9,6	1,6
Vanadiini	µg / l	<0,15	7,6	2,9	11,2	7,7
Sinkki	µg / l	2190	236	494	11,4	47,8
Uraani	µg / l	6,3	<0,1	<0,1	3,9	10,9
Fluoridi	mg / l	1,5	<1	<1	<1	<1
DOC	mg / l	4	25,1	49,4	30,6	58,1
Kloridi	mg / l	27,3	135	20,3	122	31,7
Sulfaatti	mg / l	3030	2340	1800	1540	2490

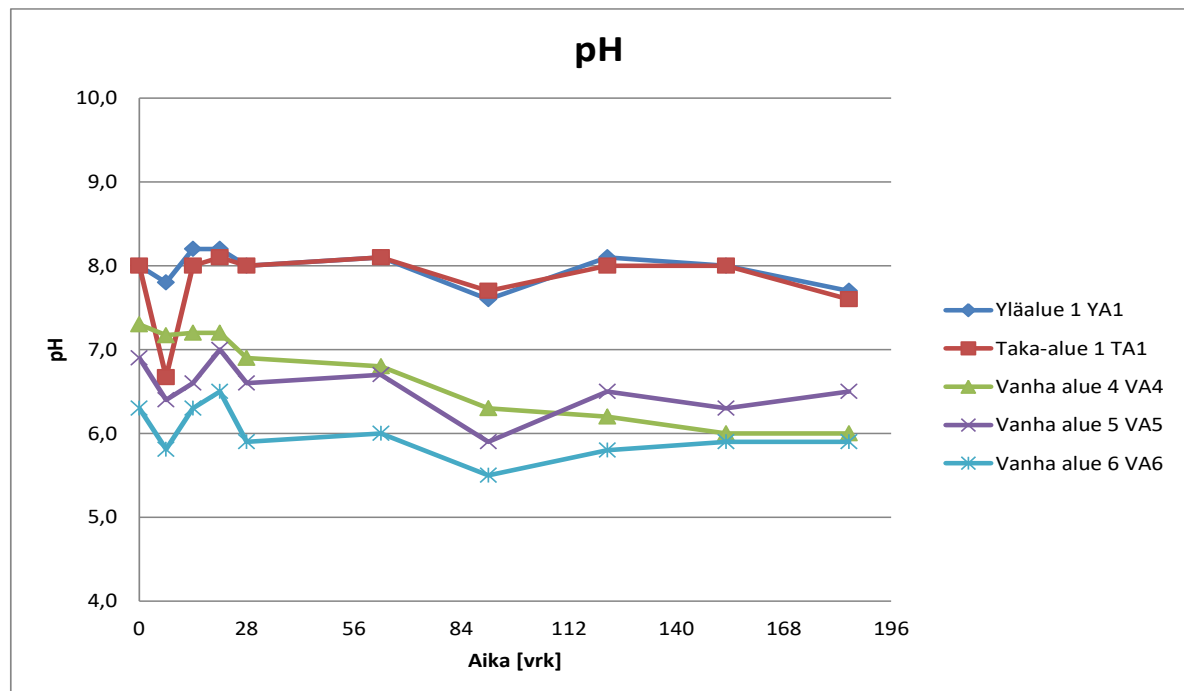
Taulukossa 8 esitettyjen toisen suodatusvaiheen vesien pitoisuuksien perusteella kuitusavi oli turvetta parempi jälkisuodatusmateriaali. Kuitusavisuodatusten jälkeen pH oli molemmissa näytteissä samaa tasoa 7,5-7,6. Kuitusavi myös tasoitti tuhkan ja kalsiitin läpi suotautuneessa vedessä havaittuja pitoisuuksien eroja. Suodatuksessa tapahtuneet muutokset on esitetty taulukossa keltaisella värillä, kun pitoisuus on noussut ojaveden alkuperäisestä pitoisuudesta ja vastaavasti harmaalla, kun pitoisuus on laskenut suodatuksessa. Testitulokset kokonaisuudessaan on esitetty liitteessä 3.

6.3 pH-seuranta

Hiturasta eri läjitysalueilta kerätyistä nikkelikastushiekkanäytteistä tehtiin myös pH-seurantaa kuuden kuukauden ajan. Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella pH-tason muutosta näytteiden ollessa kosketuksissa ilmakehän hapen ja veden kanssa. Näyteastioiden vesimäärä pidettiin vakiona seuranta-ajan. Ennakkotietojen perusteella nikkelikastushiekka ei ole happoa muodostavaa, mutta joidenkin materiaalien pH-taso saattaa laskea hapen kanssa reagoiessa happamaksi. Näytteistä tehtiin pH-mittauksia kerran viikossa ensimmäisen neljän viikon ajan, jonka jälkeen mittaukset tehtiin kuukauden välein. Lisäksi näytteistä mitattiin redox-potentiaali ja sähkönjohtavuus. Tutkitut näytteet ja niiden vesipitoisuudet on esitetty taulukossa 9.

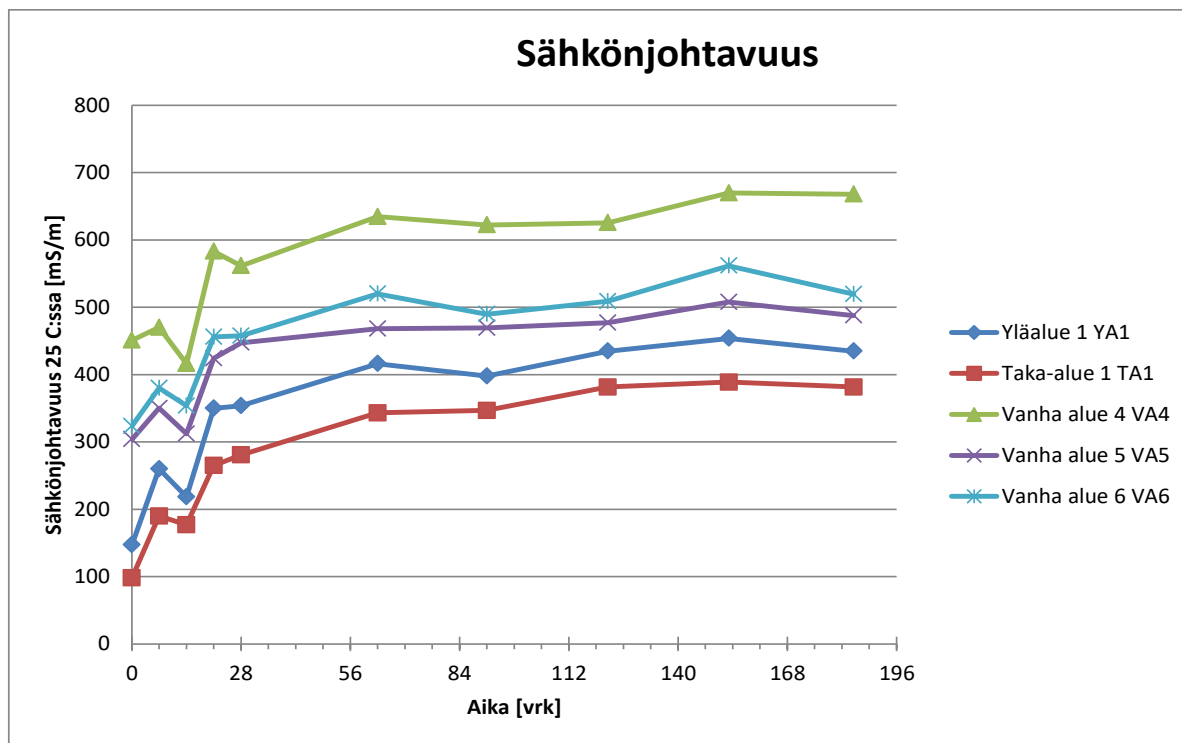
Taulukko 9. Nikkelirikastushiekkan pH-seuranta näytteet

Alue	Nimen lyhenne	w (%)
Yläallas 1 (n. 1 m)	YA1	45,7
Taka-allas 1	TA1	52,9
Vanha rikastushiekka-alue 4	VA4	35,9
Vanha rikastushiekka-alue 5	VA5	76,8
Vanha rikastushiekka-alue 6	VA6	101

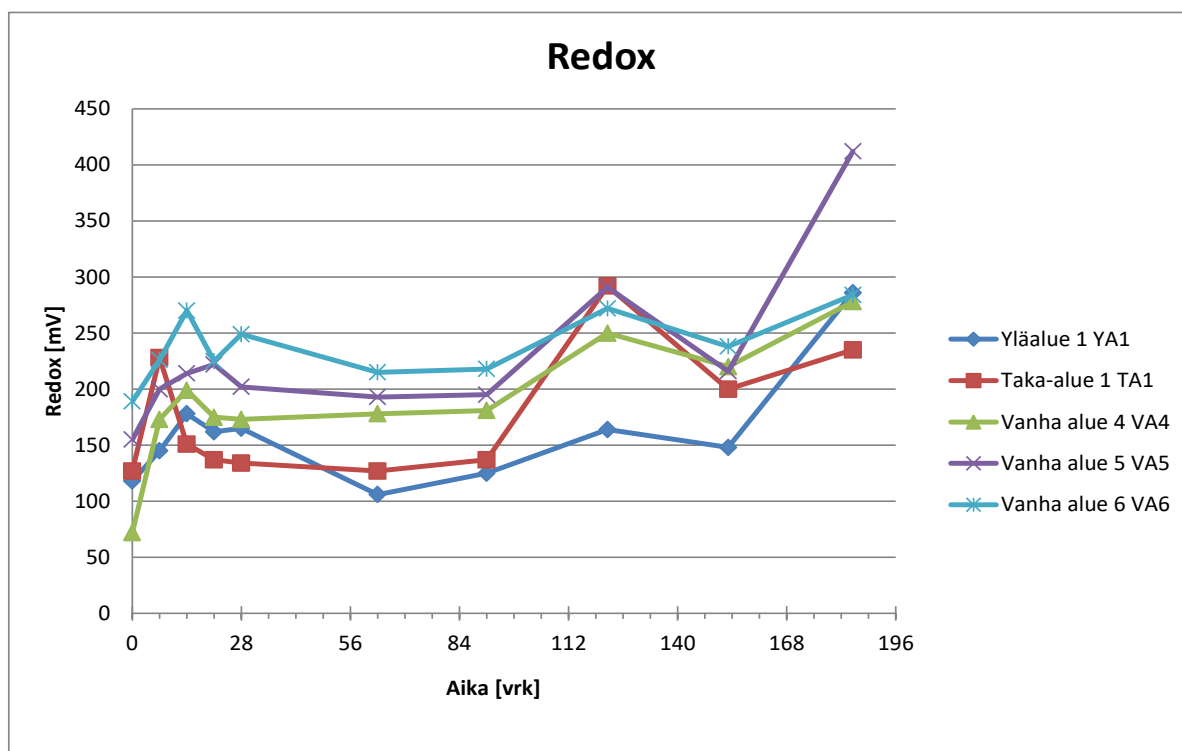


Kuva 14. pH-seurannan mittaustulokset.

Kuvan 14 tulosten perusteella pH-arvojen muutos oli kaikkien näytteiden osalta maltillinen lähtöarvoihin nähden. Suurin muutos todettiin näytteessä VA4, jonka pH laski arvosta 7,3 arvoon 6,0 (1,3 yksikköä).



Kuva 15. Nikkelirikastushiekan sähkönjohtavuuden seurantatulokset.



Kuva 16. Nikkelirikastushiekan redox-potentiaalın seurantatulokset.

Kaikkien näytteiden sähkönjohtavuus nousi seurantajakson ensimmäisen kuukauden aikana, mutta arvot tasaantuivat mittausten loppuvaiheessa (kuva 15). Redox-potentiaalın trendinä oli arvojen nousu, joka antaisi viitteitä näytteiden hapettumisesta, vaikka mittaustuloksissa olikin vaihtelevuutta (kuva 16).

6.4 Vedenläpäisevyydestien suotovedet

Materiaalien käyttäytymisestä tuotettiin lisätietoa mittaamalla viiden kultarikastushiekan vedenläpäisevyysskokeen alku- ja lopputilanteen vesien pH, sähkönjohtavuus ja redox-potentiaali. Vedenläpäisevyydesti kesti 3-12 vuorokautta näytteestä riippuen, jolloin tulokset kertovat vain lyhyen ajanjakson muutoksista materiaaleiden läpi suotautuneessa vedessä.

Taulukko 10. Kultarikastushiekan läpi suotautuneen veden tutkimustulokset

Materiaali	Seosaine	pH alku	pH loppu	EC alku (mS/m)	EC loppu (mS/m)	redox alku (mV)	redox loppu (mV)
Kultari- kastus- hiekk	ei lisäkomponenttia	7,7	7,9	0,6	0,3	143	192
	2-kalkki 5 %	12,7	12,7	6,8	7,1	-38	-52
	LT 15 %	8,1	10,5	0,9	0,4	141	87
	biotiitti 15 %	7,2	8	0,6	0,3	286	237
	kipsi 15 %	7,4	7,6	2,4	2,2	391	174

Taulukossa 10 esitettyjen tulosten perusteella pH muutokset tapahtuvat nopeimmin, kun seosaineena käytettiin tuhkaa ja biotiittia. Sähkönjohtavuudessa ei tapahdu lyhyellä aikavälillä suuria muutoksia alkuperäiseen verrattuna, jolloin veteen ei ole liennut sähkönjohtavuutta nostavia suoloja esimerkiksi sulfaattia merkittävästi. Redox-potentiaali kertoo veden hapettumisesta, jota ei tapahdu seosaineita käytettäessä.

6.5 Yhteenveto

Kolonnitesteillä tuotettiin tietoa materiaalien liukoisuusominaisuuksia ja tuloksia verrattiin kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoihin. Kultarikastushiekkasta liukeneva arseeni pidättyi tutkimusten perusteella nikkelikastushiekkakerrokseen. Arseenia pidättävien sidosten vahvuudesta tulisi päästä selville, jotta voitaisiin vakuuttua ratkaisun turvallisuudesta myös pidemmällä aikavälillä. Stabiilomalla kultarikastushiekkalla kalkilla havaittiin erinomainen haitta-aineiden pidättyminen, sillä kaikki kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvot alittuivat.

Nikkelinrikastushiekkaa sisältävistä kerrosrakenteista liukenevan nikkelin määrään ei voitu vaikuttaa testauksessa käytetyillä materiaaleilla, mutta nikkelin liukoisuus kuitenkin väheni testin edetessä (liite 2B). Seuraavassa vaiheessa rakenneratkaisuja tulisi testata myös maasto-olosuhteissa liukoisuustulosten aikaulottuvuuden sekä haitta-aineiden kulkeutumiseen vaikuttavien ulkoisten tekijöiden selvittämiseksi. Tutkimustuloksista käytiin Oulun yliopiston kanssa keskustelua, jonka jälkeen tutkimuksia jatkettiin laajempina pilotointina Oulun yliopiston Johanna Laukkasen toimesta loppukesästä 2021 Hituran kaivosalueella.

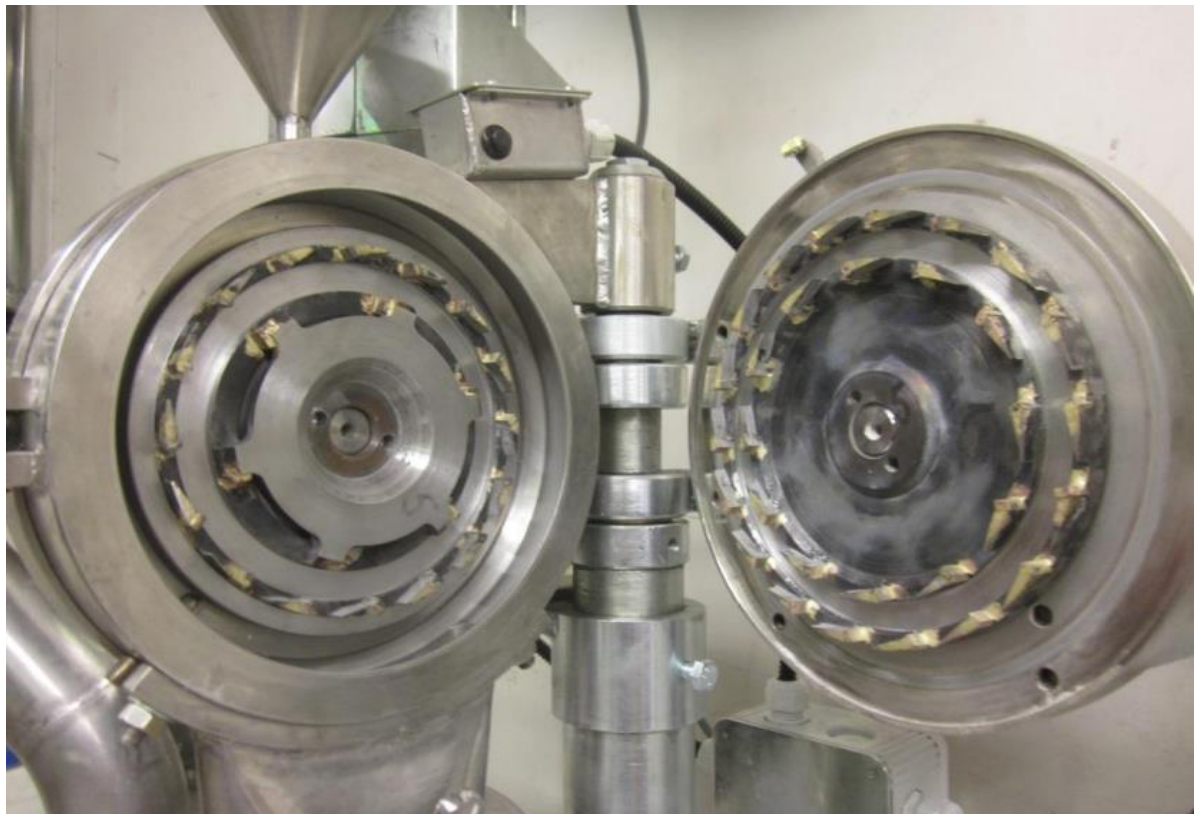
Hituran kaivoksen rikastushiekat olivat pH-tasoltaan neutraaleja tai lievästi emäksisiä, jolloin tuhkan hyötykäyttö alueella perustuisi lähinnä vedenläpäisevyyden muuttamiseen. Tuhkalaadusta riippuen tuhka sisältää jonkin verran haitta-aineita, joiden merkitys jää vähäiseksi todellisen seostetavan kerrosrakenteen ollessa noin 1/3 kolonnitestissä testattuun paksuuteen verrattuna.

Suoto-ajakokeessa kalsiitin avulla saatu pH-tason muutos ei ollut riittävän korkea tiettyjen haitta-aineiden pidättymiseksi. Turvesuodatus kalsiittisuodatuksen jälkeen ei tuo merkittävää lisähyötyä, sillä vain nikkelin pitoisuus toisen suodatuksen aikana pienenee. Kuitusavisuodatuksella pienentää nikkelin ja mangaanin pitoisuuksia mutta ei tuo merkittävää lisäetua kalsiittisuodatuksen jälkeen.

Tuhkalla saatiin selkeästi korkeampi pH-tason muutos ja tätä kautta parempi haitta-aineiden pidättyminen alkuperäisestä ojavedestä. Tuhkan toimivuudesta pidemmällä aikavälillä tarvitaan kuitenkin lisätietoja, sillä raudan ja mangaanin saostuminen voi aiheuttaa materiaalin tukkeutumisen. Mahdollisella pilotoinnilla tulisi myös selvittää, miten tuhkasuodatinrakenne kannattaa teknisesti toteuttaa. Lisäksi tuhkan käytössä on huomioitava testissä havaitut tuhkasta peräisin olevat haitta-aineet, joiden liukenemiseen ei vaikuta esimerkiksi tuhkasuodatuksen jälkeen toteutettu turve- tai kuitusavisuodatus.

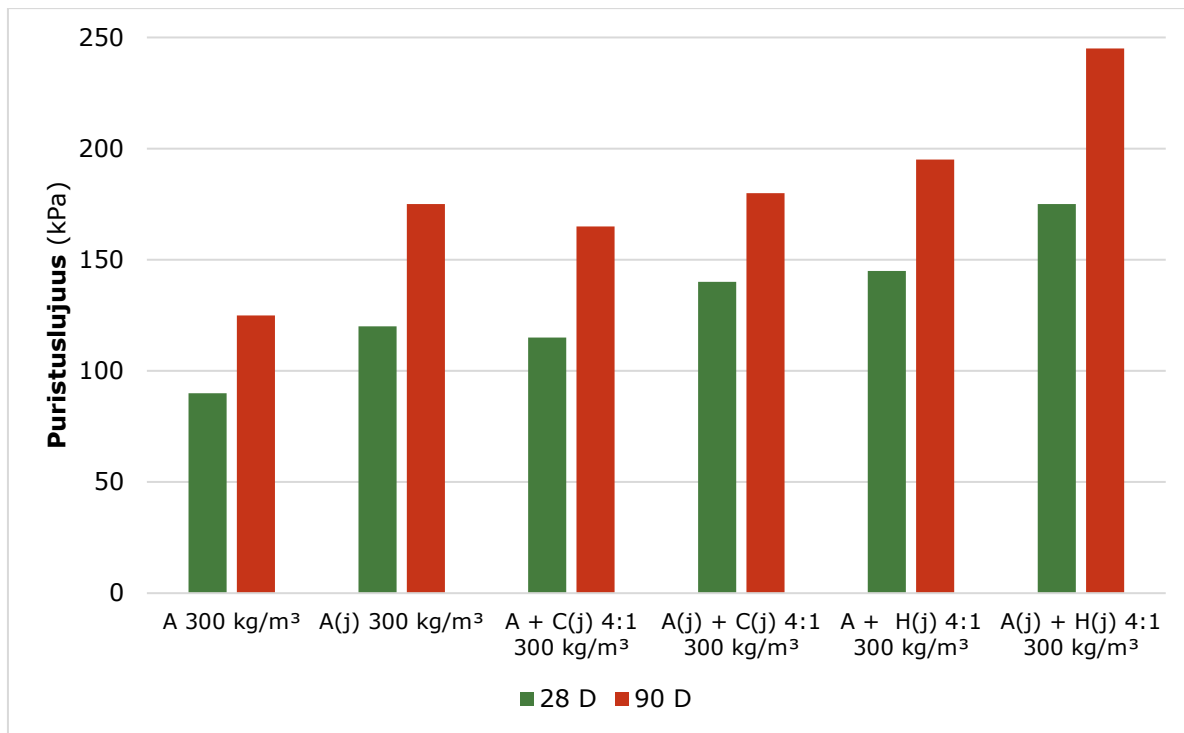
7. SIDEAINEMATERIAALIEN JAUHATUS

Hituran rikastushiekka-altaiden pohjarakenteita suunniteltiin toteutettavaksi stabiloimalla vanhan rikastushiekka-altaan pintarakennetta uuden rikastushiekka-altaan pohjaksi. Stabiloinnissa sideaineen valintaan vaikuttaa oleellisesti saavutettava lujuus, johon voidaan vaikuttaa jauhamalla käytettävä sideaine pienempään raekokoon. Sideainemateriaalin jauhaminen pienempään raekokoon kasvattaa sen reaktiivista pinta-alaa, mikä vaikuttaa myös lujuuden kehittymiseen. Laboratoriossa jauhatuksella saavutettavia etuja testattiin tappimyllyllä, jolla pyrittiin kasvattamaan rikastushiekka-altaiden peitto-/pohjarakenteiden sideainemateriaaleiksi suunniteltujen lentotuhkien ominaispinta-alaa ja sitä kautta reaktiivisuutta.

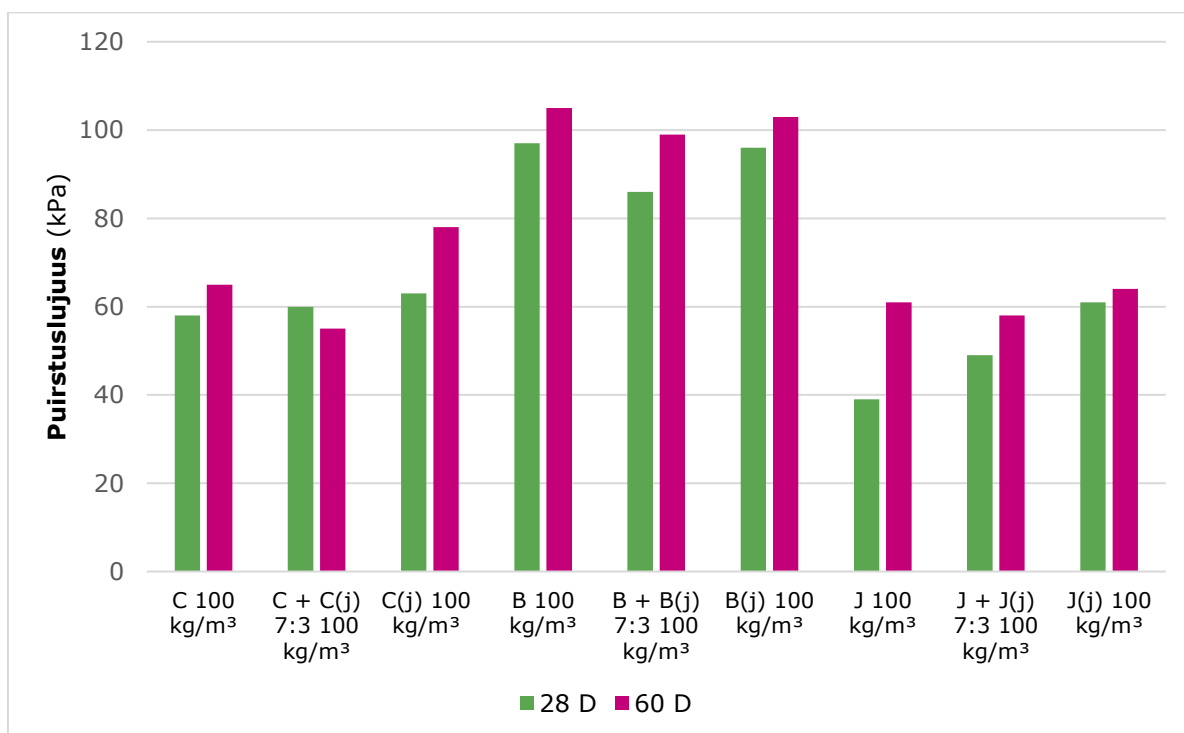


Kuva 17. Tappimylly.

Erilaisista jauhetuista ja/tai jauhamattomista tuhkamateriaaleista valmistettujen koekappaleiden puristuslujuustuloksia on esitetty kuvissa 18 (runkoaineena ruoppausmassa) ja 19 (runkoaineena siltti). Referenssinä kuvissa on esitetty myös jauhamattomista sideainemateriaaleista valmistettujen koekappaleiden puristuslujuustuloksia.



Kuva 18. Tuhkasta sideaineena valmistettujen koekappaleiden puristuslujuudet (jauhetun materiaalin tunnuksen perässä "j").



Kuva 19. Tuhkasta sideaineena valmistettujen koekappaleiden puristuslujuustulokset (jauhetun materiaalin tunnuksen perässä "j").

Kuvassa 18 esitetyistä tuloksista nähdään, että tuhkasta A sideaineena valmistettujen koekappaleiden puristuslujuus paranee selvästi jauhatuksen ansiosta. Myös kahden eri tuhkalaadun sideaineseoksissa jauhatus parantaa koekappaleiden lujuusominaisuuksia. Tuhkien C ja J kohdalla jauhatus parantaa lujittumista jonkin verran, kun taas tuhkan B kohdalla jauhatuksen vaikutukset lujuuteen ovat negatiiviset (kuva 19).

Jauhatuksesta saatava hyöty tulee arvioida siitä muodostuvien kustannusten kannalta ja hyöty vaihtelee myös tuhkalaaduittain. Jauhatuksen on todettu lisäävän lujuutta, kun on käytetty biotuhkista jalostettua sideainetta. Vähemmän reaktiivisten tuhkien jauhatuksella ei ole ollut suurta vaikutusta lujuuteen. Tuhkien jauhatuksesta sideainemateriaalina saatu hyöty todettiin tutkimuksissa suunniteltuja massiivirakenteita ajatellen pieneksi suhteessa jauhatuksesta aiheutuvaan lisätyön määrään.

8. PILOTOINTIIN LIITTYVÄ MATERIAALITESTAUS

Laboratorion materiaalitestauksen jälkeen tutkimukset etenivät pilotointivaiheeseen, jossa testausta jatkettiin suuremmissa mittakaavassa maasto-olosuhteissa. Pilottirakenteilla oli tarkoitus syventää ja lisätä tietoa aiemmin laboratoriossa testattujen potentiaalisimpien materiaalien rakennettavuudesta (tekniset tutkimukset). Lisäksi pilotoinnin painopisteenä oli rakenteiden vedenläpäisevyys- ja liukoisuusominaisuuksista jo olemassa olevan tiedon täydentäminen (ympäristökelpoisuus). Materiaalien lähtökohdat oli selvitetty laboratoriotutkimuksissa, joiden perusteella voitiin valita seurattavat parametrit pilotointeihin.

Maasto-olosuhteissa haitta-aineiden kulkeutumiseen vaikuttavia tekijöitä on kontrolloituja laboratorio-olosuhteita enemmän; esimerkiksi lämpötila, imeytyvän sadeveden määrä ja ominaisuudet (kuten pH ja happipitoisuus) sekä hapetus-pelkistysolosuhteet. UPACMIC-hankkeessa testaus painottui alkuvaiheissa pääosin Hituran kaivosalueelle suunniteltuihin rakenteisiin, mutta hankkeen edetessä kaivosyhtiö ajautui konkurssiin ja suunnitelmat jäivät toteutumatta. Pilotointitoteutettiin eri materiaaleista kuin oli alun perin tutkittu, jolloin materiaalitestausta jatkettiin myös laboratoriossa pilotoinnin suunnittelun ja toteutuksen yhteydessä. Seuraavissa kappaleissa on esitetty pilotointien yhteydessä tehdyn materiaalitestauksen keskeisimpiä tuloksia. Pilottirakenteista saadut tutkimustulokset raportoidaan B1 Final technical report on piloting -raportissa.

8.1 Pyhäsalmi, pintarakenneratkaisut

Pyhäsalmen pintarakenteen pilotoinnin lähtökohtana oli moreenin ja rikastushiekan jalostamien käyttäen uusiomateriaaleja. Tavoitteena oli arvioida uusiomateriaalien käyttöä mm. käsiteltävyyden, työstettävyyden ja tiivistyksen näkökulmista sekä kerätä tietoa rakentamisen aikana esiin tulleista haasteista ja ongelmista. Pilotointiin valituilla materiaaleilla pyrittiin vaikuttamaan Pyhäsalmen kaivoksen sulfidipitoisen ja hapontuottokykyisen rikastushiekan ominaisuuksiin.

Pilotoinnissa käytetyt materiaalit olivat eri erää kuin aikaisemmissa laboratoriokokeissa käytetyt materiaalit, jolloin niiden ominaisuudetkin vaihtelivat. Pilotointiin käytettävistä materiaaleista tehtiin ennen rakentamista teknistä ja ympäristökelpoisuuteen liittyvää materiaalitestausta aiempien Hituran materiaalitestauksen yhteydessä potentiaalisimmiksi arvioitujen ratkaisujen perusteella.

Materiaalitestauksen tutkimustulokset on esitetty taulukoissa 11 ja 12, materiaalien kokonaispitoisuudet on esitetty liitteessä 4. Tutkittujen ratkaisujen oletettiin aiemman materiaalitestauksen perusteella soveltuvan käytettäväksi myös Pyhäsalmen pilottirakenteissa. Rakenteissa käytettäväksi uusiomateriaaleiksi valittiin testitulosten perusteella tuhka ja kipsi. Tuhkalla päästiin hyviin tuloksiin niin vedenläpäisevyyden kuin haitta-aineiden liukoisuuden suhteen. Tarkempia tietoja liittyen pilotoinnin suunnitteluun ja rakennusvaiheeseen on esitetty viiteraporteissa *Koetointiminta 2015, astiatetit Pyhäsalmen materiaaleilla toteutettavan koerakentamisen periaatteet ja työn ohjeistus 11/2015, Pyhäsalmen astiakokeet 2016 koerakentamisen raportti* sekä Noora Karjalaisen diplomityö *Uusiomateriaalien hyödyntäminen rikastushiekka-aitaiden pintarakentamisessa 3/2016*.

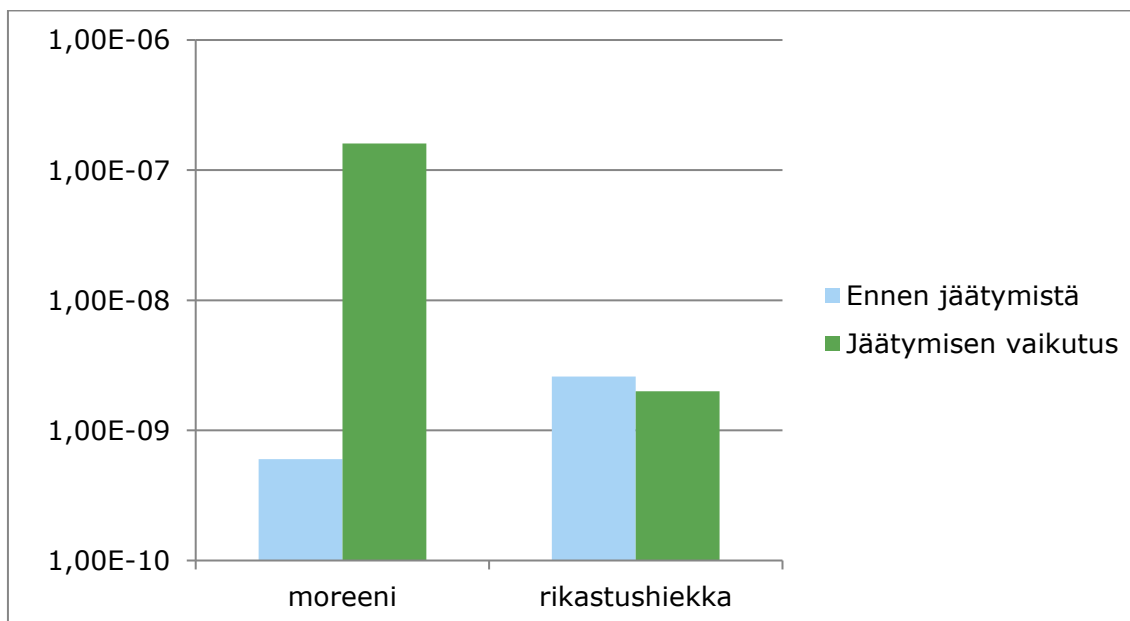
Taulukko 11. Pyhäsalmen pintarakennepilotointia valmisteleavan teknisen laboratoriotestauksen ensimmäisen vaiheen tulokset

Runkomateriaali	seosaineet	määrä [%]	Tutkimusten 1-vaihe						
			mod. Proctor / tasotarkistus 2)	Koekappaleiden tiivistäminen			Vedenläpäisevyys ja puristuslujuus		Puristuslujuus
				tiivistystyöväri	vesipitoisuus	toteutunut tiheys	k [m/s]	σ [kPa]	
Moreeni	---			5 x 10	8,0	2130	$2,4 \cdot 10^{-9}$	240 (PV-11a)	
	LT (OE)	5			9,0	2090	$5,4 \cdot 10^{-9}$	360 (PV-12a)	
		10	10.2 / 2000		10,2	2000	$2,8 \cdot 10^{-8}$	350 (PV-13a)	660 (P-14a)
		20			11,7	1870	$8,8 \cdot 10^{-8}$	300 (PV-15a)	
		LT (AK)	10		9.7 / 2020	9,7	2020	$5,7 \cdot 10^{-9}$	410 (PV-16a)
	LT (OE) +kipsi	10+5			11,5	1970	$1,3 \cdot 10^{-8}$	280 (PV-17a)	
		10+10			12,5	1900	$1,8 \cdot 10^{-8}$	210 (PV-18a)	
	LT (OE) +kipsi+kalkki	10+5+3	13.3 / 1890		13,3	1890	$7,5 \cdot 10^{-8}$	2660 (PV-19a)	4400 (P-20a)
		10+5+5			14,0	1860	$4,5 \cdot 10^{-8}$	2470 (PV-21a)	
		10+10+3			14,0	1850	$8,6 \cdot 10^{-9}$	2600 (PV-22a)	
	LT (Ka) +kipsi+kalkki	10+5+3			12,8	1910	$1,3 \cdot 10^{-8}$	1950 (PV-23a)	
		10+10+3			13,3	1880	$3,5 \cdot 10^{-9}$	2340 (PV-24a)	
	valimohiekka	5			8,5	2110 / 2070 ^{B)}	$6,0 \cdot 10^{-10}$	290 (PV-25a)	
		10			9,0	2100	$8,7 \cdot 10^{-10}$	230 (PV-26a)	
Rikastushiekka (seos)	---	-		5 x 10	16,0	2220 / 2270 ^{B)}	$2,6 \cdot 10^{-9}$	200 (PV-51a)	
	LT (OE)	5			17,1	-	-	-	
		10	17.2 / 2090		18,2	2080	$1,7 \cdot 10^{-8}$	390 (PV-52a)	580 (P-53a)
		20			19,2	1930	$8,2 \cdot 10^{-8}$	520 (PV-54a)	
	LT (AK)	10	18.0 / 2020		19,0	2020	$3,7 \cdot 10^{-8}$	320 (PV-55a)	
	LT (SE) +valimohiekka	10+3			18,0	2060	$2,9 \cdot 10^{-8}$	230 (PV-56a)	
		10+5			17,5	2070	$2,2 \cdot 10^{-8}$	240 (PV-57a)	
	LT (La) +valimohiekka	10+5			17,5	2070	$2,0 \cdot 10^{-8}$	410 (PV-58a)	
	LT (OE) +kipsi	10+5			18,0	2030	$4,9 \cdot 10^{-8}$	390 (PV-59a)	
		10+10			18,0	1970	$1,3 \cdot 10^{-7}$	400 (PV-60a)	
		10+5+3	18.0 / 1860		19,0	1870	$1,8 \cdot 10^{-7}$	530 (PV-61a)	840 (P-62a)
	LT (OE) +kipsi+kalkki	10+5+5			19,5	1820	$2,5 \cdot 10^{-7}$	710 (PV-63a)	
		10+10+3			19,5	1850	$1,6 \cdot 10^{-7}$	570 (PV-64a)	
		10+5+3			18,5	1960	$1,3 \cdot 10^{-7}$	440 (PV-65a)	
	LT (Ka) +kipsi+kalkki	10+10+3			18,5	1920	$1,6 \cdot 10^{-7}$	480 (PV-66a)	
		10+3			18,0	1940	$4,8 \cdot 10^{-7}$	310 (PV-67a)	
	kipsi+kalkki	10+3							

Taulukko 12. Pyhäsalmen materiaaleista muodostettujen koekappaleiden sisältämien haitta-aineiden liukoiset pitoisuudet vertailtuna kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvoihin

Haitta-aine	Kaatopaikkojen raja-arvot, L/S=10 l/kg, asetus 331/2013			kumulatiivinen L/S = 10 l/kg			
	Pysyvä jäte	Tavanomainen jäte	Vaarallinen jäte	Mr+ valuhiekka	Rikastushiekka	Rikastushiekka a+ LT 5%	Rikastushiekka+ LT 10%
Elohopea, Hg	0,01	0,2	2	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Alumiini, Al				8	880	1400	1100
Arseeni, As	0,5	2	25	<0,2	1,5	0,3	0,2
Barium, Ba	20	100	300	0,7	0,2	0,2	0,1
Kadmium, Cd	0,04	1	5	0,05	1,5	1,4	1,3
Kromi, Cr	0,5	10	70	<0,1	2,8	0,8	0,1
Kupari, Cu	2	50	100	4,8	76	59	29
Rauta, Fe				<0,2	6000	1000	150
Mangaani, Mn				4	46	70	93
Molybdeeni, Mo	0,5	10	30	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Nikkeli, Ni	0,4	10	40	0,4	1,6	1,6	1,6
Lyijy, Pb	0,5	10	50	<0,1	0,3	<0,1	<0,1
Antimoni, Sb	0,06	0,7	5	0,04	0,06	0,02	<0,01
Seleen, Se	0,1	0,5	7	0,02	0,09	0,04	0,07
Vanadiini, V				<0,1	0,30	<0,1	<0,1
Sinkki, Zn	4	50	200	10	500	490	530
Kloridi, Cl	800	15000	25000	20	130	62	27
Sulfaatti, SO4	1000	20000	50000	550	99000	29000	30000
Fluoridi	10	150	500	<5	120	35	25
DOC	500	800	1000	<5	53	30	45
Kalsium				110	4300	4800	4300
Natrium				61	7	9	130
Kalium				23	5	1	6
Magnesium				28	1100	1100	1200

Ennen rakentamista teknisen testauksen toisessa vaiheessa moreeni + 5 % valimohiekka ja rikastushiekan rakenneratkaisujen osalta tutkittiin jäätyksen vaikutus läpäisevyyteen ja lujuuteen sekä routivuus (kuva 20). Tutkimuksissa moreeni + 5 % valimohiekka rakenneratkaisu oli lievästi routiva ja rikastushiekka ilman lisäkomponentteja routimaton.

**Kuva 20.** Pyhäsalmen materiaalistestaustulokset jäätyksen vaikutuksesta vedenläpäisevyyteen.

Rakenteissa käytettävien materiaalien vesipitoisuudet ja tavoitetheydet tarkistettiin ennen rakentamisen aloittamista siltä osin kuin se oli rakentamisen kannalta tarpeellista. Vesipitoisuuksien

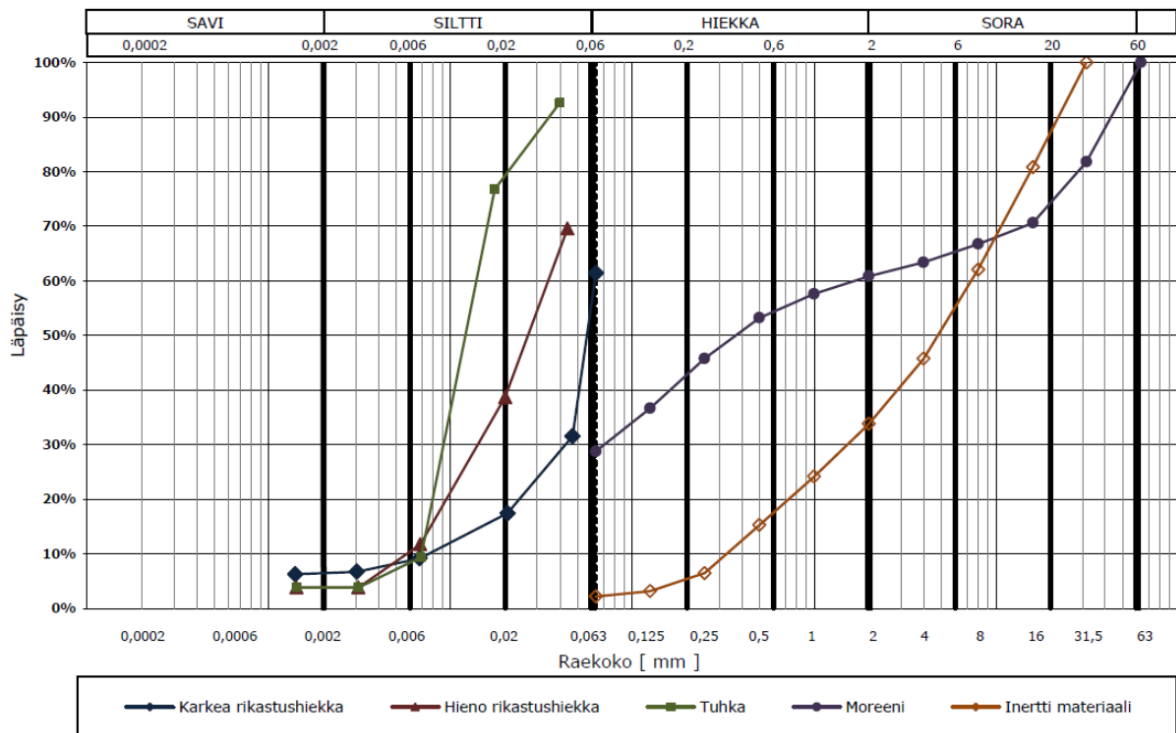
lisäksi pilottirakentamisessa käytettäville materiaaleille suoritettiin kentällä tiivistyskokeet Proctor-välineistöllä. Tiivistyskokeissa käytettiin tiivistystyömääränä 10 iskua/kerros ja tiivistys suoritettiin viidessä eri kerroksessa. Tiivistyskokeiden avulla arvioitiin materiaalin tiivistymistä ja eri rakennekerroksiin tarvittavia materiaalimääriä. Vesipitoisuus- ja tiivistyskoetulokset on esitetty taulukoissa 12 ja 13.

Taulukko 13. Pyhäsalmen pilottirakenteissa käytettyjen materiaalien vesipitoisuudet.

Materiaali	Kentällä määritetyt vesipitoisuudet (%)	Laboratoriossa määritetyt vesipitoisuudet (%)
Inertti (alkuperäinen)	-	2,6
Rikastushiekka (hieno)	28,6 24,0	25,8 24,8
Rikastushiekka (karkea)	11,8	15,5
Tuhka (alkuperäisessä w)	15,5	15,2
Kipsi	-	22,4
Moreeni (seulottu)	6,1	6,3
Kipsi + Moreeni	-	15,0
Rikastushiekka + tuhka	-	16,9

Taulukko 14. Pyhäsalmen rakentamisen yhteydessä toteutettujen tiivistyskokeiden tuloksia.

Materiaali	w_{lab} [%]	m_m [g]	ρ_d [kg/m ³]	Huomiot
Hieno rikastushiekka	25,8 24,8		(1870)	Tiivistäminen hankalaa, liian märkää. Tiivistyskoe ei onnistunut
Karkea rikastushiekka	15,5	2494	2380	Tiivistäminen hieno rikastushiekkaa helpompaa
Tuhka (alkuperäinen)	15,2	864	830	Tiivistäminen alkuperäisessä vesipitoisuudessa huono, jää löyhäksi -> vesipitoisuuden nosto
Moreeni	6,3	2218	2300	Moreenin tiivistäminen helppoa tiivistyskokeessa Moreenin tiheys erittäin suuri -> tiivistyskokeella määritetty tavoitetiheys (2300 kg/m ³) vaikea toteuttaa
Kipsi	22,4	1436	1290	Kipsin tiivistäminen suhteellisen helppoa
Kipsi + Moreeni	15	1888	1810	Tiivistyskokeessa käytetty materiaali ei sisältänyt isoja rakeita
Rikastushiekka + tuhka	16,9	2467	2320	Pehmeni



Kuva 21. Pyhäsalmen pilotoinnissa käytettyjen materiaalien rakeisuuskäyrät.

Pilotoinnissa käytettyjen materiaalien rakeisuudet määritettiin laboratoriossa pesu- ja kuivaseulonalla tai areometrikokeella (kuva 21). Rakeisuuskäyrien ja maalajien GEO- luokitusten perusteella inertti materiaali vastaa rakeisuudeltaan hiekkaista soraa (hkSr), seulottu moreeni soraista hiekkamoreenia (srHkMr), karkea rikastushiekka hiekkaista silttiä (hkSi), hieno rikastushiekka ja tuhka silttiä (Si). Rakeisuuksien lisäksi rikastushiekoista määritettiin pH ja redox. Karkean rikastushiekan pH oli laboratoriossa 7,5 ja redox 236mV. Hienon rikastushiekan pH 9,4 ja redox 87mV.

Pilotointi toteutettiin Pyhäsalmen kaivoksen alueella 9–16.5.2016 UPACMIC-projektin puitteissa tehtyjen suunnitelmien sekä kanadalaisen konsulttifirman Klohn Crippen Bergerin tekemän pintarakenteiden koerakennesuunnitelman pohjalta. Pilotit rakennettiin noin 10 m³ kokoiisiin sylinterimäisiin säiliöihin, joilla simuloitiin laboratoriossa tehtävää kolonnitestiä. Rakenteista kerättiin teknisiä ja ympäristökelpoisuuteen liittyviä tietoja rakentamisvaiheesta purkamisajankohtaan asti. Koerakentamisessa käytetyt materiaalit ja niiden toimittajat on esitetty taulukossa 15 ja pilottirakenteet toteutettiin kuvassa 22 esitettyjen rakennekerrosten mukaisesti.

Taulukko 15. Pyhäsalmen koerakentamisessa käytetyt materiaalit

Materiaali	Materiaalin tuottaja
Hieno ja karkea rikastushiekka	Pyhäsalmi Mine Oy
Moreeni	Pyhäsalmi Mine Oy
Tuhka	Oulun Energia Oy
Kipsi	Yara
Kasvukerros	Rönkön Puutarha, Pyhäjärvi
Inertti materiaali	Tenhusen Maansiirto Oy



Kuva 22. Pyhäsalmen pintarakenteen pilotoinnin materiaalikerrokset.

8.2 Hitura, kuitusavi läjitysalueen peitekerroksessa

Hituran kaivosalueen pilotoinnissa testattiin rikastushiekka-altaiden pintarakenteen tiivistyskerroksessa perinteisen mineraalimaa-aineksen korvaamista kuitusavella. Rakenteita käytettiin Hituran ensimmäisen vaiheen sulkemiseen. Kuitusavea toimitettiin Hituraan kolmelta eri materiaalintuottajalta, jotka olivat Metsä Tissue Mänttä, Stora Enso Oyj Oulu ja Metsä Board Oyj Äänekoski. Jokaiselle materiaalintuottajalle rakennettiin oma koekenttä pilotointia varten. Koekentät tehtiin vuoden 2017 syksyllä ja vuoden 2018 kevään aikana, niiden tavoitteena oli tuottaa tietoa materiaalien käyttäytymisestä maasto-olosuhteissa sekä työskentelytavoista vaaditun tiiveyden saavuttamiseksi. Vaatimuksena rakenteille oli, että tiivistyskerros on homogeeninen ja vedenläpäisevyysarvo on $k \leq 1,0 \times 10^{-8}$ m/s, kerrospaksuuden tulee olla ≥ 200 mm. Tarkemmat tiedot ja lisää tutkimustuloksia kuitusavirakenteisiin liittyen löytyy viiteraporteista: *Fortum koekenttäräportit (10/2017 Mäntän kuitusavi, 5/2018 Äänekosken kuitusavi, Oulun kuitusavi 6/2018)*, *Fortum-lausunto 10/2017 "Kuitusaven soveltuvuus Hituran rikastushiekka-altaan pintarakenteeseen"* ja *Technical report, piloting cover structure (action B1) 12/2019*.

Koekentissä käytettyjä materiaaleja oli tutkittu ennakkoon laboratoriossa materiaalitestauksen ensimmäisen ja toisen vaiheen aikana. Edellisen lisäksi Fortum toteutti laatututkimuksia

ympäristökelpoisuuteen ja rakennettavuuteen liittyen. Tutkimusten perusteella vaihtoehtoiset materiaaliratkaisut (kuitusavet) hyväksyttiin Hituran rakenteissa käytettäväksi perinteisen moreenirakenteen sijaan. Kuitusavi täyttää uusiomateriaaleilta vaaditut ympäristökelpoisuuden raja-arvot. Rakentamista edeltäviä kuitusavien tutkimustuloksia on koottu taulukoihin 16-19.

Taulukko 16. Kuitusavinäytteiden käyttöä edeltävä materiaalitestausta Hiturassa (Fortum).

Näytenimi	Märkätiheys (kg/m ³)	Vesipitoisuus (%)	Vedenläpäisevyys k-arvo (m/s)
Mänttä 2 23.3.2017	1132	99,7	6,4 x 10 ⁻¹⁰
Mänttä 3 9.3.2017	979	122,4	4,9 x 10 ⁻¹⁰
Mänttä vanha kasa 27.7.2017	1310,2	143,1	4,3 x 10 ⁻⁹
Äänekoski1 28.12.2017	1012,8	160,4	2,2 x 10 ⁻⁹
Äänekoski2 28.12.2017	1055,8	158,3	2,4 x 10 ⁻⁹
Äänekoski3 28.12.2017	1044,5	158,3	3,0 x 10 ⁻⁹
Äänekoski4 28.12.2017	1031,2	158,2	2,7 x 10 ⁻⁹
Äänekoski5 28.12.2017	1012,8	160,4	2,2 x 10 ⁻⁹
Oulu NP123 15.12.2017	1507,4	63,2	4,5 x 10 ⁻⁹
Oulu NP135 15.12.2017	1536,2	59,9	4,3 x 10 ⁻⁹
Oulu NP137 15.12.2017	1531,0	59,2	3,6 x 10 ⁻⁹
Oulu NP143 15.12.2017	1545,9	57,9	3,1 x 10 ⁻⁹
Oulu NP246A 15.12.2017	1512,7	59,5	3,0 x 10 ⁻⁹
Oulu NP246B 15.12.2017	1547,7	58,0	3,3 x 10 ⁻⁹

Taulukko 17. Mäntän kuitusaven routimiskerroin ja kieritysraja (Fortum)

Näyte	Routimiskerroin SP, mm ² /Kh	Kieritysraja (%)
Mänttä 1	4,25	107
Mänttä 2	3,90	132

Taulukko 18. Mäntän kuitusaven leikkauslujuus (Fortum)

Näyte	Suljettuleikkauslujuus kPa	Vesipitoisuus (%)
Mänttä 1	6,28	197,9
Mänttä 2	5,88	224,2

Taulukko 19. Kuitusavesta uutetun veden vaikutukset rikastushiekan liukosiin pitoisuuksiin (Fortum).

Yhdiste	Kuitusaven kokonaispitoisuudet (mg/kg)	Kuitusaven liukoisuus laboratoriovedellä L/S 10 (mg/kg)	Rikastushiekan kokonaispitoisuudet (mg/kg)	Rikastushiekan liukoisuus kuitusavesta uutetulla vedellä L/S 10 (mg/kg)
TOC/DOC	210 000-250 000	634-1050	-	286-559
Kloridi	1100- <1800	< 100	180	103-155
Rikki	-	-	12600	-
Sulfaatti	-	< 500	-	2140-2220
pH	-	7,6-8,4	-	8,1-8,2
Barium	-	1,1-1,6	-	0,36-0,45
Kupari	89-99	< 0,05	1480	0,12-0,18
Nikkeli	5,8-6,1	< 0,05-0,07	2460	0,32-0,36
Sinkki	22-29	< 0,05	90	0,07-0,08

Tutkimustulosten perusteella taulukossa 16 esitettyjen kuitusavinäytteiden vedenläpäisevyysarvot täyttivät peitekerroksen vedenläpäisevyydelle asetetun vaatimustason ($k \leq 1,0 \times 10^{-8}$ m/s).

Kieritysrajakoe ei tutkimusten perusteella sovellu kuitusavelle, koska kuitusavi ei plastisoidu tavallisten savimateriaalien tavoin (tässä tutkimuksessa määritetyt tulokset ovat kuitenkin yleisesti ottaen tyypillisesti kuitusavelle ilmoitetulla plastisuusraja-alueella/tasolla). Routakokeiden perusteella kuitusaven routivuus on pieni, eikä kuitusavirakenteessa ole juurikaan routimista aiheuttavaa vapaata vettä. Testitulosten perusteella kuitusavesta valmistettavat peittorakenteet eivät vaadi ylimääräistä routasuojausta. Testeissä määritetyt suljettujen leikkauslujuuksien arvot ovat tyypillisesti tuoreelle kuitusavelle ilmoitettujen arvojen mukaisia (tuore <10 kPa, rakenteeseen tiivistetty 1-4 vuoden jälkeen 10-35 kPa).

Rakennettavuuteen liittyvien tutkimusten lisäksi Mäntän kuitusavelle tehtiin ympäristökelpoisuuteen liittyvää testausta kuitusavesta suotautuvan veden vaikutuksista rikastushiekan sisältämien aineiden liukoisuuksiin. Suotovesitutkimuksia tehtiin laboratoriovedellä sekä kuitusavesta uutetulla vedellä. Tuloksia on esitetty taulukossa 19, johon on koottu laboratorion määrittämisen ylittäneet tulokset kahden näytteen (uusi ja vanha kuitusavi kasa) keskiarvojen osalta. Esitettyjen tulosten perusteella rikastushiekan liukoinen sulfaattipitoisuus ylittää VNa 331/2013 asetuksen mukaisen raja-arvon 1000 mg/kg. Liukoisuudet olivat samalla tasolla myös kuitusaven uutovedellä tehdyissä kokeissa. Metallien liukoisuudet alittavat pysyvän jätteen kaatopaikkakelpoisuuden raja-arvot ja pääosin myös analyysien määrittämisen rajat. Kuparin liukoisuus oli hieman korkeampi kuitusaven uutovedellä kuin laboratoriovedellä tehdyissä liukoisuuskokeissa, sama tilanne on havaittavissa myös nikkelin ja sinkin osalta. Testauksen perusteella kuitusavesta irtoava vesi ei lisää merkittävästi

rikastushiekan sisältämien metallien liukoisuutta, savikerroksen pieni vedenläpäisevyyden ansiosta vettä ei juurikaan suotaudu kerroksen läpi.

Pilotoinnissa käytettyjen kuitusavien kokonaispitoisuudet on esitetty liitteessä 5A ja Oulun ja Äänekosken kuitusavien liukoiset pitoisuudet liitteessä 5B. Uuttotestin tulokset kokonaisuudessaan ovat liitteessä 5C.

Koekenttien rakentamisen aikana otettiin näytteitä, joista valmistettiin koekappaleita vedenläpäisevyydestejä varten. Kaikki koekentistä määritetyt vedenläpäisevyysarvot alittivat vaaditun tason $k \leq 1,0 \times 10^{-8}$ m/s (taulukko 19). Analyyseissä käytettiin kahta eri gradienttia 31 ja 5, joiden välillä ei ollut huomattavaa eroa.

Taulukko 20. Koekentistä otetuista näytteistä määritetyt vedenläpäisevyysarvot (Fortum).

Näyte	Märkätiheys (kg/m ³)	Vesipitoisuus (%)	Vedenläpäisevyys k-arvo, (m/s)	Gradientti
Mänttä TRX1	1066,8	141,2	$7,3 \times 10^{-9}$	31
Mänttä TRX8	1057,3	133,1	$5,5 \times 10^{-9}$	31
Mänttä TRX14	1071,7	136,9	$5,8 \times 10^{-9}$	31
Mänttä TRX1	1074,7	135,4	$9,0 \times 10^{-9}$	5
Mänttä TRX6	1064,6	137,9	$7,5 \times 10^{-9}$	5
Mänttä TRX6	1061,1	114,6	$7,6 \times 10^{-9}$	5
Mänttä TRX8	1036,8	137,2	$4,5 \times 10^{-9}$	5
Mänttä TRX11	1060,0	130,3	$7,6 \times 10^{-9}$	5
Mänttä TRX14	1058,6	135,5	$5,6 \times 10^{-9}$	5
Äänekoski TRX3	1142,4	146,7	$9,7 \times 10^{-9}$	5
Oulu O1	1334,6	63,7	$7,2 \times 10^{-9}$	5
Oulu O4	1441,4	58,3	$5,3 \times 10^{-9}$	5

8.3 Kuopio, Sorsasalons pystyeristerakenne

Kuopion Sorsasalossa sijaitsevalle Fortum Waste Solutions Oy:lle suunniteltiin tavanomaisen ja vaarallisen jätteen sijoitusalueiden väliin pystyeristerakennetta, jonka poikkileikkauskuva on esitetty raportin liitteessä 6. Pystyeristerakenteen tulee estää veden ja sen mukana haitta-aineiden kulkeutuminen vaarallisen jätteen sijoitusalueelta tavanomaisen jätteen sijoitusalueelle. Pystyeristerakenteen materiaaleina pyrittiin käyttämään ylijäämä- ja jättemaita, sekä teollisuuden sivutuotteita/jätteitä. Lopulliselle rakenteelle annettu vedenläpäisevyysvaatimus oli $\leq 10^{-9}$ m/s.

Pystyeristerakenteen **tiivistyskerroksessa** suunniteltiin käytettäväksi ylijäämäsaveta, jonka tavoitettavuuteen vaadittavat työskentelytavat selvitettiin koekentän avulla. Ennen rakentamisen aloittamista savelle tehtiin rakennettavuuteen liittyviä ennakkotutkimuksia Fortumin toimesta. Savialueelta otettiin näytteitä koekuopista ja niistä määritettiin Fortumin toimesta rakeisuudet areometrikokeella, hehkutushäviö sekä sähkönjohtavuus ja pH. Näytteiden pH- ja

sähkönjohtavuustulokset on esitetty taulukossa 21. Lisää tutkimustuloksia sekä koekenttärakentamisen tarkemmat tiedot ovat Fortumin koekenttäräportissa *Mäkelä alue 2 savi 11/2020*.

Taulukko 21. Mäkelän savialueen näytteiden pH- ja sähkönjohtavuustulokset (Fortum).

Näyte	Sähkönjohtavuus ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	pH
KK1 / 1,0 m	70,2	6,6
KK2 / 1,0 m	59,9	6,6
KK3 / 1,0 m	54,7	6,4
KK3 / 2,5 m	58,2	6,5
KK4 / 1,0 m	72,3	6,6
KK5 / 0,8 m	45,3	6,2
KK5 / 1,5 m	60,8	6,4

Koekentässä rakenne tiivistettiin kaivinkoneen kauhalla käyttäen apuna muottia. Rakenne tehtiin noin 1000 mm kerrospaksuuteen (mittauspisteet T10-T12), josta rakenne leikattiin noin 500 mm kerrospaksuuteen. Rakenteen tiiveydet mitattiin rakentamisen aikana Troxler-mittarilla.

Koekentästä otettiin kaksi näytettä (T14 ja näyte 1), joista määritettiin vedenläpäisevyys, pisteestä T14 vedenläpäisevyys mitattiin rinnakkaismäärityksenä kahdessa eri tiheydessä. Taulukossa 22 esitettyjen tulosten perusteella vaadittu tiiveys on saavutettavissa koekentässä käytetyillä menetelmillä. Koekentältä otetuista näytteistä valmistettujen koekappaleiden vedenläpäisevyysarvot täyttivät selvästi rakenteelle asetetun vedenläpäisevyysvaatimuksen $k \leq 10^{-9}$ m/s.

Pystyeristeseinämän rakentaminen aloitettiin syksyllä 2020 vanhan pohjarakenteen HDPE-muovikalvon päälle ja rakentamista jatketaan keväällä 2022. Tiivistyskerroksessa hyödynnettiin Mäkelän alueen ylijäämäsavea lisäksi Hamulan alueen ylijäämäsavea. Myös Hamulan savea testattiin ennen rakentamista koekentällä. Tulosten perusteella myös Hamulan savea vedenläpäisevyystulokset olivat sellaisella tasolla, että sen hyödyntäminen kohteella oli mahdollista (taulukko 22). Koekentän tarkemmat tiedot ja tutkimustulokset löytyvät Fortumin koekenttäräportista *Hamulan savi sekä hienainesmoreeni Kuopion käsittelykeskus, pohjarakenne 10/2020*.

Taulukko 22. Mäkelän savea koekentästä määritetyt vedenläpäisevyystulokset (Fortum).

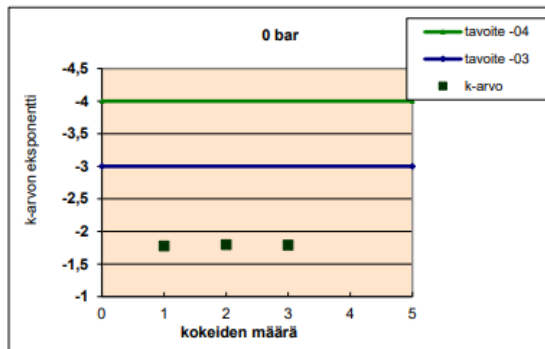
Näyte	Märkätiheys (kg/m^3)	Vesipitoisuus (%)	Vedenläpäisevyys k-arvo (m/s)
T14	1813,7	38,6	$1,4 \times 10^{-10}$
T14 R	1719,2	43,6	$2,9 \times 10^{-10}$
N1	1702,8	39,8	$2,5 \times 10^{-10}$

Taulukko 23. Hamulan saven koekentistä määritetyt vedenläpäisevyytulokset (Fortum).

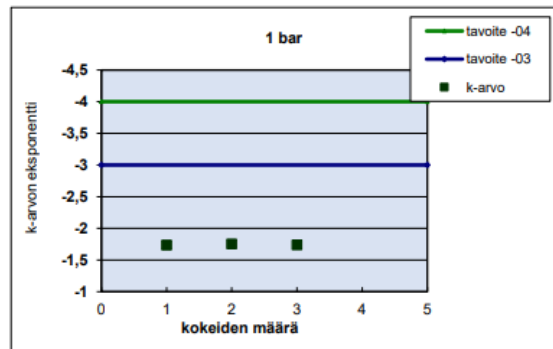
Näyte	Märkätiheys (kg/m ³)	Vedenläpäisevyys k-arvo (m/s)
N1	2099,0	1,4 x 10 ⁻⁹
N2	2056,3	9,9 x 10 ⁻¹⁰
TRX11	2087,0	7,3 x 10 ⁻¹⁰

Pystyeristerakenteen **kuivatuskerrokseen** käytettiin Riikinvoima Oy:n toimittamaa karkeaa pohjatuuhkaa. Ennen rakentamisen aloittamista tuhkan soveltuvuutta rakenteeseen tutkittiin ympäristökelpoisuuden ja rakennettavuuden näkökulmista.

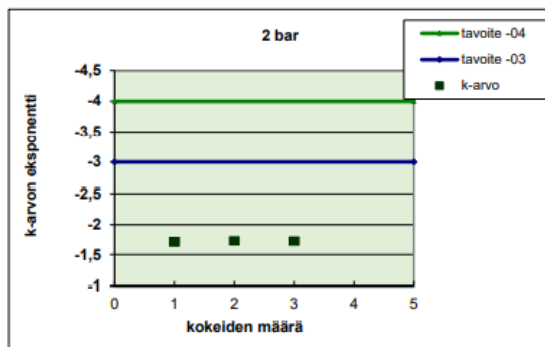
K-ARVO (ka.) bar 0	1,6E-02
MÄRKÄTILAVUUSPAINO	1376
mittaus aika s	5
Kokeiden määrä	3



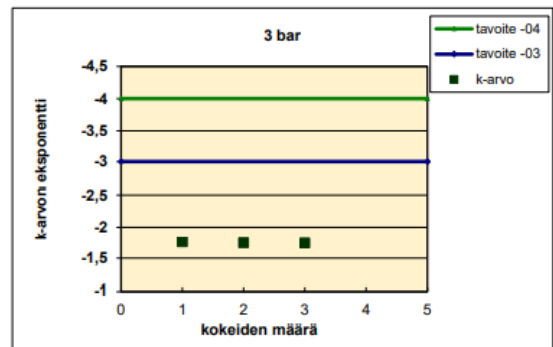
K-ARVO (ka.) bar 1	1,8E-02
MÄRKÄTILAVUUSPAINO	1394
mittaus aika s	5
Kokeiden määrä	3



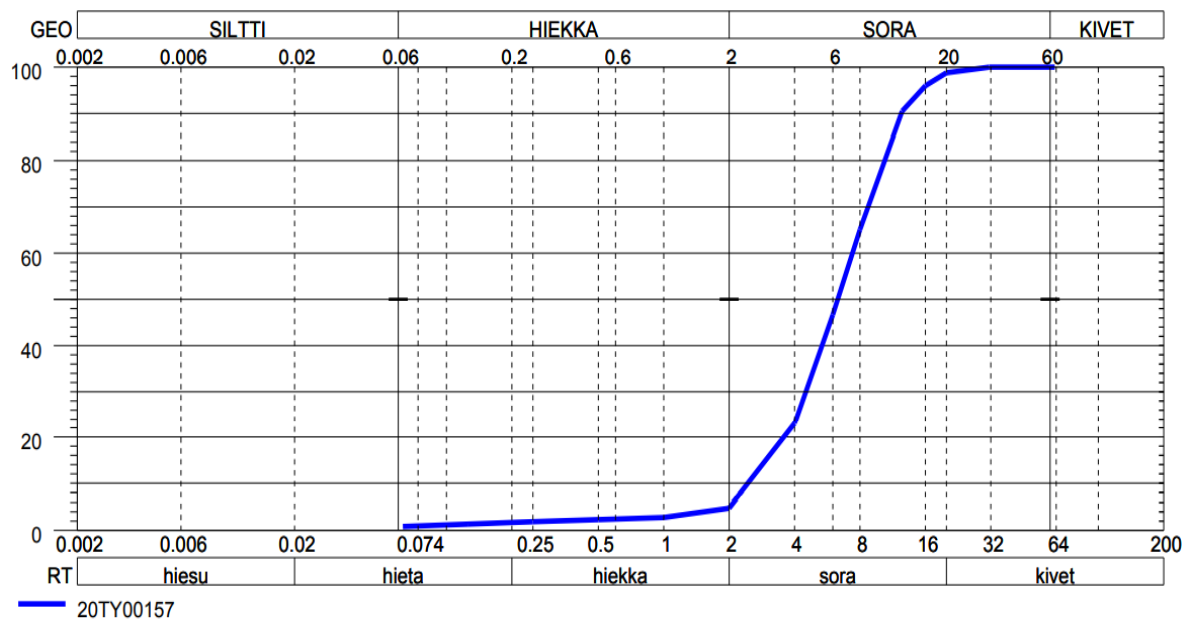
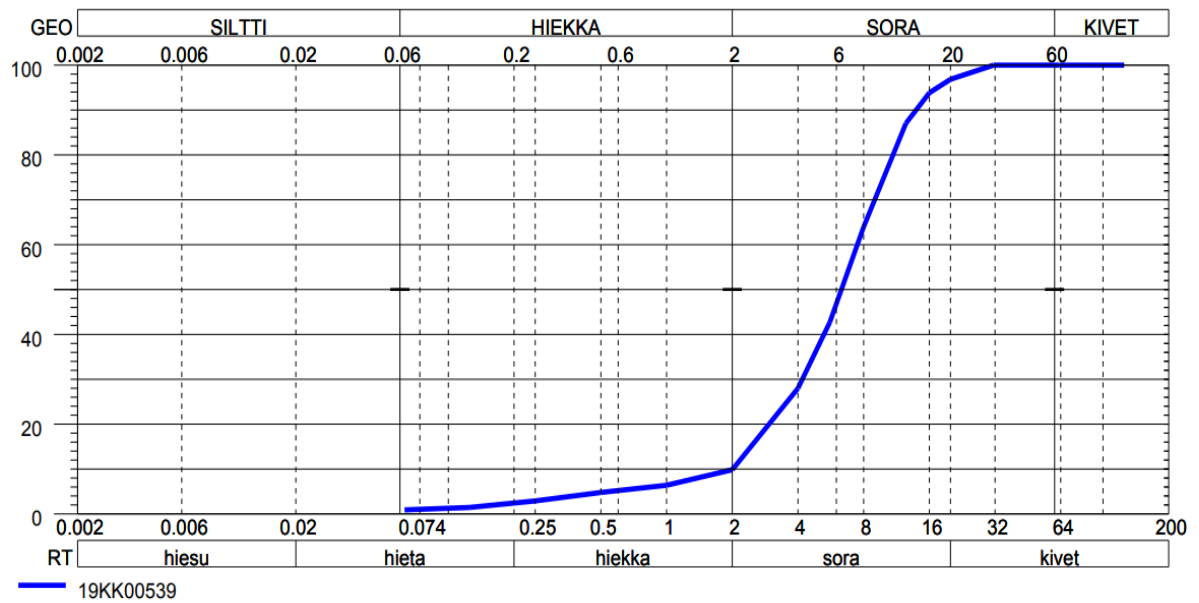
K-ARVO (ka.) bar 2	1,9E-02
MÄRKÄTILAVUUSPAINO	1404
mittaus aika s	5
Kokeiden määrä	3



K-ARVO (ka.) bar 3	1,8E-02
MÄRKÄTILAVUUSPAINO	1418
mittaus aika s	5
Kokeiden määrä	3

**Kuva 23.** Riikinvoiman karkean pohjatuuhkan vedenläpäisevyytulokset kiinteäseinämäisessä selissä (Fortum).

Kuvassa esitettyjen vedenläpäisevyytulosten perusteella tuhka soveltui käytettäväksi suunniteltuun rakenteeseen. Rakenteen kannalta tuhkan riittävän suuri raekoko ja vähäinen hienoaineksen määrä mahdollisti hyvän vedenläpäisevyyden. Tuhkan rakeisuuskäyrät ovat nähtävissä kuvassa 23.



Kuva 24. Tuhkanäytteiden rakeisuuskäyrät (Fortum).

Tuhkanäytteiden hienoainespitoisuus rakeisuuskäyrien perusteella on erittäin pieni $\leq 5\%$. Geoteknisen luokituksen mukaan tuhkanäytteistä määritetyt maalajit ovat Sora (Sr) ja hiekkainen sora (hkSr) (kuva 24).

Taulukko 24. Riikinvoima Oy:n tuottamasta tuhkaista tutkittujen haitta-aineiden kokonaispitoisuudet verrattuna vaarallisen jätteen raja-arvoihin sekä pH-arvot (Fortum).

Komponentti	Näyte 18KK01684 Vuosi- kokooma 2018 (mg/kg tuore)	Näyte 18KK00030 Vuosi- kokooma 2017 (mg/kg tuore)	Luokitusta vastaava sovellettava vaarallisen jätteen pitoisuusraja ¹ (mg/kg)	Aineen luokitus (Vaarallisen jätteen pitoisuusrajan määrävä luokitus)	Yhteen- laskussa alin huomioitava pitoisuus (Cut-off- raja) (mg/kg)
Arseeni, As ²	<5	<5	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Kadmium, Cd ²	1,6	1,3	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Kromi, Cr ²	356	139	1 000	Carc. 1B (H350i)	-
Kupari, Cu					
Kupari(II)oksidi (CuO)	1 088	1 584	2 000	Aquatic Chronic 1 (H410)	800
Molybdeeni, Mo					
Molybdeenitrioksidi (MoO ₃)	<10	<10	6 700	Carc. 2 (H351)	-
Nikkeli, Ni					
Nikkelidioksidi (NiO ₂)	45	60	650	Carc. 1A (H350i)	-
Lyijy, Pb ²	92	208	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Antimoni, Sb ²	12	24	25 000	Aquatic Chronic 2 (H411)	10 000
Sinkki, Zn					
Sinkkioksidi (ZnO)	257	713	2 000	Aquatic Chronic 1 (H410)	800
pH, L/S 10	10,7	11,6	≤ 2 tai ≥ 11,5 ³		
pH, L/S 2	10,5	11,0	≤ 2 tai ≥ 11,5 ³		
pH, L/S 8	10,4	10,6	≤ 2 tai ≥ 11,5 ³		

Taulukossa 24 esitettyjen tulosten perusteella tuhka ei sisällä haitallisten aineiden pitoisuuksia, jotka ylittäisivät vaarallisen jätteen raja-arvot. Kuparin kokonaispitoisuus ylittää pitoisuuden 800 mg/kg, joka on alhaisin yhteenlaskusääntöjen mukaan huomioon otettava pitoisuus vaaraominaisuuksien arvioinnissa. Minkään muun aineen pitoisuus ei ylitä alhaisinta huomioon otettavaa pitoisuutta, jolloin pitoisuuksien yhteenlasku ei ole tarpeellinen.

Tutkitun tuhkan pH-arvo on korkea, jolloin sen syövyttävyyden ja ärsyttävyyden tutkimista voisi pitää perusteltuna. Suomessa tarkastelun ulkopuolelle on jätetty kiinteät termisissä prosesseissa muodostuvat jätteet, jolloin tutkimusta ei tarvitse tehdä. Tutkimustuloksiin liittyvät analyysitodistukset löytyvät viiteraportista Fortum *Jätteen kaatopaikkakelpoisuustestaus karkean pohjatuhkan seula-alite 11/2019*.

Taulukko 25. Riikinvoima Oy:n tuottamasta tuhkasta tutkitut haitta-aineiden liukoiset pitoisuudet sekä orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus "TOC" (Fortum).

Parametri	Näyte 18KK01684 Vuosikokooma 2018 (mg/kg, kuiva- aine)	Näyte 18KK00030 Vuosikokooma 2017 (mg/kg, kuiva- aine)	Tavanomaisen jätteen kaatopaikan ¹ raja-arvo L/S 10 (VNa 331/2013) (mg/kg)	Vaarallisen jätteen kaatopaikan raja-arvo L/S 10 (VNa 331/2013) (mg/kg)
Liukoisuusominaisuudet (kumulatiivinen L/S 10, SFS-EN 12457-3)				
Arseeni, As	<0,1	<0,1	2	25
Barium, Ba	<4,0	<4,0	100	300
Kadmium, Cd	<0,01	<0,01	1	5
Kromi, Cr	0,2	<0,1	10	70
Kupari, Cu	<0,4	<0,4	50	100
Elohopea, Hg	<0,002	<0,002	0,2	2
Molybdeeni, Mo	0,4	0,8	10	30
Nikkeli, Ni	<0,1	<0,1	10	40
Lyijy, Pb	<0,1	<0,1	10	50
Antimoni, Sb	0,27	0,29	0,7	5
Seleeni, Se	<0,03	<0,03	0,5	7
Sinkki, Zn	<0,8	<0,8	50	200
Kloridi, Cl ⁻	<160	<160	15 000	25 000
Fluoridi, F ⁻	2,8	6	150	500
Sulfaatti, SO ₄ ²⁻	1 335	1 200	20 000	50 000
DOC	<100	<100	800	1 000
TDS ²	3 100	3 800	60 000	100 000
Kokonaispitoisuudet				
Hehkutushäviö, %	0,2	0,1	10 ³	10 ⁴
TOC, %	<0,3	<0,3	5 ¹ /10 ³	6 ⁴
Muut ominaisuudet				
pH, L/S 10	10,7	11,6	>6	
pH, L/S 2	10,5	11,0	>6	
pH, L/S 8	10,4	10,6	>6	
Johtokyky, µS/cm L/S 2	1 200	1 200		
Johtokyky, µS/cm L/S 8	310	420		
Haponneutralointi- kapasiteetti (ANC)			tutkittava ja arvioitava	tutkittava ja arvioitava

Tutkittujen haitta-aineiden liukoiset pitoisuudet täyttävät VNa 331/2013 mukaiset tavanomaisen ja vaarallisen jätteen kaatopaikkakelpoisuuskriteerit (taulukko 25). Asetuksen mukaan myös orgaanisen hiilen (TOC) kokonaispitoisuudet molempien näytteiden osalta täyttävät vaarallisen ja tavanomaisen jätteen kriteerit.

Pystyterakenteen tiivistys- ja kuivatuskerrokset tuettiin 4-5 metriä leveällä **tukitäytöllä**, johon käytettiin oman alueensa (vaarallinen/tavanomainen jäte) kaatopaikkakelpoisuuden täyttäviä materiaaleja. Rakentamista edeltäviä materiaalitutkimuksia ympäristökelpoisuuteen liittyen tehtiin rakenteeseen suunnitellulle tuhkalta sekä Hituran vesienkäsittelysaksalle.

Taulukko 26. Kuopion Energian toimittaman tuhkan kokonaispitoisuudet verrattuna vaarallisen jätteen raja-arvoihin (Fortum).

Komponentti	Näyte 693-2020-00021179 (mg/kg tuore)	Näyte 693-2020-00021180 (mg/kg tuore)	Näyte 693-2020-00021181 (mg/kg tuore)	Luokitusta vastaava sovellettava vaarallisen jätteen pitoisuusraja ⁽¹⁾ (mg/kg)	Aineen luokitus (Vaarallisen jätteen pitoisuusrajan määrittävä luokitus)	Yhteenlaskussa alin huomioitava pitoisuus (Cut-off-rajana) (mg/kg)
Arseeni, As ⁽²⁾	4,4	<3	3,5	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Barium, Ba ⁽²⁾	2 096	2 198	2 794	225 000	Acute Tox. 4 (H332)	10 000
Kadmium, Cd ⁽²⁾	7,6	7,7	13	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Koboltti, Co						
Kobolttikloridi (CoCl ₂)				450	Carc. 1B (H350i)	-
Kobolttisulfaatti (CoSO ₄)	13	13	13	380	Carc. 1B (H350i)	-
Kobolttikarbonaatti (CoCO ₃)				500	Carc. 1B (H350i)	-
Kromi, Cr ⁽²⁾	76	73	74	1 000	Carc. 1B (H350i)	-
Kupari, Cu						
Kupari(II)oksidi (CuO)				2 000	Aquatic Chronic 1 (H410)	800
Kupariidihydroksidi/kupari(II)hydroksidi (Cu(OH) ₂ tai CuH ₂ O ₂)	120	120	170	1 600	Aquatic Chronic 1 (H410)	650
Elohopea, Hg ⁽²⁾	0,10	0,12	0,23	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
				2 500	Acute Tox. 2 (H300)	1 000
Molybdeeni, Mo						
Molybdeenitrioksidi (MoO ₃)	8,8	8,7	11	6 700	Carc. 2 (H351)	-
Nikkeli, Ni						
Nikkelihydroksidi/Nikkelidihydroksidi (Ni(OH) ₂)	53	52	54	630	Carc. 1A (H350i)	-
Nikkelikarbonaatti (NiCO ₃)				490	Carc. 1A (H350i)	-
Lyijy, Pb ⁽²⁾	53	53	79	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Antimoni, Sb ⁽²⁾	<2	<2	<2	25 000	Aquatic Chronic 2 (H411)	10 000
Vanadiini, V						
Vanadiinipentoksidi (V ₂ O ₅)	38	35	33	5 600	STOT RE 1 (H372) Muta. 2 (H341)	-
Sinkki, Zn						
Sinkkioksidi (ZnO)	1 597	1 598	2 295	2 000	Aquatic Chronic 1 (H410)	800
PCB_{tot} ⁽³⁾	<0,070	<0,070	<0,070	50 ⁽⁴⁾		
Mineraaliöljy (C₆-C₄₀)	<50	<50	<50	1 000 ⁽⁵⁾ 10 000 ⁽⁶⁾		-

Taulukossa 26 esitettyjen tulosten perusteella tuhka sisältää sinkkiä vaarallisen jätteen raja-arvon ylittävänä pitoisuutena yhden näytteen osalta. Lisäksi kahdessa muussa näytteessä sinkin pitoisuus ylittää alhaisimman vaaraominaisuuksien arvioinnin yhteenlaskussa huomioon otettavan pitoisuuden.

Taulukko 27. Kuopion energian toimittaman tuhkan liukoiset pitoisuudet sekä orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus (TOC), hehkutushäviö ja pH (Fortum).

Parametri	Näyte 693-2020- 00021179 L/S 10 (mg/kg, kuiva-aine)	Näyte 693-2020- 00021180 L/S 10 (mg/kg, kuiva-aine)	Näyte 693-2020- 00021181 L/S 10 (mg/kg, kuiva-aine)	Vaarattoman (tavanomaisen) jätteen kaatopaikan ⁽¹⁾ raja-arvo L/S 10 (VNa 331/2013) (mg/kg)	Vaarallisen jätteen kaatopaikan raja-arvo L/S 10 (VNa 331/2013) (mg/kg)
Liukoisuusominaisuudet (kumulatiivinen L/S 10, SFS-EN 12457-3)					
Arseni, As	<0,01	<0,01	<0,01	2	25
Barium, Ba	3,4	3,5	3,1	100	300
Kadmium, Cd	<0,005	<0,005	<0,005	1	5
Kromi, Cr	9,0	10	14	10	70
Kupari, Cu	<0,05	<0,05	0,087	50	100
Elohopea, Hg	<0,004	<0,004	<0,004	0,2	2
Molybdeeni, Mo	4,5	5,3	7,6	10	30
Nikkeli, Ni	<0,01	<0,01	0,013	10	40
Lyijy, Pb	0,49	0,54	0,77	10	50
Antimoni, Sb	<0,01	<0,01	<0,01	0,7	5
Seleeni, Se	0,80	0,91	1,3	0,5	7
Sinkki, Zn	5,3	6,4	9,7	50	200
Kloridi, Cl ⁻	2 000	2 500	4 100	15 000	25 000
Fluoridi, F ⁻	<5	<5	<5	150	500
Sulfaatti, SO ₄ ²⁻	23 000	37 000	48 000	20 000	50 000
DOC	110	110	120	800	1 000
TDS ⁽²⁾	110 000	120 000	170 000	60 000	100 000
Kokonaispitoisuudet					
Hehkutushäviö, %	1,8	1,5	<0,2	10 ⁽³⁾	10 ⁽⁵⁾
TOC, %	2,0	1,7	1,3	5 ^{(1)/10 ⁽³⁾}	6 ⁽⁵⁾
PCB-yhdisteet (7 kongeneeria)	<0,070	<0,070	<0,070		
Mineraaliöljy (C ₁₀ -C ₄₀)	<50	<50	<50	(2 500) ⁽⁴⁾	
PAH-yhdisteet (EPA 16)	0,36	0,43	0,40	(150) ⁽⁴⁾	
Muut ominaisuudet					
pH, L/S 2	13,3	13,3	13,4	>6	
pH, L/S 8	12,9	12,9	12,9	>6	
Johtokyky, mS/m L/S 2	7 900	9 000	12 000		
Johtokyky, mS/m L/S 8	1 400	1 500	2 300		

Taulukko 28. Kuopion Energian toimittaman tuhkan happoneutralointikapasiteetti (Fortum).

ANC	Näyte 693-2020-00021179 Kulutus mol H ⁺ /kg	Näyte 693-2020-00021180 Kulutus mol H ⁺ /kg	Näyte 693-2020-00021181 Kulutus mol H ⁺ /kg
pH 4	6,0	6,9	8,2
pH 5	5,5	6,4	7,5
pH 6	4,8	5,5	6,6
pH 7	3,5	3,9	5,3
pH 8	2,4	2,8	3,3
pH 9	1,9	2,1	2,4
pH 10	1,5	1,6	1,9
pH 11	1,2	1,3	1,5
pH 12	0,9	1,0	1,1

Tutkittujen haitta-aineiden liukoiset pitoisuudet täyttävät VNa 331/2013 mukaiset vaarallisen jätteen kaatopaikkakriteerit (taulukko 27). Ainoastaan liuenneiden aineiden kokonaispitoisuus (TDS) ylitti vaarallisen jätteen kaatopaikkakelpoisuuskriteerin. Yhden näytteen osalta ylitys on 10 %, jota pidetään vielä hyväksyttävänä. Tuhkan orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus (TOC) ja hehkutushäviö täyttivät myös vaarallisen jätteen kaatopaikkakelpoisuuskriteerit. Lisäksi näytteistä määritettiin happoneutralointikapasiteetti, joiden tulosten perusteella tuhkan haponneutralointikapasiteetti on erinomainen (taulukko 28). Esitettyjen tutkimustulosten analyysitodistukset löytyvät viiteraportista *Jätteen kaatopaikkakelpoisuustestaus Kuopion Energia Oy Haapaniemen voimalaitoksen lentotuhka*. Analyysitodistukset löytyvät raportista *Jätteen kaatopaikkakelpoisuustestaus Kuopion Energia Oy Haapaniemen voimalaitoksen lentotuhka*.

Hituran vesienkäsittelysakka kalkkikäsiteltiin pH-tason nostamiseksi Hituran ensimmäisessä sulkemisvaiheessa. Ennen sijoittamista pystyterakerakenteen tukikerrokseen, sakka kiinteytettiin Mondi Powerflute Oy:n käsittelemättömällä lentotuhkalla. Molemmista jätteistä kerättiin Fortum Waste Solutions Oy:n toimesta useita osanäytteitä, jotka yhdistettiin kokoomanäytteiksi kaatopaikkakelpoisuustestausta varten. Tuhkalla kiinteytetty näyte otettiin jätteiden käsittelykokeista Fortum Waste Solutions Oy:n Kuopion teollisuusjätekeskuksessa.

Kokoomanäytteet esikäsiteltiin Fortum Waste Solutions Oy:n laboratorioissa. Epäorgaanisia analyyseja varten näyte kuivattiin, määritettiin kuiva-aine, murskattiin alle 4 mm kokoon raskasmetallivapaalla leukamurskaimella ja homogenisoitiin ja toimitettiin SGS Finland Oy:n laboratorioon. Lentotuhka analysoitiin Fortum Waste Solutions Oy:n laboratorioissa Riihimäellä. Jätteen sisältämien metallien kokonaispitoisuuksien analysoimiseksi näyte esikäsiteltiin standardimenetelmän SFS-EN 13657 mukaisesti kuningasvesihajotuksella. Alkuaineanalyysit määritettiin ICP-AES-tekniikalla. Tulokset ilmoitetaan yksikössä mg/kg tuorepainoa kohden. Lisäksi jätteestä määritettiin pH-arvo L/S-suhteessa 10 liukoisuusominaisuuksien analysoinnin yhteydessä.

Taulukko 29. Lentotuhkan ja vesienkäsittelysakan tutkittujen haitallisten aineiden kokonaispitoisuudet verrattuna vaarallisen jätteen raja-arvoihin sekä pH-arvo

Komponentti	Näyte KE20-01403.001 (20TY00042) Vesienkäsittelysaka (mg/kg tuore)	Näytteet 20KK00358 20KK00201 Lentotuhka (mg/kg tuore)	Näyte KE20-02341.001 (20KK00352) Kiinteytetty saka (mg/kg tuore)	Luokitusta vastaava sovellettava vaarallisen jätteen pitoisuusraja ¹⁾ (mg/kg)	Aineen luokitus (Vaarallisen jätteen pitoisuusrajan määräävä luokitus)	Yhteenlaskussa alin huomioitava pitoisuus (Cut-off-raja) (mg/kg)
Arseeni, As ⁽²⁾	<10	13	<10	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Kadmium, Cd ⁽²⁾	8,7	3,9	4,4	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Koboltti, Co						
Kobolttikarbonaatti (CoCO ₃)	2 000			500	Carc. 1B (H350i)	-
Kromi, Cr ⁽²⁾	1,3	31	3,9	1 000	Carc. 1B (H350i)	-
Kupari, Cu						
Kuparidihydroksidi/kupari(II)hydroksidi (Cu(OH) ₂ tai CuH ₂ O ₂)	19	65	17	1 600	Aquatic Chronic 1 (H410)	650
Molybdeeni, Mo						
Molybdeenitrioksidi (MoO ₃)	<10	8,1	<10	6 700	Carc. 2 (H351)	-
Nikkeli, Ni						
Nikkelihydroksidi/Nikkelidihydroksidi (Ni(OH) ₂)	4 000	28	2 706	630	Carc. 1A (H350i)	-
Lyijy, Pb ⁽²⁾	1,3	59	1,5	2 500	Aquatic Chronic 1 (H410)	1 000
Antimoni, Sb ⁽²⁾	<10	<6,6	<10	25 000	Aquatic Chronic 2 (H411)	10 000
Sinkki, Zn						
Sinkkioksidi (ZnO)	300	958	244	2 000	Aquatic Chronic 1 (H410)	800
Kuiva-ainepitoisuus, %	21,3	97,76	24,6			
pH, L/S 10	8,7	9,7	8,8	≤ 2 tai ≥ 11,5 ⁽³⁾		

1) Metallionin yleisen luokituksen puuttuessa käytetään analysoituille komponenteille taulukossa esitettyjen yhdisteiden perusteella laskettuja pitoisuusrajoja.

Taulukossa 29 esitettyjen tulosten mukaan kiinteyttämätön vesienkäsittelysaka sisältää kobolttia ja nikkeliä vaarallisen jätteen raja-arvon ylittävänä pitoisuuksina saaden vaaraomaisuudet HP 7 (syöpää aiheuttava), HP 10 (lisäntymiselle vaarallinen) ja HP 14 (ympäristölle vaarallinen). Kiinteytetystä sakasta ei analysoitu kobolttia, mutta kiinteyttämättömän jätteen pitoisuuksien perusteella myös kiinteytetyssä jätteessä on nikkelin lisäksi kobolttia vaarallisen jätteen raja-arvon ylittävänä pitoisuutena.

Lentotuhkan osalta esitettyjen tulosten mukaan jäte ei sisällä haitallisten aineiden pitoisuuksia, jotka ylittäisivät vaarallisen jätteen raja-arvot. Sinkin kokonaispitoisuus ylittää pitoisuuden 800 mg/kg, joka on alhaisin yhteenlaskusääntöjen mukaan huomioon otettava pitoisuus vaaraomaisuuksien arvioinnissa. Minkään muun aineen pitoisuus ei kuitenkaan ylitä kyseistä alhaisinta huomioon otettavaa pitoisuutta, joten pitoisuuksien yhteenlaskua ei ole tarpeen tehdä. Käsittelyttömän sekä kiinteytetyn vesienkäsittelysakan kaatopaikkakelpoisuudet analysoitiin SGS Finland Oy:n laboratorioissa. Lentotuhkan osalta orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus (TOC), hiilen kokonaisuus (TC) sekä alkuainehiili analysoitiin SGS Finland Oy:n laboratorioissa.

Jätteen liukoisuusominaisuudet tutkittiin Fortum Waste Solutions Oy:n laboratorioissa yksivaiheisella ravistelutestillä, standardimenetelmällä SFS-EN 12457-2 alle 4 mm jakeesta, koska kaksivaiheisen ravistelutestin SFS-EN 12457-3 ensimmäisen vaiheen suodosta ei saatu suodatettua riittävä määrä analyysia varten. Näytettä uutettiin ionivaihdettuun veteen 24 tunnin ajan (neste/kiinteä) L/S-suhteessa 10. Saadusta suodoksesta analysoitiin metallit ja anionit, joille on kaatopaikoista annetussa valtioneuvoston asetuksessa 331/2013 määritetty raja-arvot. Määrittelyt tehtiin ICP-AES-, IC- ja FIMS-tekniikoilla standardimenetelmien SFS-EN 12506 ja SFS-EN 13370 mukaisesti. Lisäksi suodoksesta analysoitiin standardimenetelmällä SFS-EN 1484 liuenneen orgaaninen hiili (DOC) ja standardimenetelmällä SFS-EN 872 liuenneiden aineiden kokonaispitoisuus (TDS), joille on myös asetuksessa 331/2013 annettu raja-arvot. Tulokset ilmoitetaan L/S-suhteessa 10 yksikössä mg/kg kuiva-ainetta.

Taulukko 30. Jätteen kaatopaikkakelpoisuusanalyysien tulokset ja muut tutkitut ominaisuudet

Parametri	Näyte KE20- 01403.001 (20TY00042) Vesienkäsittelysakka L/S 10 (mg/kg, kuiva- aine)	Näytteet 20KK00358 20KK00201 19KK00600 Lentotuhka L/S 10 (mg/kg, kuiva-aine)	Näytteet KE20- 02341.001 KE20- 02580.001 (20KK00352) Kiinteytetty sakka L/S 10 (mg/kg, kuiva-aine)	Tavanomaisen jätteen kaatopaikan ⁽¹⁾ raja-arvo L/S 10 (VNa 331/2013) (mg/kg)	Vaarallisen jätteen kaatopaikan raja-arvo L/S 10 (VNa 331/2013) (mg/kg)
Liukoisuusominaisuudet					
Arseni, As	<0,1	<0,1	<0,10	2	25
Barium, Ba	<4,0	3,1	<4,0	100	300
Kadmium, Cd	<0,01	<0,01	<0,010	1	5
Kromi, Cr	<0,1	<0,050	<0,10	10	70
Kupari, Cu	<0,4	<0,050	<0,40	50	100
Elohopea, Hg	<0,002	<0,001	<0,002	0,2	2
Molybdeeni, Mo	<0,1	3,9	0,54	10	30
Nikkeli, Ni	0,4	<0,050	0,16	10	40
Lyijy, Pb	<0,1	<0,1	<0,10	10	50
Antimoni, Sb	<0,05	0,13	<0,05	0,7	5
Seleen, Se	<0,8	0,010	<0,03	0,5	7
Sinkki, Zn	<0,03	<0,05	<0,80	50	200
Kloridi, Cl ⁻	8 692	253	3 700	15 000	25 000
Fluoridi, F ⁻	<26	<100	<20	150	500
Sulfaatti, SO ₄ ²⁻	49 941	65 900	48 000	20 000	50 000
DOC	130	<100	<100	800	1 000
TDS ⁽²⁾	93 000	93 000	83 000	60 000	100 000
Kokonaispitoisuudet					
Hehkutushäviö, %	21,8		36,0	10 ⁽³⁾	10 ⁽⁴⁾
TOC, %	1,0	33,2	17	5 ^{(1)/10 ⁽³⁾}	6 ⁽⁴⁾
Alkuainehiili, %		33,2	13,9		
TC		33,2			
Muut ominaisuudet					
pH, L/S 10	8,7	9,7	8,7	>6	
Johtokyky, µS/cm L/S 10	5 370	8 800	7 600		
Haponneutralointikapasiteetti (ANC), pH 4, mol H ⁺ /kg	7,93			tutkittava ja arvioitava	tutkittava ja arvioitava

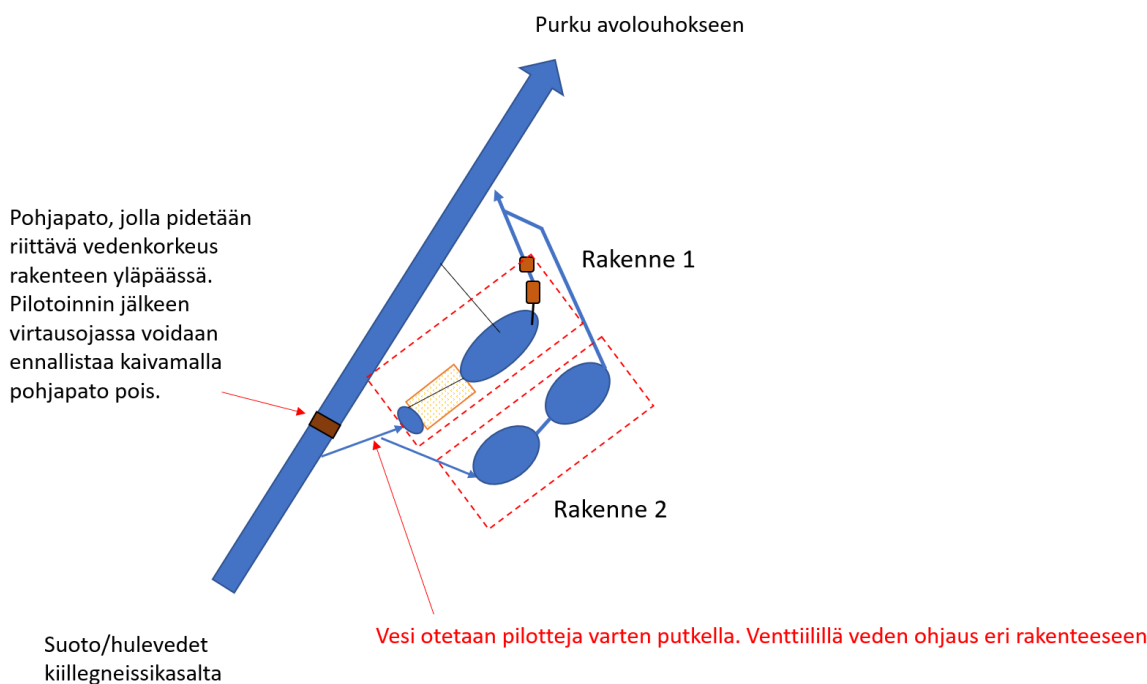
Taulukossa 30 esitettyjen tulosten perusteella jätteiden sisältämien haitta-aineiden liukoiset pitoisuudet täyttävät vaarallisen jätteen kriteerit VNa 331/2013 mukaisesti, lukuun ottamatta lentotuhkan sisältämää sulfaattia. Sulfaatin ja kloridin liukoisuuksien sijaa kaatopaikkakelpoisuuden kriteereissä voidaan soveltaa liuenneiden aineiden kokonaispitoisuutta (TDS), joka alittui myös lentotuhkalla. Myös tuhkalla kiinteytetty vesienkäsittelysakka on tutkittujen aineiden osalta sijoituskelpoinen vaarallisen jätteen kaatopaikalle. Seoksen korkea orgaanisen hiilen kokonaispitoisuus (TOC) johtuu lentotuhkan sisältämästä alkuainehiilestä. Tarkemmat tiedot tutkimuksista ja

analyysitodistukset löytyvät *Fortumin Jätteen kaatopaikkakelpoisuustestaus -raportista Lentotuhkalla kiinteytetty vesienkäsittelysakka*.

Rakenteen tukikerroksen tuhkalla kiinteytetty vesienkäsittelysakka luokitellaan nikkelin ja kobolttin kokonaispitoisuuksien perusteella vaaralliseksi jätteeksi. Kiinteytetty sakka, alkuperäinen sakka ja kiinteytyksessä käytetty Mondi Powerflute Oy:n lentotuhka täyttävät vaarallisen jätteen kaatopaikkakelpoisuuskaatopaikkakriteerit. Tarkemmat tiedot löytyvät ELY-keskuksen lausunnosta *Kiinteytetyn vesienkäsittelysakan hyötykäyttö Kuopion teollisuusjätekeskuksessa vaarallisen jätteen kaatopaikalla pystyeristerakenteiden tukimateriaalina, hyväksyminen*. Kuopion pystyeristerakenteen toteutuksesta tarkempia tietoja on Fortumin raportissa *Pystyeristerakenne TavOm-VJ 2020*.

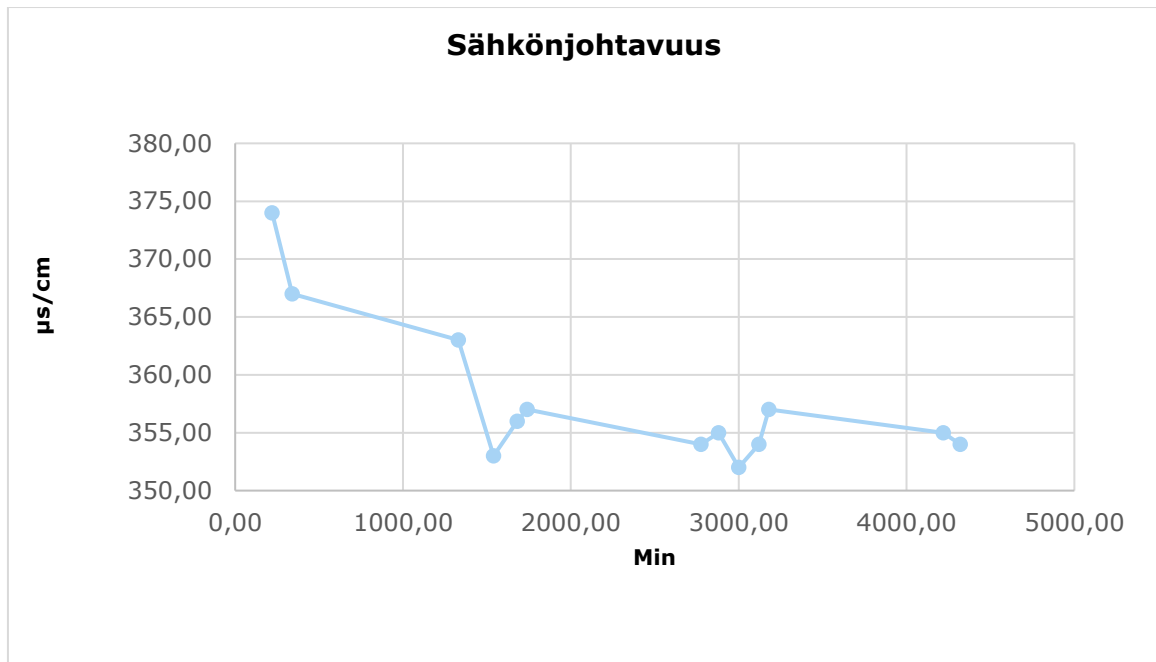
8.4 Hitura, vesienkäsittelyrakenteet

Hituran kaivosalueelle rakennettiin toisessa sulkemisvaiheessa vesienkäsittelyrakenteita sivutuotekalkista, geopolymeeristä sekä kaupallisen toimijan toimittamasta reaktiivisesta matosta. Tavoitteena oli testata erilaisten passiivisten vesienkäsittelyratkaisujen vaikutusta kaivosveden laatuun huomioiden materiaalien ympäristökelpoisuuteen ja tekniseen toteutukseen liittyvät ominaisuudet. Lisäksi selvitettiin muutaman yksinkertaisen rakenteen/ratkaisun toimivuutta ja käyttöikää kohteessa. Suunniteltujen rakenteiden periaatekuva on esitetty kuvassa 25, jossa rakenne 1 kuvaa kalkkikiven ja geopolymeerisuodattimen pilotointia (uusiomateriaalit) ja rakenne 2 reaktiivisen maton pilotointia.

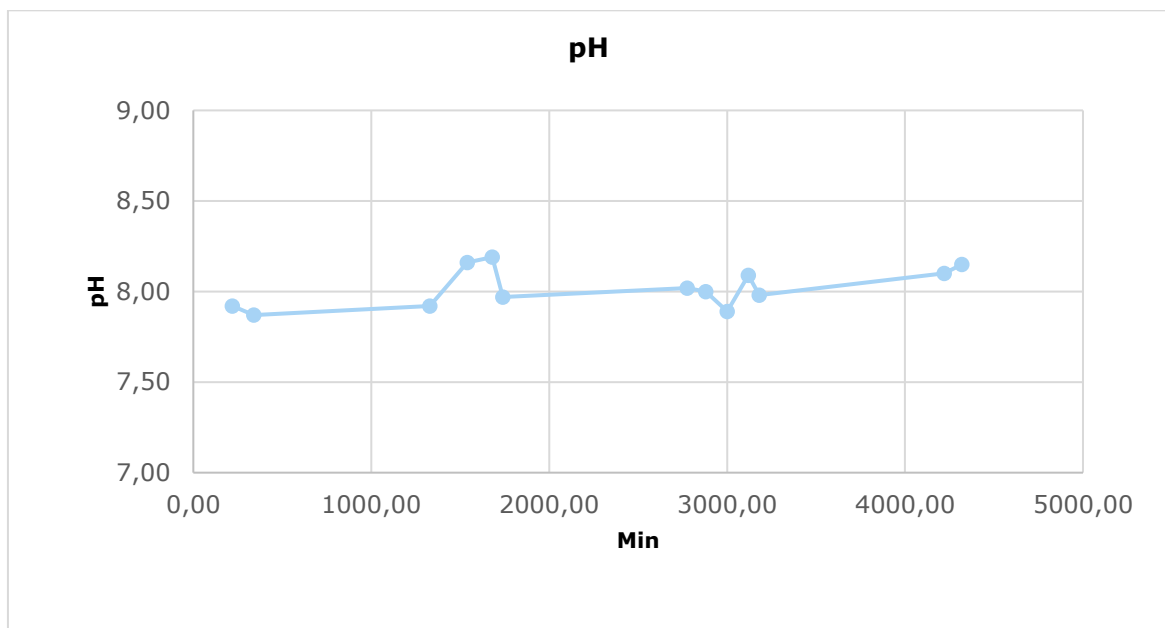


Kuva 25. Hituran vesienkäsittelyrakenteiden periaatekuva.

Rakenteessa 1 **kalkkikivirakenteella** pyritään nostamaan veden pH-tasoa, jolloin osa veteen liuenneista haitallisista metalleista saostuu ja pidättyy rakenteeseen. Vesienkäsittelyrakenteeseen suunniteltua kalkkikiveä ja sen neutraloivaa vaikutusta testattiin laboratoriossa läpivirtaustestinä, jossa Hituran ojavettä johdettiin kalsiittipatjaan kolonnissa ja veden pH:ta ja sähkönjohtavuutta seurattiin.



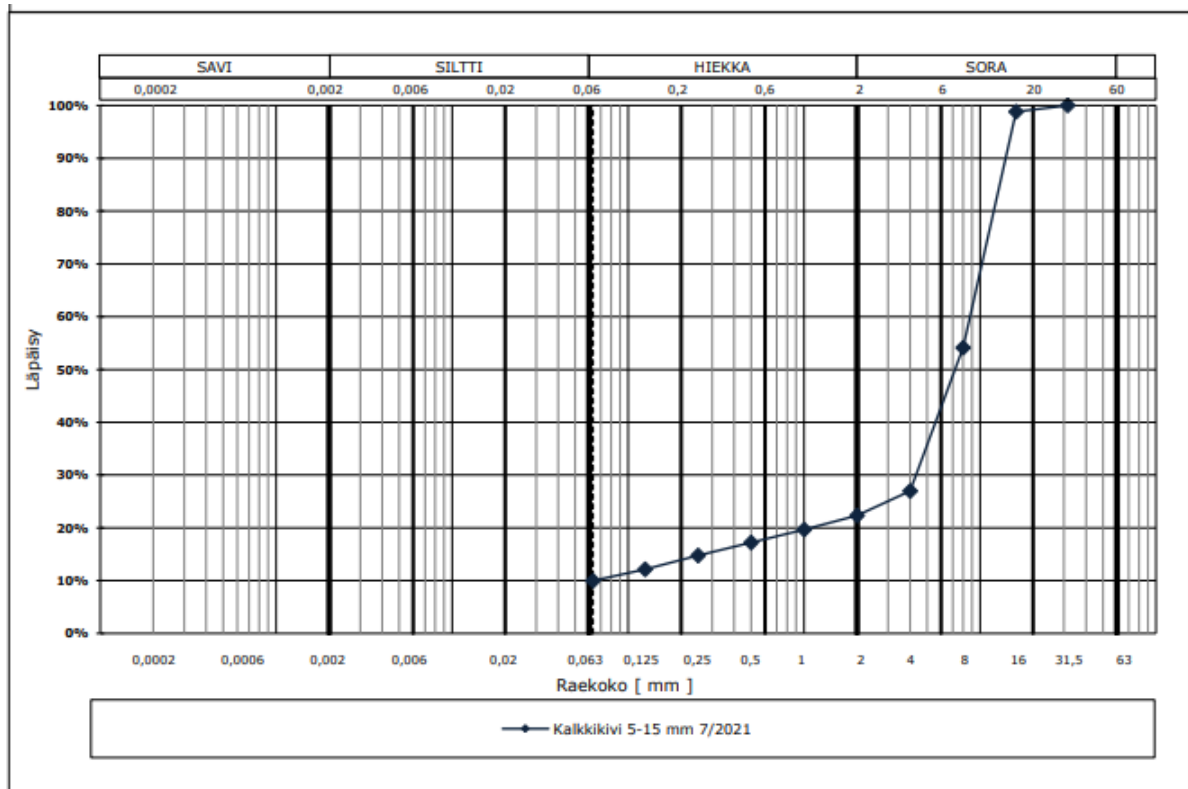
Kuva 26. Läpivirtaustestin veden sähkönjohtavuustulokset eri ajanhetkinä.



Kuva 27. Läpivirtaustestin veden pH-tulokset eri ajanhetkinä.

Veden laadun paraneminen oli havaittavissa jo lyhyen tutkimusajanjakson aikana sähkönjohtavuuden vähentyessä ja pH-tason noustessa (kuvat 28 ja 29). Laboratoriotestiä simuloiva koerakenne toteutettiin Hituran sulkemisen toisessa vaiheessa kalkkikivipadon, jonka läpi kaivosalueen ojavedtä johdettiin.

Ennen kalkkikivipadon asentamista SMA Mineralsin toimittaman kalkkikiven rakeisuus määritettiin laboratoriossa. Materiaalin tuli olla riittävän karkeaa, ja hienoainepitoisuus pienehkö, jotta vesi virtaa esteettömästi padon läpi. Kalkkikivimateriaalin rakeisuuskäyrän (kuva 30) perusteella kalkkikivimateriaalin geoteknisen luokituksen mukainen maalaji oli soramoreeni (SrMr) ja hienoainepitoisuus oli noin 10 %.



Kuva 28. Hituran kalkkikivipadossa käytetyn kalkkikiven rakeisuuskäyrä.

Kalkkikivipatorakenteen yhteydessä testattiin myös Oulun yliopiston kehittämää **geopolymeeri-suodatinta**. Hituran pilotointiin valittiin Oulun yliopiston laboratoriotestauksen perusteella parhaiten haitta-aineita poistanut materiaali, masuunikuonageopolymeeri. Granulit valmistettiin masuunikuonajauheesta ja alkaliliuoksesta, jotka pestiin ennen pilotointia. Geopolymeerisuodattimen haitta-aineiden poisto perustuu pH-tason nostamiseen, jolloin metallit saostuvat, sekä adsorptioon.

Pilotoinnissa suodatinta testattiin ensin ainoana vesienkäsittelymenetelmänä ennen kalkkipadon asentamista noin viikon ajan, jolloin sen todettiin suodattavan tehokkaasti haitta-aineita suotovedestä. Tehon varmistamiseksi tulisi kuitenkin tehdä vielä pidempiaikainen testaus.

Pitkäaikaisseurannassa suodatin oli asennettuna kalkkikivipadon jälkeen. Noin neljän kuukauden seurannan aikana geopolymeerisuodatin on kestänyt hyvin eikä ole vapauttanut sitomiaan haitta-aineita. Suodattimen tehokkuutta arvioidessa tulee kuitenkin huomioida, että kalkkikivipato nosti veden pH-tasoa ja näin ollen haitta-aineiden poisto tapahtuu pääosin jo kalkkipadolla.

Reaktiivinen matto eli Tektoseal Active HM on aktiivinen geokomposiitti, joka pysäyttää haitalliset aineet ennen kuin ne pääsevät maaperään. Matto koostuu kahdesta geotekstiili kerroksesta ja niiden välissä olevasta kationisesta rakeisesta adsorbentista. Hituran pilotoinnissa testattava matto on Tektoseal Active HM 4000 geopolymeeri, jossa on 4000 g adsorbenttia jokaista neliometriä kohden. Pilotoinnissa käsittelyaltaiden pohja on peitetty Tektoseal Active HM -matolla, jonka läpi saastunut vesi hiljalleen suotautuu ja metallit pidättyvät materiaaliin (kuva 29). Pilotoinnin tavoitteena on selvittää maton toimivuutta ja käyttöikää vaihtelevissa olosuhteissa, tulokset käsitellään erillisessä raportissa.

Maton rakeinen adsorbentti on kalsiumalumiinisilikaatti, jonka tehtävänä on metallien poistaminen matosta suotautuvasta vedestä. Voimakas metallien adsorptiokyky on seurausta ”mesoporous” (nanoporous eli sisältää nanohuokosia, joiden halkaisijat ovat 2-50 nm) -rakenteesta, joka syntyy valmistusprosessin seurauksena. Metallien sitoutuminen vedestä tapahtuu Van der Waals voimien (dispersiovoimat) vaikutuksesta sekä kationinvaihto-reaktioilla, jotka sitovat liuenneet ionit adsorbentin pinnalle. Aluksi metallit kiinnittyvät rakeisen materiaalin ulkopinnalle, josta ne siirtyvät syvemmälle mattoon. Ajallisesti siirtymä kestää muutamasta sekunnista minuutteihin. Erityyppisten metallien sitoutumistehokkuus vaihtelee, erityisesti kaksi- ja kolmivalenttiset metallit kiinnittyvät rakeiden pinnalle.



Kuva 29. Suotovesi virtaa putkesta käsittelyaltaaseen, jonka pohja on päällystetty Tektoseal Active HM -matolla.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

Maasto- ja laboratoriotutkimusten perusteella löydettiin useita sopivia vaihtoehtoisia materiaaleja uudentyypisiin kaivosalueiden pohja-, peite- ja reaktiivisiin rakenteisiin. Laajamittainen materiaali testaus sisälsi niin teknisen kuin ympäristökelpoisuuden näkökulmasta monenlaisia tutkimuksia, joiden tulosten perusteella materiaalien soveltuvuutta erilaisiin rakenneratkaisuihin on arvioitu taulukossa 31.

Taulukon merkinnät;

++ = materiaali soveltuu rakenteeseen, + = materiaali soveltuu rakenteeseen muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta, -/+ = materiaalin soveltuvuus on epäselvä, - = materiaali ei sovellu rakenteeseen ja 0 = materiaalia ole testattu ko. rakenteeseen.

Taulukko 31. Vaihtoehtoisten materiaalien soveltuvuus

Materiaali	Materiaalin tekninen soveltuvuus			Materiaalin ympäristökelpoisuus			Kommentit
	Peitto	Pohja	Reaktiivinen	Peitto	Pohja	Reaktiivinen	
Kuitusavi	++	+	-	++	++	+	Kuitusavi omaa suotuisat vedenläpäisevyysominaisuudet, jolloin oikein tiivistettynä sillä saavutetaan parempi rakenne kuin moreenilla.
Kalkkikivi (tuotannon sivuvirta)	+	+	++	+	+	+	Kalkkikivimurske soveltuu happamien suotovesien käsittelyyn passiivisesti. Lisäksi se omaa myös lujittumisominaisuuksia.
Kuiva lentotuhka	+	+	+	+	+	-/+	Lentotuhkat voivat saostaa reaktiivisuutensa vuoksi raskasmetalleja suotautuvasta vedestä tai parantaa moreenin vedenläpäisevyysominaisuuksia sekoitettaessa. Lentotuhkien ominaisuuksien välillä on runsaasti eroa, ja tuhkat voivat käyttäytyä eri tavoin eri materiaalien kanssa. Näistä syistä jokainen kombinaatio on tutkittava tapauskohtaisesti.
Kasatuhka	-/+	-/+	-/+	0	0	-/+	Kasavarastoitu lentotuhka on vähemmän reaktiivista kuin tuore lentotuhka. Varastoinnin aikana tuhkasta huuhtoutuu epäorgaanisia komponentteja.
Bentoniittipitoinen valimohiekka	+	+	0	-/+	-/+	0	Sekoitettaessa moreeniin, seoksen vedenläpäisevyys pienenee, jolloin voidaan saavuttaa huonolaatuisilla moreeneilla paremmat vedenläpäisevyysominaisuudet. Valimohiekan ympäristökelpoisuus vaihtelevat syntypaikan mukaan, joten nämä on tutkittava tapauskohtaisesti.
Kipsi	+	0	0	+	+	+	Kipsi soveltuu peiterakenteisiin, mutta materiaalin vedenläpäisevyys arvo on korkea sellaisenaan, joka täytyy ottaa huomioon rakennetta suunniteltaessa. Seostettuna muuhun maa-ainekseen ominaisuudet paranevat huomattavasti.
Poltettu kalkki (2-kalkki)	+	+	+	+	+	+	Soveltuu kaikkiin rakenteisiin sekoitettuna muihin maa-aineksiin.

10. VIITERAPORTIT

Hituran Life-hankkeeseen liittyvä materiaalitestausta: tekniset ominaisuudet 2/2014

Hituran Life-hankkeeseen liittyvä materiaalitestausta: tekniset ominaisuudet, tutkimusten toinen vaihe tarkentavat testit ja eri materiaalien keskinäiset erot 12/2014

Hitura laboratoriotestien tulokset raportti (Ympäristökelpoisuus) 12/2014

Koetoiminta 2015, astiatestit Pyhäsalmen materiaaleilla toteutettavan koerakentamisen periaatteet ja työn ohjeistus 11/2015

Noora Karjalainen Uusiomateriaalien hyödyntäminen rikastushiekka-altaiden pintarakentamisessa 3/2016

Pyhäsalmen astiakokeet 2016 koerakentamisen raportti 6/2016

Fortum "Kuitusaven soveltuvuus Hituran rikastushiekka-altaan pintarakenteeseen" 10/2017

Fortum koekenttäraportit (Mäntän kuitusavi 10/2017, Äänekosken kuitusavi 5/2018, Oulun kuitusavi 6/2018)

Technical report, piloting cover structure (action B1) 12/2019

Fortum koekenttäraportti Hamulan savi sekä hienoainesmureeni Kuopion käsittelykeskus pohjarakenne 10/2020

Fortum jätteen kaatopaikkakelpoisuus karkean pohjatuhkan seula-alite 11/2019

Elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus lausunto Kiinteitetyn vesienkäsittelysakan hyötykäyttö Kuopion teollisuusjätekeskuksessa vaarallisen jätteen kaatopaikalla pystyeristysrakenteiden tukimateriaalina, hyväksyminen 6/2020

Fortum jätteen kaatopaikkakelpoisuustestaus lentotuhkalla kiinteitetty vesienkäsittelysaka 6/2020

Fortum koekenttäraportti Mäkelä alue 2 savi: Kuopion käsittelykeskus, pystyeristysseinä 11/2020

Fortum jätteen kaatopaikkakelpoisuus Kuopion energia Oy Haapaniemen voimalaitoksen lentotuhka 11/2020

Fortum Pystyeristerakenne TavOm-VJ 2020, väliraportti Kuopion teollisuusjätteen käsittely- ja kierrätyskeskus Kuopion rakentaminen 2020 5/2021

Liite 1. Teknisen materiaalitestauksen toisen vaiheen tuloksia nikkeliirikastushiekan, moreenin ja sivutuoteseosten osalta.

Runko- materiaali	Lisäkomponentit	määrä ¹⁾	Mod. Pr ²⁾	w tiivistettäessä ³⁾	Kpl:n tiheys	Vedenläp. ⁴⁾	σ_{21+7d} ⁴⁾	Segreg.potentiaali
			[% / kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[m/s]	[kPa]	[mm ² /Kh]
	ei lisäkomponentteja	-		16,0	1727	1,5E-06	70	<0,1 (routimaton)
	2-kalkki	5 %		17,0	1738	2,7E-07	240	
	LT A	10 %	16,5 / 1700	17,5	1692	3,7E-07	140	
		20 %	16,0 / 1690	17,0	1690	2,2E-07	310	0,50 (liev. routiva)
		30 %		17,0	1654	1,8E-07	710	
	LT B	10 %		17,0	1688	1,4E-06		
		20 %		17,0	1660	1,3E-06		
	LT C	15 %		17,0	1705	4,1E-07	240	
	LT D	15 %		17,0	1750	3,2E-07	230	
	LT H	10 %		17,0	1712	4,5E-07		
		15 %		17,0	1689	3,2E-07	250	
		25 %		17,5	1606	3,3E-07		
	LT I	15 %		16,0	1749	8,4E-07	90	
	LT J	15 %		17,0	1683	1,6E-06	100	
		25 %		17,5	1661	1,7E-06		
	KT A	15 %		19,0	1611	1,1E-06		
		25 %		21,0	1545	7,8E-07		
	KT B	15 %		19,0	1552	2,9E-06		
		10 %		18,0	1698	8,6E-07	100	
	KT C	20 %	19,0 / 1660	20,0	1668	2,8E-07	90	0,64 (liev. routiva)
		30 %		21,0	1598	9,1E-07		
	KT D	15 %		19,0	1585	2,0E-06		
		25 %		21,0	1528	2,0E-06		
	KT I	15 %		19,0	1698	6,8E-07		
		25 %		21,0	1632	3,6E-07		
	KT J	15 %		19,0	1648	1,0E-06		
	LT A + valimohiekka K	10+5%		17,0	1729	1,5E-07		
		10+10%		16,5	1748	1,8E-07		
		15+5%		16,5	1723	2,2E-07		
	LT B + valimohiekka K	10+10%		16,5	1723	7,8E-07		
	LT C + valimohiekka K	10+10%		16,5	1759	2,3E-07		
	LT C + valimohiekka L	10+10%		16,5	1754	2,7E-07		
	LT D + valimohiekka L	10+5 %		17,0	1745	1,2E-07	150	
		15+10%		16,5	1750	1,2E-07	150	
	LT D + valimohiekka K	15+10%		16,5	1758	9,9E-08	200	
	LT D + valimohiekka K	10+10%		16,5	1759	2,1E-07		
	LT D + valimohiekka K - pöly(seos) 1:1	10+5+5%		16,5	1735	1,0E-07		
	LT H + valimohiekka K	10+5%		17,0	1734	9,9E-08		
		10+10%		16,5	1758	1,1E-07		
		15+5%		16,5	1740	1,0E-07		
	LT I + valimohiekka K	10+10%		16,0	1757	2,0E-07		
	LT J + valimohiekka K	10+10%		16,5	1734	2,9E-07		
	LT J + valimohiekka L	10+10%		16,5	1730	2,7E-07		
	KT A + valimohiekka K	15+10%		18,5	1667	1,8E-07		
	KT B + valimohiekka K	15+10%		18,5	1632	8,8E-07		
	KT C + valimohiekka K	15+10%		18,5	1702	1,9E-07		
	KT J + valimohiekka K	15+10%		18,5	1678	2,2E-07		
	KS F	15 %		23,0	1536	4,9E-07	90	
		10 %		21,0	1587	7,1E-07	80	
	KS E	20 %	24,0 / 1490	25,0	1495	5,2E-07	80	0,43 (liev. routiva)
		30 %		29,0	1386	4,1E-07	80	
		10+5%		22,0	1601	3,9E-08		
	KS E + "2-kalkki"	15+3%		23,5	1551	8,8E-08		
		15+5%		23,5	1541	4,7E-08	170	
		15+7%		23,5	1575	2,7E-07		
	KS E / kasa (seos) + "2-kalkki"	15+5 %		23,5	1563	1,3E-07		
	KS F + "2-kalkki"	10+5%		22,0	1587	9,8E-08		
		15+5%		23,5	1548	1,5E-07		
	KS F + OKTO (0-125 um filler)	15+5%		22,5	1525	7,6E-07		
		15+10 %		22,5	1552	6,5E-07		

Lyhenteet:

- 1) Lisäkomponenttimäärä laskettiin rikastushiekan märkämassasta
- 2) Tiivistyskokeet tehtiin työmäärältään modifioitua Proctor-sullontaa käyttäen
- 3) Koekappaleet valmistettiin vakiotyömäärällä 10 iskua/kierros, 5 kierrosta
- 4) Vedenläpäisevyydestit aloitettiin 21 d sitoutumisajan jälkeen, läpäisevyydesti noin 7d, jonka jälkeen puristuslujuusmääritys noin 28 d ikäisillä näytteillä.

Runkomateriaali	Lisäkomponentit	määrä ¹⁾	Mod. Pr ²⁾ [% / kg/m ³]	w tiivistettäessä ³⁾ [%]	Kpl:n tiheys [kg/m ³]	Vedenläp. ⁴⁾ [m/s]	σ_{21+7d} ⁴⁾ [kPa]
Moreeni 2	ei lisäkomp.	-	norm. Pr	5,9	2227	3,0E-09	-
	LT A	10 %		10,0	2034	8,0E-09	
	LT H	10 %		10,0	2048	7,2E-09	
	LT A + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5 %		11,0	1943	8,8E-07	
	LT J + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5 %		11,0	1970	3,6E-09	
	Valimohiekka K + pöly (seos)	10+5 %		7,5	2159	9,5E-10	
Moreeni 1	ei lisäkomp	-	norm. Pr	10,0	2033	4,5E-07	70
	10 %			11,5	1964	4,0E-08	
	LT A	20 %		14,0	1868	1,8E-08	290
	LT B	10 %		11,0	1959	1,7E-07	
	LT C	10 %		11,0	2002	5,1E-08	
	20 %			13,5	1893	4,5E-08	240
	LT D	10 %		11,0	1998	1,2E-07	
	10 %			11,0	1997	4,8E-08	190
	LT H	20 %	12,5 / 1890	13,5	1883	4,6E-08	220
	30 %			16,0	1769	6,5E-08	310
	LT H + "2-kalkki"	10+5%		12,5	1906	5,8E-08	660
	LT I	10 %		10,5	2038	1,4E-07	
	LT J	10 %		11,0	2001	2,0E-07	
	KT A	10 %		13,0	1919	8,5E-08	
	20 %			15,0	1836	7,0E-08	
	KT B	10 %		12,5	1912	1,9E-07	
	KT C	10 %		12,5	1870	1,3E-07	
	20 %			14,5	1890	8,7E-08	
	KT D	10 %		12,5	1922	2,5E-07	
	KT I	10 %		11,5	2004	1,5E-07	
	20 %			13,0	1942	1,7E-07	
	KT J	10 %		12,5	1943	1,5E-07	
	LT A + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5%		13,5	1871	9,8E-07	
	LT B + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+3%		13,0	1867	2,7E-08	
	LT C + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5%		13,0	1869	2,2E-08	
	LT D + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5%		13,0	1875	5,8E-09	1050
	LT H + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+3%		13,0	1888	1,3E-07	
	10+10+5%			13,0	1898	3,7E-08	
	LT H + kipsi G + OKTO (0-125 um filleri)	10+10+5%		12,5	1917	3,6E-08	
	LT I + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5%		12,5	1899	1,6E-08	
	LT J + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5%		13,0	1892	9,4E-09	
	KT C + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5%		14,0	1862	1,5E-08	
	KT D + kipsi G + "2-kalkki"	10+10+5%		14,0	1874	8,8E-08	
Valimohiekka K	10 %		9,5	2054	4,1E-09	80	
15 %			9,5	2045	1,7E-09		
20 %	8,5 / 2030		9,5	-	-		
30 %			10,0	2024	5,4E-09	100	
Valimohiekka K + pöly K1	10+10%		10,0	2022	6,2E-10	120	
Valimohiekka K + pöly K2	10+10%		10,0	2031	2,0E-10	110	
Valimohiekka K + pöly (seos)	5+5%		9,5	2055	1,2E-09		
	10+3%		10,0	2035	1,1E-09		
	10+5%		10,0	2034	7,1E-10		
	15+5%		10,0	2037	7,1E-10		
Valimohiekka L + pöly (seos)	10+5%		10,0	2028	7,7E-10		

Runkomateriaali	Lisäkomponentti	määrä ¹⁾	Mod. Pr ²⁾ [% / kg/m3]	w tiivistettäessä ³⁾ [%]	Kpl:n tiheys [kg/m3]	Vedenläp. ⁴⁾ [m/s]	σ_{21+7d} ⁴⁾ [kPa]
LT A +KS E		5:5		49,6	966	6,5E-08	
LT A +KS F		5:5		55,0	966	3,6E-08	
LT A +KS E (kasa/seos)		5:5		49,6	980	6,7E-08	
KT A +KS E		5:5		77,0	795	3,9E-08	
LT B + KS E		5:5		49,6	1023	2,6E-08	210
	Valimohiekka K	3:7	<50 / >920	86,6	744	1,7E-08	60
		5:5 +10 %		47,0	1071	3,1E-08	
LT B +KS E (kasa/seos)		5:5		49,6	1037	2,8E-08	
LT B + KS E	2-kalkki ⁱⁱ	3:7 + 5 %		79,2	786	2,1E-08	140
LT B + KS E	PlusSe	3:7 + 5 %		79,2	790	1,6E-08	140
LT B + KS F		3:7	45 / 1000	64,7	881	2,2E-08	190
		5:5		55,0	973	5,5E-08	
		5:5		55,0	963	6,1E-08	
LT C + KS F	Valimohiekka K	5:5 +10 %		52,0	1025	4,3E-08	
	Valimohiekka L	5:5 +10 %		52,0	1021	4,1E-08	
LT D + KS E		5:5		49,6	1052	1,9E-08	
LT D + KS F		5:5		55,0	992	3,7E-08	
		5:5		104,0	674	1,5E-08	
KT D + KS E	Valimohiekka K	5:5 +10 %		87,4	768	5,6E-09	
		5:5		55,0	950	5,5E-08	
LT H + KS F	Valimohiekka K	5:5 +10%		52,0	1016	3,8E-08	
	Valimohiekka K + pöly (seos)	5:5 +(5+5) %		52,0	996	3,9E-08	
LT I + KS E		5:5		49,6	1044	5,6E-08	
LT I + KS F		5:5		55,0	997	4,2E-08	
KT I + KS E		5:5		66,1	886	1,5E-08	
LT I + KS E (kasa/seos)		5:5		49,6	1053	1,1E-07	
		5:5		55,0	986	3,1E-08	
LT J + KS F	Valimohiekka K	5:5 +10 %		52,0	1032	1,0E-08	
		5:5		57,3	969	3,8E-08	70
LT J + KS E		3:7		93,5	711	4,9E-09	60
KS E	Valimohiekka K	10 %		153	490	1,1E-09	
		15 %		138	525	1,0E-09	50 / 15%
		25 %		116	611	7,7E-10	50 / 15%
	Valimohiekka L	15 %		138	528	8,7E-10	
	Valimohiekka K + pöly (seos)	10+5%		138	527	8,2E-10	
		10 %		94,7	686	6,3E-10	
KS F	Valimohiekka K	15 %		87,5	730	4,8E-10	
		25 %		75,8	799	8,6E-10	70 / 15%
	Valimohiekka K + pöly (seos)	10+5%		87,5	730	4,9E-10	

Liite 2A. Kolonnitestiin suodosten tulokset (L/S 10)

		HK1, Au-rhk	HK2, Ni-rhk	HK3, Au-rhk, Ni-rhk	HK4, moreeni, Au- rhk, Ni-rhk	HK5, Au-rhk+15 % biotiitti, Ni- rhk	HK6, stabiloitu Au-rhk + KT, Ni- rhk	HK7, stabiloitu Au-rhk + LT, Ni- rhk	HK8, stabiloitu Ni-rhk + LT, Ni- rhk	HK9, stabiloitu Au rhk + kalkki	HK10, stabiloitu Au rhk + kalkki, Au-rhk, Ni-rhk		
pH (L/S 10)		8,8	8,3	8,4	8,2	8,3	7,7	7,5	7,5	12,7	11,7		
redox (L/S 10) [mV]		299	424	344	417	315	224	95	220	-19	-128		
EC (L/S 10) [mS/m]		5,5	20,9	14,3	12,1	15,4	21,6	21,6	54				
Kaatopaikkojen raja-arvot, L/S=10, VNa 331/2013		Liukoisuus mg/kg kuiva-aineessa kumulatiivisessa L/S-suhteessa 10											
Haitta-aine	Kaatopaikkojen raja-arvot, L/S=10, VNa 331/2013			Liukoisuus mg/kg kuiva-aineessa kumulatiivisessa L/S-suhteessa 10									
	Pysyvä jäte	Tavanomainen jäte	Vaarallinen jäte										
Rikki, S				51	2 010	1 869	1 184	2 141	3 270	3 959	4 947	51	3 220
Elohopea, Hg	0,01	0,2	2	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Alumiini, Al				<1,229	<0,499	<0,497	<0,502	<0,495	<0,497	<0,495	<0,496	0,860	0,592
Arseeni, As	0,5	2	25	17	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,085	<0,005
Barium, Ba	20	100	300	<0,054	0,100	0,085	0,072	0,211	0,188	0,175	0,212	0,860	0,421
Kadmium, Cd	0,04	1	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	<0,0021	<0,002	<0,002
Koboltti, Co				<0,005	<0,020	<0,024	<0,015	<0,022	<0,039	<0,043	<0,037	<0,005	<0,029
Kromi, Cr	0,5	10	70	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	<0,020	0,023	<0,020
Kupari, Cu	2	50	100	<0,017	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,016	<0,016	<0,015	<0,015	<0,016
Vismutti, Bi				<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Rauta, Fe				<0,251	<0,250	<0,248	<0,251	<0,247	<0,248	<0,248	<0,248	<0,267	<0,247
Mangaani, Mn				<0,021	5,664	5,759	3,343	6,285	8,9	9,8	10,0	<0,020	<7,22
Telluuri, Te				<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Molybdeeni, Mo	0,5	10	30	0,101	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,353	0,011
Thorium, Th				<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Nikkeli, Ni	0,4	10	40	0,01	0,68	0,84	0,52	0,77	1,31	1,38	1,24	0,01	1,03
Lyijy, Pb	0,5	10	50	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,026	<0,005
Antimoni, Sb	0,06	0,7	5	0,063	<0,005	0,203	0,114	0,313	0,111	0,198	0,238	<0,005	0,009
Seeleni, Se	0,1	0,5	7	0,023	<0,024	<0,025	<0,019	<0,035	<0,039	<0,061	<0,05	0,05	0,08
Vanadiini, V				0,040	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015	<0,015
Sinkki, Zn	4	50	200	<0,050	<0,053	0,505	0,431	<0,198	0,388	0,015	0,398	0,308	0,115
Uraani, U				0,008	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,0010	<0,0010	<0,0010	<0,001	<0,001
Strontium, Sr				0,178	0,932	0,769	0,679	0,747	2,1	4,5	8,0	11,7	2,3
Kloridi, Cl	800	15000	25000	<30	849	875	485	<937	<1120	<1358	<1668	<24,8	1079
Sulfaatti, SO4	1000	20000	50000	<87	6 146	5 777	3 706	6 641	9 808	11 802	14 893	<24,8	9 182
Fuoridi	10	150	500	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<14,7	<14,8	<14,9	<9,9	<9,9
DOC	500	800	1000	104	90	39	25	28	16,8	22	16,8	105,4	29,9

Liite 3. Suotovesikokeen tulokset

Haitta-aine	yksikkö	Ojavesi, lähtötilanne	Testi I						Testi II							
			Tuhka			Turve		Kuitusavi		Kalsiitti			Turve		Kuitusavi	
			RSO-1A ko-kooma	RSO-1A N1	RSO-1A N9	RSO-1B ko-kooma	RSO-1C ko-kooma	RSO-1C N1	RSO-1C N6	RSO-2A ko-kooma	RSO-2A N1	RSO-2A N6	RSO-2B ko-kooma	RSO-2C ko-kooma	RSO-2C N1	RSO-2C N4
pH		4,0	9,8 (ka)	10,3	9,4			7,3	7,5	7,4 (ka)	7,3	7,5	3,7 (ka)	7,6 (ka)	7,3	7,7
Elohopea	µg / l	<0,1	<0,5			<0,5	<0,5			<0,5			<0,5	<0,5		
Alumiini	µg / l	27400	<50	<50	<50	3970	<50	<50	<50	<50	<50	<50	2700	<50	<50	<50
Arseeni	µg / l	1,8	3,5	<0,5	2,8	14	3,1	4,9	1,6	0,81	0,87	0,78	15,8	3,4	5,9	2,2
Barium	µg / l	11,3	85			126	91,7			21,9			230	148		
Kadmium	µg / l	4,7	<0,2	<0,2	<0,2	2,5	<0,2	<0,2	<0,2	1,5	0,46	1,5	3,6	<0,2	<0,2	<0,2
Koboltti	µg / l	336	<0,5	<0,5	<0,5	13,7	1,4	3,7	0,71	243	164	268	39,3	32,8	10,9	59,1
Kromi	µg / l	0,88	245			6,2	82,5			<2			<2	<2		
Kupari	µg / l	279	<1,5	<1,5	<1,5	6,5	5,4	14,7	1,7	12,4	7,0	13,9	10	12,8	28,5	5,8
Rauta	µg / l	136	<25	<25	<25	324	68,9	319	<25	<25	<25	<25	303	172	565	<25
Mangaani	µg / l	4950	<2	<2	5,3	935	35,2	23,6	41,6	4280	2460	4730	3410	517	131	910
Molybdeeni	µg / l	<0,05	350			<0,5	211			1,6			<0,5	22,9		
Nikkeli	µg / l	7860	1,9	<1	2,9	24,5	4,9	14,9	1,3	6750	5150	7100	107	937	139	1910
Lyijy	µg / l	3,2	<0,5			7,2	<0,5			<0,5			6,1	<0,5		
Antimoni	µg / l	<0,05	25,8			1,5	15,7			4,8			3,3	4,1		
Seleeni	µg / l	2,3	18			13,5	9,6			1,8			1,7	1,6		
Vanaadiini	µg / l	<0,15	59,3			7,6	11,2			<1,5			2,9	7,7		
Sinkki	µg / l	2190	<5	<5	<5	236	11,4	14,1	13	724	262	744	494	47,8	61,6	43,9
Uraani	µg / l	6,3	<0,1			<0,1	3,9			5,1			<0,1	10,9		
Fluoridi	mg / l	1,5	<1			<1	<1			<1			<1	<1		
DOC	mg / l	4	1,6			25,1	30,6			4			49,4	58,1		
Kloridi	mg / l	27,3	182			135	122			32,9			20,3	31,7		
Sulfaatti	mg / l	3030	2660	2700	1610	2340	1540	1000	1450	2990	2910	3030	1800	2490	1570	3000
			nouseva							nouseva						
			laskeva							laskeva						

Liite 4. Pyhäsalmen pilotoinnissa käytettyjen materiaalien kokonaispitoisuudet

Alku-aine	Kokonaispitoisuudet mg/kg ka						
	Rikastus-hiekka (karkea)	Rikastus-hiekka (hieno)	Tuhka	Kipsi	Moreeni	Inertti	Kasvukerros
Elohopea, Hg	0,39	0,27	0,46	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
Alumiini, Al	6 910	7 180	52 400	340	12 800	11 000	5 340
Arseeni, As	400	370	40	15	4,7	4,2	< 3
Barium, Ba	130	110	1 150	370	110	130	81
Kalsium, Ca	20 700	25 400	72 100	277 000	5 040	6 570	4 720
Kadmium, Cd	7,4	5,2	2,8	< 0,3	0,38	< 0,3	< 0,3
Kromi, Cr	18	20	120	< 2	27	25	12
Kupari, Cu	720	680	120	13	55	20	4,6
Rauta, Fe	315 000	297 000	142 000	400	17 500	20 800	3 400
Kalium, K	1530	1 490	8 690	630	2 830	1 750	920
Mangaani, Mn	430	590	2 430	21	240	190	89
Molybdeeni, Mo	9,5	6,6	11	< 1	< 1	< 1	< 1
Nikkeli, Ni	11	11	62	< 1	9,7	12	3
Lyijy, Pb	120	100	41	8,6	17	< 3	< 3,0
Antimoni, Sb	3,4	3,8	< 3	< 3	< 3	< 3	< 3
Seleen, Se	28	21	10	< 3	< 3	< 3	< 3
Vanadiini, V	14	17	190	< 2	34	48	11
Sinkki, Zn	2 180	1 680	240	20	63	33	11
Rikki, S	310 000	294 000	12800	215 000	350	210	930
Natrium, Na	280	280	3250	1 030	360	260	96
Magnesium, Mg	9 940	11 500	14 200	570	4 160	5 950	1 910

Liite 5A. Kuitusavien kokonaispitoisuudet

	Yksikkö	Kuitusavi Mänttä, näyte I	Kuitusavi Mänttä, näyte II	Kuitusavi Mänttä, näyte III	OPA sakka, näyte I	OPA sakka, näyte II	Kuitusavi Äänekoski, näyte I	Kuitusavi Äänekoski, näyte II
Alkuaine								
Elohopea, Hg	mg/kg	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,17	<0,15
Arseeni, As	mg/kg	<2,3	<1,7	<1,4	<0,86	<1,3	<4,2	<3,7
Kadmium, Cd	mg/kg	<0,23	<0,17	0,14	<0,086	<0,13	<0,42	<0,37
Koboltti, Co	mg/kg	2,3	2,3	1,8	0,51	0,25	0,53	0,4
Kromi, Cr	mg/kg	18	19	15	5	<6,3	<21	<19
Kupari, Cu	mg/kg	99	90	89	4,7	<6,3	<21	<19
Nikkeli, Ni	mg/kg	6,1	6,8	5,8	2,5	2,1	4,4	<3,7
Lyijy, Pb	mg/kg	<12	<8,5	<6,9	4,4	<6,3	<21	<19
Antimoni, Sb	mg/kg	<2,3	<1,7	<1,4	<4,3	<6,3	<21	<19
Vanadiini, V	mg/kg	10	9,5	8	2,2	1,7	<4,2	<3,7
Sinkki, Zn	mg/kg	29	24	22	9,8	11	<21	<19
Kloridi, kokonaispitoisuus	% Ka	<0,18	<0,12	0,11	<0,070	<0,070	<0,070	<0,070
TOC	% Ka	23	25	21	11	11	21	21

Liite 5B. Kuitusavien liukoiset pitoisuudet verrattuna VNa 331/2013 raja-arvoihin

Haitta-aine	Kaatopaikkojen raja-arvot, L/S=10 l/kg, asetus 331/2013				
	Pysyvä jäte	Tavanomainen jäte	Vaarallinen jäte	Oulu	Äänekoski
Elohopea, Hg (mg/kg ka)	0,01	0,2	2	< 0,005	< 0,005
Arseeni, As (mg/kg ka)	0,5	2	25	< 0,15	< 0,15
Barium, Ba (mg/kg ka)	20	100	300	0,065	0,059
Kadmium, Cd (mg/kg ka)	0,04	1	5	< 0,015	< 0,015
Kromi, Cr (mg/kg ka)	0,5	10	70	< 0,1	< 0,1
Kupari, Cu (mg/kg ka)	2	50	100	< 0,1	< 0,1
Molybdeeni, Mo (mg/kg ka)	0,5	10	30	0,55	< 0,05
Nikkeli, Ni (mg/kg ka)	0,4	10	40	< 0,1	< 0,1
Lyijy, Pb (mg/kg ka)	0,5	10	50	< 0,15	< 0,15
Antimoni, Sb (mg/kg ka)	0,06	0,7	5	< 0,01	< 0,01
Seleen, Se (mg/kg ka)	0,1	0,5	7	< 0,02	< 0,02
Sinkki, Zn (mg/kg ka)	4	50	200	< 0,1	< 0,1
Kloridi, Cl (mg/kg ka)	800	15000	25000	130	< 50
Sulfaatti, SO ₄ (mg/kg ka)	1000	20000	50000	310	670
Fluoridi (mg/kg ka)	10	150	500	< 5	< 5
DOC (mg/kg ka)	500	800	1000	470	190
pH (L/S 10)		> 6,0		7,8	8
Sähkönjohtavuus (mS/m)				35	29,8
Hehkutushäviö (550°C) % ka		10 ³	10 ⁴	28,6	30,8 (450°C)
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC) % KA	3	5	6	11,5	8,5
BTEX-yhdisteet mg/kg ka	6			< 0,10	< 0,10
PCB-yhdisteet mg/kg ka	1			< 0,010	< 0,010
Mineraaliöljy (C10-C40) mg/kg ka	500			70	< 50
PAH-yhdisteet (EPA 16) mg/kg ka	40			< 0,10	< 0,10

Liite 5C. Uuttotestien tulokset

Haitta-aine	Laboratoriovedellä uutettu L/S 10			Uutto rikastushiekasta kuitus- avesta uutetulla vedellä L/S 10	
	Hitura, rikastus- hiekkallas 2	Mänttä kuitu- savi, vanha kasa	Mänttä, kuitu- savi, uusi kasa	Mänttä kuitu- savi, vanha kasa	Mänttä, kuitu- savi, uusi kasa
Elohopea, Hg (mg/kg ka)	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Arseeni, As (mg/kg ka)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Barium, Ba (mg/kg ka)	0,16	1,1	1,6	0,36	0,45
Kadmium, Cd (mg/kg ka)	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Kromi, Cr (mg/kg ka)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Kupari, Cu (mg/kg ka)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,12	0,18
Molybdeeni, Mo (mg/kg ka)	< 0,1	0,12	0,1	< 0,1	< 0,1
Nikkeli, Ni (mg/kg ka)	0,093	< 0,05	0,072	0,32	0,36
Lyijy, Pb (mg/kg ka)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Antimoni, Sb (mg/kg ka)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Seleeni, Se (mg/kg ka)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Vanadiini V (mg/kg ka)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sinkki, Zn (mg/kg ka)	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,077	0,07
Kloridi, Cl (mg/kg ka)	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Sulfaatti, SO ₄ (mg/kg ka)	2160	< 500	< 500	2140	2220
Fluoridi (mg/kg ka)	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
DOC (mg/kg ka)	< 100	634	1050	286	559
pH (L/S 10)	9,2	8,4	7,6	8,2	8,1
Sähkönjohtavuus (µS/m)	519	627	688	837	956

Liite 6. Kuopion pystyeristerakenteen poikkileikkauskuva ja käytetyt materiaalit

