



OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

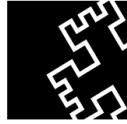
**UUSIOMATERIAALIEN HYÖDYNTÄMINEN  
RIKASTUSHIEKKA-ALTAIDEN  
PINTARAKENTEISSA**

Noora Karjalainen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2016



OULUN YLIOPISTO  
UNIVERSITY of OULU

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

**UUSIOMATERIAALIEN HYÖDYNTÄMINEN  
RIKASTUSHIEKKA-ALTAIDEN  
PINTARAKENTEISSA**

Noora Karjalainen

Työn valvoja: Kauko Kujala

Ohjaajat: Anne Tuomela, Marjo Ronkainen, Harri Jyrävä ja Pentti Lahtinen

YMPÄRISTÖTEKNIikka

Diplomityö

Maaliskuu 2016

# TIIVISTELMÄ

## OPINNÄYTETYÖSTÄ Oulun yliopisto Teknillinen tiedekunta

Koulutusohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma			
Tekijä Karjalainen Noora		Työn ohjaajat yliopistolla Kujala K, professori ja Tuomela A, yliopisto-opettaja	
Työn nimi Uusiomateriaalien hyödyntäminen rikastushiekka-altaiden pintarakenteissa			
Opintosuunta Vesi- ja yhdyskuntatekniikka	Työn laji Diplomityö	Aika maaliskuu 2016	Sivumäärä 73 s., 7 liitettä
<b>Tiivistelmä</b> <p>Tässä diplomityössä on arvioitu teollisuudessa muodostuvien uusiomateriaalien hyödyntämistä rikastushiekka-altaiden pintarakenteissa. Tavoitteena oli löytää tehtyjen laboratoriotulosten perusteilla potentiaaliset uusiomateriaaliratkaisut runkomateriaalien ominaisuuksien parantamiseen, luonnonmateriaalien korvaamiseen ja kaivosten sulkemiskustannusten pienentämiseen. Materiaalivalinnoilla pyritään myös vähentämään sulfidipitoisten rikastushiekkojen happamoitumista ja haitta-aineiden liukenemistä. Diplomityössä tarkasteltiin seuraavia uusiomateriaaleja; energianpolttoprosessien tuhkat, kipsi, valimohiekka ja kuitusavi.</p> <p>Diplomityö koostuu kirjallisuuskatsauksesta, valmiiden laboratoriotulosten tarkastelusta ja koerakenteiden ohjeistuksesta. Kirjallisuuskatsaus koostuu rikastushiekkojen luokittelusta ja ominaisuuksista, rikastushiekka-altaiden rakenteista ja teollisuuden uusiomateriaaleista. Tulososiossa käsitellään aiemmin tehtyjä laboratoriotuloksia, jotka sisältävät teknisiä ja ympäristökelpoisuustutkimuksia. Työssä käytetyt laboratoriotulokset ovat EU-Life UPACMIC (LIFE12 ENV/FI/00592)-hankkeen yhteydessä tehtyjä laboratoriotuloksia, jotka on tehty Ramboll Finland Oy:n Luopioisten T&amp;K laboratoriossa vuonna 2014. Teknisissä laboratoriotutkimuksissa on tutkittu materiaalien vedenläpäisevyyksiä, puristuslujuuksia ja niiden muutoksia, ympäristökelpoisuustutkimuksissa rikastushiekkojen haitta-aineiden kokonaispitoisuuksia ja liukoisuuksia. Laboratoriotuloksissa runkomateriaaleina on käytetty Hituran ja Pyhäsalmen kaivoksien rikastushiekkaa ja moreenia. Laboratoriotulosten pohjalta tehty koerakentamisen ohjeistus on myös osa tätä diplomityötä.</p> <p>Laboratoriotuloksista havaittiin, että uusiomateriaalien laaduilla ja sen vaihteluilla oli suuria vaikutuksia materiaalien käyttäytymiseen sekä teknisissä ominaisuuksissa että ympäristökelpoisuustutkimuksissa. Materiaalien väliset eroavaisuudet vaihtelivat tuotantolaitoksittain. Suurimmat materiaalien laatueroavaisuudet olivat tuhkaa pienemmät. Laboratoriotulosten perusteella runkomateriaalien jalostaminen uusiomateriaaleilla ei ole aina perusteltua. Myöskään uusiomateriaalin käyttömäärän kasvattaminen jalostettavassa runkoaineessa ei tuottanut automaattisesti suurempaa hyötyä. Esimerkiksi tuhkan määrän ollessa yli 10 % runkoaineen märkämässasta, saavutettavat tekniset ja ympäristölliset edut pienenevät suhteessa käytetyn tuhkan määrään.</p> <p>Laboratoriotulosten, materiaalien saatavuuden, varastoinnin ja logistiikan huomioon ottaen uusiomateriaaleista tuhka on potentiaalisin vaihtoehto sulfidipitoisen rikastushiekan jalostamiseen. Rikastushiekan jalostaminen tuhalla vähentää sulfidirikastushiekan happamoitumista, hapon tuottoa ja haitta-aineiden liukenemistä. Lisäksi tuhka lisäsi lähes kaikissa tapauksissa runkomateriaalin puristuslujuutta ja pienensi vedenläpäisevyyttä.</p> <p>Keväällä 2016 aloitettavaa pintarakenteiden koerakentamista varten tutkittavista uusiomateriaaleista jatkotutkimuksiin valittiin tuhka ja kipsi. Materiaalivalinnat tehtiin Rambollin ja kanadalaisen konsulttifirman Klohn Crippen Bergerin tekemien tutkimusten perusteilla. Tuhka toimii koerakenteissa reaktiivisena kerroksena ja kipsi neutraloivana komponenttina. Muita pintakerroksen koerakentamisen materiaaleja ovat rikastushiekka, moreeni, inertti kiviaines, multa ja siirtonurmi. Koerakentaminen suoritetaan Pyhäsalmen kaivoksella keväällä 2016, jonka ohjeistaminen on osa tätä diplomityötä. Koerakentamisen ohjeistus on diplomityön liitteenä.</p>			
Muita tietoja			

# ABSTRACT FOR THESIS

University of Oulu Faculty of Technology

Degree Programme Degree Programme in Environmental Engineering			
Author Karjalainen Noora		Thesis Supervisor Professor Kujala K. and University teacher Tuomela A.	
Title of Thesis Utilization of by-products in tailings cover			
Major Subject Water and Geo Engineering	Type of Thesis Master's Thesis	Submission Date March 2016	Number of Pages 73 p., 7 appendix
<b>Abstract</b> <p>The aim of this thesis was to find the potential industrial by-products to be used as covering materials of tailings basin. The objective was to improve properties of aggregate materials, replace virgin natural resources and reduce closure cost of the mine by utilizing by-products. One objective was to reduce the acidification of tailing. The main by-products investigated were ash, gypsum, foundry sand and fibre clay.</p> <p>The thesis consists of a literature review and laboratory tests results. Literature review consists classification and characterization of tailings, tailing pond structures and industrial by-products. Laboratory results include technical properties and environmental qualification. Technical properties consist of compressive strength and hydraulic conductivity. Environmental laboratory tests consist of detrimental element total content and solubility. Tailings and moraine from Hitura and Pyhäsalmi mines were used as aggregate materials in the laboratory tests.</p> <p>Based on the laboratory test results and material availability, ash was the best option for refining the tailings. Refining the tailings with ash reduces the acidification of sulphidic tailings, acid production and dissolution of detrimental elements. In most cases ash improved compressive strength of the aggregate material and reduced hydraulic conductivity.</p> <p>Ash and gypsum were chosen for further research. In spring 2016 surface structures will be built for further studies. Ash is being used as reactive layer and gypsum as neutralizing component. Tailings and moraine from Pyhäsalmi mine, inert rock materials, topsoil and transferable lawn are going to be tested as well.</p>			
<b>Additional Information</b>			

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:ssä, Luopioisissa. Diplomityön ovat rahoittaneet EU-Life UPACMIC (LIFE12 ENV/FI/00592)-hanke (Utilization of by-products and alternative construction materials in new mine construction) ja Ramboll Finland Oy on rahoittanut diplomityötä osana valtakunnallista UUMA2-hanketta. Työn valvojana on toiminut professori Kauko Kujala Oulun yliopistosta. Työtä ovat ohjanneet Anne Tuomela Oulun yliopistosta sekä Marjo Ronkainen, Harri Jyrävä ja Pentti Lahtinen Ramboll Finland Oy:stä.

Haluan lausua suuret kiitokset diplomityön valvojalle ja ohjaajille, jotka ovat antaneet todella arvokkaita neuvoja ja palautteita koko diplomityön aikana. Haluan kiittää myös koko Ramboll Finland Oy:n Luopioisten yksikköä mukavasta työilmapiiristä ja siitä, kuinka hyvin olette ottaneet minut vastaan uutena työntekijänä. Suuret kiitokset laboratorion väelle ja Harrille tehdyistä laboratoriotutkimuksista ja -tuloksista. Ilman niitä diplomityöni olisi jäänyt aika ohueksi. Kiitos kuuluu myös Merjalle ja Harrille astiakoe-ohjeistuksen laadinnan neuvomisesta.

Lopuksi haluan kiittää aviopuolisoani Kukua kannustuksesta, tuesta ja kärsivällisyydestä koko opintojeni ja diplomityöni aikana.

Luopioisissa 23.3.2016

Noora Karjalainen

# SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto .....	7
2 Rikastushiekat Suomessa .....	9
2.1 Rikastushiekkojen luokittelu .....	9
2.2 Sulfidiset rikastushiekat .....	11
2.3 Tarkasteltavat kohteet .....	12
2.3.1 Hituran kaivos.....	12
2.3.2 Pyhäsalmen kaivos.....	13
3 Rikastushiekka-altaiden pintarakenteet.....	15
3.1 Kuivapeitto .....	16
3.2 Vesi- ja märkäpeitto .....	18
4 Uusiomateriaalit .....	21
4.1 Tarkasteltavat uusiomateriaalit .....	21
4.1.1 Kuitusavi.....	21
4.1.2 Tuhkat .....	22
4.1.3 Kipsi.....	25
4.1.4 Valimohiekka ja -pöly .....	25
4.2 Materiaalien saatavuus, varastointi ja rakennettavuus .....	26
4.3 Tekniset ominaisuudet .....	28
5 Uusiomateriaalien ominaisuudet .....	31
5.1 Tekniset ominaisuudet .....	31
5.1.1 Hituran kaivoksen materiaalit.....	33
5.1.2 Pyhäsalmen kaivoksen materiaalit.....	41
5.1.3 Uusiomateriaaliseokset .....	45
5.2 Ympäristökelpoisuus.....	48
5.2.1 Hituran kaivoksen materiaalit.....	49
5.2.2 Pyhäsalmen kaivoksen materiaalit.....	56
6 Koerakentaminen .....	61
6.1 Materiaalivalinnat ja pintarakenteiden koerakenteet .....	61
6.2 Astiakokeiden rakentaminen .....	64
7 Yhteenveto ja johtopäätökset .....	66
Lähteet.....	70
Liitteet	

## LIITTEET:

Liite 1. Rakeisuudet

Liite 2. Laboratoriotulokset, tekniset ominaisuudet (Hituran materiaalit)

Liite 3. Laboratoriotulokset, tekniset ominaisuudet (Pyhäsalmen materiaalit)

Liite 4. Laboratoriotulokset uusiomateriaalit, tekniset ominaisuudet

Liite 5. Hituran koekappaleiden haitta-aineliukoisuudet

Liite 6. Kaatopaikka raja-arvot ja Pyhäsalmen materiaalien haitta-aineliukoisuudet

Liite 7. Astiakokeiden ohjeistus

# 1 JOHDANTO

Rikastushiekka on malmin rikastuksessa syntyvää jätettä, jonka määrään vaikuttavat rikastettava malmio ja rikastusprosessin tehokkuus. Suomen kaivosteollisuudessa rikastushiekkaa muodostuu yhteensä noin 15 – 20 miljoona tonnia vuodessa. Rikastusprosesseissa muodostuva hiekka kuljetetaan vesilietteenä yleensä purkuputkia pitkin padottuihin rikastushiekka-altaisiin, joita Suomessa oli vuonna 2015 yhteensä 47 kappaletta. Altaat ovat 1 – 900 ha kokoisia ja niiden tilavuudet vaihtelevat 10 000 – 100 000 000 m<sup>3</sup> välillä.

Rikastushiekka-altaan täyttyessä ja kaivostoiminnan loppuessa rikastushiekka-altaisiin tulee rakentaa pintarakenteet. Koska rikastushiekka-altaat ovat laajoja alueita, altaiden pintarakenteisiin tarvitaan suuret määrät erilaisia peitemateriaaleja. Esimerkiksi Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-altaiden pintarakenteisiin tarvittavien materiaalin kokonaismäärä on arvioitu olevan lähes 600 000 m<sup>3</sup>, kun suljettavan alueen kokonaispinta-ala on noin 65 hehtaaria. Materiaalimäärät ovat niin suuria, että kaivosten arvioituista sulkemiskustannuksista jopa puolet voi syntyä rikastushiekka-altaiden sulkemiseen tarvittavista materiaaleista ja niiden logistiikasta. Suurten kustannusten lisäksi huolenaiheena on neitseellisten luonnonmateriaalien kuluminen, sillä pintarakenteissa käytetään usein luonnonmateriaaleja kuten moreenia. Tavoitteena olisikin luonnonmateriaalien ja geosynteettisten kalvojen korvaaminen ja jalostaminen kaivosten omilla massoilla sekä hyödynnettävissä olevilla teollisuuden sivutuotteilla, joita teollisuudessa syntyy huomattavia määriä. Esimerkiksi Suomen energianpolttoprosesseissa syntyy vuosittain arviolta 1,5 miljoona tonnia tuhkaa. Tuhkien lisäksi hyödynnettävissä olevia sivutuotteita syntyy muun muassa paperi-, valimo- ja kemianteollisuudessa.

Tässä diplomityössä tutkitaan teollisuudessa muodostuvien uusiomateriaalien hyödyntämistä rikastushiekka-altaiden pintarakenteissa. Tarkasteltavia uusiomateriaaleja ovat; energianpolttoprosessien tuhkat, kipsi, valimohiekka ja kuitusavi. Työssä käsitellään EU-life UPACMIC (LIFE12 ENV/FI/00592)-hankkeen yhteydessä vuonna 2014 tehtyjä teknisiä ja ympäristökelpoisuustutkimusten aineistoa. Diplomityön tavoitteena on löytää laboratoriotulosten perusteilla mahdollisimman hyvät ja toimintavarmat uusiomateriaalisovellukset, joiden hyödyntämisellä saavutettaisiin ympäristöllisiä ja taloudellisia hyötyjä. Tavoitteena on vähentää luonnonmateriaalien



kulutusta, pienentää altainen sulkemiskustannuksia sekä tehostaa teollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttöä.

Tehtyjen laboratoriokokeiden, uusiomateriaalien saatavuuden, välivarastoinnin ja etäisyyksien perusteilla valitaan otollisimmat uusiomateriaalit myöhempää pintarakenteiden koerakentamista varten. Koerakentaminen aloitetaan Pyhäsalmen kaivoksella keväällä 2016, jonka ohjeistaminen kuuluu osaksi tätä diplomityötä. Diplomityö on rajattu käsittelemään uusiomateriaalien hyödyntämistä vain rikastushiekka-altainen pintarakenteissa.

## 2 RIKASTUSHIEKAT SUOMESSA

Työ- ja elinkeinoministeriön (2015) mukaan Suomessa oli yhteensä 46 kaivoslain alaista kaivosta ja louhosta vuonna 2013. Suomen kaivosteollisuudessa rikastushiekkaa muodostuu yhteensä noin 15 – 20 miljoonaa tonnia vuodessa (Ramboll 2012), jotka koostuvat lähinnä harmemineraleista, rikastettavasta malmista, prosessivedestä ja prosessissa käytetyistä kemikaaleista. Rikastushiekkojen ominaisuudet, koostumukset ja muodostuvat määrät vaihtelevat kaivoksittain. Rikastushiekkojen ominaisuuksiin ja muodostuvaan määrään vaikuttavat rikastettava malmio ja rikastusprosessin tehokkuus. (Heikkinen & Noras 2005)

### 2.1 Rikastushiekkojen luokittelu

Valtioneuvoston asettaman Vna 190/2013 asetuksen (asetus kaivannaisjätteistä) mukaan kaivannaisjäte voidaan luokitella pysyväksi jätteeksi, jos jätteessä ei tapahdu liukenemista, hajoamista eikä se aiheuta vaaraa ihmisille, ympäristölle ja terveydelle niin lyhyellä kuin pidemmälläkään aikavälillä. Luokittelun mukaan pysyvän jätteen sulfidirikkipitoisuus on enintään 0,1 % tai arvon ollessa korkeintaan 1 %, tulee rikastushiekan neutralointipotentiaalisuhteen (NPR) olla suurempi kuin 3. Neutralointipotentiaalisuhteella tarkoitetaan hapon neutraloimispotentiaalin ja hapontuottopotentiaalin välistä suhdetta. Lisäksi pysyvä jäte ei saa olla itsestään syttyvää tai palavaa materiaalia ja sen haitta-aineiden kokonaispitoisuudet tulee olla riittävän alhaiset. Riittävän alhaisina pitoisuuksina pidetään kokonaispitoisuuksia, jotka eivät ylitä maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen (Vna 214/2007) asetuksissa asetettuja kynnyksarvoja. Valtioneuvoston laatiman Vna 214/2007 asetuksen (PIMA-asetus) haitta-ainepitoisuuksien kynnyksarvot esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. PIMA- asetuksen kynnyksarvot (Vna 214/2007)

<b><i>Haitta-aine</i></b>	<b><i>kynnyksarvo (mg/kg)</i></b>
Antimoni	2
Arseeni	5
Kadmium	1
Koboltti	20
Kromi	100
Kupari	100
Elohopea	0,5
Nikkeli	50
Lyijy	60
Vanadiini	100

Sinkki	200
--------	-----

Haitta-aineiden kokonaispitoisuuksien lisäksi rikastushiekkujen luokittelu voidaan tehdä niiden haitta-aine liukoisuuksien perusteilla. Luokittelu tehdään vertaamalla rikastushiekan haitta-aineiden liukoisuuksia valtioneuvoston asetuksen kaatopaikoista (Vna 331/2013) mukaisiin liukoisuusraja-arvoihin, joita on asetettu eri kaatopaikkaluokille; pysyvän jätteen kaatopaikalle, tavanomaisen jätteen kaatopaikalle ja vaarallisen jätteen kaatopaikalle. Materiaalien haitta-aineliukoisuudet määritetään läpivirtaus- tai ravistelutesteillä. Läpivirtaustestiä ja ravistelutestiä käytetään jätteen perusmäärittelyssä. Laadunvalvonnassa ja mahdollisessa vastaavuustestauksessa voidaan käyttää ravistelutestiä, kun tiedetään ravistelutestin ja läpivirtaustestin korrelaatio. (Vna 331/2013 ja Wahlström M. et al. 2006)

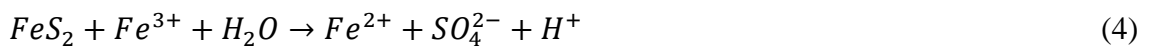
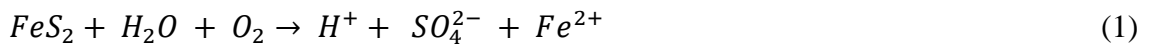
Pysyvällä jätteellä tarkoitetaan jätettä, jossa ei tapahdu kemiallisia, fysikaalisia ja biologisia muutoksia, eikä se aiheuta vaaraa ihmisille, terveydelle ja ympäristölle. Tavanomainen jäte ei ole pysyvää eikä vaarallista jätettä. Vaarallisella jätteellä tarkoitetaan jätettä, josta on vaaraa ja haittaa terveydelle ja ympäristölle. Taulukossa 2 on esitetty eri kaatopaikkaluokkien haitta-aineliukoisuuksien raja-arvot. Liukoisuudet ilmoitetaan mg/kg ja L/S-suhteella tarkoitetaan nesteen (liquid) ja kuiva-aineen (solid) välistä suhdetta.

Taulukko 2. Eri kaatopaikkaluokkien liukoisuusraja-arvot (L/S= 10 l/kg) (Vna 331/2013).

<b>Haitta-aine</b>	<b>Pysyvä jäte</b>	<b>Tavanomainen jäte</b>	<b>Vaarallinen jäte</b>
Arseeni	0,5	2	25
Barium	20	100	300
Kadmium	0,04	1	5
Kromi	0,5	10	70
Kupari	2	50	100
Elohopea	0,01	0,2	2
Molybdeeni	0,5	10	30
Nikkeli	0,4	10	40
Lyijy	0,5	10	50
Antimoni	0,06	0,7	5
Seleen	0,1	0,5	7
Sinkki	4	50	200
Kloridi	800	15000	2500
Fluoridi	10	150	500
Sulfaatti	1000	20 000	50 000
Liennut orgaaninen hiili	500	800	1000

## 2.2 Sulfidiset rikastushiekat

Suomen maaperässä esiintyy hapettuvia sulfidimineraaleja, kuten rikkikiisua ( $\text{FeS}_2$ ), kuparikiisua ( $\text{CuFeS}_2$ ), magneetikiisua ( $\text{Fe}^{1-x}\text{S}$ ) ja sinkkivälkettä [ $(\text{Zn,Fe})\text{S}$ ]. Näistä yleisin sulfidimineraali on rikkikiisu eli pyriitti. Sulfidimineraalimalmien rikastuksessa muodostuu sulfidipitoisia rikastushiekkvoja, joita voidaan pitää ongelmallisina niiden happamoitumisen vuoksi. Reagoidessaan veden ja hapen kanssa sulfidipitoiset rikastushiekat muodostavat sulfaatti-ioneja ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) ja happamuutta aiheuttavia vetyioneja ( $\text{H}^+$ ) reaktioyhtälöiden 1 – 4 mukaisesti.



Sulfidipitoisten rikastushiekkvojen happamoituminen voi aiheuttaa kaivosalueelta happamia valumavesiä (AMD, acid mine drainage), jollei happoja neutraloivia mineraaleja ei ole riittävästi saatavilla. Valumavesien happamuus riippuu sulfidipitoisten rikastushiekkvojen määrästä, laadusta sekä niiden suhteesta happamuutta neutraloiviin mineraaleihin. Kaivosvedet voivat olla happamoitumisen seurauksena hyvinkin happamia. Veden pH voi olla jopa alle 3. Hapettuessaan sulfidimineraalit kasvattavat myös metallien ja epämetallien liukoisuuksia, jolloin haitta-aineliukoisuudet kaivos- ja valumavesissä kasvavat. Esimerkiksi rikkikiisun hapettuminen lisää muun muassa arseenin, kadmiumin, elohopean ja lyijyn liukoisuuksia. (Toropainen 2006)

Happamoitumisen yleisiä tunnusmerkkejä ovat kullan- tai punertavanruskeat kaivosvalunnat, veden pH:n ja happipitoisuuksien lasku, redox ja sähkönjohtavuuden nousu, lisääntyneet metallipitoisuudet, rikin haju ja kasvuston puuttuminen. Veden matala pH on merkki pinta- ja pohjavesien happamoitumisesta, jotka vaikuttavat vesieliöihin ja pinta- ja pohjavesien käyttöön. Happamoitumisen seurauksena vesieliöstökanta voi vähentyä tai kadota jopa kokonaan, sillä pahimmillaan happamoituminen voi tehdä vesistöistä lähes elinkelvottomia. Happamoituminen voi aiheuttaa esimerkiksi suuria kalakuolemia. Veden pH:n ollessa matala, kalan kidusten

pinnalle muodostuu happea läpäisemätön pinta, jolloin kala kuolee hapenpuutteeseen. (Sutela et al. 2012, Toropainen 2006)

Sulfidipitoisten rikastushiekkojen hapon muodostumista voidaan estää hapen määrän minimoinnilla. Hapen pääsyä rikastushiekkakerrokseen voidaan ehkäistä esimerkiksi monikerroksisilla pintarakenteilla tai pitämällä rikastushiekka-allas kokonaan vedellä kylläisessä tilassa. Muita hapettumisen minimointikeinoja on esimerkiksi rikastushiekan neutraloiminen eli pH:n säätäminen esimerkiksi kalkin, kalkkikiven tai lentotuhkan avulla. (Kauppila et al. 2011, Heikkinen & Noras 2005)

## **2.3 Tarkasteltavat kohteet**

Diplomityö kuuluu UPACMIC (LIFE12 ENV/FI/00592)-hankkeeseen, jossa ovat mukana Hituran ja Pyhäsalmen kaivokset. Hituran kaivos on ollut hankkeessa mukana laboratoriokokeiden myötä. Pyhäsalmen kaivos on laboratoriokokeiden lisäksi mukana keväällä 2016 alkavassa pintarakenteiden koerakentamisessa.

### **2.3.1 Hituran kaivos**

Hituran kaivos on Nivalassa, Pohjois-Pohjanmaalla sijaitseva nikkeli-kaivos. Kaivoksella on aloitettu nikkeli- ja kobolttituotanto avolouhoksena 1970-luvulla ja kaivos on siirtynyt maanalaiseen tuotantoon 1990-luvulla. Nikkelin alhaisen hinnan vuoksi kaivos on joutunut keskeyttämään tuotantonsa useita kertoja.

Hituran kaivoksen kaivannaisjätteen jätehuoltosuunnitelmassa arvioidaan rikastushiekan määrän olevan 23 – 31 Mt kaivostoiminnan loputtua vuonna 2025. Hituran kaivoksella nikkeli-rikastuksen yhteydessä muodostuu keskimäärin 620 000 tonnia rikastushiekkaa vuodessa. Kaivoksen rikastushiekka koostuu pääosin magnesiumista, piistä ja raudasta sekä pienistä määristä alumiinia, kalsiumia, mangaania, kaliumia, rikkiä, kloridia ja raskasmetalleja. Tehtyjen tutkimusten perusteilla kaivoksen rikastushiekka luokitellaan tavanomaiseksi jätteeksi. Rikastushiekat kuljetetaan vesilietteenä purkuputkia pitkin rikastushiekka-altaisiin, joiden kokonaispinta-ala on noin 95 ha. Rikastushiekka-altaiden lisäksi alueella on selkeytys- ja palautusvesialtaat. Altaiden pohjarakenteet koostuvat luonnollisesta pohjasta.

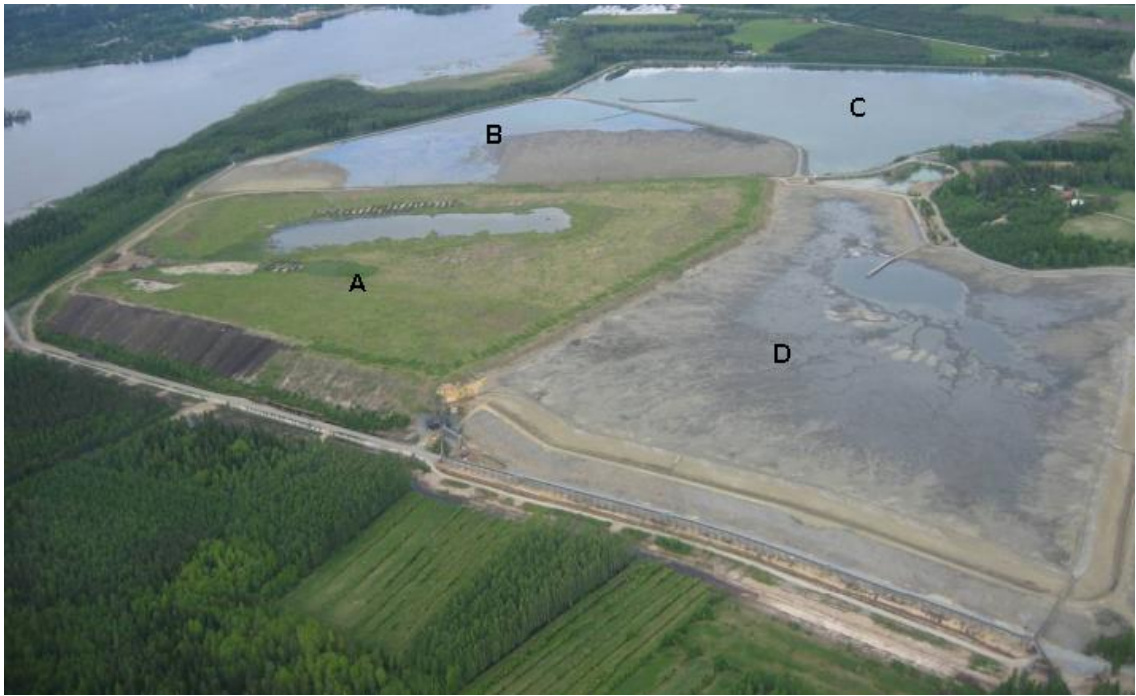
Oman malmin lisäksi Hituran kaivos on rikastanut Lieksan Tainiovaaran (1989), Kälviän (1999) ja Särkiniemen kaivoksen (2007 – 2008) malmeja, joiden rikastuksessa on muodostunut arviolta 148 000 tonnia rikastushiekkaa. Tämänhetkisten suunnitelmien mukaan Hituran kaivos tulee tulevaisuudessa aloittamaan läheisten louhosten kultamalmin rikastamisen. Rikastusprosessista muodostuneet rikastushiekat sijoitettaisiin Hituran kaivosalueelle, jonka vuoksi myös kultarikastushiekan ympäristökelpoisuutta käsitellään luvussa 5.2. (Belvedere Mining Oy 2012)

### **2.3.2 Pyhäsalmen kaivos**

Pyhäsalmen kaivos sijaitsee Pyhäjärvellä, Pohjois-Pohjanmaalla. Kaivos on aloittanut toimintansa vuonna 1962 avolouhoksena ja vuonna 1967 kaivos on aloittanut maanalaisen louhinnan avolouhinnan rinnalla. Uusien malmilöydösten seurauksena Pyhäsalmen kaivos on syventynyt ja näin ollen siitä on tullut Euroopan syvin perusmetallikaivos. Kaivoksella on syvyyttä noin 1450 metriä.

Kaivoksella louhitaan sinkki-, kupari- ja pyriittirikastetta, joiden rikastusprosessissa muodostuu rikastushiekkaa arviolta 400 000 – 500 000 tonnia vuodessa. Muodostuneet rikastushiekat ovat sulfidipitoisia, herkästi hapettuvia, happoa tuottavia materiaaleja ja koostuvat suurimmaksi osaksi rikistä, raudasta, piistä ja bariumista. Raudan ja rikin määrä rikastushiekassa vaihtelevat kaivoksen pyriittituotannon mukaan. Kaivannaisjätteen jätehuoltosuunnitelman mukaan kaivoksen rikastushiekat ylittävät PIMA-asetuksen raja-arvot sinkin, koboltin, kuparin, arseenin, kadmiumin ja antimonin osalta. Korkean sulfidipitoisuuden vuoksi Pyhäsalmen rikastushiekoja voidaan pitää happamia valumavesiä tuottavina rikastushiekkoina, sillä kaivoksen jätehuoltosuunnitelman mukaan rikastushiekan neutraloimispotentiaalisuhde on vain 0,17. Tämä tarkoittaa sitä, että rikastushiekan hapontuottopotentiaali on neutralointipotentiaalia paljon suurempi ja rikastushiekka happamoituu herkästi reagoidessaan hapen kanssa.

Rikastusprosessissa muodostuvasta rikastushiekasta erotellaan hieno ja karkea rikastushiekka erilleen. Karkeaa rikastushiekkaa hyödynnetään kaivoksen täyteaineena ja hienompi rikastushiekka johdetaan vesilietteenä padottuihin rikastushiekka-altaisiin, joiden yhteenlaskettu pinta-ala on noin 150 ha (Kuva 1). Altaiden pohjarakenteet ovat pääsääntöisesti rikastushiekan painosta tiivistynyttä turvetta, jonka alapuolella on hiesun/saven peittämä hienoainesmoreeni.

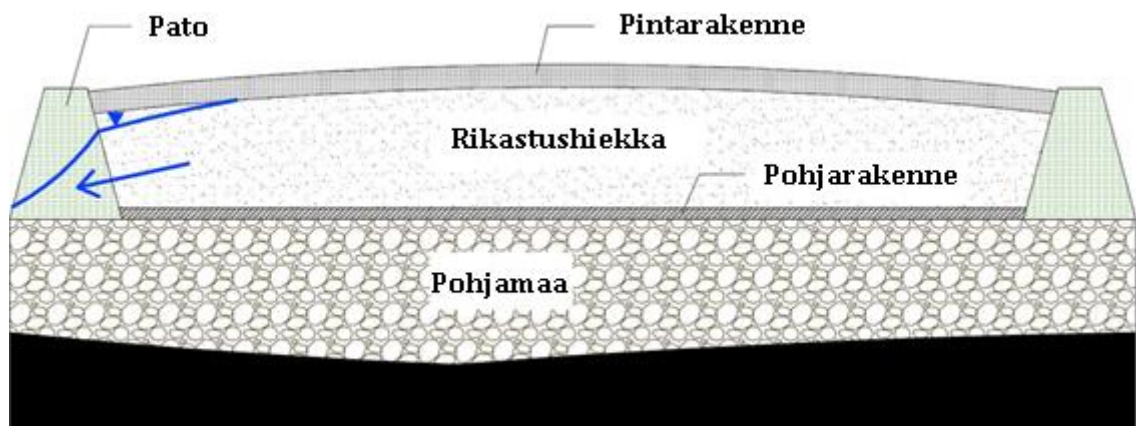


Kuva 1. Pyhäsalmen rikastushiekka-altaat (Ramboll 2012, muokattu).

Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekka-allas A on suuruudelta noin 41 hehtaaria, joka on suljettu vuosina 2001 – 2002. Altaan tiivistyskerroksessa on käytetty siltistä hiekkamoreenia (siHkMr), jonka kerrospaksuus on ollut 300 mm. Suojakerros koostuu 500 mm:n paksuisesta hiekkamoreenista. Lisäksi pintaan on rakennettu 50 – 100 mm paksuinen kasvukerros. Kuten kuvasta 1 näkyy, altaan keskelle on jätetty noin kahden hehtaarin kokoinen alue sulkematta, liiallisen kosteuden vuoksi. B-allas on noin 31 hehtaarin kokoinen rikastushiekka-allas, jonka eteläosaan varastoidaan pyriittipitoista rikastushiekkaa, pohjoisosaan lopullista rikastushiekkaa. C-allas on pinta-alaltaan noin 47 hehtaaria ja se toimii vesienkäsittelyaltaana. D-allas toimii rikastushiekan läjitysaltaana. Altaan pinta-ala on noin 31 hehtaaria. (Pyhäsalmi Mine Oy, 2014)

### 3 RIKASTUSHIEKKA-ALTAIDEN PINTARAKENTEET

Rikastushiekka-altaat ovat rikastamon läheisyydessä olevia padottuja altaita, joissa varastoidaan rikastusprosessista muodostunutta rikastushiekkaa. Rikastushiekka-altaiden ympäristörakenteet koostuvat pohja-, pinta- ja patorakenteista (Kuva 2). Lisäksi rikastushiekka-altaissa voidaan käyttää erilaisia reaktiivisia rakenteita, kuten reaktiivisia patoja ja maahan upotettavia reaktiivisia seiniä. Rikastushiekka-altaiden ympäristörakenteille ei ole laadittu virallisia ohjeita, joten viranomaiset hyväksyvät laaditut suunnitelmat kullekin altaalle kohdekohtaisesti.



Kuva 2. Rikastushiekka-altaiden ympäristösuojarakenteet (Ramboll 2012, muokattu).

Pintarakenteilla tarkoitetaan yleisesti rikastushiekka-altaiden peittämistä kaivostoiminnan loppuessa tai rikastushiekka-altaan täytyessä. Pintarakenteiden ominaisuudet ja peittotavat ovat kohdekohtaisia, jotka riippuvat peitettävän rikastushiekan ominaisuuksista, haitta-ainepitoisuuksista, alueen sijainnista, ilmastosta, peittomateriaalien saatavuuksista, alueen vesitaseesta, jälkikäyttömuodosta, altaiden pohja- ja patorakenteista sekä pohjamaan laadusta. Vaikka pintarakenteille ei ole annettu yhdenmukaisia ohjeita, tulee rakenteiden olla ympäristölle ja terveydelle turvalliset lyhyellä ja myös pidemmällä aikavälillä katsottuna. Suunniteluissa voidaan soveltaa esimerkiksi kaatopaikkarakenteiden ohjearvoja, kunhan rikastushiekkojen laadut ja sijoitustavat otetaan huomioon. (Bjelkevik 2005, Heikkinen & Noras 2005)

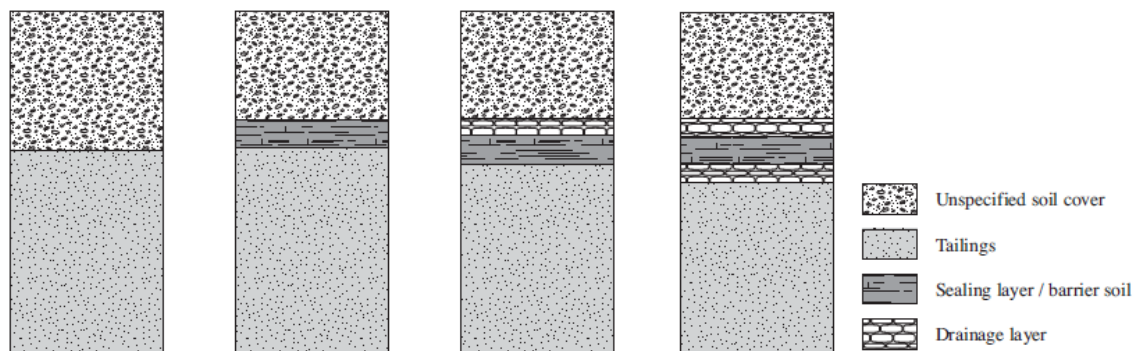
Rikastushiekka-altaiden pintarakenteista käytetään yleensä nimitystä kuiva- tai vesipeitto. Kuivapeitot koostuvat yhdestä tai useammasta maamateriaalista. Luonnonmateriaalien lisäksi rakenteissa voidaan käyttää esimerkiksi keinotekoisia



eristeitä. Vesipeitot ovat joko täysin vedellä kyllästettyjä vesipeittoja tai osittaisia märkäpeittoja.

### 3.1 Kuivapeitto

Yksinkertaisimmillaan kuivapeitto voi olla yhdestä materiaalista koostuva pintakerros, jossa käytettävä materiaali on sijoitettu suoraan rikastushiekkakerroksen päälle (Kuva 3). Yksinkertainen kuivapeitto sopii etenkin happoa tuottamattomien rikastushiekkokerrosten peittämiseen ja maisemointiin, jolloin pintamateriaalina käytetään yleensä moreenia. Kuivapeiton tehtävänä on estää rikastushiekan pölyämistä, veden pääsyä rikastushiekkakerrokseen sekä hapen diffuusiota. Kerroksen paksuuteen vaikuttavat muun muassa peitettävän rikastushiekan ominaisuudet (liukoisuudet), paikallinen ilmasto (mm. sadanta, haihdunta ja lämpötila), kasvillisuus (juurien tunkeutumissyvyys) ja peittomateriaalien saatavuus. Kerroksen paksuus on tyypillisesti noin 0,5 – 1,5 metriä. Tutkimusten mukaan pohjoismaisissa olosuhteissa 1,0 – 1,5 metrin paksuinen moreenikerros voi vähentää rikastushiekan hapettumisastetta jopa 80 – 90 %. (Carlsson 2002, Heikkinen & Noras 2005)



Kuva 3. Esimerkkejä rikastushiekka-altaiden pintarakenteista. (Carlsson 2002, muokattu).

Vaativammat pintarakenteet voivat sisältää erilaisia materiaalikerroksia, kuten kasvu- ja pintakerroksen, kuivatuskerroksen, tiivistyskerroksen ja keinotekoisia eristeitä (Kuva 3). Kasvukerroksen tehtävänä on toimia kasvualustana kasvillisuudelle ja suojata tuulen ja veden aiheuttamia eroosioita. Kuivatuskerroksen tehtävänä on toimia suotautuneiden vesien poistajana ja pienentää alempiin kerroksiin kohdistuvaa vesipainetta. Kuivatuskerroksen toimivuuden kannalta käytettävän materiaalin tulee olla hyvin vettä läpäisevää. Kuivatuskerroksessa käytettävät tyypillisimmät materiaalit ovat hiekka ja sora. Tiivistyskerroksen tehtävänä on estää veden suotautuminen jätekerrokseen, joten

tiivistyskerroksessa käytettävän materiaalin tulee olla heikosti vettäläpäisevää. Lisäksi tiivistyskerros tulee suojata routavaurioilta, jotta tiivistysrakenteen rakenne ei muutu routimisen vaikutuksesta. Routiminen voi löyhyyttää materiaalia, jolloin myös materiaalin vedenläpäisevyys kasvaa. Lisäksi materiaalin kuivumista ja painumista aiheutuvat halkeamat tiivistyskerroksessa tulee pystyä välttämään. Tiivistyskerrokseen soveltuvia luonnonmateriaaleja ovat esimerkiksi savet, siltit ja hienoainesmoreenit. (Carlsson 2002)

Sipilän (1996) mukaan pintamateriaalit voidaan jakaa kolmeen materiaalityyppiin; hapenkulkua estäviin, happea kuluttaviin ja hapetusreaktiota estäviin materiaaleihin. Hapenkulkua estäviä materiaaleja ovat esimerkiksi savet, moreenit ja synteettiset kalvot, happea kuluttavia materiaaleja turve, lietteet ja komposti. Tuhka ja kalkki soveltuvat hapetusreaktioita estäviin rakenteisiin, sillä niillä on neutralointikyky ja kyvyt nostaa pH:ta ja näin ollen estää rikastushiekan hapetusreaktiot.

Suomessa kuivapeittoa on käytetty usein altaiden sulkemismuotona. Kuivapeittoa on käytetty esimerkiksi Pyhäsalmen kaivoksen A- altaan sulkemiseen ja tämänhetkisten suunnitelmien mukaan myös altaat B ja D tullaan sulkemaan samanlaisella pintarakenteella kuin allas A. Tämä tarkoittaa sitä, että altaiden tiivistyskerroksen paksuus olisi 300 mm, suojakerroksen 500 mm ja kasvukerroksen 50 – 100 mm. Materiaaleina käytettäisiin A-altaan tavoin moreenia / savista silttiä. Taulukkoon 3 on kerätty peitettävien altaiden pinta-alatiedot ja kerrokseen tarvittavat materiaalmäärät. Pinta-aloissa on ilmoitettu peitettävien lakialueiden ja luiskien pinta-alat.

Taulukko 3. Sulkemisen materiaalmäärät, alkuperäinen suunnitelma (Pyhäsalmi Mine Oy 2014).

<b>Allas</b>	<b>Pinta-ala [ha]</b>	<b>Tiivistyskerros[m<sup>3</sup>]</b>	<b>Suojakerros[m<sup>3</sup>]</b>	<b>Kasvukerros[m<sup>3</sup>]</b>
A	2	6 000	10 000	1 000 – 2 000
B	24,4 + 7,7	96 300	160 500	16 050 – 32 100
D	22 + 9	93 000	155 000	15 500 – 31 000
<b>Σ</b>	<b>65,1</b>	<b>195 300</b>	<b>325 500</b>	<b>32 550 – 65 100</b>

Pyhäsalmen rikastushiekka-altaiden sulkemiseen tarvittavien pintamateriaalien kokonaismäärä tulisi olemaan melkein 600 000 m<sup>3</sup>, joka kattaa noin puolet kaivoksen arvioiduista sulkemiskustannuksista. Näin ollen teollisuuden sivutuotteiden hyödyntäminen pintarakenteissa olisi erittäin kannattavaa. Sivutuotteiden hyötykäyttö

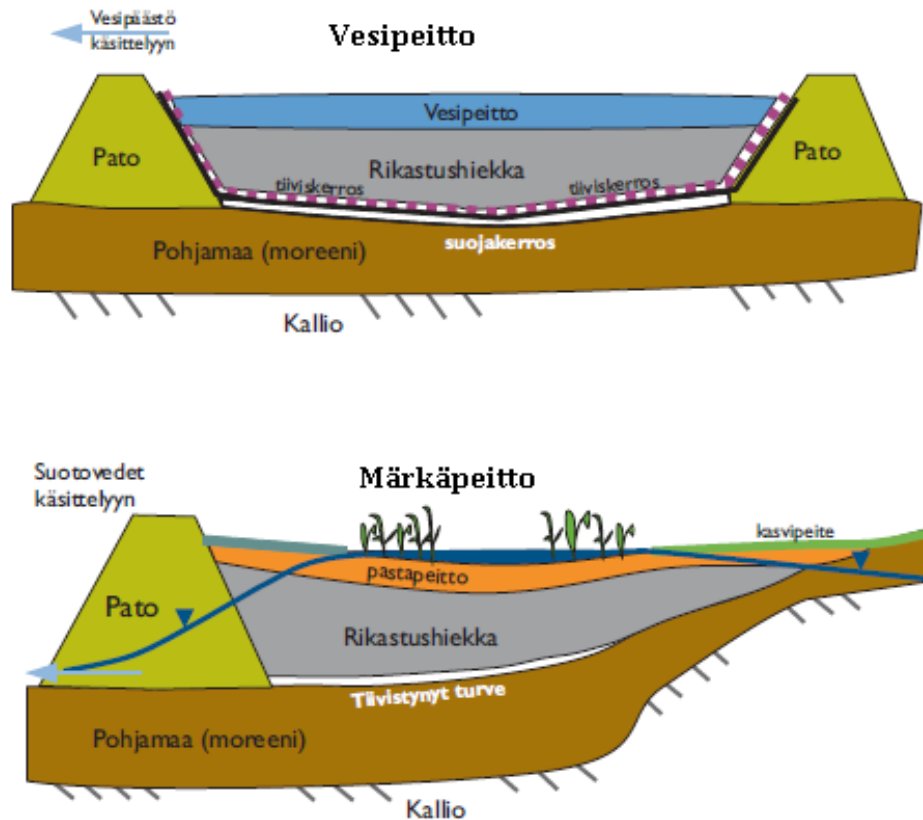
säästäisi suuret määrät luonnonmateriaaleja ja laskisi merkittävästi kaivoksen sulkemiskustannuksia. Sulkemisesta aiheutuvien kustannusten pienentämiseksi peitemateriaalit olisi pyrittävä hankkimaan mahdollisimman läheltä kaivosta, sillä suurille materiaalimäärille logistiikkakulut kasvavat runsaasti etäisyyksien kasvaessa.

### 3.2 Vesi- ja märkäpeitto

*Kaivannaisjätteen sijoittaminen veden alle tai peittäminen riittävän paksulla vesikerroksella on nykytietämyksen mukaan paras jälkihoitomenetelmä estämään tai hidastamaan rautasulfidien hapettumista ja sitä seuraavaa haitallisten aineiden liukenemista* (Kauppila et al. 2011 s. 177). Tämä perustuu siihen, että vedessä hapen diffuusio on noin  $10^4$  kertaa pienempi kuin ilmassa ja näin ollen vesipeitto estää tehokkaasti hapen pääsyä rikastushiekkakerrokseen.

Vesipeitossa käytettävään kerrospaksuuteen vaikuttavat alueen laajuus ja tuulisuus. Kerrospaksuudessa tulee ottaa huomioon tuulen aiheuttaman veden sekoittuminen, jota ilmenee etenkin keväisin jään sulaessa ja syksyllä syysmyrskyjen aikana. Vesikerroksen paksuuden jäädessä liian alhaiseksi, happi pääsee kulkeutumaan rikastushiekkakerrokseen turbulenssin avulla, jolloin rikastushiekka voi happamoitua. Tutkimusten mukaan riittävä vesisyvyys on noin 1,3 metriä. Veden syvyyttä voidaan kuitenkin hieman madaltaa, jos rikastushiekkakerros peitetään moreenilla tai muulla kiviaineksella ennen varsinaista vesipeittoa (Kuva 4). Tällöin riittävä vesisyvyys on noin 0,74 metriä. (Kauppila et al. 2011 ja Sipilä 1996)

Vesipeitto on helppohoitoinen ja kustannustehokas. Tärkeintä vesipeitossa on vesikannen pysyvyys ja vesitasapainon säilyvyys. Vesikansi ei saa kuivua eikä tulvia. Vesipeiton ollessa altaan sulkemismuotona, padoilta edellytetään pitkäaikaista stabiiliteettia. Lisäksi allasrakenteiden tulee kestää erilaiset säävaihtelut, kuten tulvat, myrskyt ja jääpadot. Vesipeitto edellyttää tiiviit pohja- ja patorakenteet (Kuva 4). (Kauppila et al. 2011, Bjelkevik 2005)



Kuva 4. Rikastushiekka-altaan sulkeminen vesi- ja märkäpeitolla (Kauppila et al. 2011, muokattu).

Rikastushiekka-altaat voidaan peittää myös märkäpeitolla. Märkäpeitolla tarkoitetaan osittaista vesipeittoa, jonka on periaate kuvattu kuvassa 4. Osittainen vesipeitto sopii heikosti happoa tuottavien rikastushiekkojen peittämiseen. Märkäpeittoa voidaan kuitenkin käyttää myös happoa tuottaviin rikastushiekkoihin, jos rikastushiekan päälle rakennetaan kuvan 4 mukainen suojakerros. Märkäpeiton ollessa rikastushiekka-altaan sulkemismuotona, allas muotoillaan keskeltä koveraksi, jolloin sade- ja sulamisvedet kerääntyvät itsestään altaan keskiosaan. Allaspadoilta edellytetään kestävyyttä vedenpinnan vaihteluille, sillä vuodenajat ja säiden vaihtelut aiheuttavat vedenpinnan vaihteluita rikastushiekka-altaissa. Pohjarakenteilta edellytetään vesitiiveyttä tai osittaista vesitiiveyttä. (Kauppila et al. 2011)

Ruotsissa vesipeittoa on käytetty ensimmäisen kerran Stekenjokkin kupari- ja sinkkikaivoksessa, joiden rikastusprosesseissa on syntynyt pyriittipitoista rikastushiekkaa noin 4,4 Mt. Rikastushiekka-aldaiden sulkeminen on tehty vuosina 1990

– 1991, jolloin rikastushiekkakerroksen päälle on laitettu 2,2 metrin vesikerros. Vesipeiton vaikutuksesta sinkkipitoisuudet valumavesissä olivat pienentyneet jopa 90 % alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Myös muiden metallien liukoisuudet olivat laskeneet alkuperäisestä tilanteesta. (Bjelkevik 2005)

## 4 UUSIOMATERIAALIT

Uusiomateriaaleja muodostuu eri teollisuuden aloissa suuret määrät. Uusiomateriaalit ovat jätettä, jotka voidaan käyttää uudelleen esimerkiksi maarakentamisessa. Uusiomateriaaleja on mahdollista hyödyntää joko sellaisenaan tai lisäkomponenttina maamateriaalien jalostamiseen ja korvaamiseen.

### 4.1 Tarkasteltavat uusiomateriaalit

UPACMIC-hankkeessa tutkittavia uusiomateriaaleja ovat kuitusavet, pohja- ja lentotuhkat, valimohiekat sekä kipsimäiset teollisuuden sivutuotteet. Seuraavissa kappaleissa esitellään kunkin uusiomateriaalin perusominaisuudet, syntyvät ja määrät Suomessa.

#### 4.1.1 Kuitusavi

Kuitusavi on sellu- ja paperiteollisuudessa muodostuva sivutuote. Kuitusavi on kuitupitoista lietettä, joka sisältää kuitujen lisäksi myös täyteaineita, kuten kaoliinia. Väriltään kuitusavi on yleensä harmaata, valkoista, vaaleanvihreää, -keltaista tai -ruskeaa (Kuva 5). Lietteen väri riippuu prosessissa käytetyistä väriaineista ja lietteen koostumuksesta. (Finncao Oy 2001)



Kuva 5. Kuitusavi (Ramboll).

Kuitusavi jaetaan kahteen luokkaan niiden syntyvän mukaan; kuitulietteenä ja siistauslietteeksi. Kuitulietettä muodostuu paperitehtailla, joissa raaka-aineina käytetään mekaanista massaa tai sellua. Siistauslietettä muodostuu, kun keräyspaperia siistataan

uusiomassaksi eli paperista poistetaan vanha muste. Siistausliete koostuu lyhyistä kuiduista, painomusteesta sekä täyte- ja päällysaineista. (Finncao Oy, 2001) Metsäteollisuuden tekemän raportin mukaan vuonna 2013 Suomessa oli 37 massa- ja paperiteollisuuden yksikköä. Näistä yksiköistä muodostuu vuosittain yhteensä noin 400 000 tonnia kuitu- ja siistausliettä. (Metsäteollisuus 2014)

Kuitusavien ominaisuuksiin vaikuttavat paperi- ja massateollisuudessa käytetyt prosessit, raaka-aineet sekä vedenpoistotekniikka. Ominaisuuksiltaan kuitusavi on todella kosteaa ja sen vesipitoisuus voi vaihdella noin 100 – 300 %, riippuen käytetystä vedenpoistotekniikasta. Kuitusaven vedenläpäisevyys on  $10^{-8} - 10^{-10}$  m/s, joka pienenee kuivatilavuuspainon kasvaessa. Näin ollen kuitusaven vedenläpäisevyyteen vaikuttavat rakentamisen aikainen tiivistäminen sekä materiaalin kuormitus. Finncaon tekemien teknisten tutkimuksien mukaan kuitusavilla voi olla poikkeavia mekaanisia ominaisuuksia, kuten vetolujuutta. Vetolujuuden myötä kuitusavilla on kantavuus ja muodonmuutoskestävyyttä, joiden ansiosta kuitusavea voidaan hyödyntää esimerkiksi kaatopaikkojen tiivistyskerroksissa joko sellaisenaan tai seostettuna muihin runkoaineisiin. Kuitusavea on hyödynnetty esimerkiksi maisemoinnissa ja teidenrakentamisessa. (Mäkelä ja Höynälä 2000, Finncao Oy 2001)

#### 4.1.2 Tuhkat

Tuhkat ovat energiapolttoprosessien palamatonta ainetta, joiden kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet sekä muodostuvat määrät riippuvat käytettävästä polttoprosessista ja polttoaineesta. Myös polttoparametreilla, kuten lämpötilalla, ilman syötöllä ja palamisnopeudella on vaikutusta muodostuvan tuhkan laatuun. (Korpijärvi et al. 2009) Suomessa tuhkaa muodostuu vuosittain noin 1,5 miljoona tonnia, josta osaa voidaan hyödyntää esimerkiksi tie-, katu- ja kenttärakenteissa joko sellaisenaan, sideaineena, seostettuna toiseen sivutuotteeseen tai tiivistettynä.

Muodostuneet tuhkat luokitellaan niiden keräyspaikan ja polttoainekoostumuksen mukaan. Tuhkien luokittelu on esitetty taulukossa 4. (Kiviniemi et al. 2012)

Taulukko 4. Tuhkien luokittelu Suomessa (Kiviniemi et al. 2012).

<i>Luokitus</i>	<i>Nimike</i>	<i>Määritelmä</i>
Keräyspaikan mukaan	Pohjatuhka	Kattilan pohjalle kerääntyvä tai poistettava liejupetimateriaalin mukana poistuva tuhka

Polttoaine koostumuksen mukaan	Lentotuhka	Savukaasuista erotettava tuhka
	Kivihiilen poltto	Kivihiilen polton lentotuhka
	Seospoltto	Tavanomaisten polttoaineiden seospoltto
	Rinnakkaispoltto	Jätteiden ja tavanomaisten polttoaineiden rinnakkaispoltto

Taulukon 4 lisäksi tuhkat voidaan luokitella polttoainekoostumuksien mukaan CEN/TC 154/GW12-standardilla (Eurooppalainen toissijaisten kiviainesten standardi). Taulukossa 5 on standardin mukaiset määritelmät tuhkien luokitteluun.

Taulukko 5. CEN/TC 154/GW 12 – standardin mukaiset luokitukset.

<i>Lähde</i>	<i>Tunnus</i>	<i>Määritelmä</i>
B Yhdyskuntajätteenpoltto	B1	Yhdyskuntajätteenpolton pohjatuhka
	B2	Yhdyskuntajätteenpolton lentotuhka
	C1	Kivihiilen pölypolton lentotuhka
	C2	Kivihiilen leijupetipolton lentotuhka
	C3	Kivihiilen kattilakuona
C Kivihiilen poltto	C4	Kivihiilen arinapolton pohjatuhka
	C5	Kivihiilen leijupetipolton lentotuhka
	I1	Paperilietteenpolton tuhka
I Muut	I2	Vedenkäsittelyjätteenpolton tuhka
	I3	Biomassatuhka

Energiateollisuuden (2016) tietojen mukaan, Suomessa kivihiilen poltosta muodostuu lentotuhkaa yli 300 000 tonnia ja pohjatuhkaa noin 50 000 tonnia vuodessa. Kivihiilen poltossa muodostuvan tuhkan määrä on laskussa, sillä kivihiilen kulutus on vähentynyt ja vähenee tulevaisuudessa entisestään. Kivihiilen kulutus on ollut vuonna 2015 poikkeuksellisen alhainen. Tilastokeskuksen (2016) mukaan kivihiilen kulutus on laskenut vuonna 2015 26 % vuoteen 2014 verrattuna ja 45 % 2000-luvun keskiarvoon verrattuna. Yksi syy kulutuksen laskuun on sen kannattavuuden heikkeneminen.

Kivihiilen poltosta muodostuva lentotuhka on hienojakoista, neulasmaisista kiteistä ja pallomaisista hiukkasista koostuvaa materiaalia. Väriltään tuhka on tyypillisesti harmaata (Kuva 6). Väriin vaikuttaa tuhkan hiilipitoisuus. Korkea hiilipitoisuus ilmenee tuhkan tummuudessa, mitä korkeampi hiilipitoisuus sitä tummempi tuhka. Lentotuhkan raekoko vaihtelee 2 – 200 µm välillä, pohjatuhkan 1,5 – 5 mm. Pohjatuhka on



huomattavasti lentotuhkaa karkeampaa ja väriltään ruskean harmaata. Kivihiilen poltosta muodostuvaa lentotuhkaa voidaan hyödyntää esimerkiksi sementin valmistuksessa ja maarakentamisessa. Hyödyntämisen käyttöaste on arviolta 60 – 80 %. (Korpijärvi et al. 2008, Finergy 2000, Mäkelä ja Höynälä 2000)



Kuva 6. Kivihiilen poltossa muodostuvaa lentotuhkaa (Ramboll 2015).

Suomessa puun ja turpeen poltossa muodostui vuonna 2014 tuhkaa noin 500 000 tonnia (Pohjala M. 2015). Muodostuva tuhka on kivihiilen poltossa muodostuvaa lentotuhkaa karkeampaa ja raekooltaan seostuhka muistuttaa hienoa hiekkaa ja silttiä. Väriltään tuhkat vaihtelevat ruskeanpunaisesta harmaaseen (Kuva 7). Puun ja turpeen poltossa muodostuvaa tuhkaa hyödynnetään muun muassa teiden rakenteissa ja metsien lannoituksissa. (Korpijärvi et al. 2012 ja Finergy 2000, Mäkelä & Höynälä 2000)



Kuva 7. Puun ja turpeen poltossa muodostunutta kostutettua siilotuhkaa (vasen) ja kuivaa tuhkaa (Ramboll 2014).

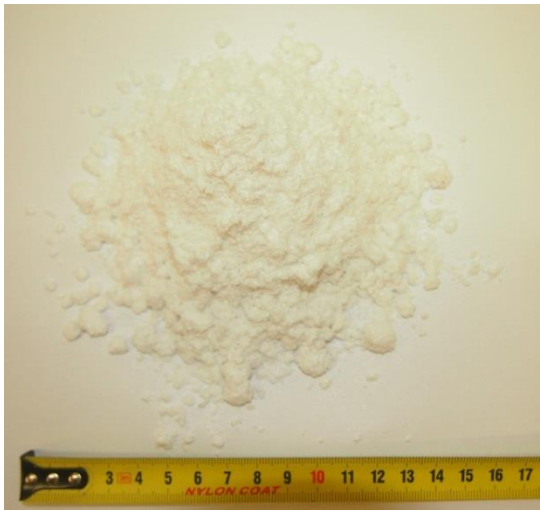
Tuhkien geotekniset ominaisuudet kuten; rakeisuus, tiheys, vedenläpäisevyys, routivuus ja optimivesipitoisuus vaikuttavat niiden käyttäytymiseen. Näin ollen materiaalit tulee tutkia ennen hyötykäyttöä, jotta sen käyttäytymistä ja soveltuvuutta eri osa-alueissa

voidaan arvioida. Tuhkien hyötykäyttöön ja laatuun vaikuttavat oleellisesti myös tuhkien väliavarastointi.

#### 4.1.3 Kipsi

Rambollin (2008) tekemän selvityksen mukaa Suomen kemianteollisuudessa syntyy vuodessa arviolta 1,8 miljoonaa tonnia prosessikipsiä. Kipsimäistä sivutuotetta muodostuu esimerkiksi Yara Suomi Oy:n fosforihapon tuotannossa, jossa trikalsiumfosfaatti reagoi rikkihapon kanssa muodostaen fosforihappoa ja fosfokipsiä (Kuva 8). Kipsi erotetaan fosforihaposta pesun ja suodatuksen avulla.

Fosforikipsi on rakeisuudeltaan noin 0,5 – 1,0 mm. Kipsin maksimikuivatiheys vaihtelee 1470- 1670 kg/m<sup>3</sup> välillä ja vedenläpäisevyys 10<sup>-3</sup> – 10<sup>-4</sup> m/s. Vaikka kipsin vedenläpäisevyys on korkea, on sillä usein vedenläpäisevyyttä pienentävä vaikutus seoskomponenttina käytettäessä. Tämä voidaan havaita esimerkiksi luvussa 5.1 käytyjen laboratoriotulosten tarkasteluista. Kipsiä voidaan hyödyntää sideaineena, seostettuna runkoaineisiin, kuten stabilisoinnissa. Lisäksi kipsiä voidaan hyödyntää maataloudessa sekä rakennustuoteteollisuudessa. (Ramboll 2012)



Kuva 8. Fosforihapon tuotannossa syntyvää fosfokipsiä.

#### 4.1.4 Valimohiekka ja -pöly

Valimohiekka ja -pöly ovat valimoiden suurimmat jätelajikkeet. Suomen valimoissa käytetään yleisimmin valuhiekkana kvartsihiekkää, jota kierrätetään prosessissa useita kertoja. Raekoon pienennettyä liian pieneksi, valimohiekka poistetaan prosessista,

jonka jälkeen hiekka on ylijäämähiekkää. Suomessa ylijäämähiekkää syntyy valimokohtaisesti noin 500 – 10 000 tonnia vuodessa, pölyä 20 – 1000 tonnia. Osa ylijäämähiekkasta on niin sanottua tuorehiekkää, joka sisältää bentoniittia. Tämän vuoksi tuorehiekoilla on yleisesti pieni vedenläpäisevyys. Valimohiekkoina on hyödynnetty muun muassa kaatopaikkarakenteissa. Lisäksi hiekkaa ja pölyä on hyödynnetty ja testattu piha-alueiden täyttämässä ja betonin, asfaltin ja sementin valmistuksessa.

## 4.2 Materiaalien saatavuus, varastointi ja rakennettavuus

Uusiomateriaalien hyödyntämiseen vaikuttaa teknisten ominaisuuksien ja ympäristökelpoisuuksien lisäksi materiaalien saatavuus, varastointi, rakennettavuus ja käsittely. Taulukkoon 6 on kerätty uusiomateriaalien saatavuuteen, varastointiin ja rakennettavuuteen liittyviä hyötyjä ja haittoja.

Taulukko 6. Uusiomateriaalien rakennettavuus, varastointi ja saatavuus.

<b>Materiaali</b>	<b>Rakennettavuus ja käsittely</b>	<b>Varastointi</b>	<b>Saatavuus</b>
Lentotuhka (LT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- helposti pölyävä</li> <li>- keveä</li> <li>- vesipitoisuus oleellinen rakennettavuuden kannalta</li> <li>- lujittuva</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kuivana varastointi haastavaa</li> <li>- varastointi vaikuttaa ominaisuuksiin</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vaihtelee vuodenaikojen mukaan</li> <li>- kasavarastoidun tuhkan saatavuus kuivatuhkaa parempi</li> </ul>
Pohjatuhka (PT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- käsittely helpohkoa</li> <li>- kuivana pölyävä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- varastointi lentotuhkaa helpompaa</li> <li>- varastointi kostutettuna</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vaihtelee vuodenaikojen mukaan</li> </ul>
Kipsi	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sekoittaminen voi olla haastavaa/työlästä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kasavarastointi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- saatavuus hyvä</li> </ul>
Valimohiekka	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ei pölyä</li> <li>- helppo käsitellä</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ei varastointia, kuljetukset tuotannon tahdissa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- haasteina saatavuus ja pitkät välimatkat</li> </ul>
Kuitusavi (KS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ei pölyä</li> <li>- keveä</li> <li>- joustava/kimmoisa</li> <li>- vesipitoisuuden alentaminen vaikeaa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- varastointi helppoa (kasavarastointi)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- saatavuus epävarma suurille massamäärille</li> </ul>

Lento- ja pohjatuhkien saatavuudet vaihtelevat runsaasti vuodenaikojen mukaan. Talvella tuhkaa muodostuu keskimääräistä enemmän, koska talvella energiantuotanto on suurempaa alhaisen lämpötilan vuoksi. Tämä tulee ottaa huomioon tuhkan hyötykäytössä, sillä tuhkan muodostuminen ja maarakentaminen tapahtuvat usein eri vuodenaikoina. Saatavuuden lisäksi tuhkien varastoinnilla on suuri merkitys tuhkien

laatuun. Lentotuhkan varastointi vaikuttaa merkittävästi sen teknisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Lentotuhkan ominaisuudet ovat parhaimmat, kun lentotuhka on tuoretta ja kuivaa. Kuivassa lentotuhkassa sen ominaisuudet, reaktiivisuus ja homogeenisuus voivat säilyä jopa vuosia. Tuhkan kuivavarastointi on kuitenkin haastavaa sen pölyävyyden, käsiteltävyyden ja kuljetuksen vuoksi. Kuivan lentotuhkan varastointi tarvitsee suuret varastointitilat, jotka ovat usein rajalliset. Tämän vuoksi tuoreen ja kuivan lentotuhkan saatavuus on kasavarastoitua lentotuhkaa huonommat. Pohjatuhkan varastoinnilla ei ole suurta vaikutusta sen ominaisuuksiin, joten sen varastointi on lentotuhkaa helpompaa. Tuhkien käsiteltävyyteen ja rakennettavuuteen vaikuttavat suuresti käsiteltävän tuhkan vesipitoisuus. Alhaisen vesipitoisuuden omaavan tuhkan käsittely aiheuttaa helposti pölyämistä ja liian korkea vesipitoisuus liettymistä. Vesipitoisuus vaikuttaa myös materiaalin tiivistämiseen ja saavutettuun tiiveysasteeseen. Tuhkat tiivistyvät parhaiten niiden optimivesipitoisuudessa, joka on lentotuhkilla noin 20 – 50 % ja pohjatuhkilla 16 – 24 %. (Kiviniemi et al. 2012)

Kipsin saatavuus ja varastointitavat mahdollistavat kipsin hyötykäytön maarakentamisessa. Kipsiä hyödynnettäessä tulee kuitenkin kiinnittää huomiota sekoitustyöhön ja kipsin työstettävyyteen. Kosteaa kipsiä voi esimerkiksi tarttua sekoitusastian reunoille ja paakkuuntua.

Kuitusaven tiivistämisessä vesipitoisuudella on suuri merkitys saavutettuun tiiveyteen. Kuitusaven vesipitoisuus rakentamisvaiheessa on yleensä materiaalin optimivesipitoisuutta suurempi, jolloin tiivistämisellä ei saavuteta Proctor-kokeella määritettyä maksimikuivairtoteheyttä. Kuitusaven vesipitoisuuden laskeminen optimivesipitoisuuteen ei kuitenkaan käytännössä ole mahdollista. Lisäksi tiivistämisessä tulee huomioida Proctor-kokeen aikana tapahtuneet rakenteelliset muutokset, jolloin Proctor-kokeen maksimikuivairtoteheys on kenttäolosuhteissa saatua tiheyttä suurempi. (Finnca 2001) Lisäksi kuitusaven saatavuus yhdeltä ja samalta tuottajalta voi olla haastavaa suurille massamäärille.

Valimohiekan hyödyntämisestä haastavaa tekee sen saatavuus ja pitkät välimatkat. Materiaalien saatavuus tulisi olla taattua, sillä pintarakenteisiin käytettävät materiaalmäärät ovat suuret. Materiaali ei saa loppua kesken. Lisäksi pitkät välimatkat lisäävät kuljetuskustannuksia suurille massamäärille. Hyödynnettävän materiaalin syntypaikka tulisi olla mahdollisimman lähellä sen hyödyntämiskohdetta.

### 4.3 Tekniset ominaisuudet

Uusiomateriaalien tekniset ominaisuudet kuten vedenläpäisevyys, puristuslujuus, muodonmuutoskestävyys ja tiivistyminen vaikuttavat materiaalien käyttäytymiseen ja niiden hyödyntämiseen pintarakenteissa. Materiaalien ominaisuudet on huomioitava muun muassa rakennetyyppejä ja kerrospaksuuksia valittaessa.

#### Vedenläpäisevyys

Materiaalin vedenläpäisevyydellä tarkoitetaan materiaalin läpi virtaavan veden määrää aikayksikössä (m/s). Materiaalien vedenläpäisevyyteen vaikuttavat materiaalin rakeisuus ja tiiviys. Materiaalien vedenläpäisevyydet vaihtelevat suuresti. Paljon hienoinesta sisältävät materiaalit ovat läpäisevyyksiltään heikommin vettäläpäiseviä. Esimerkiksi soran vedenläpäisevyys on noin  $10^{-3}$  m/s ja saven  $10^{-10}$  m/s. Taulukossa 7 on eri kivennäismaalajien vedenläpäisevyysarvoja. (Rantamäki et al. 2004)

Taulukko 7. Kivennäismaalajien vedenläpäisevyysarvoja (Rantamäki et al. 2004).

<i><b>Maalaji</b></i>	<i><b>Vedenläpäisevyys <math>k</math> [m/s]</b></i>	<i><b>Läpäisevyyden suuruusluokka</b></i>
Sora	$10^{-2} \dots 10^{-4}$	Hyvin vettäläpäisevä
Hiekka	$10^{-4} \dots 10^{-6}$	Hyvin vettäläpäisevä
Siltti	$10^{-5} \dots 10^{-9}$	Huonosti vettäläpäisevä
Savi	$10^{-8} \dots 10^{-10}$	Lähes vettäläpäisemätön

#### Lujuus ja muodonmuutosominaisuudet

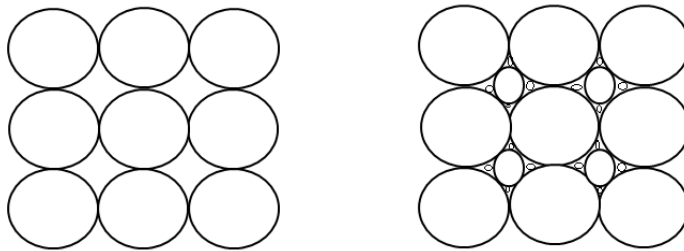
Puristuslujuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä sietää jännitystä. Materiaalien puristuslujuus voidaan määrittää yksiaksiaalisella puristuskokeella, jossa sylinterinmuotoista näytettä puristetaan tasaisesti pystysuunnassa. Kokeen aikana pystysuuntainen kuormitus ja jännitys kasvavat. Jännityksen kasvaessa riittävästi kappale murtuu, jolloin materiaali saavuttaa suurimman puristuslujuuden. Jos kappale ei murru, materiaalin puristuslujuutena voidaan pitää puristuslujuutta, jossa kappaleen kokoonpuristuma on 10 %. (Rantamäki et al. 2004)

Suuri puristuslujuus ei kuitenkaan takaa aina hyvää muodonmuutoskestävyyttä. Lujaa materiaalia on usein kova ja hauras, jolloin se murtuu suhteellisen pienellä muodonmuutostasolla. Materiaalien kykyä vastustaa muodonmuutosta kuvataan materiaalin kimmomoduulilla. Kimmomoduuli ( $E_{50}$ -moduuli) määritetään

puristuskokeesta saadun muodonmuutos-jännityskuvaajan avulla, jossa kimmomoduuli on materiaalin 50 % puristuslujuutta ja sitä vastaavan muodonmuutoksen suhde eli suoran kulmakerroin. Mitä suurempi materiaalin kimmomoduuli, sitä jäykempi materiaali. (Kiviniemi et al. 2012)

### Tiiviys ja tiivistäminen

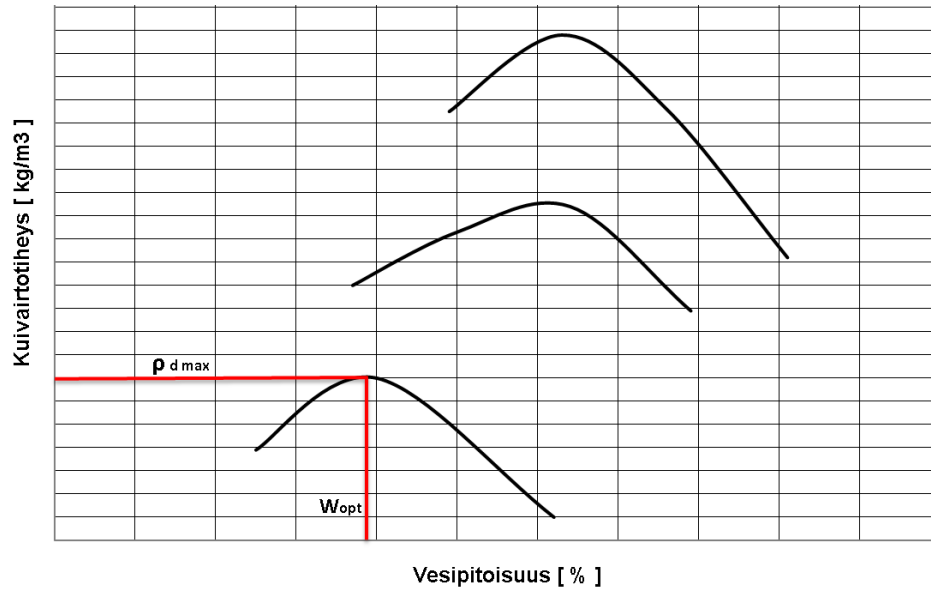
Materiaalien tiiveydellä on tärkeä rooli maarakentamisessa, sillä sen avulla voidaan arvioida materiaalin vedenläpäisevyyttä, lujuutta ja maan kantavuusominaisuuksia. Materiaalin tiivistämiseen ja saavutettavaan tiiveyteen vaikuttavat muun muassa materiaalin rakeisuus, vesipitoisuus ja käytetty tiivistysmenetelmä. Tasarakeiset materiaalit tiivistyvät sekarakeisia materiaaleja huonommin. Tasarakeisessa materiaalissa rakeet sijoittuvat vierekkäin, jolloin rakeiden väliin jää tyhjää tilaa, jolloin materiaalin kuivairtoteiheyttä jää alhaiseksi. Sekarakeisessa materiaalissa materiaalin hienorakeiset rakeet täyttävät isompien rakeiden väliin jäävien tyhjät tilat (Kuva 9).



Kuva 9. Tasarakeisen ja sekarakeisen materiaalin tiivistäminen.

Tiivistämisen lopputulokseen vaikuttaa myös tiivistettävän materiaalin vesipitoisuus. Eri vesipitoisuuksissa materiaalin rakeet sulloutuvat eri tiheyteen, vaikka materiaalin tiivistämisessä käytettävä työmäärä olisikin sama. Paras tiivistystulos saavutetaan materiaalin optimivesipitoisuudessa eli vesipitoisuudessa, jossa materiaalin kuivairtoteiheyttä on suurin. Materiaalin optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtoteiheyttä voidaan määrittää Proctor- kokeella, jossa materiaali tiivistetään sylinterimuotoiseen muottiin viidessä eri kerroksessa. Materiaalin optimivesipitoisuuden ja maksimikuivairtoteiheyden määrittämiseksi Proctor- koe joudutaan tekemään samalla materiaalilla useamman kerran eri vesipitoisuudessa. (Rantamäki et al. 2004) Proctor-

kokeiden tuloksista laaditaan kuvan 10 mukaiset kuvaajat, jotka kuvaavat kuivairtitiheyden riippuvuutta tiivistettävän materiaalin vesipitoisuudesta.



Kuva 10. Optimivesipitoisuuden ja maksimikuivairtitiheyden määrittäminen Proctor-kokeella.

## 5 UUSIOMATERIAALIEN OMINAISUUDET

Tässä luvussa käsitellään UPAMIC- hankkeessa tutkittavien uusiomateriaalien ja runkomateriaalien teknisiä ominaisuuksia, ympäristökelpoisuuksia sekä uusiomateriaalien vaikutuksia runkomateriaalien ominaisuuksiin. Kappaleessa esitetyt tutkimustulokset on kerätty Ramboll Finland Oy:n tekemistä laboratoriotutkimuksista, jotka on tehty Luopioisten T&K- laboratoriossa vuoden 2014 aikana. Näytteiden analysointi on tehty Ahma ympäristö Oy:n laboratoriossa.

Laboratoriotutkimuksissa käytetyt materiaalit ovat olleet; Hituran ja Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekat ja moreenit, lentotuhka (LT), kasatuhka (KT), valimohiekka, kipsi ja kuitusavi (KS). Tutkimuksissa käytettyjen uusiomateriaalien toimittajia ovat olleet; Alholmens Kraft Ab, Componenta Oy, Kanteleen Voima Oy, Laanilan Voima Oy, Metsä Group, Oulun Energia Oy, Stora Enso Oyj, SCA Tissue Finland Oy ja Yara Suomi Oy. Materiaalien kaikki laboratoriotulokset on esitetty anonymisti.

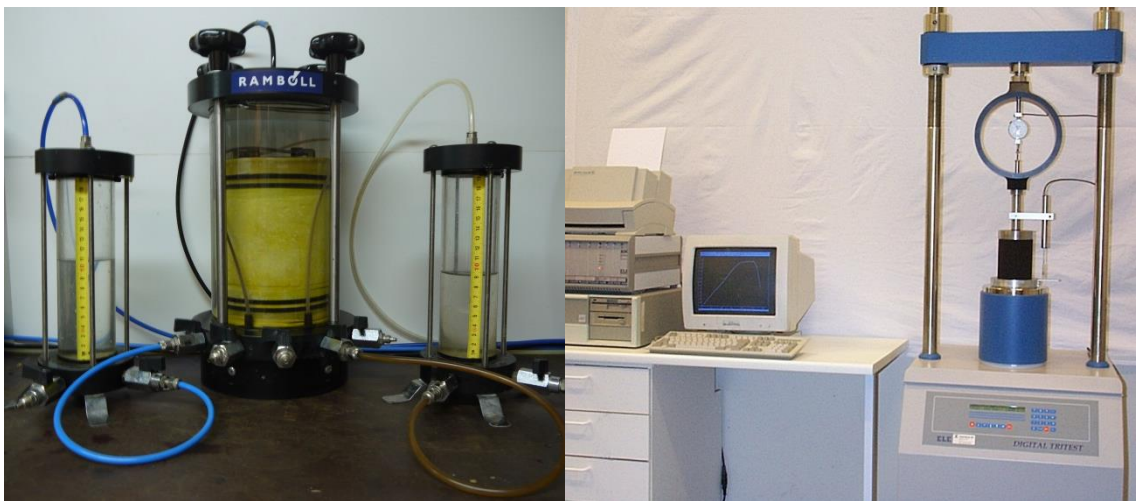
### 5.1 Tekniset ominaisuudet

Uusiomateriaalien hyötykäyttö suojarakenteissa edellyttää materiaaleilta tiettyjä teknisiä ominaisuuksia kuten, tavoiteltavaa vedenläpäisevyyttä, lujuutta, rasiskestävyyttä sekä käsiteltävyys- että tiivistettävyysominaisuuksia. Tehdyissä laboratoriokeissa ei ole kuitenkaan tavoiteltu tiettyä vedenläpäisevyyttä, sillä rikastushiekka-altaiden peiterakenteille ei ole määritetty noudatettavia vedenläpäisevyysarvoja kuten esimerkiksi kaatopaikkarakenteille. Teknisten laboratoriokeiden tarkoituksena on ollut kerätä tietoa siitä, millaisia vedenläpäisevyyksiä ja puristuslujuuksia erilaisilla materiaaliratkaisuilla saadaan. Vedenläpäisevyytavoite on kuitenkin asetettu  $10^{-7} - 10^{-10}$  m/s tasolle, jotta pintarakenne toimisi tarkoituksen mukaisesti.

Materiaalien läpäisevyyksiä on tutkittu standardin SFS 179-2-CEN/TS 17892-11:fi mukaisesti pehmeäseinäisellä testilaitteistolla (Kuva 11). Puristuslujuuden määrittämisessä on käytetty mukailtua SFS 179-2-CEN/TS 17892-7:fi standardia, jossa puristuslujuuskokeet on määritetty vedenläpäisevyyskokeiden kappaleista 3 – 4 viikon kuluttua kappaleiden valmistuksesta. Puristuslujuuksien määrittämisessä on käytetty 1- aksiaalista puristuslaitteistoa, jossa kuormitus on ollut 1mm/min (Kuva 11). Laboratoriokeissa käytetyt koekappaleet on valmistettu tiivistämällä materiaali



arvioidussa vesipitoisuudessa, joka on määritetty modifioidulla Proctor-kokeilla. Mahdollisimman pienen läpäisevyyden saavuttamiseksi tiivistettävän materiaalin vesipitoisuutta on korotettu 1 %-yksiköllä tiivistyskokeiden avulla arvioidulla optimivesipitoisuudella. Tiivistyskokeilla on pyritty löytämään eri materiaalien tiivistämisen kannalta optimaalinen vesipitoisuusalue ja samalla saamaan tietoa toteutuvista tiheystasoista ja materiaalien käsiteltävyydestä. Käytetyt vesipitoisuudet ja tiheydet laboratoriotulosten liitteissä.



Kuva 11. Vedenläpäisevyyden ja puristuslujuuden määrittäminen laboratoriossa (Ramboll).

Runko- ja uusiomateriaalien rakeisuudet on määritetty standardin SFS 197-2-CEN ISO/TS 17892-4:fi mukaisesti. Laboratoriotutkimustulosten perusteella rikastushiekat vastaavat rakeisuudeltaan silttistä hiekkaa (siHk), lento- ja kasatuhkat silttiä (Si) / hiekaista silttiä (hkSi) ja valimohiekka hiekkaa (Hk). Käytettyjen materiaalien rakeisuuskäyrät ovat liitteessä 1.

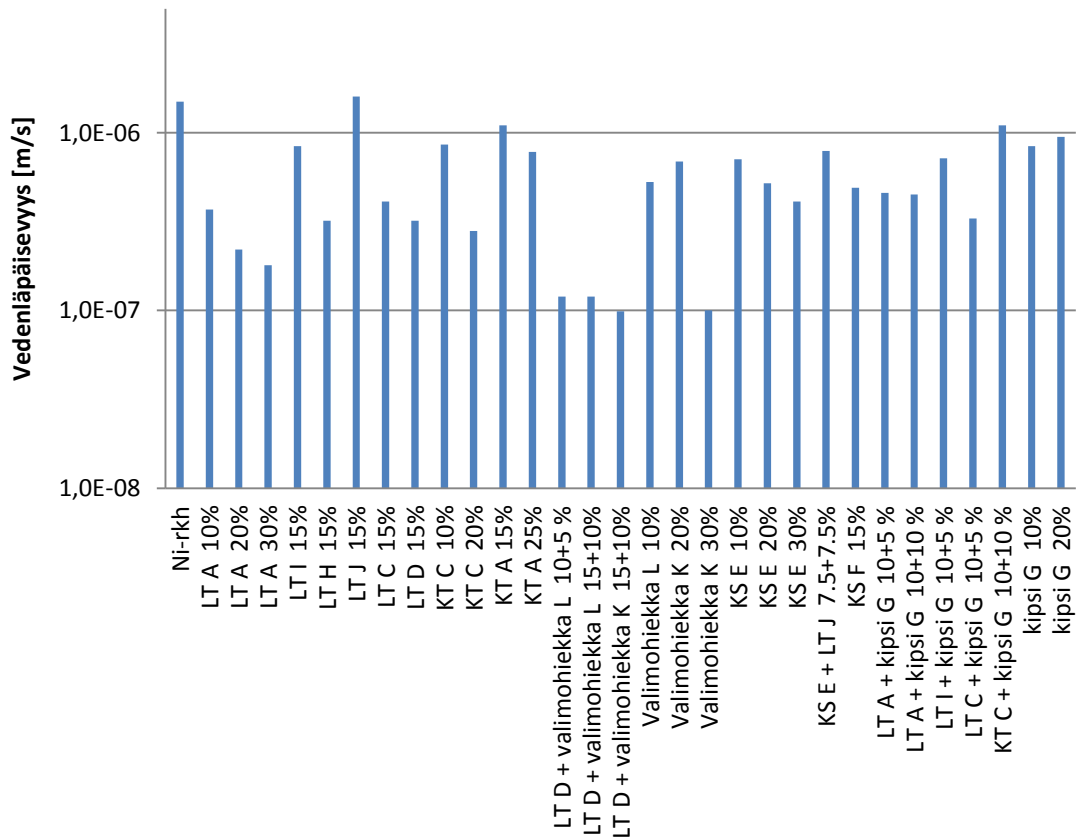
Tekniset laboratorioskokeet on tehty kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa tarkoituksena on ollut selvittää potentiaaliset uusiomateriaalivaihtoehdot runkomateriaalien jalostamiseen ja toisessa vaiheessa tarkastella uusiomateriaalien laadun vaikutuksia teknisiin ominaisuuksiin ja saavutettaviin etuihin. Tekniset laboratorioskokeet on tehty sekä Hituran että Pyhäsalmen runkomateriaaleille. Lisäksi tekniset laboratorioskokeet on suoritettu erilaisille uusiomateriaaliseoksille.

### **5.1.1 Hituran kaivoksen materiaalit**

Hituran kaivoksen runkomateriaalien ja uusiomateriaalien teknisiä ominaisuuksia on tutkittu käyttämällä runkoaineina kaivoksen nikkelirikastushiekkaa ja moreenia.

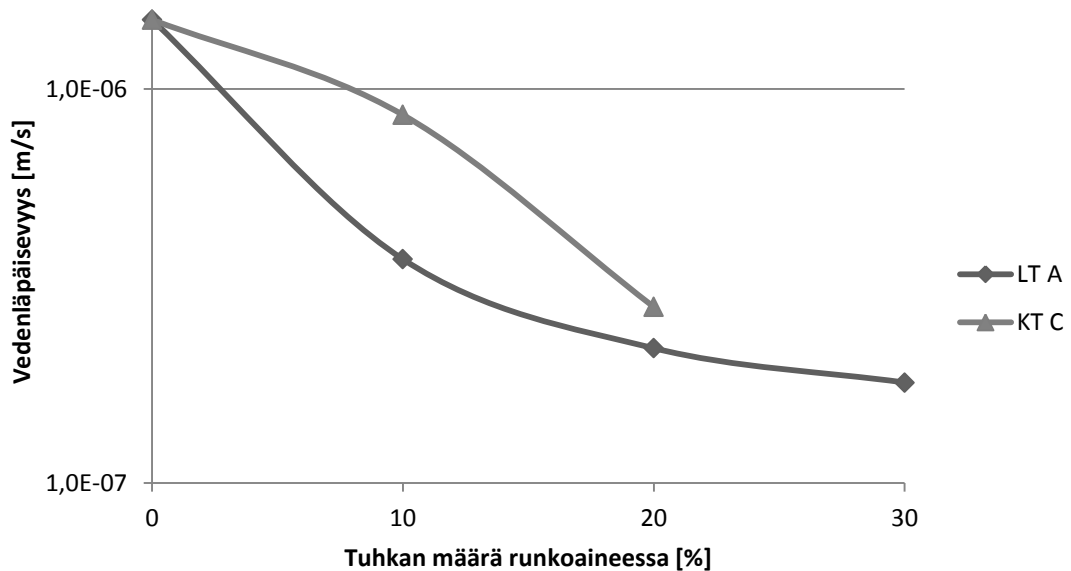
#### **Nikkelirikastushiekka runkoaineena**

Teollisuudessa muodostuvien uusiomateriaalien vaikutuksia nikkelirikastushiekan vedenläpäisevyyksiin on tutkittu tekemällä vedenläpäisykokeita ensiksi pelkälle nikkelirikastushiekalle ja tämän jälkeen uusiomateriaaleilla jalostetuille rikastushiekoille. Läpäisevyyskokeista saatuja tuloksia vertaamalla rikastushiekan alkuperäiseen vedenläpäisevyyteen, voidaan tehdä päätelmiä uusiomateriaalien vaikutuksista nikkelirikastushiekan läpäisevyyteen. Kuvaan 12 ja liitteeseen 2 on koottuna vedenläpäisykokeista saatuja tuloksia. Kuvassa uusiomateriaaleista on käytetty seuraavanlaisia lyhenteitä; lentotuhka (LT), kasatuhka (KT) ja kuitusavi (KS). Materiaalin jälkeinen kirjain kuvaa materiaalin tuottajaa.



Kuva 12. Uusiomateriaalien vaikutukset nikkeliirikastushiekan vedenläpäisevyyteen.

Laboratoriotulosten perusteella nikkeliirikastushiekan vedenläpäisevyys tiivistettynä on  $1,5 \cdot 10^{-6}$  m/s (Kuva 12). Tuhkan lisääminen rikastushiekkaan laskee vedenläpäisevyyttä huomattavasti lukuun ottamatta LT J 15 % seosta, jossa lentotuhkan määrä on 15 % runkomateriaalin märkämässasta. Tuhkaa käyttäessä vedenläpäisevyydet vaihtelevat  $1,6 \cdot 10^{-6} - 1,8 \cdot 10^{-7}$  m/s välillä. Pienin vedenläpäisevyys on saavutettu Ni-rkh + LT A 30 % -seoksella, jossa lentotuhkan määrä on ollut 30 % rikastushiekan märkämässasta. Tuloksista kuitenkin havaitaan, että käytetyn lentotuhkan määrän lisääntyessä saatava hyöty pienenee suhteessa käytetyn tuhkan määrään. Kuvan 13 perusteella sopiva lentotuhkan määrä on 10 – 15 % nikkeliirikastushiekan märkämässasta. Tätä suuremmilla määrillä ei saavuteta hyödynnettävissä olevia etuja.



Kuva 13. Esimerkki tuhkan määrän ja laadun vaikutuksista nikkelikastushiekan vedenläpäisevyyteen.

Vaikka laboratoriotulokset ovat esitetty anonymisti, voidaan kuvasta 12 kuitenkin havaita materiaalituottajien väliset eroavaisuudet. Esimerkiksi LT D 15 % ja LT J 15 % lisäkomponenttien väliset erot vedenläpäisevyyksissä on huomattavan suuret, vaikka käytetyn tuhkien määrät rikastushiekassa ovat samat. Laboratoriotulosten perusteella lentotuhilla LT A, LT H, LT C ja LT D saavutetaan suurimmat hyödyt, jos tavoitteena on nikkelikastushiekan vedenläpäisevyyden pienentäminen. Kasatuhkaa (KT) ja lentotuhkaa (LT) verrattaessa, vedenläpäisevyydet olivat yleisesti ottaen pienempiä lentotuhkaa käytettäessä (Kuva 12 ja 13)

Rikastushiekan jalostaminen valimohiekalla pienentää rikastushiekan vedenläpäisevyyttä edellä mainittuja tuhkia keskimääräistä heikommin. Poikkeuksena valimohiekka K 30 %, jonka vaikutuksesta rikastushiekkaseoksen vedenläpäisevyys laskee  $1,0 \cdot 10^{-7}$  m/s tasolle. Tulosten perusteilla rikastushiekan vedenläpäisevyyttä voidaan pienentää entisestään, kun rikastushiekkaan lisätään valimohiekan lisäksi myös hieman lentotuhkaa. Tällöin alhaisimmaksi vedenläpäisevyydeksi on saatu  $9,9 \cdot 10^{-8}$  m/s.

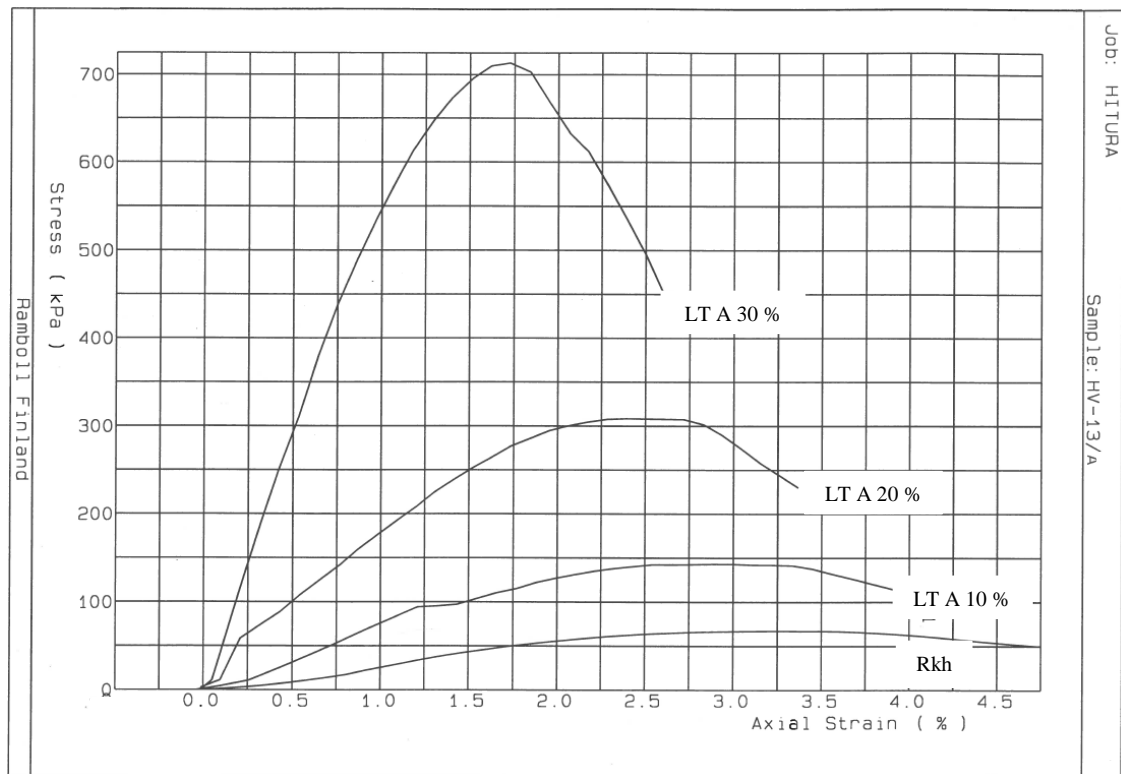
Kuitusaven (KS) vaikutus rikastushiekan vedenläpäisevyyden alentamiseen on vähäinen verrattessa tuloksia tuhalla saatuihin etuihin. Kuitusavella saadut vedenläpäisevyydet vaihtelevat  $4,1 \cdot 10^{-7}$  –  $7,1 \cdot 10^{-7}$  m/s välillä, riippuen lisätyn kuitusaven määrästä.



Suurimmat puristuslujuudet saavutetaan lentotuhkalla LT A. Lentotuhkia ja kasatuhkia verratessa, lentotuhkilla saavutetaan suurempia lujuuksia.

Valimohiekan osuus puristuslujuuksiin jää pieneksi, sillä puristuslujuudet eivät juuri kasva alkuperäisestä tilanteesta. Tulosten perusteella valimohiekan määrällä ei ole vaikutusta rikastushiekan puristuslujuuksiin. Laboratoriotesteissä koekappaleiden lujuutta saatiin kuitenkin kasvatettua lisäämällä seokseen valimohiekan lisäksi lentotuhkaa, jolloin lujuudet kasvoivat 150 – 200 kPa arvoihin. Kuitusaven merkitys puristuslujuuksiin on myös vähäinen eikä sen määrä vaikuta saatuihin arvoihin. Kaikilla kuitusaven käyttömäärillä saavutettiin sama 80 kPa puristuslujuus. Kuitusavi lisäkomponenttina lisäsi vain 10 kPa puristuslujuutta verratessa tulosta pelkkään nikkelikastushiekkaan. Myös lentotuhkan ja kuitusaven yhteisvaikutus jäi pieneksi, sillä tuhka-kuitusavi-rikastushiekka seoksella päästiin lukemaan 90 kPa, joka on vain 20 kPa suurempi rikastushiekan puristuslujuudesta. Myös kipsin vaikutus rikastushiekan puristuslujuuteen on pienehkö. Laboratoriotulosten perusteella kipsin lisääminen rikastushiekkaan nosti rikastushiekan lujuutta vain 20 kPa alkuperäisestä tilanteesta. Puristuslujuus kuitenkin kasvaa, kun rikastushiekkaan lisätään kipsin lisäksi myös lentotuhkaa. Lentotuhkan lisäämisellä päästiin jopa 220 kPa lukemiin.

Lentotuhkilla saavutettu korkea puristuslujuus ei kuitenkaan takaa aina materiaalin hyvää kantavuutta. Materiaalien hyödyntämisessä tulee huomioida myös materiaalien muodonmuutoskestävyydet ja rasituskestävyys / pitkäaikaiskestävyys. Kuva 15 havainnollistaa lentotuhkan määrän vaikutusta kappaleen saavutettavaan puristuslujuuteen ja sitä vastaavaan muodonmuutokseen.



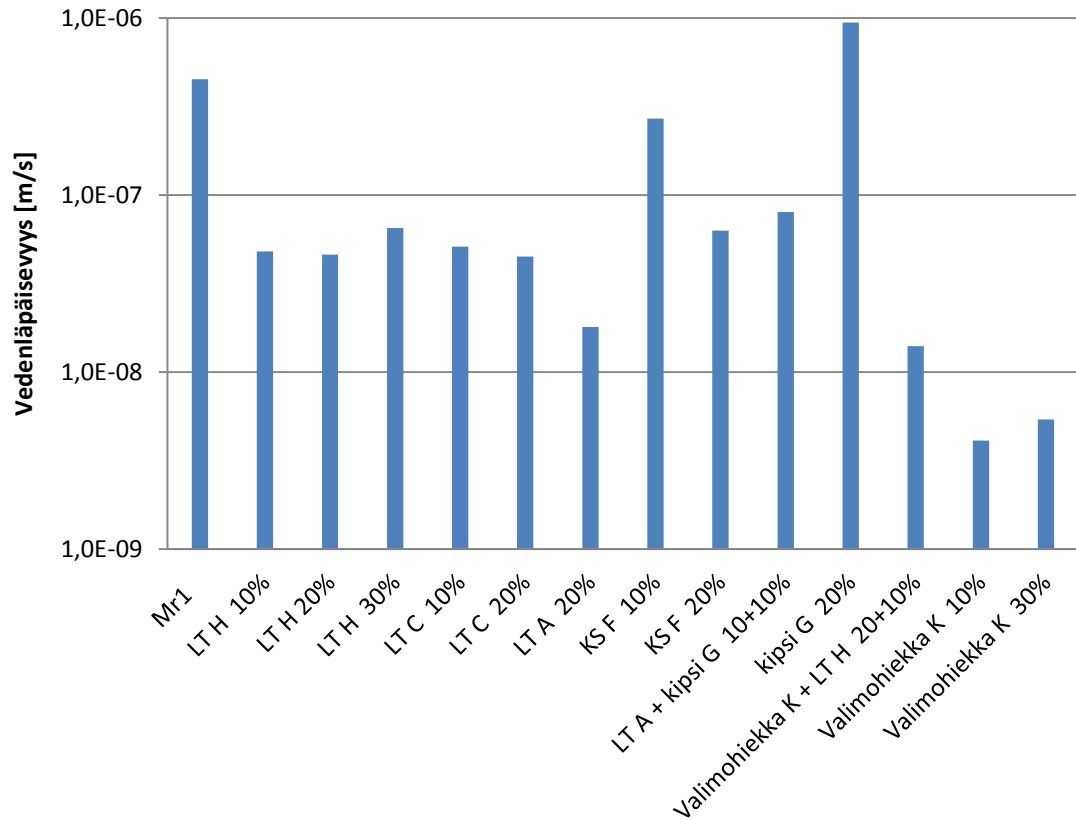
Kuva 15. Tuhkan määrän vaikutus kappaleen puristuslujuuteen ja muodonmuutokseen.

Kuvasta havaitaan, että lentotuhkan määrän kasvaessa kappaleen puristuslujuus kasvaa ja materiaalin muodonmuutos pienenee, jolloin materiaalista tulee jäykempi ja hauraampi. Esimerkiksi LT A 30 % -kappaleen muodonmuutos saavutetussa puristuslujuudessa on 1,75 %. Tämä tarkoittaa sitä, että kappale kestää vain 1,75 % kokoonpuristuman, jonka jälkeen kappale murtuu. Lentotuhkan määrän ollessa 20 % rikastushiekan märkämässasta kappale kestää noin 2,5 % kokoonpuristuman. Pelkällä rikastushiekalla ja LT A 10 % -kappaleella murtomuodonmuutos on noin 3 – 3,5 % muodonmuutokset. Kuvasta 15 havaitaankin, että lentotuhkan määrän ollessa 10 % rikastushiekan märkämässasta rikastushiekan puristuslujuus kaksinkertaistuu, mutta kappaleen muodonmuutos säilyy lähes samana.

### Moreeni runkoaineena

Hituran materiaalien laboratorikokeissa on käytetty toisena runkomateriaalina Hituran kahdenlaista moreenia, joiden vedenläpäisevyydet ovat olleet  $4,5 \cdot 10^{-7}$  m/s (Mr1) ja  $3,0 \cdot 10^{-9}$  m/s (Mr2). Jälkimmäisen moreenin vedenläpäisevyys on jo lähtötasoltaan niin pieni, ettei lisäkomponenttien lisäämisellä voida juurikaan vaikuttaa sen läpäisevyyden

pienentämiseen. Näin ollen tämänkaltaisten, suhteellisen paljon hienoaainesta sisältävien ja heikosti vettäläpäisevien moreenien jalostaminen ei ole perusteltua. Kuvassa 16 ja liitteessä 2 on koottuna moreeni 1:sen ja lisäkomponenttien tekniset laboratoriotulokset. Pienen vedenläpäisevyyden omaavan moreenin (Mr2) tuloksia ei tässä yhteydessä käsitellä tämän tarkemmin.



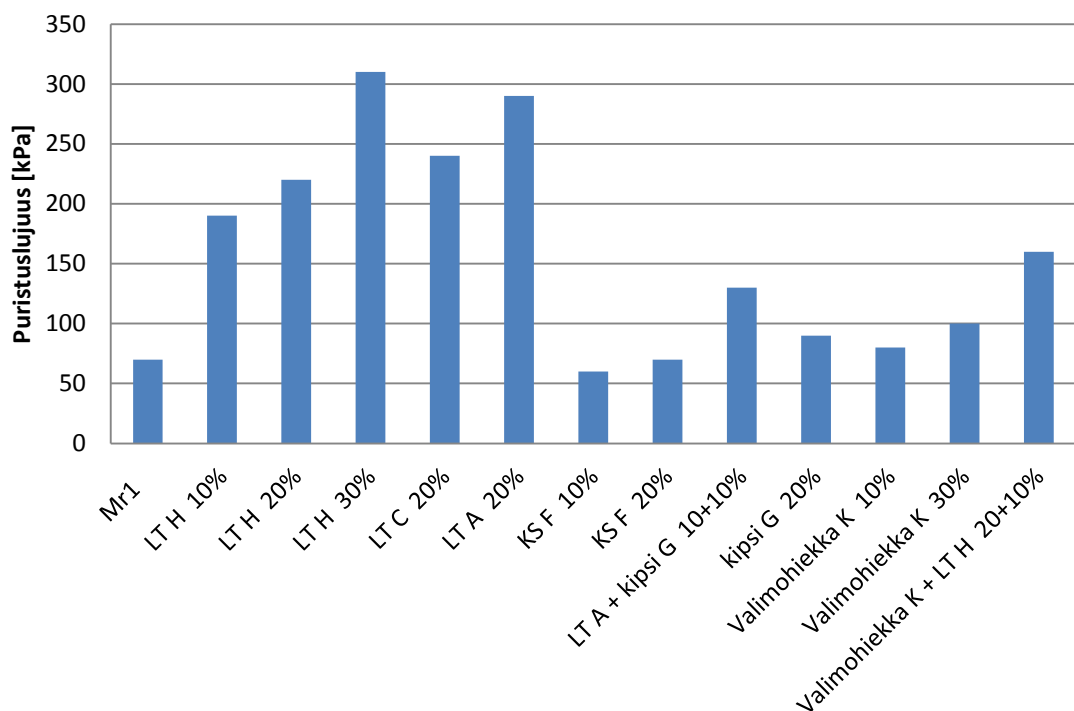
Kuva 16. Uusiomateriaalien vaikutus moreenin vedenläpäisevyyteen.

Vedenläpäisytulosten perusteella lentotuhkien käyttö suhteellisen läpäisevän moreenin lisäkomponentteina laskee moreenin vedenläpäisevyyttä parhaimmillaan arvoon  $1,8 \cdot 10^{-8}$  m/s. Tulosten perusteella käytetyn tuhkan määrän lisäämisellä ei ole suurta merkitystä saavutettavaan läpäisevyyteen, sillä vedenläpäisevyys ei pienene merkittävästi tuhkan määrän kasvaessa 10 %:sta 20 %:iin (Kuva 16). Sopiva tuhkamäärä moreenin jalostamiseen on noin 10 % moreenin märkämässasta, jolloin moreenin vedenläpäisevyys laskee noin 90 % sen alkuperäisestä läpäisevyydestä.



Kuten nikkelikastushiekkaseoksissa, myös moreeniseoksissa kuitusaven lisääminen ei ole kannattavaa, jos tavoitteena on laskea materiaalin vedenläpäisevyyttä. Kuitusavi laskee moreenin vedenläpäisevyyttä heikosti. Tutkimustulosten perusteilla myöskään kipsi ei sovellu tämänkaltaisen moreenin vedenläpäisevyyden alentamiseen, sillä tulosten perusteella moreenin jalostaminen kipsillä todellisuudessa vain kasvattaa moreenin vedenläpäisevyyttä alkuperäiseen läpäisevyyteen verrattuna. Vedenläpäisevyys kuitenkin laskee, kun moreeniin lisätään kipsin lisäksi myös lentotuhkaa. Moreenin jalostaminen kipsi-tuhkaseoksella ei ole kuitenkaan järkevää, sillä pelkällä tuhalla saadaan suurempia etuja (Kuva 16). Pienin vedenläpäisevyys on saavutettu kun moreeni on jalostettu valimohiekalla. Tällöin läpäisevyydeksi on saatu  $4,1 \cdot 10^{-9}$  m/s kun käytettävän valimohiekan määrä on ollut 10 % moreenin märkämässasta. Valimohiekan määrän kasvattaminen yli 10 %:in, ei tulosten perusteilla ole järkevää.

Uusiomateriaalien vaikutuksia moreenikappaleiden puristuslujuuksiin on tutkittu puristuskokeen avulla. Kokeista saadut tulokset on esitettyä kuvassa 17 ja liitteessä 2.



Kuva 17. Uusiomateriaalien vaikutukset moreenin puristuslujuuteen.

Moreenin puristuslujuus ilman lisäkomponenttia on 70 kPa. Moreenin jalostaminen lentotuhkalla lisää kappaleen puristuslujuutta 120 – 240 kPa, riippuen lisätyn tuhkan määrästä ja tuottajasta. Kuitusaven, kipsin ja valimohiekkojen osuudet

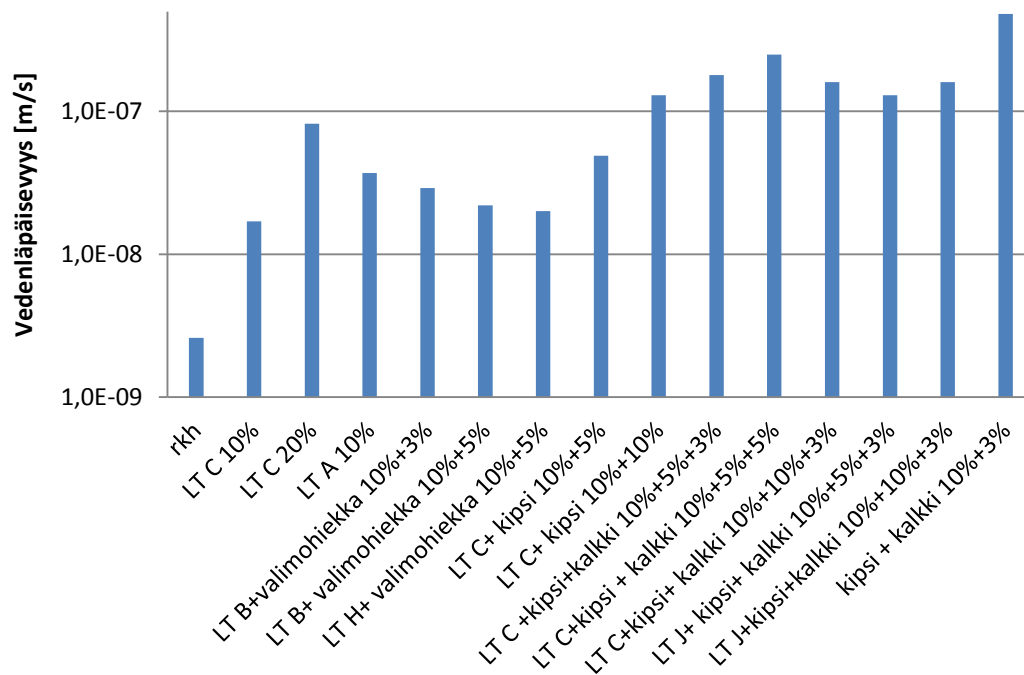
puristuslujuuksien kasvuun ovat tuhkia pienempiä. Suurin puristuslujuus saavutetaan, kun nikkelirikastushiekka jalostetaan lentotuhkalla LT H 30 %. Muut uusiomateriaalit jäivät selvästi lentotuhkaa heikommaksi.

### 5.1.2 Pyhäsalmen kaivoksen materiaalit

Keväällä 2016 aloitettavaa koerakentamista varten Pyhäsalmen kaivoksen moreenille ja rikastushiekalle on tehty tekniset laboratoriotestaukset. Laboratoriokokeisiin on valittu edellisten kokeiden perusteilla potentiaalisimmat materiaaliratkaisut, jotka mahdollisesti toimivat myös Pyhäsalmen runkomateriaaleille. Laboratoriotesteissä testataan Pyhäsalmen hienon rikastushiekan ja moreenin jalostamista tuhkalla, kipsillä ja valimohiekalla. Vedenläpäisevyyksien ja puristuslujuuksien lisäksi laboratoriotesteissä on tutkittu kahden materiaalin routivuutta ja jäätyksen merkitystä materiaalin vedenläpäisevyyteen ja puristuslujuuteen.

#### Rikastushiekka runkoaineena

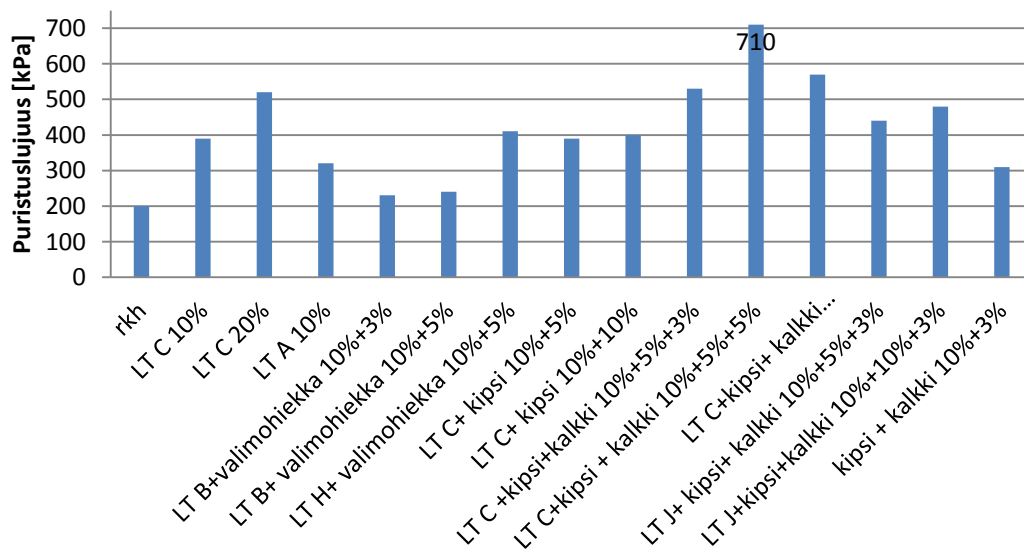
Rikastushiekan ja jalostettujen rikastushiekkojen vedenläpäisevyyskokeiden tulokset ovat esitettynä kuvassa 18 ja liitteessä 3.



Kuva 18. Rikastushiekan jalostaminen uusiomateriaaleilla ja jalostamisen vaikutus vedenläpäisevyyksiin.

Tutkimustulosten perusteella rikastushiekan vedenläpäisevyys on  $2,6 \cdot 10^{-9}$  m/s. Alhaisen vedenläpäisevyyden vuoksi, rikastushiekan jalostaminen lisäkomponenteilla ei laske rikastushiekan vedenläpäisevyyttä alkuperäisestä tilanteesta. Vedenläpäisykokeissa on saavutettu  $10^{-8}$  m/s taso hyödyntämällä lentotuhkaa ja lentotuhka-valimohiekkaseosta (Kuva 18).

Vedenläpäisykappaleista tehtyjen puristuslujuuksien tulokset ovat esitettynä kuvassa 19 ja liitteessä 3.

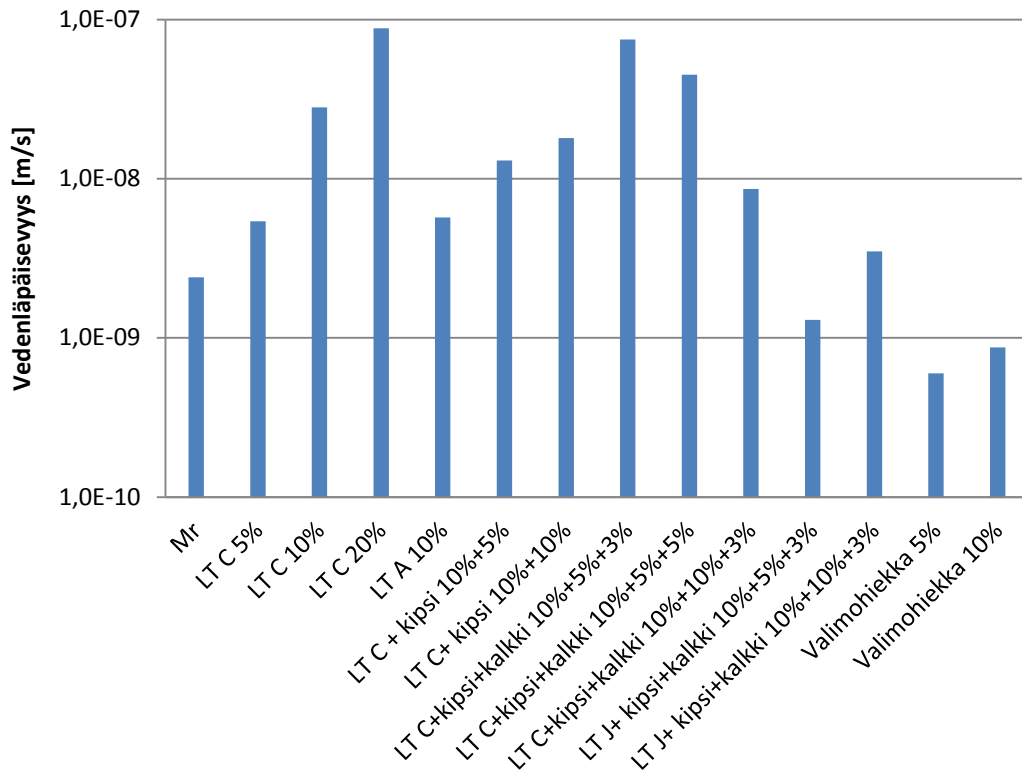


Kuva 19. Uusiomateriaalien vaikutus rikastushiekan puristuslujuuteen.

Kuvasta nähdään, että rikastushiekan puristuslujuus sellaisenaan on 200 kPa. Rikastushiekan jalostaminen tuhalla lisää rikastushiekan puristuslujuutta 120 – 320 kPa, riippuen lisätyn tuhkan määrästä ja tuhkan tuottajasta. Suurin puristuslujuus saadaan käyttämällä LT C + kipsi + kalkki lisäkomponentteja, jolloin kappaleen puristuslujuudeksi on saatu 710 kPa. Suuri puristuslujuus ei kuitenkaan tarkoita suurta muodonmuutoskestävyyttä, vaan voi tehdä rakenteesta jopa liian hauraan (Kuva 15). Tämä tulee huomioida etenkin materiaalivalintoja tehdessä.

### Moreeni runkoaineena

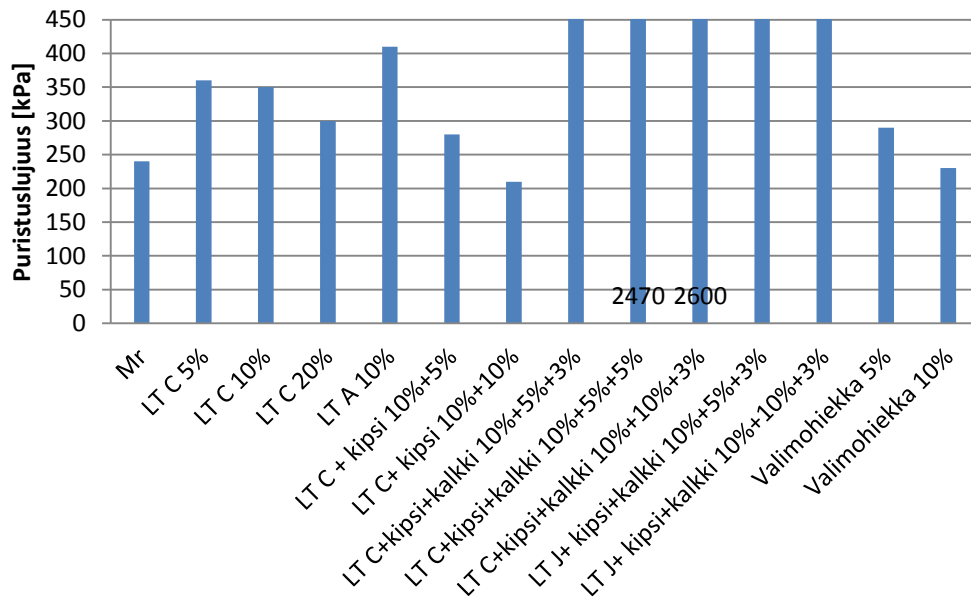
Pyhäsalmen moreeni sisältää suhteellisen paljon hienoainesta, jolloin moreenin vedenläpäisevyys on jo entuudestaan alhainen,  $2,4 \cdot 10^{-9}$  m/s. Kuvassa 20 ja liitteessä 3 moreenin vedenläpäisykokeiden tulokset.



Kuva 20. Uusiomateriaalien vaikutus moreenin vedenläpäisevyyteen.

Moreenin jalostaminen uusiomateriaaleilla kasvattavat yleisesti moreenin vedenläpäisevyyttä. Moreenin jalostaminen uusiomateriaaleilla ei tuo lisäetuja moreenin vedenläpäisevyyden laskuun lukuun ottamatta moreenin jalostamista valimohiekalla (Kuva 20). Tulosten perusteilla moreenin jalostaminen valimohiekalla laskee moreenin vedenläpäisevyyden jopa  $6 \cdot 10^{-10}$  m/s tasolle. Suuri vedenläpäisevyyden lasku voi johtua valimohiekan sisältämästä bentoniitista, jolla on kyky laskea materiaalin läpäisevyyttä.

Vedenläpäisykappaleista tehdyt puristuslujuudet on esitettyä kuvassa 21 ja liitteessä 3.



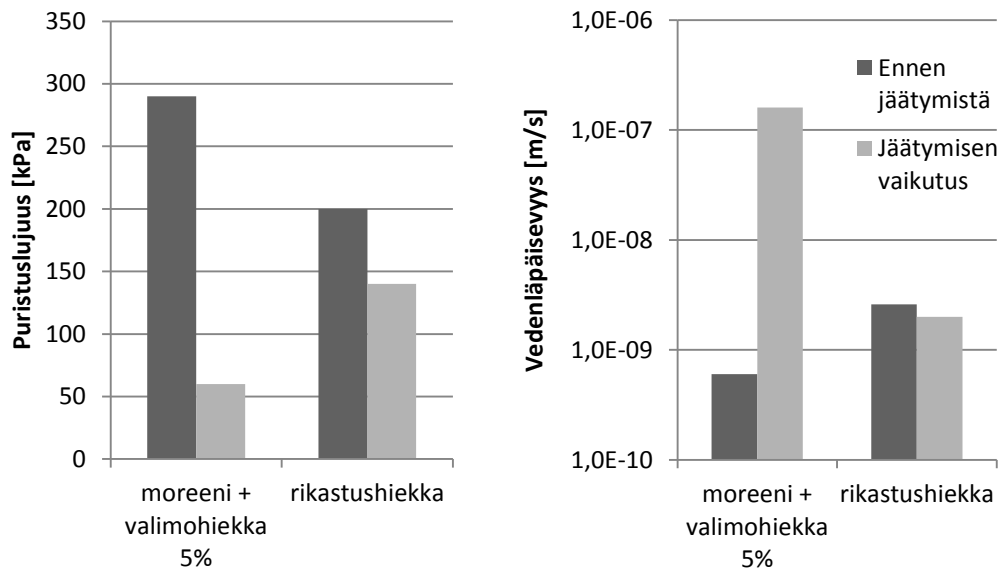
Kuva 21. Uusiomateriaalien vaikutus Pyhäsalmen moreenin puristuslujuuteen.

Tulosten perusteilla moreenin puristuslujuus sellaisenaan on 240 kPa. Moreenin jalostaminen tuhkalla lisää moreenin puristuslujuutta 60 – 170 kPa, riippuen käytetyn tuhkan määrästä ja tuottajasta. Valimohiekan vaikutukset puristuslujuuteen jäävät hieman tuhkaa pienemmiksi. Laboratoriokokeissa on päästy jopa yli 2000 kPa puristuslujuuksiin, kun moreenia on jalostettu lentotuhka-kipsi-kalkkiseoskella. Näin suuret lujuudet eivät kuitenkaan ole tavoitteellisia. Puristuslujuuden ollessa suuri, materiaalien muodonmuutoskestävyydet voivat olla kuitenkin pieniä, jolloin materiaali on jäykkä ja hauras.

### Routivuus ja jäätyminen vaikutus teknisiin ominaisuuksiin

Kahden materiaalin routivuutta on tutkittu routanousukokeella. Routanousukokeen perusteella Pyhäsalmen rikastushiekka on routimatonta ja valimohiekalla jalostettu moreeni lievästi routivaa. Testitulokset eivät kuitenkaan ole täysin yksiselitteisiä, sillä rikastushiekka sisältää veden jäätyislämpötilaan vaikuttavia komponentteja, jolloin veden jäätympiste voi poiketa normaalista jäätympisteestä. Tämä voi vääristää routanousukokeen lopputulosta, jolloin rikastushiekka ei ole käytännössä välttämättä täysin routimatonta.

Routivuuden lisäksi laboratoriossa on tutkittu jäätyksen vaikutusta materiaalien vedenläpäisevyyksiin ja puristuslujuuksiin. Kuvista 22 havaitaan, että jäätyksen vaikutuksesta moreenikappaleen puristuslujuus pienenee noin 80 % ja vedenläpäisevyys kasvaa arvosta  $6,0 \cdot 10^{-10}$  m/s arvoon  $1,6 \cdot 10^{-7}$  m/s. Routimattomalla rikastushiekalla jäätyksen vaikutukset ovat pienet. Rikastushiekan puristuslujuus pienenee 60 kPa ja kappaleen vedenläpäisevyys pysyy melkein samana.

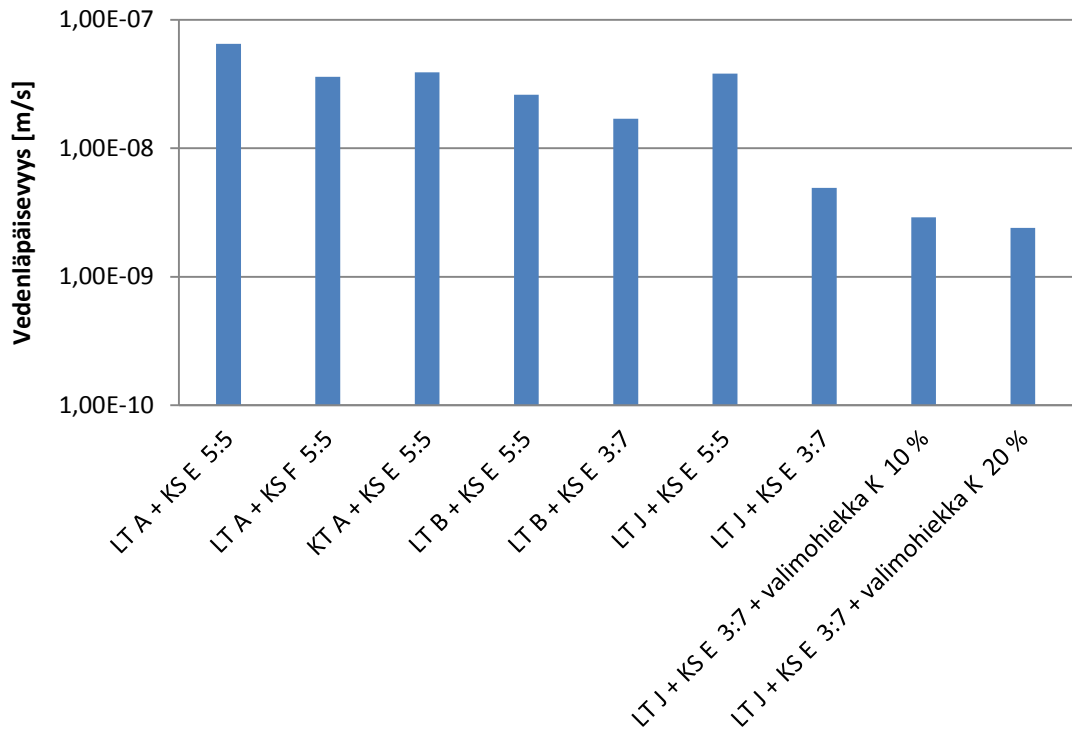


Kuva 22. Jäätyksen vaikutus materiaalien puristuslujuuteen ja vedenläpäisevyyteen.

### 5.1.3 Uusiomateriaaliseokset

Tässä luvussa tutkitaan uusiomateriaalien käyttöä pintarakenteissa sellaisenaan tai toiseen uusiomateriaaliin sekoitettuna. Uusiomateriaalien käyttäminen sellaisenaan on kuitenkin perusteltava riittävän hyvin. Muun muassa saatavuus, varastointi ja kuljetukset tulee huomioida materiaalivalinnoissa, sillä materiaalmäärät ovat todella suuria.

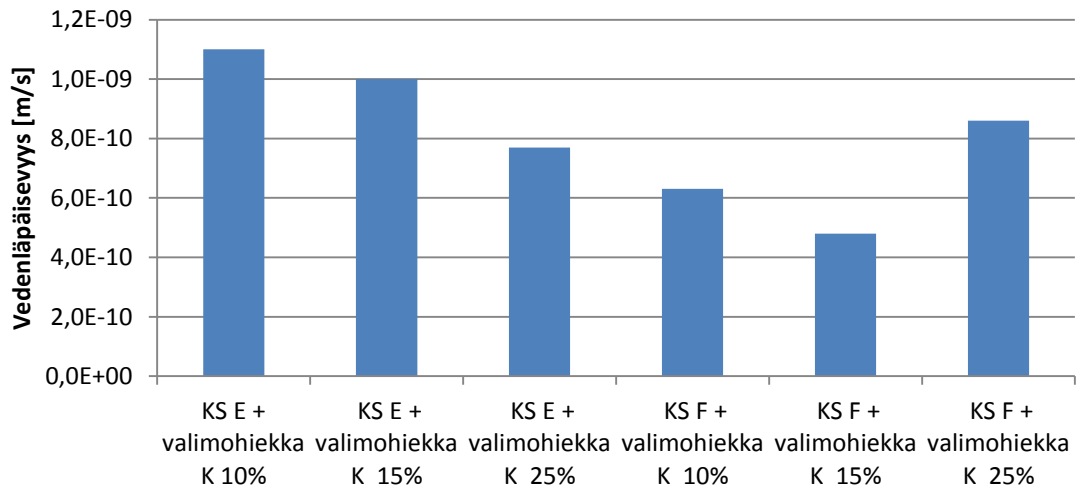
Uusiomateriaaleille on tehty vedenläpäisevyys ja puristuslujuuskokeet, joissa on keskitytty lentotuhkien, kuitusaven ja valimohiekkojen hyödyntämiseen. Kokeissa saadut tulokset on esitettyä liitteessä 4 ja kuvissa 23 – 25.



Kuva 23. Tuhka-kuitusaviseosten ja LT+KS+ valimohiekkaseosten vedenläpäisevyydet.

Tuhka-kuitusaviseoksilla vedenläpäisevyydet vaihtelevat  $4,9 \cdot 10^{-9} - 6,5 \cdot 10^{-8}$  m/s välillä. Pienin vedenläpäisevyys tuhka-kuitusaviseoksilla on saavutettu lentotuhkan (LT J) ja kuitusaven (KS E) seossuhteen ollessa 3:7. Valimohiekan lisääminen tuhka-kuitusaviseokseen pienensi seoksen vedenläpäisevyyttä arvoon  $2,9 \cdot 10^{-9} - 2,4 \cdot 10^{-9}$  m/s riippuen lisätyn valimohiekan määrästä. (Kuva 23).

Pienimmät vedenläpäisevyydet uusiomateriaaliseoksilla on saavutettu valimohiekkakuitusaviseoksella, jossa vedenläpäisevyydeksi on saavutettu jopa  $4,8 \cdot 10^{-10}$  m/s (Kuva 4). Tulosten perusteella valimohiekan määrällä ei ole suurta vaikutusta saavutettavaan vedenläpäisevyyteen, mutta kuitusaven tuottajien väliset eroavaisuudet ovat havaittavissa. Kuitusavella F saavutetaan kuitusavea E pienempiä vedenläpäisevyyksiä

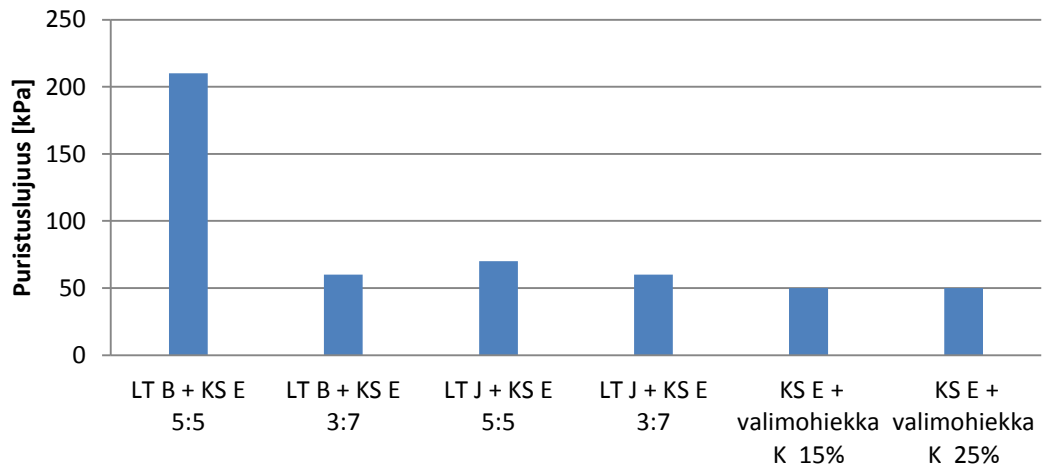


Kuva 24. Kuitusavi-valimohiekka- kappaleiden vedenläpäisevyydet.

Kuvassa 24 oleva ja muista vedenläpäisevyytuloksista poikkeava KS F + valimohiekka K 25 % koekappale on tehty eri erässä muiden koekappaleiden kanssa. Materiaalien homogenisoinnista huolimatta materiaalit ovat voineet olla hieman toisistaan poikkeavat, joka selittää kappaleen suuremman vedenläpäisevyyden. Tulos ei kuitenkaan vaikuta loppupäätelmään, sillä kuitusavi-valimohiekkaseokset alittavat  $10^{-9}$  m/s vedenläpäisevyydet kaikilla seossuhteilla.

Uusiomateriaaliseosten puristuslujuustuloksia on esitetty kuvassa 25. Tuhka-kuitusaviseosten puristuslujuudet vaihtelevat 60 – 210 kPa välillä, riippuen tuhkan ja kuitusaven seossuhteesta ja käytettävän tuhkan laadusta. Lentotuhkalla LT B saavutetaan lentotuhkaa LT J suurempia puristuslujuuksia kuitusaven kanssa.





Kuva 25. Uusiomateriaaliseosten puristuslujuudet.

Puristuslujuuskokeissa kuitusavi-valimohiekka-kappaleet eivät murtuneet. Kappaleiden 15 % kokoonpuristumista vastaava jännitys oli 50 – 70 kPa. Tämä tarkoittaa sitä, että kappaleet ovat olleet pehmeitä ja joustavia jolloin ne ovat kestäneet suuretkin muodonmuutokset.

## 5.2 Ympäristökelpoisuus

Ympäristökelpoisuustutkimuksissa tarkoituksena on ollut selvittää rikastushiekkojen haitta-ainepitoisuudet ja niiden liukoisuudet. Lisäksi tavoitteena on ollut selvittää uusiomateriaalien vaikutuksia rikastushiekan haitta-aineliukoisuuksiin. Ympäristökelpoisuustutkimukset on tehty käyttämällä runkomateriaaleina Hituran ja Pyhäsalmen rikastushiekkoja ja moreenia.

Materiaalien haitta-aineiden liukoisuudet on määritetty 2-vaiheisella ravistelutesteillä tai läpivirtaustestillä standardia CEN/TS 14405 käyttäen. Uusiomateriaalien vaikutusta rikastushiekkojen liukoisuuksiin on testattu soveltaen standardia CEN/TS 14405, jossa materiaalit on pakattu kolonniin kerroksittain alhaalta ylöspäin (Kuva 26). Testien aikana kolonniin läpi on johdettu vettä niin, että se on vastannut veden luonnollista kulkusuuntaa. Materiaaleista liuenneiden haitta-aineiden määrät on analysoitu kappaleiden läpi suotautuneista vesistä.



Kuva 26. Materiaalien haitta-aineliukoisuuksien määrittäminen läpivirtaustestillä (Ramboll 2014).

### 5.2.1 Hituran kaivoksen materiaalit

#### Rikastushiekkojen kokonaispitoisuudet

Ympäristökelpoisuustutkimukset on suoritettu Hituran kaivoksella muodostuvalle nikkelirikastushiekalle sekä kaivoksella tulevaisuudessa mahdollisesti rikastettavalle kultarikastushiekalle. Nikkeli- ja kultarikastushiekkojen kokonaispitoisuudet ja PIMA-asetuksen kynnsarvot on esitetty taulukossa 8. Taulukossa lihavoituna kynnsarvot ylittävät kokonaispitoisuudet.

Taulukko 8. Rikastushiekkojen kokonaispitoisuudet ja PIMA-asetuksen kynnsarvot (Vna 214/2007).

<i><b>Haitta-aine</b></i>	<i><b>Nikkelirikastushiekka (mg/kg)</b></i>	<i><b>Kultarikastushiekka (mg/kg)</b></i>	<i><b>Kynnsarvo (mg/kg)</b></i>
Alumiini	4910	16500	
Arseeni	<b>10</b>	<b>240</b>	5
Kadmium	0,45	0,39	1
Koboltti	<b>70</b>	8,7	20
Kromi	<b>360</b>	<b>1170</b>	100
Kupari	<b>1170</b>	<b>110</b>	100
Elohopea	< 0,04	<0,04	0,5
Nikkeli	<b>1500</b>	<b>590</b>	50
Lyijy	< 3	5,6	60
Antimoni	< 3	< 3	2
Vanadiini	25	49	100

Sinkki	34	18	200
Rauta	92300	19600	
Barium	28	15	
Molybdeeni	< 1	23	
Seleeni	< 3	< 3	
Mangaani	840	250	

Taulukossa 8 esitettyjen kokonaispitoisuuksien perusteella Hituran rikastushiekat ylittävät PIMA- asetuksen kynnysarvot arseenin (As), koboltin (Co), kromin (Cr), kuparin (Cu) ja nikkelin (Ni) osalta. Nikkelirikastushiekka ylittää nikkelpitoisuuden jopa 30-kertaisesti. Kultarikastushiekka ylittää nikkelpitoisuuden 11-kertaisesti ja arseenipitoisuuden jopa 48-kertaisesti. Näin ollen Hituran rikastushiekkoina ei voida luokitella pysyviksi jätteiksi.

### Haitta-aineiden liukoisuudet

Kolonnitestin ensimmäisessä vaiheessa tavoitteena on ollut selvittää pelkkien nikkeli- ja kultarikastushiekkoina liukoisuudet eli niin sanottu lähtötilanne, joihin pyritään vaikuttamaan erilaisilla pintarakenneratkaisuilla. Rikastushiekkoina liukoisuustuloksia verrataan kaatopaikka asetuksessa (Vna 331/2013) esitettyihin haitta-aineliukoisuuksien raja-arvoihin (Taulukko 9). Taulukossa vihreällä väritetyt arvot ylittävät pysyvän jätteen kaatopaikan ja sinisellä väritetyt tavanomaisen jätteen kaatopaikan raja-arvot.

Taulukko 9. Rikastushiekkoina liukoisuudet ja kaatopaikka-asetuksen raja-arvot, [mg/kg] L/S = 10 l/kg (Ramboll ja Vna 331/2013).

Haitta-aine	Ni-rkh	Au-rkh	Pysyvä jäte	Tavanomainen jäte	Vaarallinen jäte
Arseeni	0,005	<b>17</b>	0,5	2	25
Barium	0,1	0,054	20	100	300
Kadmium	0,002	0,002	0,04	1	5
Kromi	0,02	0,02	0,5	10	70
Kupari	0,015	0,017	2	50	100
Elohopea	0,005	0,005	0,01	0,2	2
Molybdeeni	0,005	0,101	0,5	10	30
Nikkeli	<b>0,676</b>	0,012	0,4	10	40
Lyijy	0,005	0,005	0,5	10	50
Antimoni	0,005	<b>0,063</b>	0,06	0,7	5
Seleeni	0,024	0,023	0,1	0,5	7
Sinkki	0,054	0,05	4	50	200
Kloridi	<b>849</b>	30	800	15000	2500
Fluoridi	5	5	10	150	500
Sulfaatti	<b>6146</b>	87	1000	20000	50000
DOC	90	104	500	800	1000

Liukoisuustulosten perusteella nikkelikastushiekasta liukenee pysyvän jätteen liukoisuusraja-arvot ylittäviä pitoisuuksia nikkeliä, kloridia ja sulfaattia. Kultarikastushiekka ylittää pysyvän jätteen raja-arvon antimonin osalta ja tavanomaisen jätteen raja-arvon arseenin osalta.

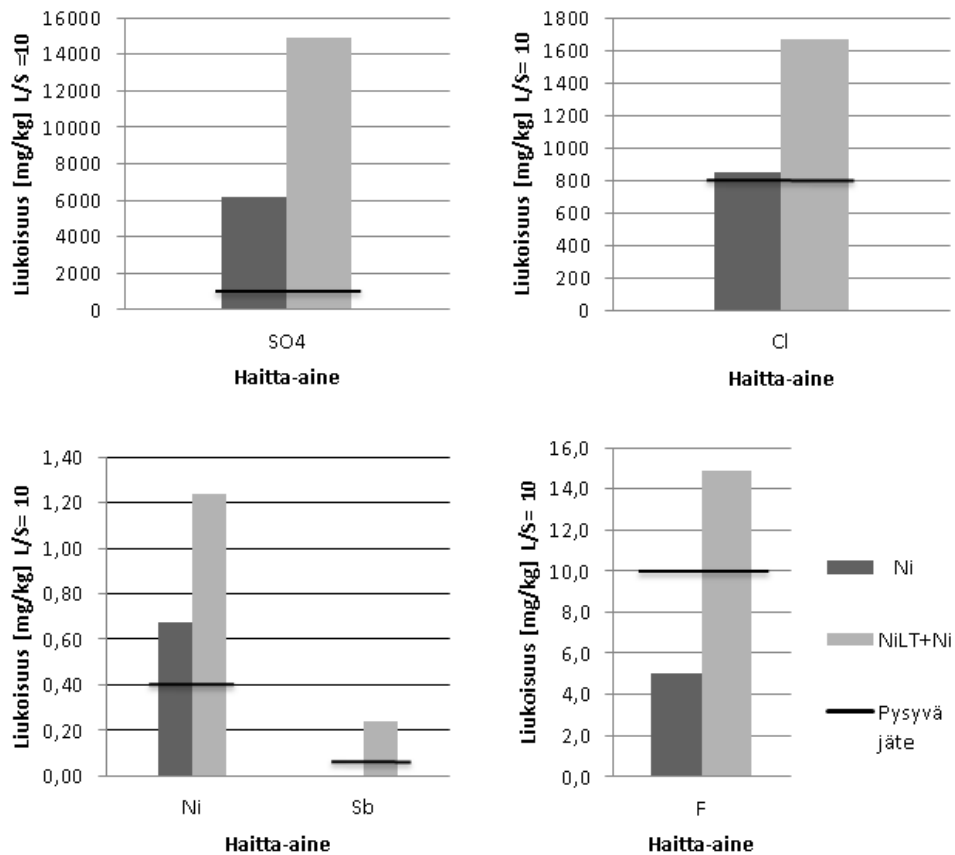
Liukoisuustestien toisessa vaiheessa tavoitteena on ollut tutkia uusiomateriaalien yhteisvaikutusta suotautuvien vesien haitta-aineliukoisuuksiin ja selvittää uusiomateriaalien kelpoisuudet pintarakenteissa. Tavoitteena on saada pienennettyä haitta-aineiden liukoisuuksia uusiomateriaaleja hyödyntäen. Liukoisuustesteissä käytettävät materiaalit rikastushiekkojen lisäksi ovat olleet; moreeni, kasavarastoitu lentotuhka (KT), tuore lentotuhka (LT) ja kalkki. Testeissä käytetyt tuhkat ovat olleet kokoomänäytteitä, eli useamman tuottajan tuhkista koottu näyte. Taulukossa 10 on esitetty kolonnitesteissä käytetyt materiaalit, niiden kerrospaksuudet ja järjestykset kolonnissa. Materiaalien kerrospaksuuksissa on pyritty mallintamaan pintarakenteiden todellisia mittasuhteita. Kolonnitesteistä saadut haitta-aineliukoisuudet ja kaatopaikkakelpoisuuksien raja-arvot on esitetty liitteessä 5.

Taulukko 10. Kolonnitestiä kappaleet ja materiaalipaksuudet.

<b><i>Kappaleen nimi</i></b>	<b><i>Materiaalit</i></b>	<b><i>Korkeus (cm)</i></b>
Au	Au-rkh	28
Ni	Ni-rkh	28
Au +Ni	Au-rkh Ni-rkh	6,9 21,1
Mr + Au +Ni	Moreeni Au-rkh Ni-rkh	2,4 6,3 19,3
AuKT + Ni	stabiloitu Au-rkh + KT 15 % Ni-rkh	8 18
AuLT + Ni	stabiloitu Au-rkh + LT 15 % Ni-rkh	8 18
NiLT + Ni	stabiloitu Ni-rkh + LT 15 % Ni-rkh	8 18
KalkkiStab.Au	stabiloitu Au-rkh + kalkki 5 %	27,5
KalkkiStab.Au + Au +Ni	stabiloitu Au-rkh + kalkki 5 % Au-rkh Ni-rkh	4,3 4 17,9

Liukoisuustulosten perusteella pysyvän kaatopaikan liukoisuusrajat ylittivät kaikki koekappaleet, lukuun ottamatta kalkkistabiloitua kultarikastushiekkaa (KalkkiStab.Au). Kappaleet ylittivät pysyvän jätteen raja-arvot nikkelin (Ni), antimonin (Sb), kloridin (Cl), ja sulfaatin (SO<sub>4</sub>) osalta (Liite 5).

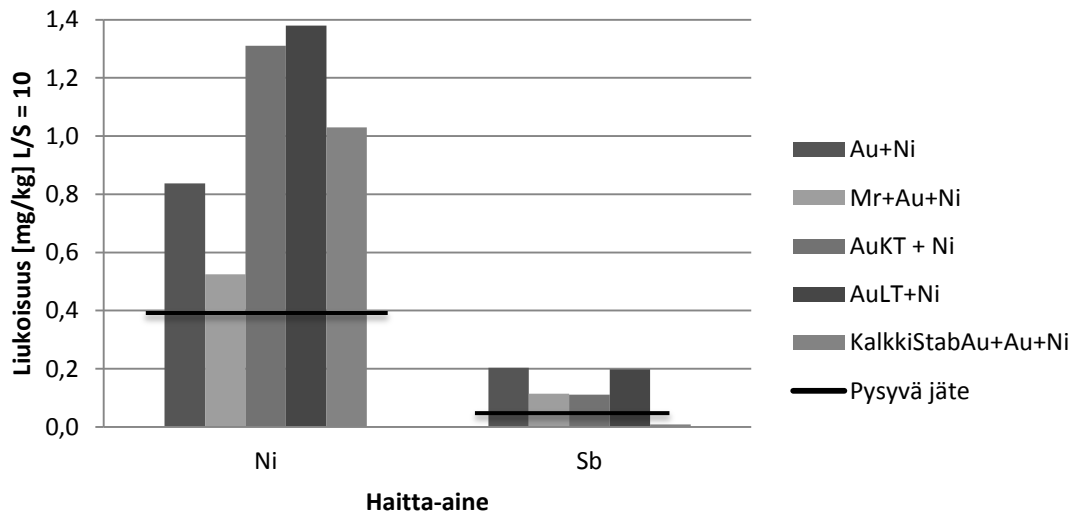
Tuoreen lentotuhkan (NiLT+Ni) vaikutusta nikkelikastushiekan liukoisuuksiin voidaan tarkastella vertailemalla saatuja liukoisuustuloksia pelkän nikkelikastushiekan (Ni) liukoisuustuloksiin (Kuva 27).



Kuva 27. Lentotuhkan vaikutus nikkelikastushiekan haitta-aineliukoisuuksiin.

Liitteestä 5 ja kuvasta 27 nähdään, ettei lentotuhkan lisääminen nikkelikastushiekkaan pienennä haitta-aineiden liukoisuuksia nikkelikastushiekasta. Stabiloinnin seurauksena muun muassa sulfaatin (SO<sub>4</sub>), kloridin (Cl), nikkelin (Ni), antimonin (Sb) ja fluoridin (F) liukoisuudet kasvoivat ja ylittivät pysyvän jätteen raja-arvot. Kaikkien haitta-aineiden liukoisuudet jäivät kuitenkin tavanomaisen jätteen raja-arvojen alapuolelle.

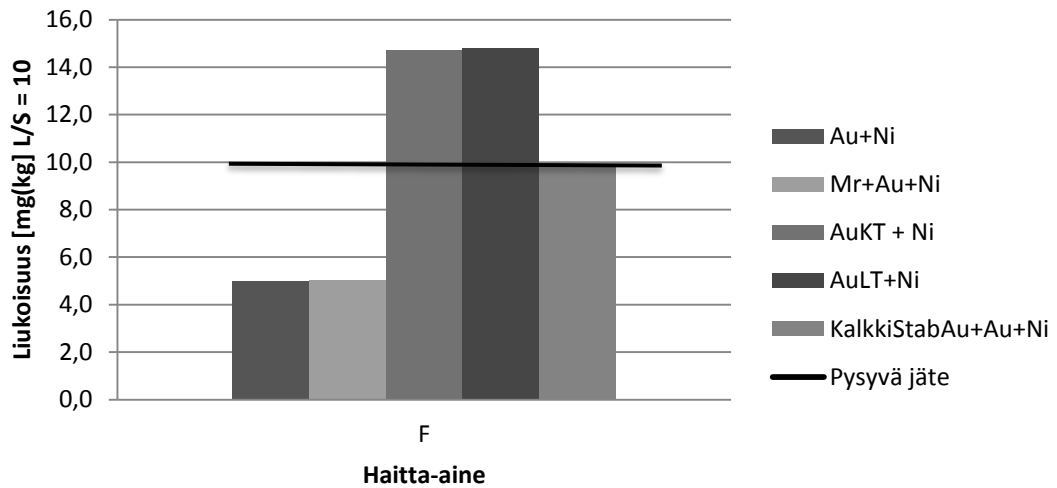
Seuraavaksi tarkastellaan moreenin (Mr+Au+Ni), kasavarastoidun lentotuhkan (AuKT + Ni), tuoreen lentotuhkan (AuLT + Ni) ja kalkkistabiloinnin (KalkkiStab.Au + Au+Ni) vaikutuksia kulta-nikkelikastushiekkakerroksen (Au+Ni) liukoisuuksiin. Saatuja haitta-aineiden liukoisuustuloksia verrataan kappaleen Au+Ni liukoisuustuloksiin.



Kuva 28. Moreenin, kasa- ja lentotuhkan sekä kalkkistabiloinnin vaikutukset rikastushiekkojen liukoisuuksiin.

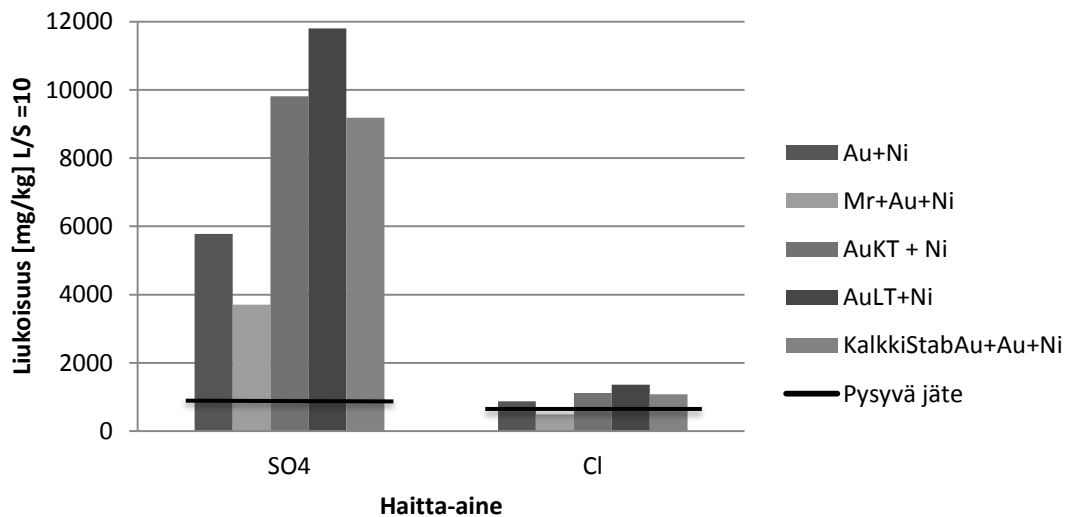
Kuvasta 28 ja liitteestä 5 havaitaan, että kaikki liukoisuuskappaleet ylittävät pysyvän jätteen raja-arvot nikkelin ja antimonin osuuksilla lukuunottamatta kalkkistabilointia. Nikkeliliukoisuutta rikastushiekassa lisäävät kalkkistabilointi ja tuhkien lisääminen alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Kasa- ja lentotuhkaa verrattaessa, lentotuhkan lisääminen rikastushiekkaan nostaa haitta-aineliukoisuuksia hieman kasatuhkaa enemmän (Kuvat 28 – 30). Tulosten perusteilla ainoastaan moreenikerros pienentää nikkelin liukoisuutta hieman alkuperäisestä tilanteesta. Antimonin (Sb) liukoisuudet pienenevät alkuperäisestä tilanteesta hieman, mutta ylittävät kalkkistabilointia lukuunottamatta pysyvän jätteen raja-arvon. Kalkkistabiloinnin vaikutuksesta antimonin liukoisuus laskee jopa 0,005 mg/kg tasolle. Antimonin liukoisuutta rikastushiekasta pienentävät kasatuhkan ja moreenin käyttö. Tuoreen lentotuhkan lisääminen pitää arseenin liukoisuuden miltein lähtötilanteen tasolla.

Fluoridin liukoisuuksiin moreenikerroksella ei ole vaikutusta, sillä fluoridin liukoisuus pysyy samana alkuperäiseen tilanteeseen verrattaessa. Kasa- ja lentotuhkan käyttö kultarikastushiekan stabilisoinnissa kolminkertaistaa fluoridin liukoisuuksia alkuperäiseen tilanteeseen verrattaessa ja näin ollen ylittää pysyvän jätteen raja-arvon, joka on 10 mg/kg. Myös kalkkistabiloinnin vaikutuksesta fluoridin liukoisuus lähes kaksinkertaistuu, mutta jää pysyvän jätteen raja-arvon alapuolelle (Kuva 29).



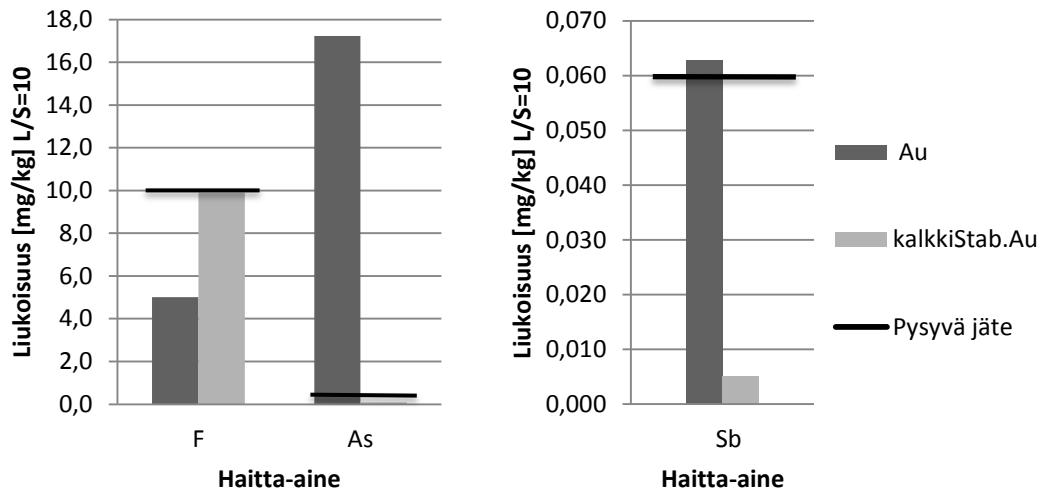
Kuva 29. Moreenin, kasa- ja lentotuhkan sekä kalkkistabiloinnin vaikutus fluoridin liukoisuuteen.

Sulfaatin liukoisuus ylittää pysyvän jätteen raja-arvot kaikilla koekappaleilla. Ainoastaan paksu moreenikerros pienentää sulfaatin liukenemista rikastushiekasta. Kloridin liukoisuudet jäävät myös pysyvän jätteen raja-arvojen yläpuolelle lukuun ottamatta moreenikerros-kappaletta (Kuva 30).



Kuva 30. Moreenin, kasa- ja lentotuhkan sekä kalkkistabiloinnin vaikutukset rikastushiekan sulfaatti- ja kloridiliukoisuuksiin.

Kultarikastushiekan (Au) ja kalkkistabiloidun kultarikastushiekan (KalkkiStab.Au) haitta-aineiden liukoisuustulokset ja niiden väliset erot on esitetty kuvassa 31 sekä liitteessä 5.



Kuva 31. Kalkkistabiloinnin vaikutus fluoridin, arseenin ja antimonin liukoisuuksiin kultarikastushiekasta.

Kalkkistabiloinnin seurauksena fluoridin liukoisuus kaksinkertaistuu lähtötilanteesta, mutta alittaa pysyvän jätteen raja-arvon. Kultarikastushiekassa arseenin (As) liukoisuus on 17,2 mg/kg ja se ylittää tavanomaisen jätteen raja-arvon. Kalkkistabiloinnin vaikutuksesta arseenin liukoisuus kultarikastushiekasta pienenee jopa 99 % alkuperäisestä, jolloin liukoisuus on vain 0,085 mg/kg ja alittaa pysyvän jätteen raja-arvon (Kuva 31). Stabiloinnin vaikutuksesta myös antimonin (Sb) liukoisuus kultarikastushiekasta pienenee merkittävästi, jopa 92 %. Liukoisuustulosten perusteella kalkkistabiloidun kultarikastushiekan haitta-aineliukoisuudet jäävät pysyvän jätteen raja-arvon alapuolelle (Liite 5). Kalkkistabiloidussa rikastushiekassa haitta-aineet pidättyvät eivätkä liukene suotautuvaan veteen.

Tutkimustulosten perusteella stabilointi lento- ja kasatuhkilla lisäävät jonkin verran kappaleen haitta-aineliukoisuuksia. Nousevat haitta-aineliukoisuudet voivat johtua tuhkien sisältämistä haitta-aineista, joihin vaikuttavat käytettyjen tuhkien laadut. Todellisuudessa tuhkien sisältämien haitta-aineliukoisuuksien merkitys jää laboratoriotuloksia pienemmiksi, sillä tuhkakerroksen paksuus pintarakenteissa olisi



suhteessa paljon ohuempi kuin laboratoriossa testatuissa koekappaleissa. Testatuissa koekappaleissa tuhkakerroksen paksuus oli melkein kolme kertaa suurempi, mitä pintarakenteissa todellisuudessa käytettäisiin. Koekappaleiden kohonneet haitta-aineliukoisuudet voivat selittyä myös tuhkan emäksisyydellä. Hituran rikastushiekat ovat jo entuudestaan neutraaleja/hieman emäksisiä, joten tuhkan pH:n säädöllä ei ole suuria etuja haitta-aineiden pidättämiseen ja liukoisuuksien pienentämiseen.

Tutkimustuloksista havaittiin myös kasavarastoidun lentotuhkan (KT) ja kuivan lentotuhkan (LT) väliset erot. Kuivalla lentotuhkalla liukoisuudet olivat suurempia kuin kasatuhkalla. Kasavarastoidun lentotuhkan pienemmät haitta-aineliukoisuudet voivat johtua varastoinnin aikana tapahtuneista ominaisuuksien muutoksista. Kasavarastoinnin aikana tuhkasta on voinut liueta helposti liukenevat haitta-aineet, jolloin tuhkan haitta-ainepitoisuudet ovat tuoretta lentotuhkaa matalammat. Näiden tulosten perusteella kasatuhkan hyödyntäminen peiterakenteissa olisi lentotuhkaa hyödyllisempää. Lisäksi kasatuhkan käyttö pintarakenteissa olisi helpompaa sen saatavuuden vuoksi, koska kasatuhkan saatavuus ja varastointi on lentotuhkaa parempi.

### 5.2.2 Pyhäsalmen kaivoksen materiaalit

Pyhäsalmen kaivoksen ympäristökelpoisuus määrittäisiin on valittu aiempien tutkimusten perusteilla hyväksi koetut materiaalityratkaisut. Pyhäsalmen ympäristökelpoisuustutkimuksien tavoitteina on tutkia lentotuhkan ja tuhkan määrän vaikutuksia haitta-aineiden pidättymiseen ja liukoisuuksiin. Toisena tarkastelun kohteena on moreenin jalostaminen valimohiekalla.

### Rikastushiekan kokonaispitoisuudet

Pyhäsalmen rikastushiekan kokonaispitoisuudet ja PIMA-asetuksen kynnysarvot on esitetty taulukossa 11. Taulukossa esitetyt pitoisuudet ovat kolmen näytteen kokonaispitoisuuksien keskiarvoja.

Taulukko 11. Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekan haitta-ainepitoisuudet ja PIMA-asetuksen kynnysarvot.

<b>Haitta-aine</b>	<b>Rikastushiekka (mg/kg)</b>	<b>Kynnysarvo (mg/kg)</b>
Arseeni	<b>373</b>	5
Kadmium	<b>7,1</b>	1
Koboltti		20

Kromi	19	100
Kupari	<b>937</b>	100
Elohopea	0,44	0,5
Nikkeli	15	50
Lyijy	<b>178</b>	60
Antimoni	<b>7</b>	2
Vanadiini		100
Sinkki	<b>2380</b>	200

Kokonaispitoisuuksien perusteilla, Pyhäsalmen rikastushiekka ylittää PIMA-asetuksen kynnyksarvot moninkertaisesti etenkin sinkin, lyijyn, kuparin ja arseenin pitoisuuksilla.

### Liukoisuudet

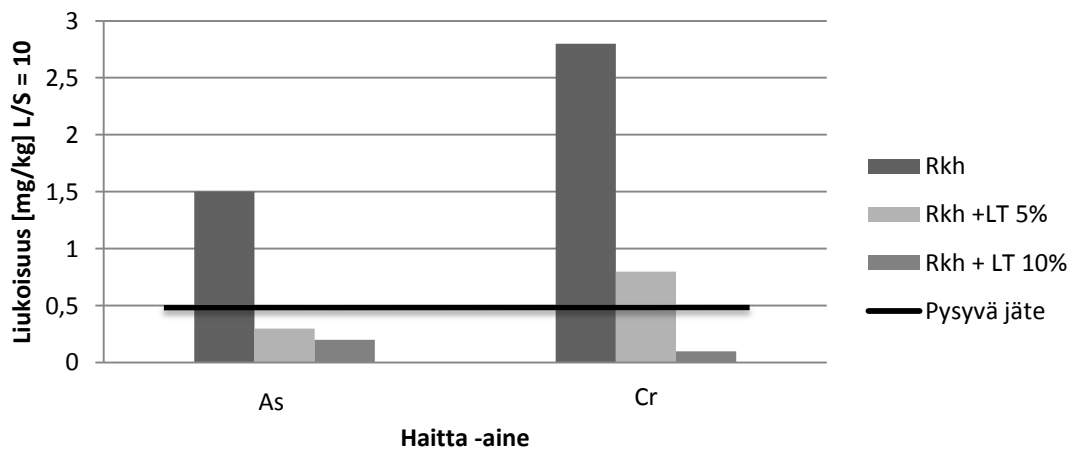
Haitta-aineiden liukoisuutta rikastushiekassa ja tuhkan vaikutusta haitta-aineiden liukoisuuksiin on tutkittu tekemällä liukoisuustestejä rikastushiekalle sekä rikastushiekalle, joka on jalostettu lentotuhkalla. Lentotuhkan määrä rikastushiekassa on ollut 5 ja 10 % rikastushiekan märkämässasta. Lisäksi liukoisuustestejä on tehty valimohiekalla jalostetulle moreenille, jossa valimohiekan määrä on ollut 5 % moreenin märkämässasta. Materiaalien liukoisuustutkimustulokset on koottuna taulukkoon 12 ja liitteeseen 6. Taulukossa pysyvän kaatopaikan raja-arvot ylittävät liukoisuudet esitetty vihreällä, tavanomaisen sinisellä ja vaarallisen punaisella.

Taulukko 12. Pyhäsalmen materiaalien haitta-aineliukoisuudet (mg/kg), L/S = 10 l/kg.

<i>Haitta-aine</i>	<i>Moreeni + valimohiekka K 5 %</i>	<i>Rikastushiekka</i>	<i>Rikastushiekka + LTC 5 %</i>	<i>Rikastushiekka + LTC 10 %</i>
Elohopea	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002
Alumiini	8	880	1400	1100
Arseeni	<0,2	<b>1,5</b>	0,3	<0,2
Barium	0,7	0,2	0,2	0,1
Kadmium	<b>0,05</b>	<b>1,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>
Kromi	<0,1	<b>2,8</b>	<b>0,8</b>	<0,1
Kupari	<b>4,8</b>	<b>76</b>	<b>59</b>	<b>29</b>
Rauta	<0,2	6000	1000	150
Mangaani	4	46	70	93
Molybdeeni	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Nikkeli,	<b>0,4</b>	<b>1,6</b>	<b>1,6</b>	<b>1,6</b>
Lyijy	<0,1	0,3	<0,1	<0,1
Antimoni	0,04	<b>0,06</b>	0,02	<0,01
Seleen	0,02	0,09	0,04	0,07
Vanadiini	<0,1	0,30	<0,1	<0,1
Sinkki	<b>10</b>	<b>500</b>	<b>490</b>	<b>530</b>
Kloridi	20	130	62	27
Sulfaatti	550	<b>99000</b>	<b>29000</b>	<b>30000</b>
Fluoridi	<5	<b>120</b>	<b>35</b>	<b>25</b>
DOC	<5	53	30	45

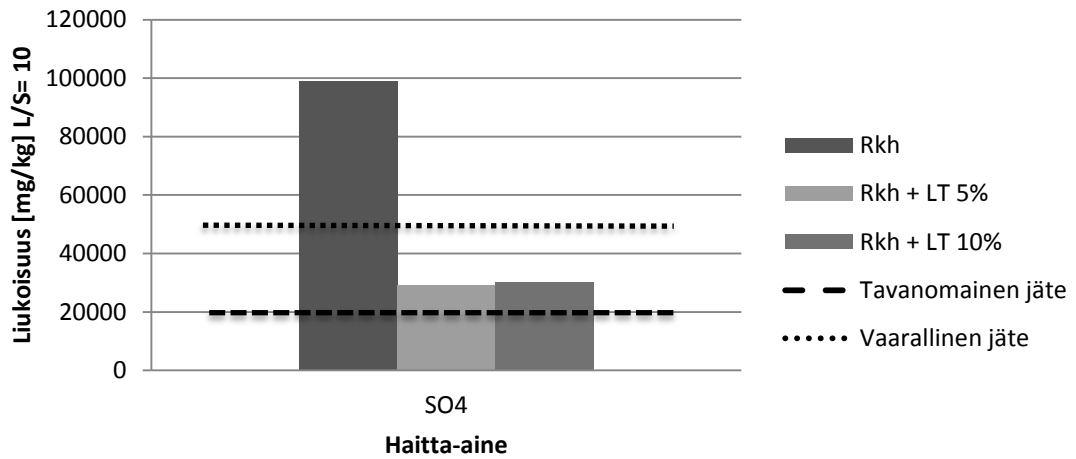
Liukoisuustulosten perusteilla moreenin jalostaminen valimohiekalla ylittää pysyvän kaatopaikan raja-arvot kadmiumin kuparin, nikkelin ja sinkin liukoisuuksilla. Kadmiumin ja nikkelin osalta liukoisuudet ovat lähellä raja-arvoja, mutta sinkin ja kuparin liukoisuudet ylittävät pysyvän jätteen raja-arvot melkein kaksinkertaisesti.

Rikastushiekka ylittää vaarallisen jätteen raja-arvot sinkin ja sulfaatin osalta. Tavanomaisen jätteen raja-arvot ylittyvät kuparin ja kadmiumin liukoisuuksilla ja pysyvän jätteen raja-arvot arseenin, kromin, nikkelin, antimonin ja fluoridin liukoisuuksilla. Tuloksista havaitaan, että rikastushiekan jalostaminen lentotuhkalla laskee etenkin arseenin, kromin, sulfaatin ja fluoridin haitta-aineliukoisuuksia. Kuvassa 32 on esitettyä lentotuhkan vaikutukset arseenin ja kromin liukoisuuksiin.



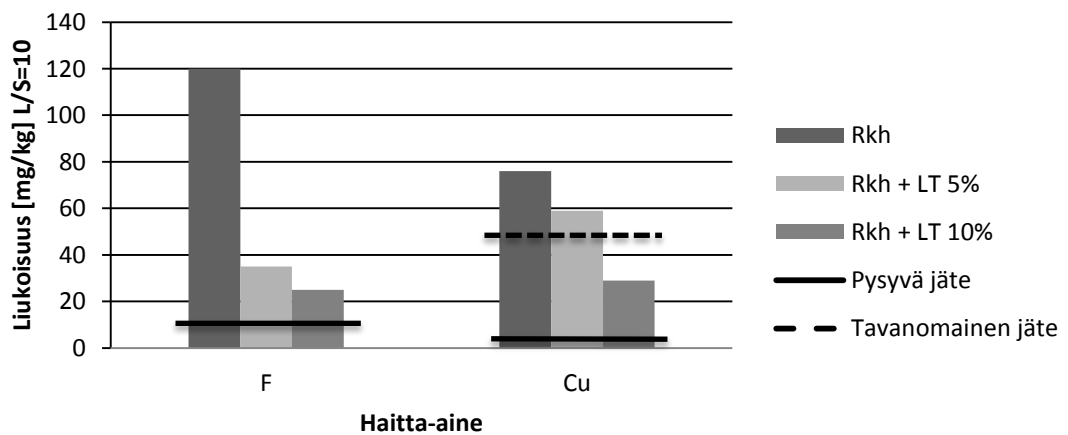
Kuva 32. Lentotuhkan vaikutus arseenin ja kromin liukoisuuksiin rikastushiekassa.

Kuvasta havaitaan, että arseenin liukoisuus rikastushiekassa pienenee yli 80 %, riippuen lisätyn tuhkan määrästä. Arseenin liukoisuus rikastushiekassa alittaa pysyvän jätteen raja-arvon, kun lisätyn lentotuhkan määrä on 5 % runkoaineen märkämässasta. Kromin liukoisuus alittaa pysyvän jätteen raja-arvon, kun tuhkan määrä rikastushiekassa on yli 5 %. Lentotuhkan vaikutuksesta myös sulfaatin liukoisuudet laskevat noin 70 % alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna (Kuva 33). Vaikka liukoisuudet laskevat huomattavasti alkuperäiseen tilanteeseen verratessa, ylittävät sulfaatin liukoisuudet tavanomaisen jätteen raja-arvot.



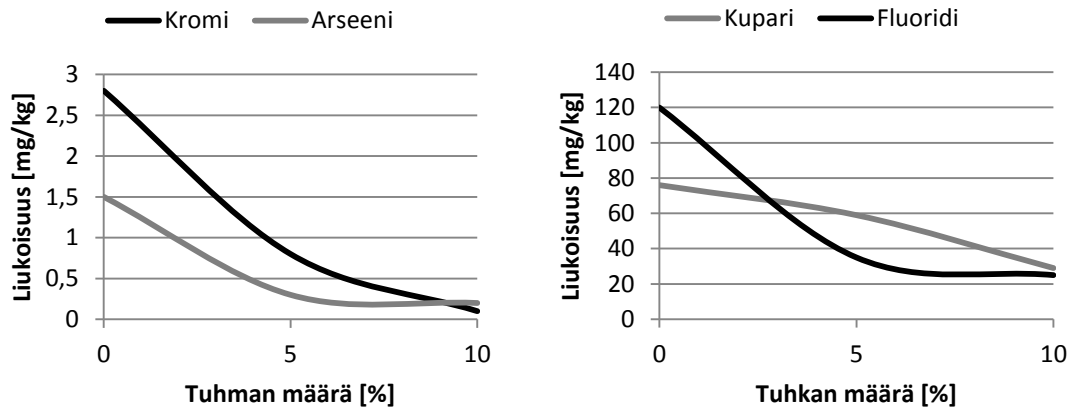
Kuva 33. Lentotuhkan vaikutus sulfaatin liukoisuuteen rikastushiekassa.

Fluoridin liukoisuus laskee noin 70 – 80 % ja kuparin noin 20 – 60 %, riippuen käytetyn lentotuhkan määrästä. Laskusta huolimatta kummankin haitta-aineen liukoisuudet ylittävät pysyvän jätteen raja-arvot (Kuva 34). Lisätyn lentotuhkan määrän ollessa 5 % rikastushiekan märkämässasta, kuparin liukoisuus ylittää tavanomaisen jätteen raja-arvon.



Kuva 34. Lentotuhkan vaikutus fluoridin ja kuparin liukoisuuksiin rikastushiekassa.

Tutkimustuloksista havaitaan, että haitta-aineiden liukoisuuksiin vaikuttaa rikastushiekassa käytetyn lentotuhkan määrä. Kuvan 35 perusteella arseenin ja fluoridin liukoisuuksiin parhaat hyödyt (suhteessa tuhkan määrään) saadaan tuhkan määrän ollessa 5 %, kun taas kromin ja fluoridin suurimmat edut saadaan tuhkan määrän ollessa 10 %. Kaikki haitta-aineet ja niiden liukoisuudet huomioon ottaen, suurimmat edut saadaan tuhkamäärän ollessa 10 % runkomateriaalin märkämässasta.



Kuva 35. Esimerkkejä lentotuhkan määrän vaikutuksesta haitta-aineiden liukoisuuksiin.

Tuhkien hyödyntäminen rikastushiekka-aitaiden pintarakenteissa olisi tutkimusten perusteella hyödyllistä, sillä sulfidipitoisen rikastushiekan jalostaminen lentotuhkalla pienentää useiden haitta-aineiden liukoisuuksia huomattavasti. Liukoisuuksien pienentyminen voi johtua lentotuhkan lisäämisen aiheuttamasta pH:n muutoksesta tai materiaalissa tapahtuvista lujittumisreaktioista (Lindroos et al. 2016). Aiempien tutkimustulosten perusteella myös tekniset ominaisuudet paranevat (vedenläpäisevyys) tuhkaa käyttämällä. Teknisten laboratoriokokeiden ja ympäristökelpoisuuskokeiden perusteilla sopiva tuhkan määrä on noin 10 % rikastushiekan märkämässasta. Tätä suuremmilla määrillä ei saavuteta suurempia teknisiä eikä ympäristöllisiä etuja.

## 6 KOERAKENTAMINEN

Koerakentaminen koostuu Ramboll Finland Oy:n ja kanadalaisen konsulttifirman Klohn Crippen Berger (KCB) suunnittelemista pintarakenteiden koerakenteista. Koerakentaminen aloitetaan Pyhäsalmen kaivoksella keväällä 2016. Koerakentamisen menetelmällä ei ole virallista nimeä, joten tässä työssä koerakentamisesta käytetään nimitystä astiakoe. Astiakokeiden tavoitteena on syventyä ja kerätä lisätietoa laboratoriossa testattujen materiaaliratkaisujen toimivuudesta ja käyttäytymisestä kenttäolosuhteissa. Kokeiden aikana määritetään koerakenteiden läpi suotautuvien vesien määrää, laatua ja vesissä tapahtuvia muutoksia. Oletuksena on, että rikastushiekan hapontuottoon ja haitta-aineiden liukenemiseen vaikuttavat muun muassa ympäristön lämpötila, sadanta ja sadeveden ominaisuudet (pH ja happipitoisuus). Astiakokeiden tarkoituksena on myös tarkastella uusiomateriaalien käsiteltävyyttä, vesipitoisuuden vaikutusta materiaalien käsiteltävyyteen, työstettävyyteen ja tiivistämiseen sekä kerätä tietoa uusiomateriaalien logistiikasta ja rakentamisen aikana tulleista haasteista ja ongelmista.

Astiakokeiden rakentamisesta vastaa Suomen maastorakentajat Oy. Heidän vastuulla on astiakokeiden rakentaminen ja rakentamiseen liittyvät kalustot, laitteet ja materiaalit. Lisäksi Suomen Maastorakentajat vastaavat materiaalien sekoitusmenetelmien testaamisesta ja soveltuvuudesta. Ramboll Finland Oy vastaa koerakentamisen teknisistä ohjeista, jonka laadinta on osa tätä diplomityötä. Ohjeiden lisäksi Ramboll vastaa koerakentamisen laadunvarmistuksesta, rakentamisen ohjauksesta ja raportoinnista, seurantasuunnitelmista, ohjeistuksesta seurantatulosten käsittelyssä sekä tulosten raportoinnista. Pyhäsalmi Mine Oy vastaa näytteenotosta ja vesinäyteanalyysistä.

### 6.1 Materiaalivalinnat ja pintarakenteiden koerakenteet

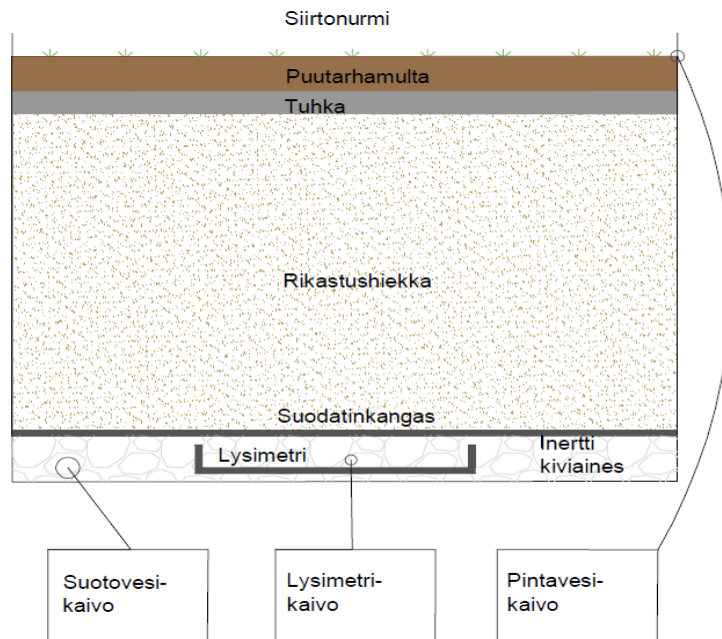
Astiakokeiden materiaalivalinnoilla pyritään vaikuttamaan Pyhäsalmen kaivoksen sulfidipitoisen ja happoa tuottavan rikastushiekan ominaisuuksiin. Tavoitteena on vähentää hapon muodostumista ja haitta-aineiden liukenemistä rikastushiekasta.

Astiakokeissa käytettävien materiaalien materiaalivalinnat on tehty laboratoriotulosten perusteilla. Laboratoriotulosten lisäksi materiaalivalintoihin ovat vaikuttaneet

materiaalin saatavuus, varastointi ja käsiteltävyys. Ramboll Finland Oy on valinnut uusiomateriaaleista kasatuhkan ja Klohn Crippen Berger kipsin, heidän tekemien laboratoriokokeiden perusteilla. Uusiomateriaalien lisäksi astiakokeissa käytetään Pyhäsalmen kaivoksen karkeaa ja hienoa rikastushiekkaa, moreenia, inerttiä kiviainesta, puutarhamultaa ja siirtonurmea.

Astiakokeissa tuhka toimii reaktiivisena kerroksena. Koerakenteissa tuhkaa käytetään sellaisenaan 10 cm paksuisena kerroksena ja rikastushiekkaan sekoitettuna. Rikastushiekkaan sekoitettaessa käytettävän tuhkan määrä on 10 % rikastushiekan märkämässasta, sillä laboratoriotulosten perusteilla tuhkan määrän kasvaessa yli 10 %:in saavutetut tekniset ja ympäristölliset hyödyt pienenevät. Kipsi toimii pintarakenteissa neutraloivana komponenttina. Käytettävän kipsin paksuus sellaisenaan on 50cm ja moreenin sekoitettaessa 70 % koko materiaalin tilavuudesta. Inertti kiviaines toimii suodatinkerroksena ja puutarhamulta kasvukerroksena, jonka yläpuolelle istutetaan siirtonurmi. Siirtonurmen tehtävänä on mukailla pintakerroksen todellista tilannetta.

Pintakerrosten koerakenteet rakennetaan sylinterimäisiin, tilavuuksiltaan 10 m<sup>3</sup> kokoisiin astioihin. Jokaisen astian alimmaiseksi kerrokseksi tulee 0,2 m paksuinen inertti kiviainekerros, jonka tehtävänä on ohjata suotautuneet vedet pois koerakenteesta. Suodatinkerrokseen asennetaan lysimetri, johon osa rakenteen läpi suotautuneesta vedestä kerääntyy. Lysimetriin keräytyvä vesi johdetaan lysimetrikaivoon, josta tarkkaillaan suotautuneen veden määrää ja laatua. Jokaisen astiakokeen inerttikerroksen yläpuolelle tulee suodatinkangas, joka estää yläpuolella olevia materiaalien sekoittumista ja kulkeutumista inerttikerrokseen (Kuva 36). Suodatinkankaiden yläpuolelle rakennetaan taulukon 13 mukaiset koerakenteet. Koerakenteessa 3 tuhkan määrä on ilmoitettu runkoaineen märkämässasta ja rakenteessa 7 kipsin ja moreenin osuudet tilavuusprosentteina.



Kuva 36. Esimerkki astiakokeiden rakenteista.

Taulukko 13. Astiakokeiden koerakenteet ja tavoiteltavat tiedot

<b>Koerakenne</b>	<b>Materiaalit</b>	<b>Kerrospaksuus [m]</b>	<b>Tavoiteltava tieto</b>
1	siirtonurmi kasvukerros, multa tuhka rikastushiekka (karkea) inertti	0,15 0,1 1,4 0,2	tuhkan vaikutus haitta- aineiden liukoisuuksiin, verrataan koerakenteeseen 5 ja 2
2	siirtonurmi kasvukerros, multa tuhka rikastushiekka (hieno) inertti	0,15 0,1 1,4 0,2	tuhkan vaikutus haitta- aineiden liukoisuuksiin, verrataan tuloksia koerakenteeseen 8 ja 1
3	siirtonurmi kasvukerros, multa rikastushiekka+ tuhka 10 % rikastushiekka (hieno) inertti	0,15 0,5 1 0,2	sekoituksen ja reaktiomatkan vaikutukset haitta-aineiden liukoisuuksiin, verrataan koerakenteeseen 2
4	siirtonurmi kasvukerros, multa moreeni rikastushiekka (karkea) inertti	0,15 0,8 0,7 0,2	ns. normaalirakenteen liukoisuudet, verrataan rakenteisiin 1 ja 5
5	rikastushiekka (karkea) inertti	1,65 0,2	karkean rikastushiekkan liukoisuudet, lähtötieto
6	siirtonurmi kasvukerros, multa kipsi rikastushiekka (karkea) inertti	0,15 0,5 1 0,2	kipsin vaikutus liukoisuuksiin neutraloivana komponenttina, verrataan etenkin rakenteisiin 1, 5 ja 7
7	siirtonurmi kasvukerros, multa	0,15	kipsin vaikutus liukoisuuksiin, sekoituksen



	moreeni 30 % + kipsi 70 % rikastushiekka (karkea) inertti	0,5 1 0,2	ja laimentamisen merkitys, verrataan rakenteeseen 6
8	rikastushiekka (hieno) inertti	1,65 0,2	hienon rikastushiekan liukoisuudet, lähtötieto
9	siirtonurmi kasvukerros, multa rikastushiekka (hieno) inertti	0,3 1,35 0,2	kasvukerroksen paksuuden merkitys liukoisuuksiin, verrataan koerakenteeseen 8
10	siirtonurmi kasvukerros, multa kipsi rikastushiekka (hieno) inertti	0,15 0,15 1,35 0,2	kipsin vaikutus liukoisuuksiin neutraloivana komponenttina, verrataan erityisesti rakenteisiin 2,8 ja 9

Jokaisella astiakokeella on tavoiteltava tieto, jota seurataan koetoiminnan aikana. Koerakenteiden 5 ja 8 tehtävänä on antaa lähtötiedot rikastushiekkojen haitta-aineliukoisuuksista, joihin erilaisilla materiaaliratkaisuilla pyritään vaikuttamaan. Astiakokeiden tavoiteltavat tiedot on esitettyä koerakennekohtaisesti taulukossa 13.

## 6.2 Astiakokeiden rakentaminen

Astiakokeet rakennetaan Rambollin laatiman työohjeen mukaisesti. Rakentamisen kaikki työvaiheet, erikoistilanteet, käytettävät materiaalit, materiaalien määrät ja käytettävät välineet on esiteltyä astiatestien ohjeistuksesta. Työohjeen on laatinut Noora Karjalainen, Harri Jyrävän ja Merja Autiolan avustuksella. Työohje liitteessä 7.

Ennen rakentamisen aloittamista, rakentamisen aikana ja rakentamisen jälkeen, tulee kiinnittää erityistä huomiota käytettäviin materiaaleihin ja ympäristöön. Taulukoon 14 on kerättyä rakentamisen eri vaiheissa huomioitavat asiat laadunvalvonnan ja raportoinnin helpottamiseksi. Laadunvalvonnasta ja raportoinnista vastaa Ramboll Finland Oy.

Taulukko 14. Kerättävä tieto ja huomioitavat asiat

<b>Kohde</b>	<b>Ennen rakentamista</b>	<b>Rakentamisen aikana</b>	<b>Rakentamisen jälkeen</b>
Materiaalit	- laatu - homogeenisuus - vesipitoisuus - materiaalinäytteet - varastointi - logistiikka - valokuvaus	- käsiteltävyys - rakennettavuus - toteutuneet tiheydet ja kerrospaksuudet - valokuvaus - käytettyjen materiaalien määrä (kerroskohtaisesti)	- valokuvaus - yleinen tarkkailu

Ympäristö	- lämpötila - tuulisuus / pölyäminen	- lämpötila - tuulisuus / pölyäminen	- lämpötila - sadanta - tuulisuus - haihdunta
Kalusto	- Kaluston toimivuutta tarkasteltava kokoajan - Materiaalien sekoitukseen käytettävä kaluston toimivuus		

Koerakentamisesta ja sen aikana kerätyistä tiedoista laaditaan raportti. Raportti tulee sisältämään koerakentamisen eri vaiheet, taulukossa 14 esitetyt huomioon otavat asiat, laadunvalvontaa, laitekehitystarpeita ja mahdollisia kehitysideoita. Laadittu raportti tarkistetaan koerakentamisen jälkeen pidettävässä yhteenvetopalaverissa. Astiakokeista analysoitavat parametrit ja niiden tulokset raportoidaan erikseen. Asioiden helpottamiseksi ympäristökelpoisuusraportointi tullaan tekemään puolivuositain..

## 7 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Suomen kaivosteollisuudessa muodostuu vuosittain suuret määrät rikastushiekkaa, jotka varastoidaan 1 – 90 hehtaarin kokoisiin rikastushiekka-altaisiin. Rikastushiekka-altaan täytyessä tai kaivostoiminnan loppuessa rikastushiekka-altaat tulee peittää joko kuiva- tai märkäpeitolla. Laajojen pinta-alojen vuoksi kuivapeittoihin kuluu valtavat määrät luonnon neitseellisiä materiaaleja, kuten moreenia. Esimerkiksi 60 hehtaarin kokoisen alueen peittämiseen tarvitaan noin 600 000 m<sup>3</sup> maa-ainesta. Luonnonmateriaalien ja rikastushiekkojen jalostaminen teollisuudessa muodostuvilla uusiomateriaaleilla säästäisi huomattavat määrät uusiutumattomia luonnonvaroja, tehostaisi uusiomateriaalien hyötykäyttöä ja pienentäisi kaivosten sulkemiskustannuksia.

Uusiomateriaalien hyödyntämistä rikastushiekka-altaiden peiterakenteissa on tutkittu teknisten ominaisuuksien ja ympäristökelpoisuuden tutkimuksilla. Teknisissä laboratoriokokeissa ei pyritty saavuttamaan materiaaleille tiettyä vedenläpäisevyyttä, koska rikastushiekka-altaille ei määritetty vedenläpäisevyyksien ohjearvoja kuten esimerkiksi kaatopaikkarakenteille. Laboratoriokokeissa on kuitenkin pyritty selvittämään minkälaisilla ratkaisuilla päästään noin 10<sup>-7</sup> – 10<sup>-9</sup> m/s vedenläpäisevyyksiin. Taulukkoon 15 on kerätty eri materiaalivaihtoehdoilla saavutettavia vedenläpäisevyyksiä. Vedenläpäisevyydet on kerätty luvun 5.1 laboratoriotuloksista.

Taulukko 15. Eri materiaalisovellutuksilla saavutettavia vedenläpäisevyyksiä.

<b>Läpäisevyys [m/s]</b>	<b>Pyhäsalmen materiaalit</b>	<b>Hituran materiaalit</b>	<b>Uusiomateriaali- seokset</b>
10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-7</sup> m/s	*Rikastushiekka + LT	*Rikastushiekka + tuhka *Rikastushiekka+ valimohiekka 10–20 % *Rikastushiekka + KS *Rikastushiekka + kipsi *Moreeni	
10 <sup>-7</sup> – 10 <sup>-8</sup> m/s	* Rikastushiekka + LT * Rikastushiekka + LT + kipsi * Moreeni + LT	*Moreeni + LT *Moreeni + KS (20 %) *Rikastushiekka + valimohiekka (30 %) *Rikastushiekka + LT+ valimohiekka	*LT + KS 5:5
10 <sup>-8</sup> – 10 <sup>-9</sup> m/s	* Rikastushiekka * Moreeni * Moreeni + LT C 15 % * Moreeni + LT A 10 %	*Moreeni +valimohiekka	* LT J + KS E 3:7
< 10 <sup>-9</sup> m/s	* Moreeni + valimohiekka		*KS + valimohiekka

Laboratoriokokeiden perusteilla rikastushiekka-altaiden peiterakenteisiin löytyi monipuolisesti erilaisia materiaalisovelluksia. Laboratoriotulosten, materiaalien saatavuuden, varastoinnin ja logistiikan huomioon ottaen, uusiomateriaaleista tuhka on potentiaalisin vaihtoehto runkomateriaalien jalostamiseen sekä vähentämään sulfidirikastushiekkan happamoitumista ja haitta-aineiden liukenemistä. Tuhkan hyödyntämisessä tulee kuitenkin huomioida tuhkalaatujen vaihtelut, sillä tuhkan laatu voi vaihdella vuodenaikojen, polttoaineiden ja prosessissa tehtyjen muutoksien sekä esiintyvien erojen seurauksina. Tuhkat kuten muutkin uusiomateriaalierät poikkeavat ominaisuuksiltaan aina toisistaan, jolloin täsmälleen samoja tuloksia ei saada eri materiaalieristä.

Tuoreen lentouhkan ja kasatuhkan välillä oli suuria eroavaisuuksia materiaalin teknisissä ominaisuuksissa ja ympäristökelpoisuuksissa. Tuoreella lentotuhkalla saatiin parempia teknisiä ominaisuuksia, mutta ympäristökelpoisuuskokeissa kasatuhka oli yleisesti lentotuhkaa parempi. Kasatuhkan heikommat tekniset ominaisuudet ja alhaisemmat haitta-aineliukoisuudet voivat johtua varastoinnin aikana tapahtuneista fysikaalisista ja kemiallisista muutoksista. Kasavarastoidusta tuhkasta helposti liukenevat haitta-aineet ovat jo voineet liueta pois, jolloin tuhkan haitta-ainepitoisuudet ovat tuoretuhkaa pienemmät. Lisäksi stabiloinnin aikana on voinut tapahtua kemiallisia reaktioita, jotka ovat voineet vaikuttaa haitta-aineiden liukoisuuksiin. Tuhkien saatavuuden, käsittelyn ja välivarastoinnin huomioon ottaen kasavarastoidun lentotuhkan hyödyntäminen on kuitenkin kuivaa lentotuhkaa helpompaa.

Laboratoriotulokset osoittavat, että runkomateriaalien jalostaminen uusiomateriaaleilla ei ole aina perusteltua. Myöskään uusiomateriaalin määrän kasvattaminen jalostettavassa runkomateriaalissa ei tuottanut automaattisesti suurempaa hyötyä. Laboratoriokokeissa havaittiin useasti, että esimerkiksi tuhkan määrän lisääntyessä yli 10 – 15 % runkoaineen märkämässasta, sen tekniset ja ympäristölliset hyödyt pienenevät. Myös uusiomateriaalien tuotantolaitosten välillä oli suuria eroja, jotka vaikuttivat materiaalien käyttäytymiseen ja niiden teknisiin ominaisuuksiin runkomateriaaleissa. Esimerkiksi eri voimalaitosten tuhkat vaikuttivat eri tavoilla runkomateriaalien vedenläpäisevyyksiin ja puristuslujuuksiin. Muissa uusiomateriaaleissa laatujen väliset erot jäivät laboratoriotulosten perusteilla vähäisiksi.

Ympäristökelpoisuustutkimusten perusteilla rikastushiekkojen haitta-aineliukoisuuksiin vaikuttaa käytetyn tuhkan lisäksi myös rikastushiekan ominaisuudet. Hituran rikastushiekan jalostaminen kasa- ja lentotuhkalla lisäsi rikastushiekan haitta-aineliukoisuuksia. Nousseet haitta-aineiden liukoisuudet voivat johtua ainakin osittain tuhkan sisältämistä haitta-aineista. Lisäksi Hituran rikastushiekat ovat jo entuudestaan neutraaleja tai hieman emäksisiä, jolloin tuhkan pH:n säädöllä ole vaikutusta haitta-aineiden pidättämiseen ja liukoisuuksien pienentämiseen. Sen sijaan Pyhäsalmen sulfidipitoisten rikastushiekkojen jalostaminen tuhkillä lasi huomattavasti haitta-aineiden liukoisuuksia. Tämä johtunee tuhkan kyvystä neutralisoida hapanta rikastushiekkaa.

Laboratoriokokeissa kuitusaven tekniset edut jäivät heikoksi. Tosin kuitusaven hyödyntäminen tuo kappaleelle yleensä joustavuutta, sillä kaikki kuitusavea sisältävät koekappaleet eivät murtuneet kunnolla puristuskokeen aikana. Runkoaineen jalostaminen valimohiekalla pienensi huomattavasti runkomateriaalien vedenläpäisevyyksiä muutamassa tapauksessa, joka johtunee valimohiekan hienoainespitoisuudesta ja hiekan sisältämästä bentoniitista. Valimohiekan saatavuus on kuitenkin haasteellista näin suurille massamäärille ja logistiikka kallista pitkien etäisyyksien vuoksi. Nämä huomioiden, valimohiekan hyödyntäminen rikastushiekka-aitaiden peiterakenteissa ei ole potentiaalisin vaihtoehto.

Laboratoriokokeiden lisäksi uusiomateriaalit tulee testata kenttäkokeissa, jossa ilman lämpötila, kosteus, sadanta ja haihdunta vaihtelevat. Myös vuodenaikojen vaihtelut ja niiden vaikutukset materiaaleihin on tärkeä tietää. Tämän vuoksi uusiomateriaalit testataan astiakokeilla keväällä 2016 sekä myöhemmin laajemmilla pilottikokeilla. Kenttätestien yhteydessä materiaalien rakennettavuutta, käsiteltävyyttä, logistiikkaa ja muita rakentamiseen liittyviä asioita tulee tutkia ja tarkkailla. Koerakentamisessa tulee huomioida myös materiaalien saavutettu tiiviysaste, sillä kenttäolosuhteissa ei päästä samaan tiiviyteen kuin laboratoriossa tehdyissä tiivistyskokeissa. Tiivistyskokeessa sylinterissä oleva materiaali ei pääse pakenemaan tiivistämisen aikana, mutta kenttäolosuhteissa materiaali voi käyttäytyä toisin. Lisäksi tiivistettävä materiaali ei ole kenttäolosuhteissa sen optimivesipitoisuudessa, jolloin saavutettu tiiveys jää maksimikuivairtoihyettä pienemmäksi. Uusiomateriaalien hyödyntämisessä tulee tarkastella myös materiaalien routakestävyyttä ja sen jäätymis-sulamiskestävyyttä eli pitkäaikaiskestävyyttä ja -toimivuutta. Materiaalin kuivuessa tai jäätyessä materiaaliin

voi muodostua halkeamia, jotka vaikuttavat materiaalin vedenläpäisevyyteen, puristuslujuuteen ja liukoisuuteen. Tämän vuoksi uusiomateriaalien hyödyntäminen edellyttää jatkotutkimuksia erityisesti materiaalien jäätymisrasitusten osalta.

Yksi tärkeä jatkotutkimustarve on rakenteiden ympäristökelpoisuus, jota tullaan tutkimaan keväällä 2016 aloitettavassa astiakokeissa. Ympäristökelpoisuutta tullaan tutkimaan koerakenteiden läpi suotautuvista vesistä.

## LÄHTEET

Belvedere Mining Oy, Hituran kaivos (2012) Kaivannaisjätteen jätehuoltosuunnitelma ja rikastehiekka-alueen patoturvallisuusasiakirja.

Bjelkevik Annika (2005) Water cover closure design for tailings dams, State of the art report. [viitattu: 18.1.2016] Saatavissa: <http://epubl.ltu.se/1402-1528/2005/19/LTU-FR-0519-SE.pdf>

Carlsson Erik (2002), Sulphide-rich tailings remediated by soil cover - Evaluation of cover efficiency and tailings geochemistry, Kristineberg, northern Sweden. [viitattu: 17.1.2016] Saatavissa: <http://epubl.luth.se/1402-1544/2002/44/LTU-DT-0244-SE.pdf>

Finergy (2000) Tuhkarakentamisohje tie-, katu- ja kenttärakenteisiin, tuhkat hyötykäyttöön- projekti

Finncao Oy (2001), Finncao-kuitusavet pintarakenteiden tiivistekerroksissa, suunnittelu- ja mitoitusohje [viitattu: 25.2.2016] Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.metsatissue.com/contacts/mills/Documents/suunnittelu-ja-mitoitusohje-pintarakenteiden-tiiviskerroksissa.pdf>

Energiateollisuus (2016) Polton sivutuotteet - poltossa syntyvät sivutuotteet [viitattu 8.2.2016] Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ymparisto-ja-kestava-kehitys/ymparistovaikutukset/polton-sivutuotteet>

Heikkinen. P.M. ja Noras. P. (2005) Kaivoksen sulkemisen käsikirja, kaivostoiminnan ympäristötekniikka. [viitattu: 20.2.2016] Saatavissa: [http://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej\\_053.pdf](http://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_053.pdf)

Kauppila. P., Räisänen. M. & Myllyoja. S. (2011) Metallikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt. Suomen ympäristö 29/2011. [viitattu 16.12.2015] Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37056/SY\\_29\\_2011.pdf?sequence=](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/37056/SY_29_2011.pdf?sequence=)

Kiviniemi. O., Sikiö. J., Jyrävä. H., Ollila. S., Autiola. M., Ronkainen M., Lindroos. N., Lahtinen. P. ja Forsman. J. (2012) Tuhkarakentamisen käsikirja: energiatuotannon

tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. [viitattu: 12.2.2016] Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen\\_kasikirja.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf)

Korpijärvi. K., Mroueh. U., Merta. E., Laine-Ylijoki. J., Kivikoski. H., Järvelä. E., Wahström. M. & Mäkelä. E. (2009), Energiatuotannon tuhkien jalostaminen maarakennuskäyttöön, VTT tiedotteita- research noter 2499 [viitattu: 26.8.2015] Saatavissa: pdf- tiedostona: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2499.pdf>

Lindroos N., Ronkainen M. & Järvinen K. (2016) Metsä- ja energiateollisuuden jätejakeiden ympäristökelpoisuus maarakentamisessa. Ympäristöministeriön raportteja 8/2016. [viitattu: 23.3.2016] Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/ym\\_metsa\\_ja\\_energiateollisuuden\\_jatejakeiden\\_ymparistokelpoisuus\\_maarakentamisessa\\_2016.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/ym_metsa_ja_energiateollisuuden_jatejakeiden_ymparistokelpoisuus_maarakentamisessa_2016.pdf)

Metsäteollisuus (2014), Metsäteollisuuden ympäristötilastot 2013 [viitattu 25.8.2015] Saatavissa pdf- tiedostona: <http://www.metsateollisuus.fi/mediabank/4775.pdf>

Mäkelä H & Höynälä H (2000) Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa, materiaalit ja käyttökohteet. Teknologia katsaus 91/2000. ISBN 952-9621-97-3

Pohjala M (2015) Energiateollisuus ry, Tuhkien tilastokysely 2014 [viitattu 8.2.2016] Saatavissa: [http://energia.fi/sites/default/files/tuhkien\\_tilastokysely\\_2014\\_loppuraportti.pdf](http://energia.fi/sites/default/files/tuhkien_tilastokysely_2014_loppuraportti.pdf)

Pyhäsalmi Mine Oy (2014), Kaivannaisjätteen jätehuoltosuunnitelma [viitattu: 2.11.2015].

Ramboll finland Oy (2012) LIFE 12 ENV/FI/000592 Technical application forms, Part C – detailed technical description of the proposed actions [viitattu 18.12.2015]

Ramboll Finland Oy (2015) UPAMIC- LIFE12 ENV/FI/000592, Taustat ja tavoitteet [viitattu: 24.8.2015] Saatavissa: <http://projektit.ramboll.fi/life/upamic/projekti.htm>

Ramboll Finland Oy (2014) Hitura laboratoriotestien tulokset, raportti (ympäristökelpoisuus),



Ramboll Finland Oy (2014) Hituran life- hankkeeseen liittyvä materiaalitestausta, tekniset ominaisuudet, tutkimuksen 2-vaihe: tarkentavat testit ja eri materiaalien keskinäiset erot.

Ramboll (2008) UUMA – inventaarioprojektin loppuraportti, UUMA- materiaallinen ja –rakenteiden inventaari [viitattu 25.8.2015] Saatavissa pdf- tiedostona:  
[http://projektit.ramboll.fi/uuma/pages/UUMA-inv-raportti\\_\(12-2008\).pdf](http://projektit.ramboll.fi/uuma/pages/UUMA-inv-raportti_(12-2008).pdf)

Rantamäki M., Jääskeläinen R. & Tammirinne M. 2004. Geotekniikka, 20 muuttumaton painos. ISBN 951-672-257-1 , 307s.

Sipilä Pekka (1996) Kaivosten jätealueiden kunnostaminen, Yleinen osa. Sulfidimalmikaivosten rikastamoiden jätealueista aiheutuvien ympäristöongelmien syyt ja niiden ehkäiseminen. Geologian tutkimuskeskus [viitattu 16.12.2015] Saatavissa:  
[http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/ka61\\_97\\_1.pdf](http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/ka61_97_1.pdf)

Sutela T., Vuori K-M., Louhi P., Hovila K., Jokela S., Karjalainen S., Keinänen M., Rask M., Teppo A., Urho L., Vehanen T., Vuorinen P. & Österholm P. (2012), Suomen ympäristökeskus, Happamien sulfaattimaiden aiheuttamat vesistövaikutukset ja kalakuolemat Suomessa. Saatavissa:  
[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38771/SY\\_14\\_12\\_Happamat\\_sulfaattim\\_aat.pdf?sequence.com](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38771/SY_14_12_Happamat_sulfaattim_aat.pdf?sequence.com)

Tilastokeskus (2016), Kivihiilen kulutus [viitattu 8.2.2016] Saatavissa:  
[http://www.stat.fi/til/kivih/2015/12/kivih\\_2015\\_12\\_2016-01-28\\_fi.pdf](http://www.stat.fi/til/kivih/2015/12/kivih_2015_12_2016-01-28_fi.pdf)

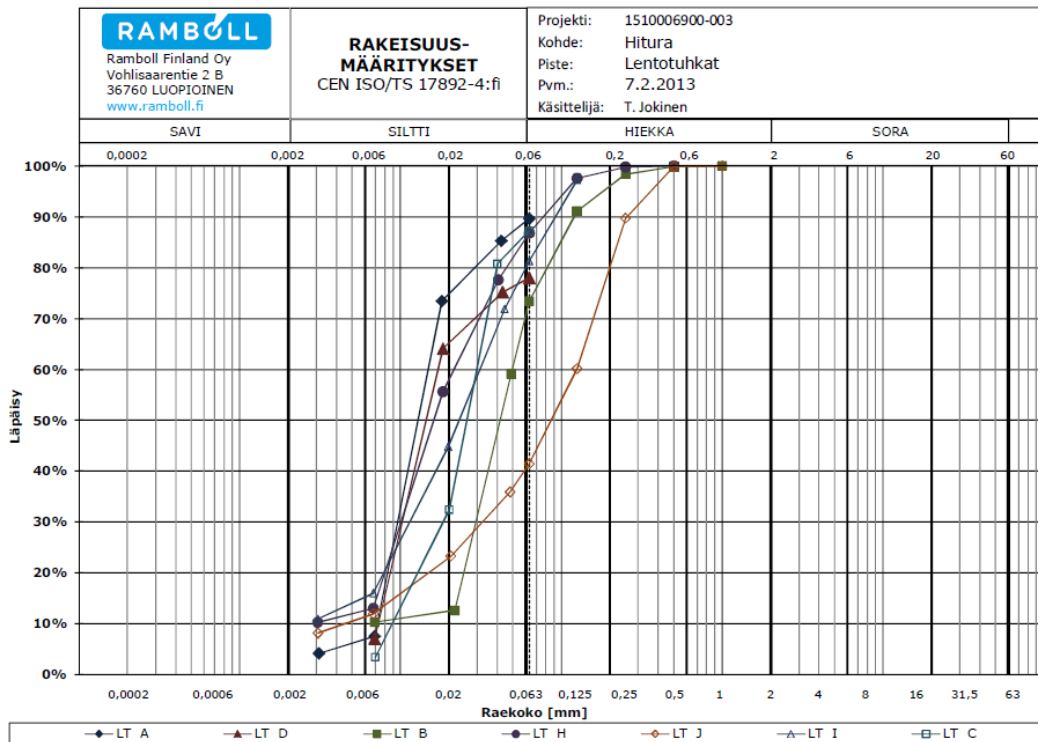
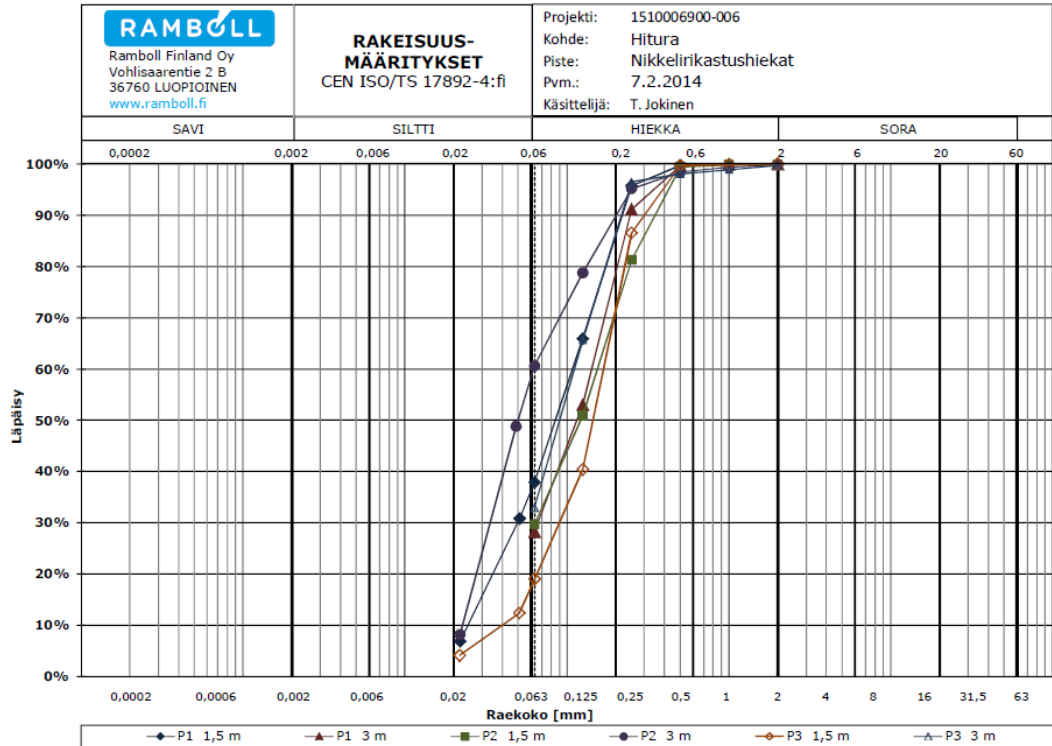
Toropainen Vesa (2006) Geologian tutkimuskeskus, Yhteenveto sulfidimalmikaivostoiminnasta Suomessa ja toiminnasta muodostuvista sivutuotteista sekä niiden ympäristövaikutuksista [viitattu: 14.12.2015] Saatavissa:  
[http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/s49\\_0000\\_2006\\_2.pdf](http://tupa.gtk.fi/raportti/arkisto/s49_0000_2006_2.pdf)

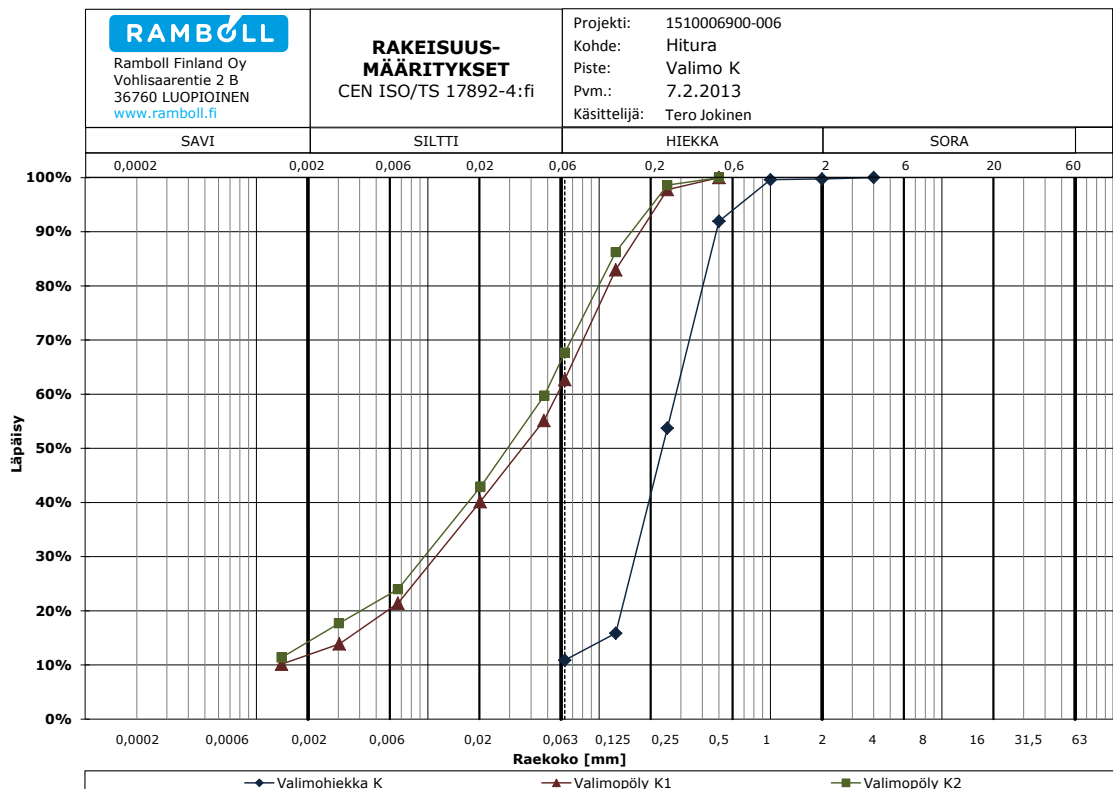
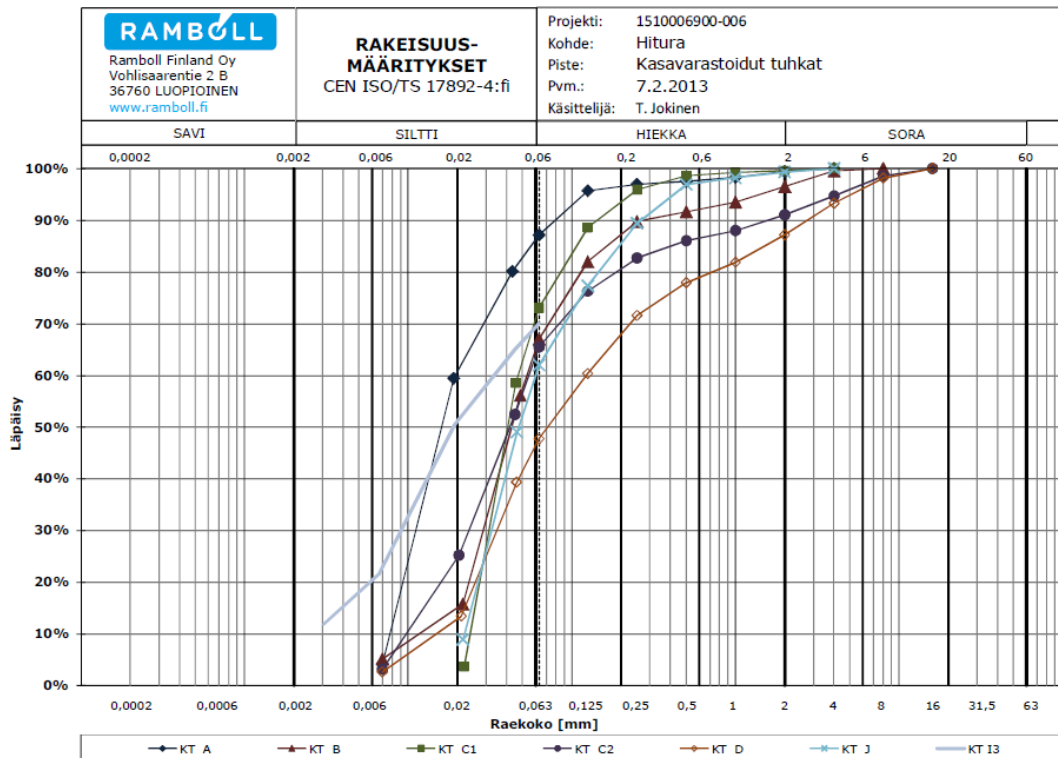
Työ- ja elinkeinoministeriö (2015) Kaivosteollisuus [viitattu 28.1.2016] Saatavissa:  
<https://www.tem.fi/yritykset/kaivosteollisuus>

Wahlström M., Laine-Ylijoki J., Vestola E., Vaajasaari K. & Joutti A.  
Ympäristöhallinnon ohjeita 2/2006 – Jätteiden kaatopaikkakelpoisuuden toteaminen.  
[viitattu 26.1.2016] Saatavissa: <http://www.ym.fi/download/noname/%7BF83F4787-0B71-4C29-A4BE-8390DEEB036A%7D/37516>

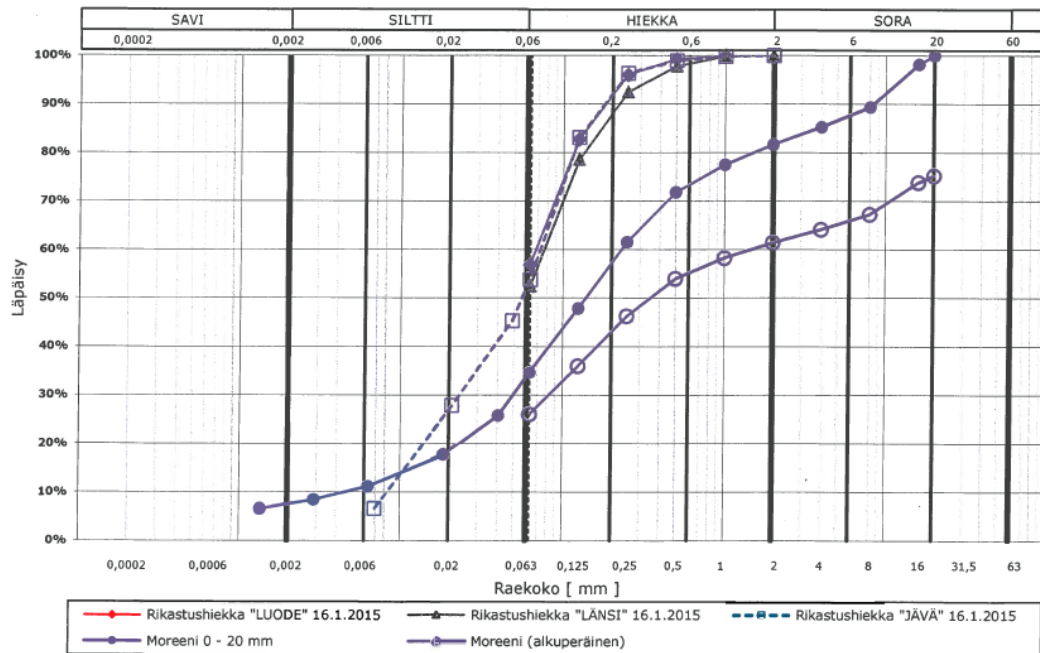
# LIITTEET

Liite 1, Rakeisuudet





## Pyhäsalmen materiaalit



Liite 2. Laboratoriotulokset, tekniset ominaisuudet (Hituran nikkelirikastushiekka ja moreeni runkoaineena)

Lisäkomponentti	tiivistetyn kpl:n vesipitoisuus ja tiheys (% / kg/m <sup>3</sup> )	vedenläpäisevyys [m/s]	puristuslujuus [kPa]
Ni-rkh	16 / 1727	1,5E-06	70
LT A 10 %	17,5 / 1692	3,7E-07	140
LT A 20 %	17 / 1690	2,2E-07	310
LT A 30 %	17 / 1654	1,8E-07	710
LT I 15 %	16 / 1749	8,4E-07	90
LT H 15 %	17 / 1689	3,2E-07	250
LT J 15 %	17 / 1683	1,6E-06	100
LT C 15 %	17 / 1705	4,1E-07	240
LT D 15 %	17 / 1750	3,2E-07	230
KT C 10 %	18 / 1698	8,6E-07	100
KT C 20 %	20 / 1698	2,8E-07	90
KT A 15 %	19 / 1611	1,1E-06	-
KT A 25 %	21 / 1545	7,8E-07	-
LT D + valimohiekka L 10+5 %	17 / 1745	1,2E-07	150
LT D + valimohiekka L 15+10 %	16,5 / 1750	1,2E-07	150
LT D + valimohiekka K 15+10%	16,5 / 1758	9,9E-08	200
Valimohiekka L 10 %		5,3E-07	70
Valimohiekka K 20 %		6,9E-07	80
Valimohiekka K 30 %		1,0E-07	80
KS E 10 %	21 / 1587	7,1E-07	80
KS E 20 %	25 / 1495	5,2E-07	80
KS E 30 %	29 / 1386	4,1E-07	80
KS E + LT J 7.5+7.5 %		7,9E-07	90
KS F 15 %	23 / 1536	4,9E-07	90
LT A + kipsi G 10+5 %		4,6E-07	210
LT A + kipsi G 10+10 %		4,5E-07	200
LT I + kipsi G 10+5 %		7,2E-07	90
LT C + kipsi G 10+5 %		3,3E-07	220
KT C + kipsi G 10+10 %		1,1E-06	100
kipsi G 10 %		8,4E-07	90
kipsi G 20 %		9,5E-07	90
Valimohiekka L 10 %		5,3E-07	70
Valimohiekka K 20 %		6,9E-07	80
Valimohiekka K 30 %		1,0E-07	80

<b>Lisäkomponentti</b>	<b>tiivistetyn kpl:n vesipitoisuus ja tiheys (%/ kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>vedenläpäisevyys [m/s]</b>	<b>puristuslujuus [kPa]</b>
Moreeni 1	10 / 2033	4,5E-07	70
LT H 10 %	11 / 1997	4,8E-08	190
LT H 20 %	13,5 / 1883	4,6E-08	220
LT H 30 %	16 / 1769	6,5E-08	310
LT C 20 %	13,5 / 1893	4,5E-08	240
LT A 20 %	14 / 1868	1,8E-08	290
KS F 10 %		2,7E-07	60
KS F 20 %		6,3E-08	70
LT A + kipsi G 10+10 %		8,0E-08	130
Kipsi G 20 %		9,4E-07	90
Valimohiekka K 10 %	9,5 / 2054	4,1E-09	80
Valimohiekka K 30 %	10 / 2024	5,4E-09	100
Valimohiekka K + LT H 20+10 %		1,4E-08	160

Liite 3, Laboratoriotulokset, tekniset ominaisuudet (Pyhäsalmen rikastushiekka ja moreeni runkoaineena)

Lisäkomponentti	tiivistetyn kpl:n vesipitoisuus ja tiheys (% / kg/m <sup>3</sup> )	Vedenläpäisevyys [m/s]	Puristuslujuus [kPa]
rkh	16 / 2220	2,6*10 <sup>-9</sup>	200
LT C 5 %	17,1 / 2090	-	-
LT C 10 %	18,2 / 2000	1,7*10 <sup>-8</sup>	390
LT C 20 %	19,2 / 1870	8,2*10 <sup>-8</sup>	520
LT A 10 %	9,7 / 2020	3,7*10 <sup>-8</sup>	320
LT B+ valimohiekka 10%+3%	18 / 2060	2,9*10 <sup>-8</sup>	230
LT B+ valimohiekka 10%+5%	17,5 / 2070	2,2*10 <sup>-8</sup>	240
LT H + valimohiekka 10%+5%	17,5 / 2070	2,0*10 <sup>-8</sup>	410
LT C+ kipsi 10%+5%	18 / 2030	4,9*10 <sup>-8</sup>	390
LT C+ kipsi 10%+10%	18 / 1970	1,3*10 <sup>-7</sup>	400
LT C+ kipsi+ kalkki 10%+5%+3%	19 / 1870	1,8*10 <sup>-7</sup>	530
LT C+ kipsi + kalkki 10%+5%+5%	19,5 / 1820	2,5*10 <sup>-7</sup>	710
LT C+ kipsi+ kalkki 10%+10%+3%	19,5 / 1850	1,6*10 <sup>-7</sup>	570
LT J+ kipsi+ kalkki 10%+5%+3%	18,5 / 1960	1,3*10 <sup>-7</sup>	440
LT J+ kipsi+ kalkki 10%+10%+3%	18,5 / 1920	1,6*10 <sup>-7</sup>	480
kipsi + kalkki 10%+3%	18 / 1940	4,8*10 <sup>-7</sup>	310

Lisäkomponentti	tiivistetyn kpl:n vesipitoisuus ja tiheys (% / kg/m <sup>3</sup> )	Vedenläpäisevyys [m/s]	Puristuslujuus [kPa]
Mr	8 / 2130	2,4*10 <sup>-9</sup>	240
LT C 5 %	9 / 2090	5,4*10 <sup>-9</sup>	360
LT C 10 %	10,2 / 2000	2,8*10 <sup>-8</sup>	350
LT C 20 %	11,7 / 1870	8,8*10 <sup>-8</sup>	300
LT A 10 %	9,7 / 2020	5,7*10 <sup>-9</sup>	410
LT C+ kipsi 10%+5%	11,5 / 1970	1,3*10 <sup>-8</sup>	280
LT C+ kipsi 10%+10%	12,5 / 1900	1,8*10 <sup>-8</sup>	210
LT C+ kipsi+ kalkki 10%+5%+3%	13,3 / 1890	7,5*10 <sup>-8</sup>	2660
LT C+ kipsi+ kalkki 10%+5%+5%	14 / 1860	4,5*10 <sup>-8</sup>	2470
LT C+ kipsi+ kalkki 10%+10%+3%	14 / 1850	8,6*10 <sup>-9</sup>	2600
LT J+ kipsi+ kalkki 10%+5%+3%	12,8 / 1910	1,3*10 <sup>-9</sup>	1950
LT J+ kipsi+ kalkki 10%+10%+3%	13,3 / 1880	3,5*10 <sup>-9</sup>	2340
Valimohiekka 5 %	8,5 / 2110	6,0*10 <sup>-10</sup>	290
Valimohiekka 10 %	9 / 2100	8,7*10 <sup>-10</sup>	230



Liite 4, Laboratoriotulokset uusiomateriaalit, tekniset ominaisuudet

Komponentit ja niiden massaosuudet	tiivistetyn kpl:n vesipitoisuus ja tiheys (% / kg/m <sup>3</sup> )	vedenläpäisevyys [m/s]	puristuslujuus [kPa]
LT A + KS E 5:5	49,6 / 966	6,5*10 <sup>-8</sup>	
LT A + KS F 5:5	< 50 / > 920	3,6*10 <sup>-8</sup>	
KT A + KS E 5:5	77 / 795	3,9*10 <sup>-8</sup>	
LT B + KS E 5:5	49,6 / 1023	2,6*10 <sup>-8</sup>	210
LT B + KS E 3:7	55 / 973	1,7*10 <sup>-8</sup>	60
LT J + KS E 5:5	57,3 / 969	3,8*10 <sup>-8</sup>	70
LT J + KS E 3:7	93,5 / 711	4,9*10 <sup>-9</sup>	60
LT I + kipsi G 5:5		1,4*10 <sup>-6</sup>	130
LT I + kipsi G 7:3		1,0*10 <sup>-6</sup>	130
LT A + kipsi G 7:3		6,3*10 <sup>-7</sup>	1900
KS E + valimohiekka K 10 %	153 / 490	1,1*10 <sup>-9</sup>	
KS E + valimohiekka K 15 %	138 / 525	1,0*10 <sup>-9</sup>	50
KS E + valimohiekka K 25 %	116 / 611	7,7*10 <sup>-10</sup>	50
KS F + valimohiekka K 10 %	94,7 / 686	6,3*10 <sup>-10</sup>	
KS F + valimohiekka K 15 %	87,5 / 730	4,8*10 <sup>-10</sup>	
KS F + valimohiekka K 25 %	75,8 / 799	8,6*10 <sup>-10</sup>	70

Liite 5, Hituran koekappaleiden haitta-aineliukoaisuudet [mg/kg] (kumulatiivisen L/S-suhteen ollessa 10)

Haitta-aine	Ni	Au	Au+Ni	Mr+ Au+Ni	AuKT +Ni	AuLT +Ni	NiLT+Ni	KalkkiStabAu	KalkkiStabAu + Au+Ni
Arseeni	0,005	17	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,085	0,005
Barium	0,1	0,054	0,085	0,072	0,118	0,175	0,212	0,86	0,421
Kadmium	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,0021	0,002	0,002
Kromi	0,02	0,02	0,02	0,02	0,020	0,02	0,02	0,023	0,02
Kupari	0,015	0,017	0,015	0,015	0,016	0,016	0,015	0,015	0,016
Elohopea	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Molybdeeni	0,005	0,101	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,353	0,011
Nikkeli	0,676	0,012	0,838	0,524	1,31	1,38	1,24	0,01	1,03
Lyijy	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,026	0,005
Antimoni	0,005	0,063	0,203	0,114	0,111	0,198	0,238	0,005	0,009
Seleeni	0,024	0,023	0,025	0,019	0,039	0,061	0,05	0,05	0,08
Sinkki	0,054	0,05	0,505	0,431	0,388	0,015	0,398	0,308	0,115
Kloridi	849	30	875	485	1 120	1 358	1 668	24,8	1 079
Fluoridi	5	5	5	5	14,7	14,8	14,9	9,9	9,9
Sulfaatti	6146	87	5 777	3 706	9 808	11 802	14 893	24,8	9 182
DOC	90	104	39	25	16,8	22	16,8	105,4	29,9

Liite 6, Kaatopaikka raja-arvot ja Pyhäsalmen materiaalien haitta-aineiden liukoisuudet [mg/kg] (kumulatiivisen L/S-suhteen ollessa 10)

Haitta-aine	Pysyvä jäte	Tavanomainen jäte	Vaarallinen jäte	Mr + valimohiekka 5%	Rikastushiekka	Rikastushiekka+ 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	<b>1,5</b>	0,3	0,2
Barium, Ba	20	100	300	0,7	0,2	0,2	0,1
Kadmium, Cd	0,04	1	5	<b>0,05</b>	<b>1,5</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>
Kromi, Cr	0,5	10	70	<0,1	<b>2,8</b>	<b>0,8</b>	0,1
Kupari, Cu	2	50	100	<b>4,8</b>	<b>76</b>	<b>59</b>	<b>29</b>
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	<b>0,4</b>	<b>1,6</b>	<b>1,6</b>	<b>1,6</b>
Lyijy, Pb	0,5	10	50	<0,1	0,3	<0,1	<0,1
Antimoni, Sb	0,06	0,7	5	0,04	<b>0,06</b>	0,02	<0,01
Seleeni, 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	<b>10</b>	<b>500</b>	<b>490</b>	<b>530</b>
Kloridi, Cl	800	15000	25000	20	130	62	27
Sulfaatti, SO4	1000	20000	50000	550	<b>99000</b>	<b>29000</b>	<b>30000</b>
Fluoridi	10	150	500	<5	<b>120</b>	<b>35</b>	<b>25</b>
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



Liite 7, Astiakokeiden ohjeistus

Vastaanottaja: **Pyhäsalmi Mine Oy**

Asiakirjatyyppe: **Astiatestien ohjeistus / Pyhäsalmi Mine Oy**

Päivämäärä: **11.11.2015**

**UPACMIC**

**KOETOIMINTA 2015, ASTIATESTIT**

**PYHÄSALMEN MATERIAALEILLA TO-  
TEUTETTAVAN KOERAKENTAMISEN PE-  
RIAATTEET JA TYÖN OHJEISTUS**

**EU-LIFE**

Tätä projektia rahoittaa EU-Life+ -ohjelma

LIFE12 ENV/FI/000592 UPACMIC



Päivämäärä 11.11.2015

Laatija Noora Karjalainen

Tarkastaja Merja Autiola ja Harri Hyrävä

Kuvaus Astiatestien ohjeistus / Pyhäsalmi Mine Oy

Viite 1510008900-008

## SISÄLTÖ

<b>1.</b>	<b>Johdanto</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Astiatestien sijoittuminen</b>	<b>5</b>
<b>3.</b>	<b>Käytettävät materiaalit</b>	<b>6</b>
3.1	Materiaalit	6
3.2	Materiaalien määrät	8
3.3	Materiaalien kuljetus	9
<b>4.</b>	<b>Käytettävät välineet</b>	<b>11</b>
<b>5.</b>	<b>Astiatestien rakenteet</b>	<b>17</b>
<b>6.</b>	<b>Rakentaminen</b>	<b>22</b>
6.1	Rakentamisen kulku	22
6.2	Rakentamisessa huomioonotettavat asiat	23
6.3	Vastuunjako	26
<b>7.</b>	<b>Erikoistilanteet</b>	<b>27</b>
7.1	Materiaalien testaaminen	27
7.2	Koeastioiden kastelu	27
<b>8.</b>	<b>Kooste kerättävästä tiedosta</b>	<b>28</b>
8.1	Kerättävä tieto rakentamisen aikana	28
8.2	Kerättävä tieto rakentamisen jälkeen	29
<b>9.</b>	<b>Tekniset seurantatiedot</b>	<b>30</b>
9.1	Ennen rakentamista huomioitavat asiat	30
9.2	Rakentamisen aikana huomioitavat asiat	31
9.3	Rakentamisen jälkeen tarkasteltavat asiat	32
<b>10.</b>	<b>Seurantatiedot ympäristökelpoisuus</b>	<b>33</b>
<b>11.</b>	<b>Raportointi</b>	<b>38</b>

## LIITTEET

- Liite 1 Käytettävien materiaalien ominaisuudet, ennakkotieto
- Liite 2 Koerakenteet
- Liite 3 Arvioidut materiaalmäärät
- Liite 4 Vesinäyte määrien arviointi
- Liite 5 Lomakkeet ja ohjeet vesinäytteenottoa varten
- Liite 6 Koerakennemateriaalien näytteenotto
- Liite 7 Kerättävä tieto rakentamisen aikana
- Liite 8 Koerakennekohtaiset koontilomakkeet

## 1. JOHDANTO

Keväällä 2016 toteutetaan UPACMIC-projektin puitteissa astiatestejä Pyhäsalmen kaivoksella. Astiatestien materiaaleina käytetään kaivoksen rikastushiekkvoja sekä materiaaleja, joilla pyritään vaikuttamaan happoa tuottavan rikastushiekan ominaisuuksiin.

Koerakentaminen toteutetaan 10 m<sup>3</sup> kokoisina astiatesteinä, joita tehdään yhteensä 10 kpl. Koerakentamisen tavoitteena on selvittää aiemmin UPACMIC- hankkeen puitteissa sekä kanadalaisen konsultin (KCB) toimesta testattujen materiaaliratkaisujen toimivuutta käytännön olosuhteissa. Testauksen painopisteenä on valittujen materiaali-/rakenneratkaisujen vedenläpäisy- ja liukoisuusominaisuuksista jo olemassa olevan laboratoriotutkimustiedon täydentäminen. Lisäksi koerakentamisen yhteydessä kiinnitetään huomiota materiaalien käsiteltävyyteen ja varsinaisen rakentamistyön toteutukseen massojen logistiikka mukaan lukien. Koetoimintaan on valittu laboratoriossa testatuista materiaaleista tilaajan kannalta kiinnostavimmat ratkaisut ja ne, joista tarvitaan lisätietoa mahdollisesti myöhemmin toteutettavien laajempien pilottirakenteiden suunnittelua varten.

Varsinaisesta rakentamisesta, siihen liittyvistä kalustoista ja materiaaleista vastaa Suomen Maastorakentajat Oy. Teknisistä ohjeista, laadunvalvonnasta, raportoinnista ja ohjeistamisesta vastaa Ramboll Finland Oy. Pyhäsalmi Mine Oy on vastuussa vesinäytteiden keräämisestä sekä säilyttämisestä kunnes testi päätetään lopettaa. Lisäksi Pyhäsalmi Mine Oy vastaa vesinäytteiden analysoinnista, teettämisestä ja kustannuksista.

Ramboll Finland Oy:ssä projektipäällikkönä toimii Harri Jyrävä. Koetoiminnan toteuttamisen periaatteiden suunnitteluun ovat osallistuneet myös Noora Karjalainen ja Merja Autiola Ramboll Finland Oy:stä.



## 2. ASTIATESTIEN SIJOITTUMINEN

Astiatestien paikaksi on valittu Pyhäsalmen kaivosalue, jossa astiat voidaan sijoittaa helposti seurattavaan paikkaan ja jatkuvan seurannan alaiseksi. Kuvaan 1 on merkitty astiatestien sijainti punaisella pisteellä.



Kuva 1. Astiatestit Pyhäsalmen kaivoksella

## **3. KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT**

### **3.1 Materiaalit**

Astiatesteissä käytettävät materiaalit ovat eri erää kuin laboratoriokokeissa ja on siten ominaisuuksiltaan jonkin verran erilaisia. Tästä syystä rakentamisessa käytettävien materiaalien vesipitoisuudet ja tavoiteteiheydet on tarkistettava ennen rakentamisen aloittamista. Jokaisesta materiaalista otetaan vähintään 3 litran näyte, josta myöhemmin määritetään materiaalien haitta-aine kokonaispitoisuudet ja liukoisuudet.

Päämateriaalina kaikissa koerakenteissa käytetään Pyhäsalmen kaivoksen rikastushiekkaa (hieno ja karkea). Materiaalien ominaisuudet on kerätty liitteeseen 1.

#### **Rikastushiekka**

Astiatesteissä käytettävät rikastushiekat tulee Pyhäsalmen kaivokselta. Hyödynnettävät rikastushiekat on suositeltavaa kaivaa ja kasata aumoihin, jolloin se kuivuu jonkin verran ennen koerakentamista. Tällöin materiaalien käsittely ja tiivistäminen on helpompaa. Huomioitavaa on, että aumatut rikastushiekat altistuu hapettumiselle. Astiatesteissä käytetään kahta erilaista rikastushiekkaa, karkeaa ( $10^{-7}$  m/s) ja hienoa ( $10^{-9}$  m/s).

#### **Inerti kiviaines**

Jokaisen astian pohjalle rakennetaan 0,2 m hyvin vettäläpäisevä kerros "inertistä" kiviaineksesta. Kiviaineksen suositeltava raekoko on 10 – 15 mm ja kiviaineksen tulee olla pestyä ja mahdollisuuksien mukaan luonnon soraa vastaavaa. Myös murskattu kiviaines käy, mutta räjähdysainejäämien vuoksi kalliokiviaineksen käyttöä tulee välttää. Tässä tapauksessa Pyhäsalmen kaivoksen kiviaineista ei voida käyttää, sillä se voi sisältää jonkin verran räjähdysainejäämiä. Materiaalivalinnan tekevät Suomen Maastorakentajat.

Inerti tavara astian pohjalla toimii suodatinkerroksena, joka ohjaa veden rakenteesta pois.

## **Tuhka**

Astiatesteissä käytettävä tuhka tulee Oulun Energialta. Tuhkan pitää olla tuoretta ja kostutettua, tiivistetty kasatuhka ei sovellu testaukseen. Tuhka kostutetaan laitoksella noin 15% vesipitoisuuteen (veden määrä kuivamassasta). Veden lisääminen tapahtuu tuottajien toimesta.

Tuhkakerros toimii rakenteissa reaktiivisena kerroksena, jonka läpi suodattuvan veden pH oletettavasti muuttuu. Astiatesteihin tuhkakerros tiivistetään kevyesti.

## **Moreeni**

Astiatesteissä käytettävä moreeni on paikallista moreenia. Rakentamisen yhteydessä moreenin rakeisuus on huomioitava. Maksimi raekoko on 60 – 80 mm. Tätä suuremmat rakeet poistetaan esimerkiksi välpällä tai seulakauhalla.

## **Kipsi**

Kipsi tulee [REDACTED] varastoalueelta valmiiksi olevasta kipsikasasta. Kipsi tulee olla alle 12 kuukautta varastoitua kipsiä. Kipsin vesipitoisuus ja määrät tarkistetaan ja tarkentuvat kentällä. Kenttäkokeiden aikana kipsin työstettävyyys on huomioitava (sekoitus, kosteus). Maastorakentajat vastaavat materiaalin homogeenisuudesta.

## **Kasvukerros**

Kaikkiin koerakenteisiin tulee kasvukerros lukuun ottamatta koerakenteita 5 ja 8. Kasvukerros materiaalina käytetään paikallisen yrittäjän nurmikkomultaa. Huomioitavaa on, ettei kypsymisvaiheessa oleva kompostimulta sovellu tähän tarkoitukseen.

## **Siirtonurmi**

Kaikkiin koerakenteisiin tulee siirtonurmi lukuun ottamatta koerakenteita 5 ja 8.

## **Suodatinkangas**

Inerti materiaalin ja varsinaisten rakennekerrosten väliin tulee suodatinkangas estämään hienompien materiaalien sekoittumisen inerttikerrokseen.

### 3.2 Materiaalien määrät

Tarvittavat arvioidut materiaalmäärät on esitetty taulukossa 1 ja yksityiskohtaisemmin liitteessä 3. Materiaalmäärissä on otettu huomioon noin 20 % lisämateriaalitarve siltä varalta, että rakennekerroksia joudutaan työn aikana uusimaan. Esitetyn moreenin lisäksi, moreenia tarvitaan suuri määrä suojarakenteisiin (Kuva 8).

Taulukko 1. Arvioidut materiaalmäärät (HUOM ! Arvioita)

<b>Materiaali määrät</b>	<b>kuivamassa [t]</b>	<b>arvioitu vesipitoisuus [%]</b>	<b>märkämassa [t]</b>
moreeni		8	12
rikastushiekka (hieno)	81		95
rikastushiekka (karkea)	56		66
kipsi	8,2	20 - 30	11
tuhka	2	15	2,5
kasvukerros	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa
inertti	ei tietoa	ei tietoa	ei tietoa

Taulukossa 2 koerakentamisessa tarvittavia muita materiaaleja.

Taulukko 2. Muut materiaalit.

<b>Muut materiaalit</b>	<b>Määrä</b>	<b>Yksikkö</b>
Siirtonurmi	n. 40	m <sup>2</sup>
Suodatinkangas	70- 95	m <sup>2</sup>
Astiat (10m <sup>3</sup> )	10	kpl
Mikro- lysimetri	1	kpl
Lysimetrit	10	kpl
Lysimetrikaivot	10	kpl
Pintavaluntakaivo	10	kpl
Pohjakaivo	10	kpl
Styrox- kannet+ sisäkannet	30	kpl
putket (+suoja-putket)	30	kpl
näytepullot (0,25 l)	n. 320	kpl
näytepullot (0,5 l)	n. 320	kpl

Suodatinkankaan materiaalimäärät on laskettu ympyrän pinta-aloina.

Kankaan tarve, kun kangas leikataan astian pohjan kanssa samankokoiseksi

→ Astian pinta-ala =  $4,52 \text{ m}^2$  (ympyrä). Kankaan pinta-ala neliön muodossa  $5,76 \text{ m}^2$

→ 10 astian pinta ala neliön muodossa =  $10 * 5,76 \text{ m}^2 = 57,6 \text{ m}^2$

Kankaan tarve, kun kangasta nostetaan max. 20cm astian laidoille (ympyrän  $d = 2,8\text{cm}$ )

Kankaan pinta-ala neliön muodossa =  $2,8 \text{ m} * 2,8 \text{ m} = 7,84 \text{ m}^2$

→ 10 astian pinta-ala =  $10 * 7,84 \text{ m}^2 = 78,4 \text{ m}^2$

Mahdollinen kankaan tärvääntymisvara huomioiden tarvittavan kankaan pinta-alksi (neliöinä laskettuna) tulee  $70 - 95 \text{ m}^2$ .

Kangas tulee leikata ympyrän muotoiseksi eikä kangasta voi nostaa n. 20 cm ylemmäs astian reunoille. Suodatinkangas voi muodostaa veden virtauskanavan astian reunoille, mikäli kangas nousee astian reunassa liian ylös.

### 3.3 Materiaalien kuljetus

Pääosa materiaalikuljetuksista voidaan hoitaa normaalia avolavakalustoa käyttäen, kunhan huolehditaan kuormien peittämisestä pressuin. Massojen kuljetukset on pyrittävä järjestämään koerakentamisen aikataulutuksen mukaisesti, tarvittaessa vaiheistettuna ja pyrkiä minimoimaan lyhytaikainen varastointitarve sekä lähtöpäässä että käyttöpaikalla. Lyhyen, muutaman päivän mittaisen välivarastoinnin yhteydessä ei ole tarvetta välivarastokasojen suojaamiselle muutoin kuin kuivien sideaineiden osalta.

Tarvittaessa Pyhäsalmi Mine Oy osoittaa varastointipaikan tuotaville massoille. Urakoitsijan on varauduttava tarvittaessa parantamaan välivarastoalueen kantavuutta esimerkiksi murskekerroksella. Materiaalit on pyrittävä läjittämään mahdollisimman lähelle koerakentamispaikkaa, jossa koerakenteissa käytettävät massat valmistetaan. Herkimät materiaalit, kuten tuhka ja kipsi on syytä läjittää esimerkiksi pressun päälle.

Kuljetuksessa tulee ottaa huomioon materiaalien mahdollinen pölyäminen. Kippausvaiheessa on huomioitava ympäristö ja kippaussuunta. Suunta tulee valita niin, ettei koeastiat likaannu pölyämisen seurauksena. Etenkin tuhkaa kipatessa tulee olla huolellinen. Vaikka tuhka toimitetaan paikanpäälle kostutettuna, voi se aiheuttaa pölyämistä kuorman purkuvaiheessa.

## 4. KÄYTETTÄVÄT VÄLINEET

Tässä luvussa esitellään astiakokeissa tarvittavia välineitä. Rakentamisesta, kalustosta ja rakentamiseen liittyvistä välineistä vastaa Suomen Maastorakentajat Oy.

### Koeastiat

Astiakokeissa käytettävät astiat (10 kpl) ovat 10 m<sup>3</sup> kokoisia kuvan 2 mukaisia säiliöitä. Astiat on valmistettu polyeteenista (PE). Astioiden korkeus on 2,2 m, sisähalkaisija 2,4 m ja ulkohalkaisija 2,6 m. Astiat ovat muodoltaan sylinterimäisiä. Muoto tulee ottaa huomioon muun muassa materiaaleja tiivistäessä.



LAITETIEDOT	
Rungon halkaisija (mm)	2400/2592
Kokonaiskorkeus (mm)	2200
Tukijalat (kpl)	8
Nostorivat (kpl)	2
Yläreunus (mm)	10
Sisäpuoli PE-levy (mm)	6

Kuva 2. Koerakenteiden astiat (PE-säiliö).

Koeranteiden testipaikaksi on valittu Pyhäsalmen kaivosalue, jossa astiat sijoitetaan helposti seurattavaan paikkaan. Astiat sijoitetaan taivasalle, paikkaan jossa ne ovat alttiina säätilojen vaihteluille.

Jokaiseen koeastiaan tulee 3 vedenpoistoputkea (pintavalunta, lysimetri, astian pohja). Koeastioihin tulee porata putkien halkaisian kokoiset reiät, joihin putket asennetaan. Liitosten tulee olla tiivitä, jottei vesivuotoja pääse tapahtumaan putken ulkopuolelta.

## Poistoputket

Astiatesteissä tarvitaan yhteensä 30 kpl putkea, 3kpl per astia. Putkien kautta suotautuneet vedet ja ylimääräiset pintavedet johdetaan keräilykaivoihin.

Kaikkien astiakokeissa käytettävien materiaalien tulee olla sellaisia, ettei niistä liukene seurantaan haittaavia komponentteja kerättäviin vesinäytteisiin. Poistoputkien ympärille olisi hyvä asentaa suojaputket estämään mahdollisia litistymiä ja putkivaurioita.

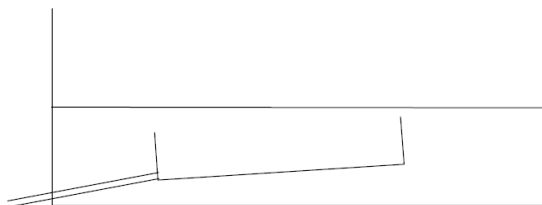
## Pintavesikaivo

Mahdollista runsaampaa, pintaan seisomaan jäävää vettä varten asennetaan poistoputki siirtonurmen yläpintaan. Siirtonurmen ja kasvukerroksen puuttuessa, poistoputki asennetaan ylimmän kerroksen yläpuolelle.

Mikäli rakenteen pintaa ei keräänny seisovaa vettä, vaan vesi suotautuu ongelmitta rakenteeseen, putki tukitaan. Astiakokeen lähtötilanteessa poistoputki tukitaan ja putken avaamistarvetta harkitaan myöhemmin. Poistoputken mahdollista avausta ja runsaampaa vesimäärää varten poistoputken päähän asennetaan pintavesikaivo, johon ylimääräinen pintavalunta kerätään. Pintavesikaivo voi olla pieni sillä oletuksena on, että pintavalunta on pientä.

## Lysimetrit

Kaikkien astioiden inerttikerrokseen tulee lysimetrit (Kuva 3), joiden avulla rakenteen läpi suotautuvaa vettä kerätään talteen seuraten sekä läpi suotautuvan veden määrää että sen laatua. Lysimetrin keräämä vesi johdetaan astioiden ulkopuolelle sijoitettaviin lysimetrikaivoihin, joista suotovesien määrä- ja laatusuranta toteutetaan.



Kuva 3. Lysimetrin periaatekuva



Lysimetrit ovat pinta-alaltaan 0,5- 0,75 m<sup>2</sup> kokoisia. Astioiden muodoilla ei ole merkitystä. Lysimetrin maksimi korkeus on 10 cm, jotta lysimetri mahtuu kallistumaan riittävästi inerttikerroksessa.

Kaikkien lysimetrien materiaalit (lysimetriallas, putket, liitokset, mittakaivot sekä lysimetrialtaan sisälle tuleva materiaali) on oltava sellaisia, ettei niistä liukene seuranta haittaavia komponentteja kerättäviin vesinäytteisiin. Esim. Polypropeeni (PP) ja polyeteeni (PE) sopivat käytettäväksi lysimetrirakenteissa.

### Lysimetrikaivot

Lysimerien keräämä vesi johdetaan altaiden ulkopuolelle sijoitettaviin lysimetrikaivoihin, joita käyttäen suotovesien määrä- ja laatu seuranta toteutetaan. Lysimetrikaivot täytyy asentaa siten, että tuloputkeen saadaan riittävä kallistus, vesimäärämittaus on mahdollista suorittaa ja kaivojen tyhjentäminen sekä näytteenotto ovat helposti toteutettavissa.

Kokeen aikana tarvittavat vesinäytteet ja rakenteen läpi suotatutuneet vesimäärät otetaan ja mitataan lysimetrikaivoista manuaalisesti. Vesimäärän mittaamiseen apuna voidaan käyttää esimerkiksi mittatikkua. Lysimetrikaivot on rakenteeltaan kuvan 4 mukainen. Kuva ei ole oikeassa mittakaavassa.



Kuva 4. Lysimetrikaivo, ei mittakaavassa

Lysimetrikaivon koon valintaan vaikuttavat tekijät (kts. myös liite 4):

- Lysimetrin pinta-ala:  $0,5 - 0,75 \text{ m}^2$ 
  - maksimi vesimäärä, joka suotautuu kuukauden aikana rakenteen läpi  
( $37 \text{ l/m}^2 * 0,5 \text{ m}^2 - 37 \text{ l/m}^2 * 0,75 \text{ m}^2$ )  
18,5 – 27,8 litraa /kk.
  - Maksimi vesimäärä viikossa 4,6 – 6,95 litraa /viikko.
- Suositeltava astiakoko **n. 20 l.**

Lysimetrikaivo asennetaan niin, että sen yläpinta on hieman maanpintaa korkeammalla. Näin pintavedet eivät pääse valumaan kaivoon. Astioissa tulee olla kannet sadeveden ja roskien pääsyn estämiseksi. Talven ajaksi kaivoihin asennetaan lisäksi esim. styrox-kannet estämään vesien jäätyminen.

### **Pohjakaivot**

Koerakenteiden läpi suotautuneet vedet johdetaan astioiden pohjasta vieressä oleviin keräilykaivoihin. Jokaisella koerakenteella on omat keräilykaivot, joista suotautuneet vesimäärät mitataan manuaalisesti esim. mittatikun avulla. Pohjakaivo on kuvan 4 mukainen kaivo. Astioissa tulee olla kannet sadeveden ja roskien pääsyn estämiseksi. Talven ajaksi kaivoihin asennetaan lisäksi esim. styrox-kannet estämään vesien jäätyksen.

Pohjakaivoista otetaan vesinäytteitä vain tapauksissa, jolloin lysimetrikaivoon ei ole suotautunut riittävästi vettä tarvittavia näytteitä varten. Mutta alustavasti kaikki vesinäytteet otetaan aina lysimetrikaivoista.

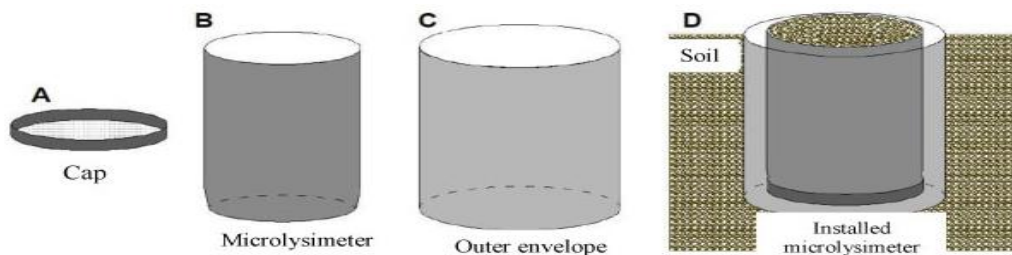
Pohjakaivon koon valintaan vaikuttavat tekijät (kts. myös liite 4):

Suotautuvan veden pinta-ala =  $3,75 - 4,0 \text{ m}^2$

- maksimi vesimäärä kuukaudessa ( $37 \text{ l/m}^2 * 3,75 - 37 \text{ l/m}^2 * 4$ ) = 139 – 148 litraa/kk
- maksimi vesimäärä viikossa = 35 – 37 litraa / vk
- Suositeltava astiakoko **n. 100 l.**

## Mikro- lysimetri

Koerakenteiden läheisyyteen (moreenipenkkaan) asennetaan kaksi mikro- lysimetriä joista toinen täytetään kasvukerros materiaalilla, toinen hienolla rikastushiekalla. Haihduntaseuranta tehdään punnitsemalla astiat aina näytteenoton yhteydessä. Kuvassa 5 on esitetty mikro- lysimetrin toimintaperiaate, mutta yksinkertaisimmillaan mikro- lysimetrit voidaan rakentaa kahdesta erikokoisesta ämpäristä (esim. 8 ja 10 litran ämpärit )



Kuva 5. Mikro-lysimetrin toimintaperiaate

## Näytepullot

Koeastioista otetaan vesinäytteitä kerran viikossa, 2 l / astia ensimmäisen kuukauden aikana. Laskenta aloitetaan siitä, kun rakenteesta alkaa suotautua vettä läpi. Ensimmäinen näyte otetaan, kun lysimetrin keräilykaivoon on suotautunut arviolta 2 l vettä. Myös sadevedestä otetaan vesinäytteitä.

Näytteet pakastetaan 0,5 ja 0,25 litran näytepulloissa. Pyhäsalmen kaivoksen tulee hankkia pakastin näytteiden pakastusta varten.

## Sääasema

Sääaseman avulla saadaan tietoa alueen sääolosuhteista kuten, lämpötilasta, kosteudesta, sademääristä ja pilvisyydestä. Sääaseman data saadaan Pyhäsalmen kaivoksen tietojärjestelmään suoraan, joten erillistä lomaketta kirjaamiselle ei tarvita. Sääasema sijaitsee noin 700 metrin päässä koepaikasta.

Sääasema ei kykene mittaamaan lumisadetta ja haihduntaa, joten lumen paksuus on mitattava esimerkiksi vesinäytteenoton yhteydessä. Lumen paksuus kirjataan näytteenottolomakkeen huomiot/havainnot sarakkeeseen. Haihdunta määritetään mikro-lysimetriä avulla.

### **Proctor- välineet**

Rakentamisen aikana suoritettavat tiivistystestit toteutetaan Proctor-välineistöllä. Käytettävä tiivistystyömäärä on 10 isku/kerros – tiivistys 5 kerroksena Proctor-muottiin. Proctor kokeet tekee Ramboll. Proctor-kokeisiin tarvittavista välineistä vastaa Ramboll.

### **Seulakauha**

Moreenin maksimi raekoko on 60-80mm. Tätä suuremmat rakeet tulee poistaa esimerkiksi seulakauhan avulla. Seulonnasta vastaa Suomen Maastorakentajat.

## 5. ASTIATESTIEN RAKENTEET

Astiakokeita rakennetaan kymmenen kappaletta. Astioiden rakennekerrokset ja niistä oletettavasti saatava tieto on esitetty tässä luvussa ja liitteessä 2. Jokaisen koerakenteen inerttikerros ja kasvukerros tehdään samasta materiaalista.

### Koerakenne 1

Testattavat materiaalit: kasvukerros, tuhka, rikastushiekka ( $10^{-7}$  m/s  $K_{\text{sat}}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Tuhkan vaikutus haitta-aineliukoisuuksiin.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- siirtonurmi
- kasvukerros 0,15m
- tuhka 0,1m
- rikastushiekka (karkea) 1,4
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### Koerakenne 2

Testattavat materiaalit: kasvukerros, tuhka, rikastushiekka ( $10^{-9}$  m/s  $K_{\text{sat}}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Tuhkan vaikutus haitta-aineliukoisuuksiin.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- siirtonurmi
- kasvukerros 0,15m
- tuhka 0,1m
- rikastushiekka (hieno) 1,4m
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### Koerakenne 3

Testattavat materiaalit: kasvukerros, tuhka-rikastushiekka seos, rikastushiekka ( $10^{-9}$  m/s  $K_{\text{sat}}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Se-koituksen ja reaktiomatkan vaikutus, verrataan koerakenteeseen 2. Huom. tuhkamäärät ovat samat kuin rakenteissa 1 ja 2.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- siirtonurmi
- kasvukerros 0,15m
- tuhka-rikastushiekka seos 0,5m
- rikastushiekka (hieno) 1,0m
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### Koerakenne 4

Testattavat materiaalit: kasvukerros, moreeni, rikastushiekka ( $10^{-7}$  m/s  $K_{\text{sat}}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Tuloksia verrataan koerakenteeseen 1, 5 sekä muihin rakenteisiin. Tarkoitus on osoittaa nk. normaalirakenteen vaikutus liukoisuuksiin.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- siirtonurmi
- kasvukerros 0,15m
- moreeni 0,8m
- rikastushiekka (karkea) 0,7m
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### **Koerakenne 5**

Testattavat materiaalit: rikastushiekka ( $10^{-7}$  m/s  $K_{sat}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Koerakenteessa saadaan lähtötieto itse rikastushiekan liukoisuuksista paikallisissa olosuhteissa. Tuloksia verrataan muihin koerakenteisiin sekä rikastushiekasta tehtyihin ravistestituloksiin. L/S-suhde tärkeä mitattava tieto.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- rikastushiekka (karkea) 1,65m
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### **Koerakenne 6**

Testattavat materiaalit: kasvukerros, kipsi, rikastushiekka ( $10^{-7}$  m/s  $K_{sat}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Kipsin vaikutus neutraloivana komponenttina. Verrataan erityisesti rakenteeseen 1,3 ja 5.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- siirtonurmi
- kasvukerros 0,15m
- kipsi 0,5m
- rikastushiekka (karkea) 1,0m
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### **Koerakenne 7**

Testattavat materiaalit: kasvukerros, kipsi-moreeniseos, rikastushiekka ( $10^{-7}$  m/s  $K_{sat}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Seikoituksen ja laimentumisen merkitys. Verrataan erityisesti rakenteeseen 6.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- siirtonurmi
- kasvukerros 0,15m
- kipsin (70%) ja moreenin (30%) seos 0,5m
- rikastushiekka (karkea) 1,0m
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### **Koerakenne 8**

Testattavat materiaalit: rikastushiekka ( $10^{-9}$  m/s  $K_{sat}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Koerakenteessa saadaan lähtötieto itse rikastushiekan liukoisuuksista paikallisissa olosuhteissa. Tuloksia verrataan muihin koerakenteisiin sekä rikastushiekasta tehtyihin ravistelutestituloksiin. L/S-suhde tärkeä mitattava tieto.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- rikastushiekka (hieno) 1,65m
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### **Koerakenne 9**

Testattavat materiaalit: kasvukerros, rikastushiekka ( $10^{-9}$  m/s  $K_{sat}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Kasvukerroksen merkitys, verrataan koerakenne 8:seen. Oletetaan että kasvukerros vähentää sadeveden happipitoisuutta ja vähentää näin ollen haitta-aineiden liukenemistä.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- siirtonurmi
- kasvukerros 0,3m
- rikastushiekka (hieno) 1,35m



- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

### **Koerakenne 10**

Testattavat materiaalit: kasvukerros, kipsi, rikastushiekka ( $10^{-9}$  m/s  $K_{\text{sat}}$ )

Tavoiteltava tieto: Sadeveden muuttuminen suotautumisen jälkeen koerakenteessa. Kipsin vaikutus neutraloivana komponenttina.

Kerrokset ja niiden paksuudet:

- siirtonurmi
- kasvukerros 0,15m
- kipsi 0,15m
- rikastushiekka (hieno) 1,35m
- suodatinkangas
- inertti materiaali 0,2m

## 6. RAKENTAMINEN

### 6.1 Rakentamisen kulku

Rakentaminen aloitetaan pohjien tasaamisella sekä koeastioiden modifioinnilla testaamiseen soveltuvaksi. Tasaamisen jälkeen jokaisen astian sisäpuolelle asetetaan mittaasteikko helpottamaan kerrospaksuuksien määrittämisessä ja materiaalien tiivistämistä. Tämä jälkeen jokaisen astian pohjalle tiivistetään saman verran (tiivistettynä 20cm) inerttiä kiviainesta. Ennen rakentamista lasketaan materiaalille se määrä, joka pitää saada tiivistettyä 0,2 m:n kerrokseksi. Asemasekoittimelta saadaan käytetyt materiaalmäärät, jotka kirjataan ylös koerakenne ja kerroskohtaisesti liitteeseen 8.

Astioihin tuleva lysimetri asennetaan inerttikerroksen sisään hieman kallelleen, jotta lysimetriin suotautunut vesi valuu putkea pitkin lysimetrikaivoon (Kuva 6). Lysimetrin päällä tulee olla riittävästi inerttiä kiviainesta, jotta päälle tulevien kerrosten tiivistäminen ei riko lysimetriä tai sen osia. Inerttikerrosta rakentaessa tulee ottaa huomioon lysimetri toimivuus. Tiivistys ei saa olla liian voimakasta, ettei lysimetri vaurioidu tai putket litisty. Inerttikerroksen rakentamisen jälkeen testataan lysimetrin toimivuus ennen muiden kerrosten rakentamista valuttamalla puhdasta vettä rakenteen läpi. Lysimetrin ja inerttikerrosten toimiessa veden tulisi ohjautua lysimetrikaivoon ja pohjakaivoon esteettä.

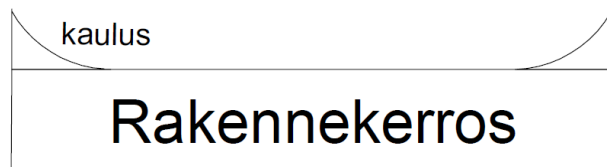


Kuva 6. Lysimetrin sijoittuminen inerttikerroksissa

Tiivistämisen jälkeen inertin materiaalin päälle asennetaan suodatinkangas. Suodatinkangas leikataan pyöreäksi ja mahdollisimman hyvin astiaan sopivaksi. Kankaan reuno-

ja ei saa nostaa kovin korkealle astian seinämiä vasten, jotta reunaan ei synny vedelle mahdollisia kulkureittejä. Tämän jälkeen koerakenteet rakennetaan luvun 5 ja liitteessä 2 esitettyjen koerakenteiden mukaisesti. Kaikissa kerrosrakenteissa kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus on 20-30cm. Tiivistyskerrosten välinen pinta rikotaan karheaksi, jottei kerrosten väliin jäisi saumakohtaa. Näin kerroksista saadaan yhtenäinen, eikä vesi kulkeudu esim. kerrosrajoja pitkin vaakasuuntaan.

Viimeisen rakennekerroksen laidoille, mahdollisen kasvukerrosmateriaalin alle, rakennetaan eräänlainen kaulus ohjaamaan sadevesi pois astian reunoilta (Kuva 7). Reinoja pitkin kulkeutuva vesi ei ole suotavaa missään olosuhteissa. Reunus voi olla esim. pieni kallistus tai koroke (2- 5cm) rakennekerrosmateriaalissa.



Kuva 7. Päällimmäisen rakennekerroksen reunoille rakennettava kaulus

Kaikki valmiit astiakokeet valokuvataan. Parista ennakkoon sovittavasta koerakenteesta kuvataan kaikki työvaiheet.

## 6.2 Rakentamisessa huomioonotettavat asiat

### Materiaalien sekoitus ja homogenisointi

Astiatesteissä käytettävät seokset (tuhka-rikastushiekka ja moreeni-kipsi) on sekoitettava toisiinsa hyvin tasaisesti, niin että näyte on silmämääräisesti homogeenista. Sekoitukset tehdään paikanpäällä juuri ennen tiivistämistä. Sekoituksessa tulee huomioida muun muassa materiaalien käsiteltävyys ja kosteuden vaikutus materiaalien sekoitettavuuteen. Esimerkiksi kipsi voi ”holvaantua” sekoitusastian reunoihin. Ennen suurempien erien sekoitusta on syytä testata eri sekoitusmenetelmien soveltuvuutta. Etenkin

kipsin ja tuhkan vesipitoisuuden merkitystä käsiteltävyyteen on syytä tarkastella. Tietyn sekoitustavan valinta ja perustelut toimitetaan laadunvalvojalle.

Materiaalien homogeenisuus arvioidaan ennen tiivistämistä. Mikäli jonkin materiaalierän kohdalla on havaittavissa selvää epähomogeenisuutta, on kyseinen massaerä homogenisoitava ennen käyttöä ja sekoitusta muihin materiaaleihin. Materiaali tulee olla sama koko tutkimuksessa, materiaalierä ei saa vaihtua kesken rakentamisen. Vesipitoisuuden osalta toimenpidetarve on arvioitava erikseen, mikäli massojen vesipitoisuustaso poikkeaa huomattavasti oletus-/tavoitetasosta. Arvioinnin tekee paikalla oleva laadunvalvonnasta vastaava henkilö proctor-kokeiden ja vesipitoisuusmittausten perusteella.

Sekoitukset ja homogenisoinnit suoritetaan Maastorakentajien esittämillä menetelmillä. Menetelmät on kuitenkin valittava siten, että rakentamisessa saavutetaan riittävän homogeeninen, tiivis ja tarkoituksenmukainen lopputulos.

### **Rakeisuus**

Astiatesteissä käytettävän moreenin rakeisuus on huomioitava. Maksimi raekoko on noin 60 – 80mm. Moreenista poistetaan tätä isommat rakeet esimerkiksi seulakauhan avulla. Seulonnasta huolehtii Suomen Maastorakentajat.

### **Kerrosten tiivistäminen, astioiden muoto**

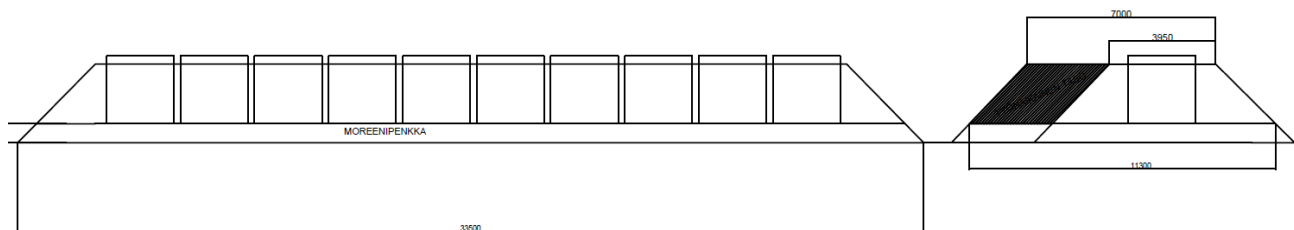
Ennen rakentamista lasketaan kullekin materiaalille se määrä, joka pitää saada tiivistettyä 0,2 - 0,3 m:n kerrokseksi. Paksut materiaalikerrokset tiivistetään astiaan useassa noin 20 - 30 cm paksuisissa erissä. Tiivistettyjen kerrosten välinen pinta tulee rikkoo (karhita) ennen seuraavan kerroksen rakentamista, jolloin kerrosten väliin ei jää sauma-kohtaa.

Kaikki kerrokset tiivistetään samoilla periaatteilla lukuun ottamatta tuhkan ja kasvukerros-rosmateriaalin tiivistämistä, jotka tehdään kokemusperäisesti. Tuhka tiivistetään kevyesti. Tavoitteena on saada tuhka tiivistettyä n. 90 % tiiveysasteeseen. Astioiden reunaosien tiivistämiseen täytyy kiinnittää erityishuomiota kaarevien reunojen vuoksi. Tiivistämistä voidaan tehostaa esimerkiksi kaarevan levyn avulla.

Kun tiivistys on tehty ja tiedetään materiaalin paino ja tilavuus saadaan tiheys määritettyä laskennallisesti. Tiheyttä on muutoin vaikea määrittää rikkomatta näin pientä rakennetta. Tiivistys tehdään optimivesipitoisuudessa. Mikäli oletettua tiheyttä ei saada toteutettua päättää laadunvalvoja riittävästä tiivistystyömäärästä ja toteutunut tiivistystyö ja tiheys kirjataan ylös. Tiheyttä ja vesipitoisuutta voidaan kontrolloida Troxler- laitteella. Kokemusta mittaustavan soveltuvuudesta kaikille testattaville materiaaleille ei kuitenkaan ole. Eli samalla saadaan testattua ko. laitteen soveltuvuutta näiden materiaalien mittaamiseen.

### Pakkassuojaus

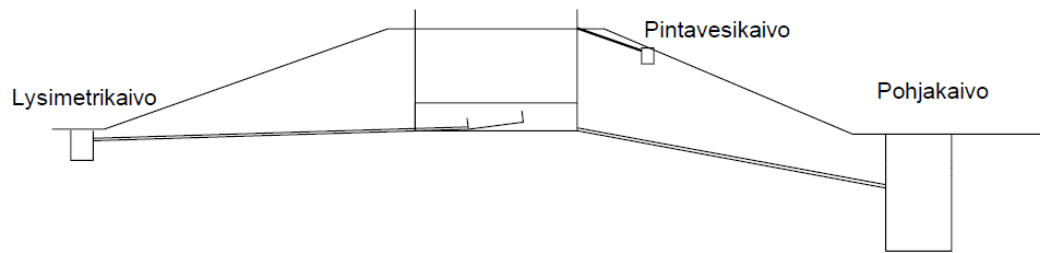
Koeastiat sijoitetaan tasoitetun moreenipenkan päälle kuvan 8 mukaisesti. Lopuksi koeastiat ympäröidään moreenilla, jolloin sivuille tuleva materiaali tukee ja suojaa astioita pakkaselta. Pakkassuojien materiaalina käytetään Pyhäsalmen moreenia. Näytteenotto-kaivojen paikat ja pakkassuojaus tulee myös huomioida. Vesinäytteiden jäätyminen tulee estää esim. styroxx-kansilla ja kaivojen upottamisella maahan. Näytteenoton ja kaivojen tyhjentämisen tulee olla toteutettavissa mahdollisimman vaivattomasti.



Kuva 8. Suojarakenteet

Suojarakenteiden rakentamisessa tulee ottaa huomioon kaivojen sijainnit ja putkien johtaminen kaivoihin.

Suojarakenteita tehdessä tulee olla huolellinen, etteivät putket vaurioidu tai litisty rakentamisen aikana, jotta vesi pääsee virtaamaan kaivoihin ongelmitta. Kuvassa 9 on esitetty vesikaivojen ja putkien periaatteet. Kuva ei ole mittakaavassa. Lysimetrikaivot voidaan asentaa muiden kaivojen kanssa samalle puolelle.



Kuva 9. Vedenjohtamisen periaatekuva

### Rakenteiden pinta

Astiatestien rakenteiden pinnat tasataan vaakasuoriksi. Mahdollista runsaampaa, pintaan seisomaan jäävää vettä varten asennetaan poistoputki rakenteen pinnan yläpuolelle (kasvukerroksen alapintaan). Mikäli seisovaa vettä ei esiinny, putki tukitaan. Oletuksena on, että lysimetristä ei saada kerättyä suuria vesimääriä, joten koko sadannan imeytyminen rakenteen läpi on suotavaa. Näin ollen testin alussa poistoputki tukitaan. Rakennekerroksen pintaan rakennetaan laidalle kaulus. Kauluksen periaate on esitetty kuvassa 5.

### 6.3 Vastuunjako

Rambollin vastuulla on koeastioiden merkitseminen, tekniset ohjeet, laadunvarmistustyöt ja ohjaus rakentamisvaiheessa. Lisäksi Ramboll vastaa rakentamistyön raportoinnista, seurantasuunnitelmasta ja ohjeistuksesta, seurantatulosten käsittelystä ja raportoinnista. Pyhäsalmi Mine Oy vastaa näytteenotosta, vesianalyyseistä ja kokoomanäytteiden teosta. Suomen Maastorakentajien vastuulla on astiakokeiden rakentaminen ja rakentamiseen liittyvät kalustot, laitteet ja materiaalit. Lisäksi Suomen Maastorakentajat vastaavat muun muassa suurien materiaalmäärien sekoitusmenetelmien testaamisesta ja soveltavuudesta.

## **7. ERIKOISTILANTEET**

### **7.1 Materiaalien testaaminen**

Ennen varsinaista rakentamista materiaalien sekoittaminen, työstettävyys ja tiivistäminen testataan koerakentamisella. Näin varmistetaan parhaat mahdolliset työtavat ja nähdään miten kokeen suoritus käytännössä onnistuu ja mitä asioita työn aikana tulee huomioida. Samassa yhteydessä nähdään sekoitustyön lisatarve, materiaalien homogeenisuus ja toteutuneet tiiveydet.

Kokeilua varten rakennusmateriaaleja on tilattava ”ylimäärin” (otettu huomioon laskennassa). Materiaalien määrissä tulee ottaa huomioon myös mahdolliset virheet rakennusvaiheessa ja niistä johtuva kokeen uusiminen. Rakennekokeilun ei tarvitse edustaa mitään em. koerakenteista, vaan testissä voidaan testata kaikista hankalimmiksi koettuja rakenteita. Materiaalien kokeilu suoritetaan kentällä, lähellä astiakoe paikkaa. Kokeilua ei tehdä koeastioihin.

### **7.2 Koeastioiden kastelu**

Rakentamisen jälkeen kaikkien koeastioiden nurmet kastellaan vedellä. Veden laatu, määrä ja kastelun ajankohta tulee olla sama kaikilla astioilla.

Kastelua jatketaan rakentamisen jälkeen. Kastelu tehdään sulan maan aikana noin 2 viikon välein esimerkiksi näytteenoton yhteydessä. Veden määränä voidaan käyttää esimerkiksi suurinta sademäärää. Lisätty vesimäärä kirjataan aina näytteenottolomakkeeseen.

Esimerkiksi: kastelu kahden viikon välein a 20 litraa / astia tasaisesti koko astian pintalalle (kastelukannu)

## 8. KOOSTE KERÄTTÄVÄSTÄ TIEDOSTA

Koerakenteista kerätään tietoa sekä ympäristökelpoisuusominaisuuksista että materiaalien rakennettavuudesta tulevia suurempia rakentamiskokonaisuuksia varten. Seuraavassa esitettyä listausta on tarkennettu luvuissa 9 ja 10.

### 8.1 Kerättävä tieto rakentamisen aikana

Rakentamisen aikana kootun tiedon kokoamisen seurantalomakkeet on esitetty liitteessä 7.

#### Tekninen:

- Materiaalien työstettävyys, käytetyt menetelmät ja koneet
  - tiivistystyömäärät vs. suunniteltu tiheys, tiivistettävyys/käsiteltävyys
  - rakentamisen haasteet ja jatkossa huomioitavat seikat
  - visuaalinen tarkastelu, halkeamat, pölyävyys, kuivuminen, väri, painuminen, valumajäljet
  - tiheys kaikista rakennekerroksista
  - koekappaleet: lujuus, vedenläpäisevyys
  - rakennepaksuudet
  - näytteet kaikista materiaaleista (3litraa/materiaali)

#### Ympäristö:

- Sääolosuhteet: lämpötila, kosteus, sademäärät, pilvisuus (sääasemasta)
- haihdunta mikro-lysimetristä, sillä sääasema ei ole haihdunnan osalta tarpeeksi tarkka
- lumisade, lumen paksuus mitataan vesinäytteenoton yhteydessä
- käytettyjen materiaalien:
  - kokonaispitoisuudet ja
  - liukoisuudet 2-vaiheisella ravistelutestillä

#### Muut:

- pölyävyys rakentamisen aikana (työsuojelu)



- materiaalien säilyvyys varastoinnin aikana, (varastoinnissa huomioon otettavat asiat)
- kuljetuksessa havaitut asiat

## 8.2 Kerättävä tieto rakentamisen jälkeen

### Tekninen:

- visuaalinen tarkastelu, halkeamat, pölyävyys, kuivuminen, väri, painuminen, valumajäljet
- rakenteen pintaan jäävä seisova vesi, sen määrä ja tarve poistoputken avaamiselle
- tiiveys
- lujuus, vedenläpäisevyys
- pitkäaikaistoimivuus

### Ympäristö:

- sadeveden laatu (happi, sähkönjohtavuus, pH, redox)
- läpisuotautuvan veden määrä
- sääolosuhteet: lämpötila, kosteus, sademäärät, pilvisuus (sääasemasta)
- haihdunta mikro-lysimetristä, sillä sääaseman tarkkuus ei riitä
- lumisade, lumen paksuus mitataan vesinäytteenoton yhteydessä
- vesinäytteistä mitataan tuoreeltaan (EC, pH ja redox), jonka jälkeen näytteet pakastetaan. Pakastetuista näytteistä muodostetaan myöhemmin kokoomanäytteitä, joiden kokoamistapa ja analysointi päätetään myöhemmin. Analysoitavat parametrit käsitellään tarkemmin luvussa 10.

## 9. TEKNISET SEURANTATIEDOT

### 9.1 Ennen rakentamista huomioon otavat asiat

Ennen rakentamisen aloittamista lähtömateriaalien laatu homogeenisuuden osalta on arvioitava silmämääräisesti ja massojen vesipitoisuus on suositeltavaa määrittää vähintään 5 eri kohdasta kutakin hyödynnettävää materiaalierää heti homogenisoinnin tai uudelleen sekoituksen jälkeen. Kaikki rakentamisessa käytettävä materiaali on homogenisoitava /sekoitettava uudelleen ennen rakentamista. Vesipitoisuuden osalta toimenpidetarve on arvioitava erikseen, mikäli massojen vesipitoisuustaso poikkeaa huomattavasti esitetystä oletus-/tavoitetasosta. Arvioinnin viimeksi mainitulta osin tekee paikalla oleva laadunvalvonnasta vastaava henkilö.

Lähtömateriaalien tavoitevesipitoisuudet tiivisrakennekerroksessa käytettäessä ovat seuraavat:

Moreeni	--- alle 10 %	(+/- 2 %)
Rikastushiekka (hieno)	--- alle 17 %	(+/- 2 %)
Rikastushiekka (karkea)	--- määritetään paikan päällä	
Tuhka	--- noin 15%	(+/- 2 %)
Kipsi	--- noin 30 %	(+/- 4 %) (kuivauslpt 40°C)
	--- noin xx %	(+/- 4 %) (kuivauslpt 60°C)
	--- noin xx %	(+/- 4 %) (kuivauslpt 105°C)

Mikäli hyödynnettävien materiaalien vesipitoisuudet poikkeavat huomattavasti edellä esitetyistä vesipitoisuuksista, on niiden vaikutukset lopputuloksen laatuun ja/tai käytettävään seokseen arvioitava ennen sekoitustyön käynnistämistä.

## 9.2 Rakentamisen aikana huomioitavat asiat

Laadunvalvonnan yhteydessä kiinnitetään erityishuomiota silmämääräiseen laadun/homogeenisuuden seuraamiseen, suunnitellun seossuhteen toteutumiseen (punnitustiedot) sekä valmiiden massojen vesipitoisuusseurantaan. Ennen varsinaista sekoitustyötä varmistetaan rakentamisessa käytettäviä materiaaleja käyttäen toteutettavalla tiivistystestillä siitä, että valmiin massan laatu ja käsiteltävyys vastaavat suunniteltua. Samalla tarkennetaan myös kyseisen materiaaliseoksen tiivistystyön laadunvalvonnassa käytettävää tiheystavoitetta. Tiivistystesti toteutetaan Proctor-välineistöllä ja käytettävä tiivistystyömäärä on 10 iskua/kerros – tiivistys 5 kerroksena Proctor-muottiin. Rakenteeseen tiivistetyn materiaalin tiiveyden tulos saa vaihdella 1 % tavoitteesta.

Rakennekerroksista kootaan mm, seuraavat tiedot:

- vesipitoisuus
- tiheys
- kerrospaksuudet
- homogeenisuus ja sekoitettavuus
- sekoitustyön määrä
- työstettävyys
- Troxlerin käytettävyys eri materiaaleille
- näytteet käytetyistä materiaaleista (min 5 litraa/näyte) laboratoriossa tehtäviä vesipitoisuus- ja tiivistymistarkastuksia varten. (Ramboll hoitaa näytteenoton, Pyhäsalmi toimittaa eteenpäin)

### **9.3 Rakentamisen jälkeen tarkasteltavat asiat**

Rakentamisen jälkeen rakenteet sekä astiat valokuvataan. Vesinäytteiden oton yhteydessä tarkkaillaan myös astioiden kuntoa mm. pinnana halkeilua ja veden imeytymistä ja kertymistä päällimmäisten kerrosten pintaan.

## 10. SEURANTATIEDOT YMPÄRISTÖKELPOISUUS

Kaikista käytetyistä rakennemateriaaleista otetaan materiaalinäytteet (ramboll), joista määritetään materiaalien kokonaispitoisuudet ja liukoisuudet (2-vaiheinen ravistelutesti). Ramboll vastaa näytteenotosta koerakentamisen aikana ja Pyhäsalmen kaivos näytteiden säilytyksestä ja toimittamisesta analysoitavaksi. Näytteistä analysoidaan samat parametrit kuin seurannan vesinäytteistä.

Materiaalitestauksen lisäksi yksi tärkeimmistä seurattavista ympäristökelpoisuuteen vaikuttavista tekijöistä on koerakenteiden läpi suotautuvan veden määrän ja laadun analysointi.

Määrän arviointia varten kerätään alueelle asennettavan sääaseman avulla sadantaa, lämpötilaa, ilmankosteutta, tuulisuutta jne. parametrejä. Haihdunnan seuranta toteutetaan nk. mikro-lysimetrin avulla, jonka painoa seurataan 1-2- viikon välein.

Kaikista koeastioista on mahdollista kerätä vesinäytteitä kolmesta eri paikasta. Koeastiaan rakennetaan keräilyputket 1) pintavedelle sekä astian 2) pohjaosaan lysimetrille ja koeastian 3) pohjalle kertyvälle suotovedelle. Seuraavassa on esitetty eri keräyspaikkojen tiedonkeruutavat ja tarkoitukset.

- 1) Mikäli rakenne on tiivis, voi rakenteen pintaan jäädä vettä. Liiallisen veden kerääntyminen estetään asentamalla poistoputki kasvukerroksen alaosaan. Tästä vedestä on mahdollista kerätä näyte, jolla testataan sadeveden muuttumista kasvukerroksessa. Kiinnostavia parametrejä ovat pH, redox ja happipitoisuus. Tätä tietoa kerätään ensimmäisen vuoden aikana yhteensä 4 krt yhdestä koerakenteesta. Näytteenotto otetaan koeastiasta, jossa vesi pääsee seurantatietojen mukaan parhaiten kertymään. Samaan aikaan kerätään näytteet myös itse sadevedestä. Myös sadevedestä määritetään pH, sähkönjohtavuus, redox ja happipitoisuus sekä muut vesinäytteistä analysoitavat parametrit, jotka on esitetty seuraavissa kappaleissa. Lähtökohtaisesti pinteveden poistoputki on kuitenkin kiinni.
- 2) Erillisellä lysimetrillä ehkäistään mahdollisten suorien reunavaluntavesien pääsy analysoitavaan näytteeseen. Lysimetrillä kerätty näyte on edustavampi kuin

astian pohjalle kertyvä näyte, sillä kaltevan pinnan vuoksi veden ei pitäisi jäädä seisomaan lysimetriin. Myös analysoitavien vesien määrä pysyy näin kohtuullisena, kun lysimetrin pinta-ala voidaan pitää pienempänä. Lysimetristä kertyvä vesi johdetaan omalla putkellaan lysimetrikaivoon.

- 3) Koeastian pohjalle kertyvä suotovesi poistetaan omalla putkellaan pohjakaivoon. Koeastian pohjalle kertyvä vesi poistetaan, jotta kokeessa voidaan määrittää rakenteen läpi suotautuvan veden laatua, eikä rakenteessa "seisseen" veden laatua.

### **Suotautuneen veden määrä**

Suotautuneen veden määrä on tärkeimpiä mitattavia parametrejä kokeen aikana. Sekä pintavesikaivon (rakennetaan jos tarpeen), lysimetriin että pohjakaivon keräämää vesimäärää seurataan jatkuvasti ja vesimäärämittaukset sekä kaivojen tyhjentäminen sovitetaan läpi suotautuvien vesimäärien mukaisesti. Ensimmäisen tarkkailukuukauden aikana kaivot tyhjenetään kerran viikossa. Tämän jälkeen tyhjennys voidaan tehdä kahden viikon välein.

Tavoitteena on saada mitattua kumulatiivisesti koeastian keräämä vesi (läpi menneen veden kokonaismäärä) ajan funktiona. Vesimäärämittausten rinnalla seurataan myös sademäärää (sääasema) ja haihduntaa (mikrolysimetri) kunkin mittausjakson aikana. Tarvittavien kaivojen tyhjennysten sekä näytteenoton ja säätietojen kirjaamisen käytännön toteutus tapahtuu Pyhäsalmi Mine OY:n toimesta.

L/S- suhteen laskentaa varten, kaikki näytteenottokaivoista poistettu vesi tulee mitata ja merkitä seurantalomakkeelle. Suotautuneen veden määrää määrittäessä on huomioitava sekä lysimetrikaivossa että suotovesikaivossa oleva suotautunut vesi. Suotautuneen veden kokonaismäärä on siis lysimetrikaivon ja suotovesikaivon yhteenlaskettu määrä. Mikäli rakenteen pintaan jää vettä suotautumatta tai se poistetaan pintavesikaivoon, on tämä myös tärkeä tieto, jota käytetään L/S suhteen määrittämisessä.

### **Vesinäytteet**

Näytteitä otetaan lysimetrikaivoista ensimmäisen kuukauden aikana kerran viikossa. Näytettä otetaan kerralla vähintään 1,5 litraa koeastiaa kohden. Vesinäytteet pakastetaan 0,25 ja 0,5 litran pulloissa (2\*0,25 l, 2\* 0,5 l ). Välittömästi näytteenoton jälkeen mitataan näytteen happi-pitoisuus, pH, sähkönjohtavuus ja redox. Näytteenoton ja analysoinnin tekee kaivoksen henkilökunta. Näytepullot tulee merkitä selkeästi tarvittavilla tiedoilla.

Näytepullojen merkkäminen:

- Näytteenotto paikka (PS1 – PS10)
- Näytteenottokerran järjestysnumero (1/53 – 53/53)
- Rinnakkaisnäytteiden koodi (a,b,c ja d)
- Näytteenotto päivämäärä

Esimersiksi: PS1\_1a/53 pvm.

Näytteenotosta täytetään näytteenottolomake, joka on liitteessä 5.

Näytteenoton yhteydessä tulee seurata mm. seuraavia asioita; rakenteen kunto, vesinäytteen mahdollinen haju ja väri, kaivon kunto. Rakenteessa voi esiintyä pakkasen aiheuttamia halkeamia. Mahdolliset halkeamat ja muut vauriot tulee valokuvata. Havaitut asiat kirjataan liitteenä olevaan näytteenottolomakkeeseen.

Jos lysimetrikaivossa ei ole riittävästi suotautunutta vettä näytteenottoa varten, otetaan vesinäyte suotovesikaivosta. Tällöin tilanne kirjataan näytteenottolomakkeeseen sekä näytepulloihin.

Teoreettisen laskelman mukaan koeastiasta kertyvät näytemäärät vaihtelevat 13,5 – 41,5 l / viikko. Määrät on laskettu liitteen 4 mukaisesti ja perustuvat keskimääräisiin kuukausisadantatietoihin.

Mikäli lysimetrin pinta-ala on 0,5 m<sup>2</sup> on lysimetristä saatavan näytteen määrä noin 11 % koko astian läpi suotautuvasta vesimäärästä eli vettä suotautuu lysimetriin on n. 1,3- 4 l / viikko. Lysimetrin pinta-alasuositus on 0,5-0,75 m<sup>2</sup>. Maastorakentajat ilmoittavat pinta-alan, kun materiaalivalinta on tehty.

**Kooste näytteenotosta:**

- Näytteitä otetaan **ensimmäisen kuukauden** aikana 1 näyte / viikko á 1,5 l, joka pakastetaan 0,25 ja 0,5 litran pulloissa. Välittömästi näytteenoton jälkeen mitataan näytteen happi-pitoisuus, pH, sähkönjohtavuus ja redox.
- Tämän jälkeen otetaan 1 näyte / 1 kk á 1,5 l joka pakastetaan 0,25 ja 0,5 litran pulloissa. Keräilykaivon täyttymistä seurataan kuitenkin viikoittain ja tyhjennetään tarvittaessa.

**Analysoitavat parametrit:**

**Ensimmäisen kuukauden** pakastetuista osanäytteistä muodostetaan kokoomanäyte, josta analysoidaan

- $\text{SO}_4^{2-}$ , Cl-, F-, pH, EC, redox, happi, DOC
- Sb, Ar, Ba, Hg, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Se, Zn, V, Mn, Mg, Fe, Al, Ca, Na, K,

**Kerran puolessa vuodessa** pakastetuista osanäytteistä muodostetaan kokoomanäyte, josta analysoidaan

- $\text{SO}_4^{2-}$ , Cl-, F-, pH, EC, redox, happi, DOC
- Sb, Ar, Ba, Hg, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb, Se, Zn, V, Mn, Mg, Fe, Al, Ca, Na, K,

Taulukkoon 3 listattuna analysoitavat näytteet, analyysitiheydet ja näytemäärät

Taulukko 3. Analysoitavat näytteet

<b>Analysoitava</b>	<b>Analyysitiheys</b>	<b>Analysoitavia näytteitä yhteensä</b>	<b>Näytemäärät yhteensä</b>	<b>Näytteenotto-kerrat</b>
<b>Rakennusmateriaalit</b>	kokonaispitoisuudet ja 2-	9	9* 3 l=27 l	1



	vaiheinen ravistelutesti			
<b>Sadevesi</b>	4 krt ensimmäisen vuoden aikana	4	$4 \cdot 2 \text{ l} = 8 \text{ l}$	4 krt vuodessa
<b>Pintavesi</b>	4 krt ensimmäisen vuoden aikana	4	$4 \cdot 2 \text{ l} = 8 \text{ l}$	4 krt vuodessa
<b>Lysimetrivedet</b>	1 kk:n kokooma	10	kerätään $10 \cdot 1,5 \text{ l} \cdot 4 \text{ vk}$ $= 60 \text{ l}$	4 krt/kk 1. kuukauden aikana
	6 kk:n kokooma (1-6 kk)	10	kerätään $10 \cdot (5 \text{ kk} \cdot 1,5 \text{ l})$ $= 75 \text{ l}$	1 krt/kk 2-6. kuukausien aikana
	6 kk:n kooma (6-12 kk)	10	kerätään $10 \cdot (6 \text{ kk} \cdot 1,5 \text{ l})$ $= 90 \text{ l}$	1 krt/kk 7-12. kuukausien aikana
		yhteensä 47 kpl	<b>vesinäytteet</b> yhteensä 241 l <b>kiinteät näytteet</b> yhteensä 27 l	

## 11. RAPORTOINTI

Koerakenteiden raportointi etenee vaiheittain. Ensimmäisessä vaiheessa on suositeltavaa raportoida itse rakentamisen vaiheet ja edellisen yhteydessä tehdyt havainnot, arvioida koerakentamisen lopputulosta/laatua, määritellä lopullinen jatkoseurantasuunnitelma sekä esittää arvio lisätutkimusta tai – selvityksiä edellyttävistä asioista.

Rakentamisen jälkeen analysoitavat parametrit ja niistä saatavat tulokset kannattaa käsitellä ja raportoida esim. puolivuositain, jotta voidaan paremmin määritellä tarvittavan seuranta-ajan pituus. Vähimmäisseuranta aika on 1 vuosi, jonka jälkeen päätetään erikseen seurannan jatkamisesta. Huomioitavaa on, että tiivisrakenteista saatavat vesimäärät voivat olla varsin vähäisiä, jolloin 1 vuoden seuranta-aika on varsin lyhyt muutosten havaitsemiseksi esim. veden laadussa.

Raportointia varten tarvittavia tietoja:

- punnitustiedot, lähtötiedot materiaaleista (w %)
- tavaroiden toimittajat
- materiaalien logistiikka/siirtely
- tavaroiden liikuttaminen, varastointi
- käytetty kalusto
- materiaalien ja niitten seosten homogeenisuus, sekoituksessa havaitut hankaludet/ongelmat, kehitysideat
- rakentajien ajatukset; suuremman mittakaavan rakentaminen /laitekehitystarve jne.
- ...

Palaveri koerakentamisen jälkeen, yhteenvetopalaveri/palautepalaveri

→ tarkistus raportille

## LIITTEET

### Liite 1, Käytettävien materiaalien ominaisuudet

#### Ennakkotieto

	<b>Rakeisuus</b>	<b>Vesipitoisuus (%)</b>	<b>kuivatiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Vedenläpäisevyys (m/s)</b>
<b>Rikastushiekka (karkea)</b>	vastaa hiekkaa		1800	$4,9 \cdot 10^{-7}$
<b>Rikastushiekka (hieno)</b>	vastaa hiekkaa	n. 20- 23	2000	$2,1 \cdot 10^{-9}$
<b>Moreeni</b>		n. 9-12	n. 2300	$2,4 \cdot 10^{-9}$
<b>Kipsi</b>	vastaa hiekkaa	n. 20-30	1503	
<b>Tuhka</b>	vastaa silttiä	n. 15%	1067	
<b>Kasvukerros</b>				
<b>Inertti</b>				

Kaikkien materiaalien tiedot (vesipitoisuudet ja tiheydet) tarkistetaan paikanpäällä.

#### Käytettävien materiaalien ominaisuudet, määritetään paikanpäällä

	<b>Rakeisuus</b>	<b>Vesipitoisuus (%)</b>	<b>Tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Rikastushiekka (karkea)</b>			
<b>Rikastushiekka (hieno)</b>			
<b>Moreeni</b>			
<b>Kipsi</b>			
<b>Tuhka</b>			
<b>Kasvukerros</b>			
<b>Inertti</b>			

## Liite 2, Koerakenteet



Liite 3, Arvioidut materiaalmäärät rakentamisessa (tilavuudet ja tiheydet tiivistettynä)

Astian nro	Materiaali	kerrospaksuus tiivistettynä (m)	kuiva massa määrät (kg)	Tilavuus (m <sup>3</sup> )	kuivatiheys (kg/m <sup>3</sup> )
1	kasvukerros	0,15		0,68	
	tuhka	0,1	498	0,45	1100
	rikastushiekka (karkea)	1,4	11400	6,33	1800
	inertti	0,2		0,90	
2	kasvukerros	0,15		0,68	
	tuhka	0,1	498	0,45	1100
	rikastushiekka (hieno)	1,4	0	6,33	
	inertti	0,2		0,90	
3	kasvukerros	0,15		0,68	
	rikastushiekka + tuhka	0,5	3620	2,26	2080
	rikastushiekka (hieno)	1	9048	4,52	2000
	inertti	0,2		0,90	
4	kasvukerros	0,15		0,68	
	moreeni	0,8	8324	3,62	2300
	rikastushiekka (karkea)	0,7	5700	3,17	1800
	inertti	0,2		0,90	
5	rikastushiekka (karkea)	1,65	13436	7,46	1800
	inertti	0,2		0,90	
6	kasvukerros	0,15		0,68	
	kipsi	0,5	3400	2,26	1503
	rikastushiekka (karkea)	1	8143	4,52	1800
	inertti	0,2		0,90	
7	kasvukerros	0,15		0,68	
	moreeni + kipsi	0,5	1564, 2375	0,68 ja 1,58	
	rikastushiekka (karkea)	1	8143	4,52	1800
	inertti	0,2		0,90	
8	rikastushiekka (hieno)	1,65	14929	7,46	2000
	inertti	0,2		0,90	
9	kasvukerros	0,3		1,36	
	rikastushiekka (hieno)	1,35	12215	6,11	2000
	inertti	0,2		0,90	
10	kasvukerros	0,15		0,68	
	kipsi	0,15	1020	0,68	1503
	rikastushiekka (hieno)	1,35	12215	6,11	2000
	inertti	0,2		0,90	

Sadantatiedot perustuvat Ilmatieteenlaitoksen tilastoihin Haapaveden Mustikkamäen sääasemalta vv. 1988-2010.

-vuosisadanta 530 mm

-haihdunta 50% (vakioitu tässä yhteydessä)

-imeytyvä vesimäärä 265 mm / v

-tilavuutena  $0,265 \text{ m}^3/\text{v}$  --  $266 \text{ l}/\text{v}/\text{m}^2$  --  
viikko

vastaa n. 4-10 l vesimääriä /m<sup>2</sup> /

tammikuussa 18 l

helmikuussa 13 l

maaliskuussa 13 l

huhtikuussa 12 l

toukokuussa 21 l

kesäkuussa 29 l

heinäkuussa 36 l

elokuussa 37 l

syyskuussa 26 l

lokakuussa 23 l

marraskuussa 20 l

joulukuussa 18 l

-tiivisrakenteen läpi teoreettisesti imeytyvä vesimäärä vuodessa:

-k-arvolla  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  = 32 m vuodessa

-k-arvolla  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  = 3,2 m vuodessa

-k-arvolla  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  = 0,32 m vuodessa

-kerättävät vesimäärät lysimetreistä ovat arviolta  $1 \text{ m}^2$  alueelta:

-arvolla  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$  → kaikki läpi suotautuva vesi (maks. 300 l)

-arvolla  $1 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$  → kaikki läpi suotautuva vesi (maks. 300 l)

-arvolla  $1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  → jos tiivisrakenteen paksuus on alle 0,32 m, suotautuu rakenteen läpi kaikki vesi (maks. 300 l)

Astioiden pinta-ala:  $4,5 \text{ m}^2$

Sadanta tilavuutena  $0,265 \text{ m}^3/\text{v}$  --  $266 \text{ l/v}$  -- vastaa n. 4-10 l vesimääriä / $\text{m}^2$  / viikko

Maksimi näytemäärä / koeastia: 1197 l / v

Näytemäärä / koeastia / kuukausi

tammikuussa 81 l

helmikuussa 58,5 l

maaliskuussa 59,5 l

huhtikuussa **54 l**

toukokuussa 94,5 l

kesäkuussa 130,5 l

heinäkuussa 162 l

elokuussa **166,5 l**

syyskuussa 117 l

lokakuussa 103,5 l

marraskuussa 90 l

joulukuussa 81 l

**NÄYTTEENOTTO, ASTIAKOKKEET** (Täytetään viikoittain)

Näytteenotto päivämäärä: \_\_\_\_\_

Näytteenottaja: \_\_\_\_\_

Mikrolysimetriä painot= \_\_\_\_\_ ja \_\_\_\_\_

Muut huomiot mikro-lysimetristä:

Lumen paksuus = \_\_\_\_\_

Lisätty vesimäärä = \_\_\_\_\_ (Jos vettä lisätään, tulee jokaiseen koeastiaan lisätä saman verran vettä)

Mitattu sadanta edellisestä näytteenotosta: \_\_\_\_\_ (tieto sääasemalta)



<b>Astian nro</b>	<b>Vesi rakenteen pinnassa</b>	<b>Vesimäärä lysimetri-kaivossa ennen näytteenottoa (A)</b>	<b>Pakastettava näyte (I) ja näytepullon merkinnät</b>	<b>Vesimäärä pohjakaivossa ennen tyhjennystä (B)</b>	<b>Suotautuneen veden kokonaismäärä (A+B)</b>	<b>Huomiot / Havainnot (vauriot yms.)</b>
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						

<b>8</b>						
<b>9</b>						
<b>10</b>						

- mikäli vesi seisoo rakenteen pinnassa (tunnustele kasvukerroksen vettyminen), arvioidaan poistoputken avaamistarvetta.

Lomakkeen täyttöohjeet ja huomioitavat seikat

**Näytteenotto-ohjeet:**

Näytteet otetaan jokaisesta astiakokeesta. Näytteenoton yhteydessä, näytteenoton jälkeen suotautuneen veden kokonaismäärä mitataan litroina. Tämän jälkeen keräilykaivo tyhjenetään suotautuneesta vedestä. Muista lisätä suotautuneen veden määrään lysimetrikaivon näytemäärä. Näytteenoton yhteydessä tarkistetaan rakenteiden kunto ja ympäristö. Mahdolliset huomiot ja havainnot kirjataan näytteenottolomakkeeseen.

**Näytepulloon tulevat merkinnät:**

- Näytteenotto paikka (PS1 – PS10)
- Näytteenotto kerran järjestysnumero/viikkonumero (1/53 – 53/53)
- Rinnakkaisnäytteiden koodi (a,b,c,d,e, ja f)
- Näytteenotto päivämäärä

Esimerkki; PS1\_1a/53 pvm. 27.10.2015

Kaikki kaivot tyhjennetään samalla kertaa. Poistetut vesimäärät kirjattava aina lomakkeeseen.

LIITE 6. Näytteenotto (Ramboll), koerakenteiden materiaalit.

Näytteen ottaja ja päivämäärä: \_\_\_\_\_

Lämpötila: \_\_\_\_\_

Sateisuus / Kosteus: \_\_\_\_\_

Tuulisuus: \_\_\_\_\_

Muut huomiot: \_\_\_\_\_

<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin saapumispäivä</b>	<b>Näytteenotto päivämäärä</b>	<b>Näytteenottaja</b>	<b>Huomiot, Havainnot</b>	<b>Kokonaispitoisuudet</b>	<b>Liukoisuudet</b>
<b>Moreeni</b>						
<b>Kipsi</b>						
<b>Tuhka</b>						
<b>Rikastushiekka (karkea)</b>						
<b>Rikastushiekka</b>						

<b>(hieno)</b>						
<b>Inertti</b>						
<b>Kasvukerros</b>						

TIEDON KERÄÄJÄ: \_\_\_\_\_

PÄIVÄMÄÄRÄ: \_\_\_\_\_

**KULJETUS JA VARASTOINTI:**

	<b>KYLLÄ</b>	<b>EI</b>	<b>HUOMIOT</b>
<b>Materiaalien tuontipäivät:</b>			
Kipsi			
Tuhka			
Kasvukerros			
Inertti			
Moreeni			
Rikastushiekat			
Muu materiaali			
<b>Homogenisointi</b>			
Kipsi			
Tuhka			
Kasvukerros			
Inertti			
Moreeni			
Rikastushiekat			
<b>Varastointi</b>			
kipsi			
tuhka			
<b>Pölyävyys</b>			
mm. tuhka			
Materiaalien näytteenotto			

<b>Materiaali</b>	<b>Vesipitoisuus</b>	<b>Homogeenisuus</b>	<b>Tiheys</b>	<b>Käsiteltävyys, rakennettavuus</b>
<b>Inertti</b>				
<b>Rikastushiekka (hieno)</b>				
<b>Rikastushiekka (karkea)</b>				
<b>Tuhka</b>				
<b>Kipsi</b>				
<b>Moreeni</b>				
<b>Kasvukerros</b>				

Tiedon kerääjä: \_\_\_\_\_

Päivämäärä: \_\_\_\_\_

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoisuus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 1</b>	Kasvuker- ros				
	tuhka				
	rikastus- hiekk (karkea)				
	inertti				

**Huomiot:**

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoisuus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 2</b>	Kasvuker- ros				
	tuhka				
	rikastus- hiekk (hieno)				
	inertti				

**Huomiot:**



	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoisuus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 3</b>	Kasvuker- ros				
	rikastus- hiekka +tuhka				
	rikastus- hiekka (hieno)				
	inerti				

**Huomiot:**

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoi- suus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 4</b>	Kasvuker- ros				
	moreeni				
	rikastus- hiekka (karkea)				
	inerti				

**Huomiot:**

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoi- suus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 5</b>	rikastus- hiekka (karkea)				
	inerti				

**Huomiot:**

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoisuus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 6</b>	Kasvuker- ros				
	kipsi				
	rikastus- hiekk (karkea)				
	inerti				

**Huomiot:**

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoisuus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 7</b>	Kasvuker- ros				
	moreeni + kipsi				
	rikastus- hiekk (karkea)				
	inerti				

**Huomiot:**

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoisuus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 8</b>	rikastus- hiekk (hieno)				
	inerti				

**Huomiot:**

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoisuus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 9</b>	Kasvuker- ros				
	rikastus- hiekka (karkea)				
	inertti				

**Huomiot:**

	<b>Materiaali</b>	<b>Materiaalin vesipitoi- suus (%)</b>	<b>Märkämas- sa (kg)</b>	<b>Toteutunut kerrospak- suus (m)</b>	<b>Toteutu- nut tiheys (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Koerakenne 10</b>	Kasvuker- ros				
	tuhka				
	rikastus- hiekka (hieno)				
	inertti				

**Huomiot:**