



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

BENTONIITTI—MOREENI- SEOKSEN SOVELTUVUUS KAATOPAIKAN POHJA JA- PINTARAKENTEENA

TEKIJÄ: Valtteri Kinnunen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Ympäristötekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Valtteri Kinnunen	
Työn nimi Bentoniitti-moreeniseoksen soveltuvuus kaatopaikan pohja- ja pintarakenteena	
Päiväys	21.4.2017
Sivumäärä/Liitteet	37
Ohjaaja(t) lehtori Teemu Räsänen, yliopettaja Merja Tolvanen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Jätekkukko Oy, Suomen GPS—Mittaus Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämä opinnäytetyö tehtiin toimeksiantona Jätekkukko Oy:lle, joka jalostaa ja ohjaa jätemateriaaleja uusiokäyttöön. Työn tarkoituksena oli selvittää laboratoriokokein eri seoksien soveltuvuutta kaatopaikan materiaaliksi. Lisäksi työstä oli tuotettava kirjallinen raportti. Työssä keskityttiin bentoniitti-moreeniseoksen vedenläpäisevyyden mittaamiseen. Laboratoriokokeilla selvitettiin, voisiko seos soveltua kaatopaikan pohja- tai pintamateriaaliksi. Työssä selvitettiin moreenin rakeisuus ja maksimitilavuuspaino, jotta pystyttiin suorittamaan vedenläpäisevyyskokeita erilaisille bentoniitti-moreeni seoksille. Bentoniitti on savimaalaji, jonka tärkein ominaisuus on sitomiskyky. Se syntyy kemiallisen rapautumisen tuloksena syntyneistä savikivennäisistä.</p> <p>Opinnäytetyön teoriaosuudessa tarkasteltiin moreenin ja bentoniitin ominaisuuksia sekä kaatopaikan pohja- ja pintarakenteita. Työn kokeet suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun kiviaineslaboratoriossa sekä Suomen GPS-mittauksen toimitiloissa. Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa suoritettiin rakeisuus ja proctor kokeet, jotka oli tehtävä ennen vedenläpäisevyyskoetta. Rakeisuus ja proctor tulosten perusteella pystyttiin laskemaan näytteiden määrä vedenläpäisevyyskokeisiin, koska maalaji ja seoksen kuivatilavuuspaino vaikuttavat tehtävään näytteeseen. Vedenläpäisevyyskokeet suoritettiin Suomen GPS-mittauksella, koska heillä oli laitteisto, jolla kokeet pystyttiin suorittamaan. Laitteiston käyttäminen harjoiteltiin Suomen GPS-mittauksen henkilökunnan avustuksella. Laitteistossa seurattiin etu- ja takapainesellien vedenpinnan vaihtelua ja tehtiin muutoksia paine-eroihin.</p> <p>Mittauksesta saadut tulokset kirjattiin excel-taulukkoon, josta saatiin vedenläpäisevyytuloksen karvo. Saatujen tulosten perusteella yksikään seos ei soveltuisi käytettäväksi kaatopaikan materiaalina.</p>	
Avainsanat bentoniitti, moreeni, vedenläpäisevyyskoe, rakeisuus, proctor-koe	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Environmental Technology			
Author(s) Valtteri Kinnunen			
Title of Thesis Suitability of the Morain—Bentonite-Mixture as the Bottom or Surface Structure of the Landfill			
Date	15 May 2017	Pages/Appendices	37
Supervisor(s) Mr Teemu Räsänen, Senior Lecturer and Ms Merja Tolvanen, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Jätekuukko Oy, Suomen GPS—Mittaus Oy			
<p>Abstract</p> <p>This thesis was commissioned by Jätekuukko Oy, who refines and routes waste materials for reuse. The goal of the thesis was to find out the suitability of different mixtures as a material for landfill through laboratory tests. The thesis focused on measuring the water permeability of the bentonite—moraine-mixture. Granularity, proctor and water permeability tests were carried out. Bentonite is a clay soil the most important feature of which is binding power. It is arise from clay soils resulting from chemical weathering.</p> <p>In the theoretical part of the thesis, the features of the moraine and bentonite as well as the base and surface structures of the landfill were examined. The tests were performed at Stone Laboratory of Savonia University of the Applied Sciences and the Suomen GPS-mittaus. The granularity and proctor tests were made at Savonia University of the Applied Sciences. These tests had to be performed before the water permeability test. Based on the proctor and granularity, sample volumes were calculated for water permeability tests. Water permeability tests were carried out with Suomen GPS-mittaus because they had the equipment to carry out the test. The staff trained the use of the equipment. The equipment monitored the variation of the water surface of the front and rear pressurized cylinders and exchanged pressure differences.</p> <p>The results from the measurement were recorded in the excel table from which the k-value of the water permeability was obtained. On the basis of the results, mixtures are not suitable as materials for the landfill.</p>			
Keywords bentonite, moraine, water permeability, granularity, proctor			

ESIPUHE

Kiitän opinnäytetyöni ohjaajaa Teemu Räsästä opinnäytetyöni aiheesta, koska aihe tuli hänen projektikurssin kautta minulle. Syksyn projektikurssilla opin kantapään kautta miten opinnäytetyössä täytyy edetä ja miten tavoitteeseen päästään. Lisäksi suurkiitokset kuuluvat Joni Mutaselle, jonka kanssa tutkimukset on toteutettu.

Kuopiossa 17.5.2017

Valtteri Kinnunen

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	JÄTEKUKKO OY	8
3	KAATOPAIKKA.....	9
3.1	Pohjaeristys ja sen rakenneosat	9
3.2	Pintaeristykseen rakenneosat	11
4	LAINSÄÄDÄNNÖN ASETTAMAT VAATIMUKSET KAATOPAIKAN RAKENTEILLE.....	13
4.1	Pohjarakenteet	13
4.2	Pintarakenteet	13
5	TUTKIMUSPROSESSISSA KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT	14
5.1	Bentoniitti.....	14
5.2	Moreeni.....	16
6	TEORIAA TUTKIMUSPROSESSISSA KÄYTETTÄVISTÄ MENETELMISTÄ.....	17
6.1	Maaperänäytteenotto kiviainestutkimuksissa	17
6.2	Rakeisuus.....	17
6.3	Pesuseulonta	18
6.4	Kuivaseulonta	18
6.5	Areometrikoe.....	18
6.6	Proctor-koe	19
6.7	Vedenläpäisevyyskoe	19
7	TUTKIMUSPROSESSIN KOKEIDEN SUORITUS	20
7.1	Tutkimusprosessin kulku	20
7.2	Maaperänäytteenotto	20
7.3	Rakeisuus.....	20
7.4	Pesuseulonta	21
7.5	Kuivaseulonta	21
7.6	Areometrikoe.....	21
7.7	Proctor-koe	22
7.8	Vedenläpäisevyyskoe	23
8	TULOKSET	25
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	30
10	YHTEENVETO.....	31

11 LÄHTEET	32
LIITE 1: PROCTOR KOKEIDEN TULOKSET	34
LIITE 2: VEDENLÄPÄISEVYYS MITTAUSPÖYTÄKIRJA	35
LIITE 3: GRADIENTTI TAULUKKO	37

1 JOHDANTO

Kaatopaikassa on pohja- ja pintarakenteet, joiden avulla suojataan ympäristöä (Kaatopaikan tiivistysrakenteet 2002). Rakenteille on asetettu ohje-arvoja, joiden mukaan kaatopaikka rakennetaan. Pyrkimyksenä on estää suotovesien kulkeutumista ja imeytymistä ympäristöön (LHJ konserni, 2017). Kaatopaikkoja on kolmea eri tyyppiä, vaarallisen-, tavanomaisen ja pysyvän jätteen kaatopaikka. Rakenteille on asetettu vaatimuksia, jotka vaihtelevat kaatopaikan tyyppin mukaan. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista, 331/2013 6§.)

Työn tarkoituksena oli selvittää, soveltuuko bentoniitti—moreeni-seos kaatopaikan materiaaliksi. Kaatopaikalle on asetettu raja-arvot, jotka on täytettävä, ennen kuin seosta voidaan hyödyntää kaatopaikan pohja- tai pintamateriaalina. Työssä keskitytään materiaalin seoksen vedenläpäisykokeisiin, jonka lisäksi tehtiin rakeisuus ja proctor-koe määrityksiä. Opinnäytetyön toimeksiantajan Jätekuikko Oy:n on mahdollista hyödyntää työstä saatavia tuloksia omassa toiminnassaan ja jatkaa seosten lisätutkimuksia seoksen soveltuvuudelle. Laboratoriomittaukset on suoritettu Suomen GPS mittauksella yhdessä henkilökunnan kanssa, sekä Savonian-ammattikorkeakoululla maa-aineslaboratoriossa. Suoritimme yhdessä Joni Mutasen kanssa työn kokeellisen osuuden, joten tutkimme myös lentotuhka—moreeni-seosta. Theseuksessa julkaistussa opinnäytetyössä (Mutanen 2017) kuvataan lentotuhka—moreeni-seoksien analyysit ja tulokset.

Kaatopaikan pohja- ja pintarakenteilla pyritään estämään suotovesien kulkeutumista ja haitta-aineiden imeytymistä ympäristöön. Jotta moreeni—bentoniitti-seosta voidaan käyttää kaatopaikan rakenteena, on vedenläpäisevyysarvon oltava $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. (Kaatopaikan tiivistysrakenteet 2002, 51.) Muiden henkilöiden aikaisemmin tekemissä tutkimuksissa, on perehdytty bentoniitti—hiekkaseoksiin, joiden vedenläpäisevyyden k-arvot ovat raja-arvojen mukaisia. Tulokset bentoniitin ja hiekan vedenläpäisystä ovat $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s ja $k \leq 1 \cdot 10^{-14}$ m/s välillä. Osa tuloksista on saatu pelkällä bentoniitilla, jossa on huomattu sen hyvät turpoamisominaisuudet. (International Journal of the Physical Sciences 2010, 1654.)

2 JÄTEKUKKO OY

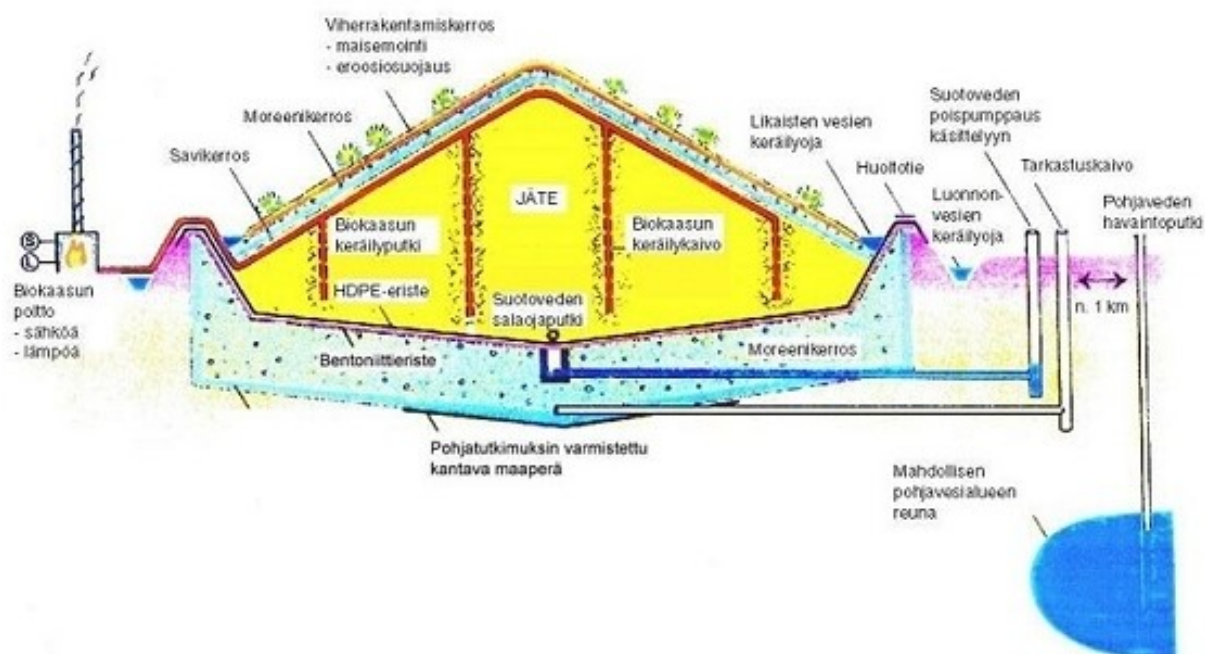
Työn tilaajana toimii Jätekuukko Oy, joka on kuntien omistama jätehuolto-yhtiö. Kuopion jätekeskuksella Heinälammennrinteen alueella työskentelee kymmenen yritystä ja noin 50 henkilöä. Jätekeskuksen tehtävänä on ohjata ja jalostaa jätemateriaaleja uusiokäyttöön. Jätekeskuksella hyödynnetään vuosittain tulevista jätteistä jopa 90 % ja materiaalien uusiokäyttö korvaa menetettyjä luonnonvaroja. Heidän palveluihinsa kuuluvat jätteenkuljetuspalvelut, lajitteluasemat, jätehuollonpalveluneuvonta, sekä täydentävät ekopisteet ja Kuopion jätekeskus. Jätekuukko vaikuttaa 16 alueella, jonka asukasmäärä on 220 000. (Kuopion Jätekuukko Oy, 2017.)

Vuodesta 2008 lähtien loppusijoitettavan jätteen määrä on tasaisesti vähentynyt Jätekuukko Oy:lla. Tulevaisuudessa loppusijoitettavien jätteiden määrä edelleen pienenee, mutta vastaanotettavien jätteiden kokonaismäärä kasvaa. Vuonna 2003 loppusijoitettavien sekajätteiden määrä on ollut 4000 tonnia ja arvio vuodesta 2016 oli vain 1000 tonnia. Jätekeskuksella on käytössä ainoastaan tavanomaisen jätteen loppusijoitusalue. Jätekeskuksen loppusijoitusalue jaetaan neljään täyttöalueeseen. Ensimmäinen 7,65 hehtaarin kokoinen täyttöalue oli käytössä vuosina 1992-2001 ja se maisemoitiin vuosina 2002 ja 2003. Toinen 3,6 hehtaarin kokoinen täyttöalue oli käytössä vuodesta 2002 eteenpäin ja siihen tehty laajennusosa on ollut käytössä vuodesta 2005 eteenpäin. Vuonna 2012 loppusijoitusalue tuli täyteen, mutta kolmas täyttöalue otettiin jo vuonna 2009 käyttöön ja se maisemoitiin osittain 2013 ja 2014. Nykyisellä noin 7,1 hehtaarin loppusijoitusalueella on arvioitu pärjäävän seuraavat 12 vuotta. (Aluehallintovirasto 2015, 19)

Jätetäyttö suoritetaan täyttämällä jäte kerroksittain ja jätteiden tulisi viettää keskelle täyttöaluetta. Kerroksen paksuus kerralla tiivistettäessä voi olla suurimmillaan 1-2 m. Kaatopaikkajyrällä jäte murskataan, tasoitetaan ja tiivistetään. Kun täyttökerros on valmis, se peitetään välipeittomateriaalilla (ylijämmämaat) ja täyttöalue luiskataan lopulliseen muotoon. Valmis täyttöalue viimeistellään ohuella kerroksella hienoainemoreenia, jonka päälle voidaan tarvittaessa rakentaa hapetuskerros kompostin seoksista. (Aluehallintovirasto 2015, 19)

3 KAAKTOPAIKKA

Kaato paikalle tapahtuvan loppusijoittamisen myötä, pohjarakenteen on oltava vesitiivis. Rakenteen täytyy noudattaa vedenläpäisevyyden ohje arvoja, vesien valumisen estämiseksi ympäristöön. Kaato paikkaan sijoitetaan materiaali- ja energiakäyttöön kelpaamattomia jätteitä, joten kaato paikan rakenteiden on oltava kunnossa (kuva 1). (LHJ konserni, 2017.)



Kuva 1. Kaato paikan rakenne (LHJ konserni, 2017)

3.1 Pohjaeristys ja sen rakenneosat

Pohjaeristuksen tehtävänä on tehostaa suotovesien keräystä ja vähentää haitta-aineiden pääsyä ympäristöön. Lisäksi sen on kestävä kemiallinen ja fysikaalinen rasitus, joka siihen kohdistuu. Täydentävä kerros, johon bentoniitti—moreeni-seoksen soveltuvuutta tutkitaan, on vedenläpäisevyys arvon oltava $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. (Kaato paikan tiivistysrakenteet 2002, 51.)

Alusrakenteena toimii pohjamaa, jonka on oltava kantavaa. Pohjamaan yläpinta on rakeisuusominaisuuksiltaan sellaista, että mineraalisen tiivistysrakenteen materiaali ei pääse kulkeutumaan alusrakenteeseen (kuva 2). Pohjamaasta on myös selvitettävä sen vedenläpäisy ja kantavuusominaisuudet laboratoriokokeiden avulla. (Kaato paikan tiivistysrakenteet 2002, 53.)

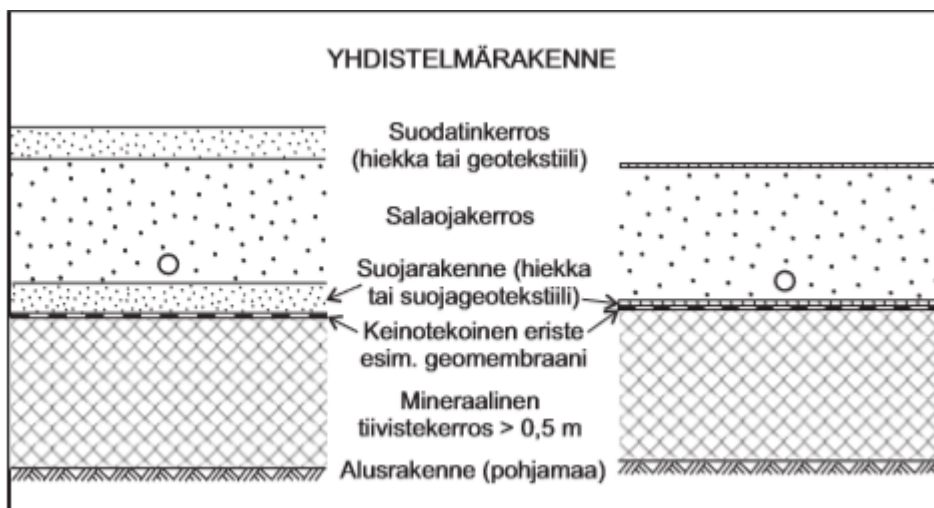
Mineraalinen tiivistekerros estää haitta-aineiden pääsyn ja minimoi diffuusion. Tietyissä tapauksissa se pystyy sitomaan itseensä haitta-aineita, kuten raskasmetalleja. Mineraalisessa tiivistekerroksessa materiaaleina käytetään yleensä kivennäismaa-aineita. Kivennäismaalajien vedenläpäisevyyttä pienennetään tarpeen tullen lisäaineilla, kuten bentoniitilla. Käytettävät materiaalit on tutkittava kokeilla ennen materiaalin valintaa. (Kaato paikan tiivistysrakenteet 2002, 54—55.)

Keinotekoinen eriste toimii täydentävänä kerroksena koskien mineraalista tiivistyskerrosta. Se pystyy pidättämään erilaisia aineita ja tehostamaan suotovesien keräystä. Yleensä keinotekoisena eristeenä käytetään geomembraania, joka valmistetaan HDPE:stä. Tehokasta on rakentaa yhdistelmä rakenne, koska sen avulla voidaan estää tehokkaammin haitta-aineiden kulkeutuminen. Geosynteettinen tiivistyskalvo ja mineraalinen tiivistyskerros pidättää haitta-aineita, kuten orgaanisia yhdisteitä. Yksittäisen rakenteen avulla ei pystytä pidättämään yhtä tehokkaasti haitta-aineita. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 55—56.)

Yläpuolinen suojarakenne on tarkoitettu vastaanottamaan ja jakamaan yläpuolisista kerroksista aiheutuvia termisiä ja mekaanisia kuormituksia. Tämän avulla voidaan estää pysyvät muodonmuutokset keinotekoiseen eristeeseen. Suojarakenteella on monia tärkeitä tarkoituksia, kuten suojaa keinotekoisesta rakennetta rakennustyön aikana ja suojelee kalvoa jätepenkereessä kehittyvältä lämmöltä. Suojarakenne voidaan toteuttaa mineraaliaineksesta, neulasidotusta geotekstiilistä tai niistä yhdessä. Myös muut materiaalit soveltuvat, mikäli ne pystyvät vastaanottamaan kalvoon kohdistuvat kuormitukset. Mineraalisen suojakerroksen paksuuden tulee olla vähintään 100 mm. Suojakerroksessa voidaan myös käyttää bentoniitti tai hiekkamattoa. Esimerkiksi Jätekukolla on ollut kaatopaikalla käytössä bentoniittimatto. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 56—57.)

Salaojakerros voidaan rakentaa salaojasorasta tai murskeesta, jotka ovat mieluiten pyöreärakeista kiviainesta. Materiaalin valinnassa on otettava huomioon vedenläpäisy ja rakeisuusominaisuuksien lisäksi, myös sen pitkäaikainen kemiallinen ja mekaaninen kuormituskestävyys, sekä hydraulisten ominaisuuksien pysyvyys. Hydraulisiin ominaisuuksiin on kiinnitettävä erityisesti huomiota, sillä suotovedet sisältävät haitta-aineita, kuten mikrobeja ja hienoaainesta, jotka voivat tukkia salaojakerroksen. Lisäksi materiaalin valinnassa on keskityttävä siihen, että se kestää suotoveden aiheuttaman kemiallisen rasituksen ja työkaluiden kuormitukset. Salaojituksen tehtävänä on poistaa ja kerätä jätetäytöstä kertyvät suotovedet, sekä pyrkiä vähentämään tiivisrakenteen päälle rakentuvaa vesipainetta. Salaojakerroksen vähimmäispaksuuden on oltava 0,5 m (VNp 861/97). (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 57—58.)

Suodatinkerros on uloin kerros, jonka avulla voidaan estää mekaanista tukkeutumista, kun se rakennetaan salaojituksen ja jätteen väliin. Suodatin kerroksen tehtävänä on erottaa jätetäyttö salaojituskerroksesta ja kiintoaineksen kulkeutumisen estäminen salaojakerrokseen, jotta salaojakerros ei tukkeudu. Hienorakeisilla materiaaleilla, kuten tuhalla on vaara tukkeutua. Sillä läjitettäessä hienorakeisia materiaaleja on olemassa riski salaojituskerroksen mekaaniselle tukkeutuvuudelle. Suodatinkerroksessa käytettäviä materiaaleja ovat suodatinkangas tai voidaan käyttää maa-aineksia, joiden suodatusominaisuudet on selvitettävä. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 58.)



Kuva 2. Kaatopaikan pohjan rakenneosat (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 52)

3.2 Pintaeristyksen rakenneosat

Pintaeristys on rakennettava, kun täyttöalue on saavuttanut lopullisen korkeutensa (kuva 3). Sen tehtävänä on estää sade- ja pintavaluntavesien imeytyminen jätemassaan, sekä suotovesien muodostuminen ja haitta-aineiden pääseminen ympäristöön. Pintaeristyksestä on tehtävä hyvä, jotta se on läpäisemätön, sekä mekaanisesti ja kemiallisesti kestävä. Eristykseen käytettävällä materiaalilla on oltava riittävä muodonmuutoskyky, koska jätepenkereessä epätasaisia painumia. Painaumat johtuvat jätepenkereen epähomogeenisuudesta ja jäterungon sisäisestä kokoonpuristamisesta. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 58–59.)

Pintaeristyksessä ja jätetäytön muotoilusta on huolehdittava, koska pintakaltevuudet vaikuttavat pintakuivatukseen ja jätetäytön painumiseen. Huomioitavaa on, että pintakaltevuudet ovat sopivat, jotta pintaeristyksen stabiliteetti toimii. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 60.)

Esipeittokerros toimii mineraalisen tiivistyskerroksen ja jätteen sekoittumisen estäjänä. Lisäksi se johtaa kaasun kaasunkeräyskerrokseen ja jakaa paineen ylempiä kerroksia tiivistettäessä. Esipeittokerros voidaan valmistaa täytön edetessä ylijäämämaasta tai muusta luonnonmaa-aineksesta. Kerroksen vähimmäispaksuus on oltava 0,3 m ja kaltevuus vähintään 5 %. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 60.)

Kaasunkeräyskerros on tarpeellinen ongelmajätteen kaatopaikalla, mikäli jäte muodostaa kaasua. Kerroksen minipaksuus on oltava vähintään 0,3 m ja se muodostetaan maa-aineksesta. Valmistaminen tapahtuu karkeasta lajittuneesta aineksesta tai geosynteettisestä kerroksesta ja se on liitettävä jätetäytössä olevaan kaasunkeräilyverkostoon. Kaasunkeräyskerroksen toiminnallisia

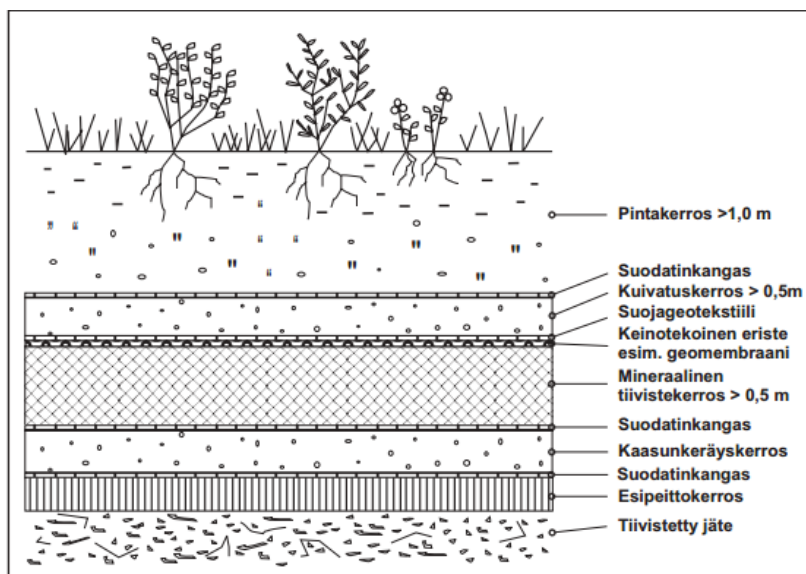
ominaisuuksia on kaasunkeräyskyky, vastustuskyky aggressiivisia kaasukomponentteja vastaan, sekä kestävyys suotovirtauksen suhteen. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 61.)

Tiivistyskerros muodostetaan savesta, siltistä, silttimoreenista, maabentoniittiseoksesta tai muusta ympäristölliset vaatimukset täyttävästä teollisuuden sivutuotteesta. Kerroksen minimipaksuus on oltava 0,5 m ja läpäisevyys arvon tulee olla $k \leq 1 \cdot 10^{-9}$ m/s. Tiivistyskerroksen tehtävänä on vähentää sadevesien imeytymistä jätetäyttöön. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 61.)

Keinotekoista eristettä käytetään puolestaan sadevesien imeytymisen estämisessä ja se tehostaa kaasun keräystä. Keinotekoinen eriste vaaditaan ongelmajätteen kaatopaikalla, mutta myös tarvittaessa tavanomaisen jätteen kaatopaikalla. Tavanomaisen jätteen kaatopaikalla se voi olla tarpeen, kun paikka sijaitsee pohjavesialueen läheisyydessä. Eristeen ominaisuuksissa on huomioitava, että se kestää alapuolisten kerrosten ja jätetäytön epätasaisen painumisen. Lisäksi sillä on oltava riittävä kemiallinen kestävyys olosuhteisiin nähden. Käytettävä keinotekoinen eriste on geomembraania ja se on saumattava hitsaamalla. Geomembraanin vähimmäispaksuus on 2,0 mm. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 61—62.)

Kuivatuskerros vähentää tiivistysrakenteeseen tulevaa hydraulista vesipainetta. Kerroksen ominaisuuksissa on otettava huomioon, että se on eroosiokestävä ja vedenläpäisevyyden arvo on $k \geq 10^{-3}$ m/s. Lisäksi sen minipaksuus on oltava 0,5 m (VNp 861/97). (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 62.)

Pintakerroksen tehtävänä on tiivistyskerroksen routasuojaus ja kuivumisen estäminen, sekä sadevesien imeytymisen vähentäminen. Kerros muodostuu vettä pidättävästä luonnonmaa-aineksesta ja sen vähimmäiskerros-paksuus on 1,0 m (VNp 861/97), mutta juurien suojaamista varten voi tarvita paksumpaa rakennetta. (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 62.)



Kuva 3. Kaatopaikan pinnan rakenneosat (Kaatopaikan tiivisrakenteet 2002, 60)

4 LAINSÄÄDÄNNÖN ASETTAMAT VAATIMUKSET KAAKTOPAIKAN RAKENTEILLE

4.1 Pohjarakenteet

Kaatopaikan maaperän tulee olla kantavaa ja sen täytyy täyttää sille asetetut tiiveysvaatimukset. Mikäli tiiveys ei täytä vaatimuksia, on sitä parannettava. Tämä voidaan tehdä rakennetulla tiiveyskerroksella, jotta suojataso saavutetaan. Tiiveyskerroksen paksuus on oltava tavanomaisen ja pysyvän jätteen kaatopaikalla vähintään 0,5 metriä ja vaarallisen jätteen kaatopaikalla 1,0 metriä. Kaatopaikavesi on myös kerättävä, johon vaaditaan kaatopaikan tiivistämiseen tarkoitettu keinotekoinen eriste ja sen päälle kuivatuskerros. Kuivatuskerroksen paksuus tulee olla vähintään 0,5 metriä. (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista, 331/2013, §6.)

Pohjarakenteiden tiiveysvaatimukset:

- Kaatopaikan maaperän (kivennäismaa tai kallio) on täytettävä sellaiset veden kyllästämisen maan vedenläpäisevyys- (K) ja paksuusvaatimukset, että niiden yhdistetty vaikutus vastaa vähintään seuraavia vaatimuksia:
 - 1) vaarallisen jätteen kaatopaikka: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s ja paksuus ≥ 5 m;
 - 2) tavanomaisen jätteen kaatopaikka: $K \leq 1,0 \times 10^{-9}$ m/s ja paksuus ≥ 1 m;
 - 3) pysyvän jätteen kaatopaikka: $K \leq 1,0 \times 10^{-7}$ m/s ja paksuus ≥ 1 m

(Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista, 331/2013 6§, Liite 1.)

4.2 Pintarakenteet

Jätteen täyttöalueen saavutettua lopullisen korkeutensa sen päälle on vaarallisen jätteen kaatopaikalla ja tavanomaisen jätteen kaatopaikalla rakennettava pintarakenteet, jotka on mainittu alla olevassa asetuksessa (taulukko 1). (Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista, 331/2013, §7.)

Taulukko 1. Pintarakenteiden kerrokset

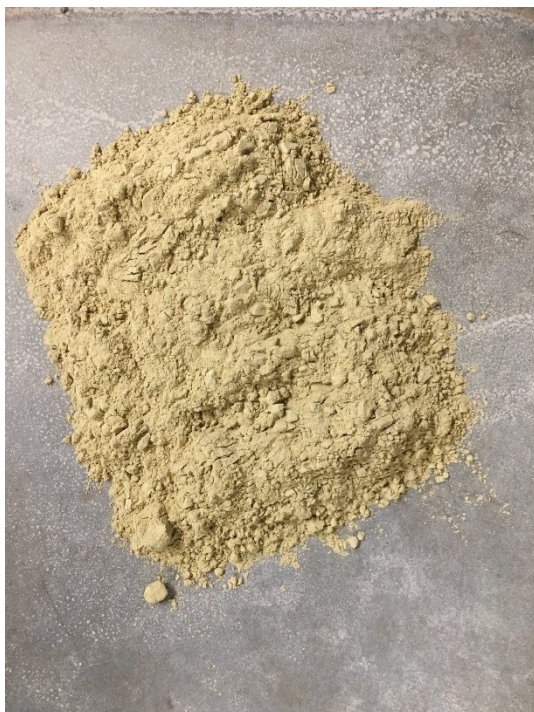
Kerros	Tavanomaisen jätteen kaatopaikka	Vaarallisen jätteen kaatopaikka
Pintakerros ≥ 1 m	Vaaditaan	Vaaditaan
Kuivatuskerros $\geq 0,5$ m	Vaaditaan	Vaaditaan
Tiivistyskerros $\geq 0,5$ m	Vaaditaan	Vaaditaan
Keinotekoinen eriste	Ei vaadita	Vaaditaan
Kaasunkeräyskerros	Vaaditaan	Tarpeen mukaan

(Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista, 331/2013, 7§, Liite 1)

5 TUTKIMUSPROSESSISSA KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT

5.1 Bentoniitti

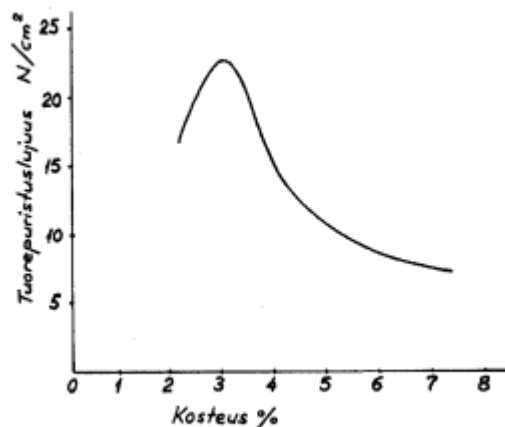
Bentoniitti on savimaalaji ja luonnontuote (kuva 4), joka syntyy kemiallisen rapautumisen tuloksena syntyneistä savikivennäisistä. Bentoniitin tärkein ominaisuus on sitomiskyky, kun se kosteutetaan vedellä. Se pystyy imemään itseensä suuria määriä vettä, jotkut savilajit kykenevät imemään itseensä jopa 600—700% kuivan saven painosta. Kun bentoniitti kostutetaan, se turpoaa ja puolestaan kuivussa se kutistuu. Kostutettuna savi muuttuu tarttuvaksi ja muovailtavaksi seokseksi. (Keskinen ja Niemi 2011, 1.)



Kuva 4. Bentoniitti (Kinnunen, 2017)

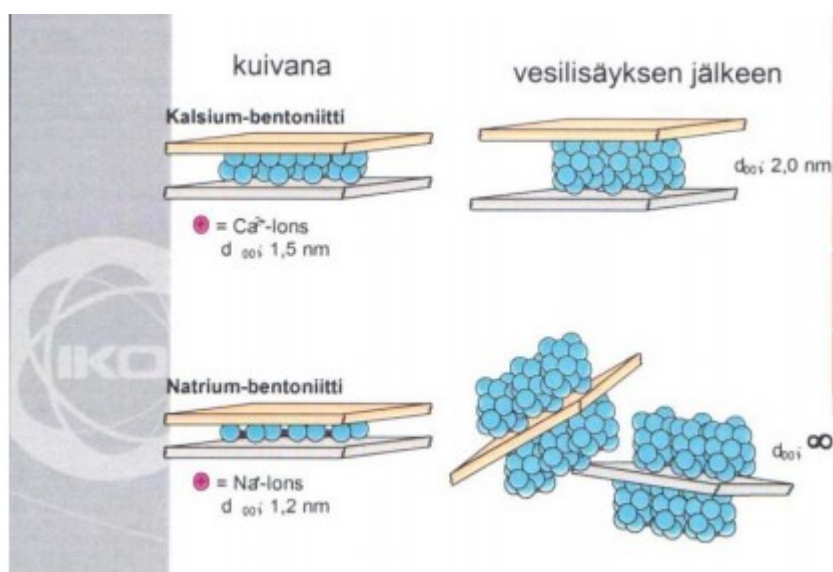
Suomessa esiintyvät savilajit ovat nuoria, jotka ovat syntyneet jääkauden jälkeen. Nämä lajit ovat suurimmaksi osaksi kallioperän hienoksi jauhautuneita kivennäisiä ja niiden sitomiskyky on heikko. Yhdysvalloissa ja Kreikassa saatavat vanhat savimaalajit ovat bentoniittia ja kaoliineja. Niitä ei tavat enää Suomen maaperässä ja ne kuljetetaan muualta tänne. Kreikan Milos-saarella on Euroopan isoimmat bentoniittiesiintymät. (Keskinen ja Niemi 2011, 2.)

Bentoniitilla on hyvä tulenkestävyys ja sitomiskyky. Sitomiskykyä ei kuitenkaan ole kuivalla bentoniitilla, koska vasta bentoniittiin lisättävä vesi tekee sen sitomiskykyiseksi. Aineen sitomiskyky kasvaa vesimäärän lisääntyessä tiettyyn pisteeseen saakka, minkä jälkeen se pienentyy (kuva 5). (Keskinen ja Niemi 2011, 2—3.)



Kuva 5. Veden vaikutus bentoniitin lujuuteen (Keskinen ja Niemi 2011, 3)

Bentoniitti on savipohjaista kiveä, joka on muodostunut vulkaanisen tuhkan rapautumisen seurauksena ja nimi bentoniitti on seurausta löytöpaikasta Yhdysvaltojen Fort Bentonin vuorelta. Bentonitilla olevat erikoiset turpoamis- ja sitomisominaisuudet (kuva 6) ovat kotoisin montmorilloniitti-savi-mineraalista. Montmorilloniitti on monikerrossilikaatti, joka on turpoavaa ainetta.



Kuva 6. Bentoniitin turpoaminen (Keskinen ja Niemi, 2011, 4)

Bentoniittia esiintyy alueilla, jossa on vulkaanista toimintaa eli ympäri maapalloa. Sitä louhitaan ja hienonnetaan sille tarkoitetuissa käsittelylaitoksissa ja sitten se aktivoidaan soodan avulla. Kun bentoniitti on aktivoitu, se levitetään avosäilytykseen, jossa se kuivataan kerroksittain. Bentonititeja on erityyppisiä, kuten kalsiumbentoniitti, natriumbentoniitti ja aktivoitu kalsiumbentoniitti. Kalsiumbentoniitin smektiittiryhmän välikerrokset koostuvat Ca^{2+} tai Mg^{2+} -ioneista, kun taas natriumbentoniitin ryhmät koostuvat pelkästään Na^{2+} -ioneista. Aktivoitussa kalsiumbentoniitissa välikerroksen kationit on korvattu soodan avulla Na^{2+} -ioneilla. Etenkin valimo teollisuus käyttää aktivoituja kalsiumbentoniitteja. (Keskinen ja Niemi, 2011, 4)

Bentoniittihiekkojen märkälujuteen vaikuttaa muotin yläosan seinämiin valetaessa syntyvä lämpögradientti. Siksi tuorehiekkasta höyrystyy vettä ja siihen muodostuu kostea vyöhyke, jonka lujuus on huono. Kun bentoniitti on sekoitettu hyvin, sen märkävetolujuus on 0,40-0,50 N/mm². Käytettäessä kiertohiekkajärjestelmää märkävetolujuus voi olla jopa vain 0,20 N/mm². Märkävetolujuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat hiekanvalmistus, hienoaines, bentoniittityyppi, suolan rikastuttaminen ja hiekkakiertojen lukumäärät. Märkälujuus on vaikuttava tekijä arvioitaessa bentoniittia, koska bentoniitin ominaisuudet perustuvat aineen turpoamiseen ja kosteutumiseen. (Keskinen ja Niemi, 2011, 5.)

5.2 Moreeni

Suomen yleisin pintamaalaji on moreeni ja lähes puolta Suomen maa-alasta peittää pohjamoreeni. Se esiintyy kalliopinnan päällä tiiviinä pohjakerroksena. Moreenimuodostumat ovat kehittyneet jääkaudella mannerjäätikön kallioperästä, sieltä irronneesta kiviaineksesta. (GTK, Moreenikerrostumat.) Maalajina moreeni on yleensä harmaa tai harmaanruskea, koska pohjaveden pinnan yläpuolella rauta voi olla hapettunut, joka aiheuttaa ruskean värin. Moreeni voidaan luokitella aineksen kivilajin-, mineraalien- tai raekoostumuksen perusteella. Lajikoostumukseltaan se on pääsääntöisesti hiekkamoreenia, mutta raekoostumus moreenissa voi vaihdella rapautuneen aineksen ja syntyvän mukaan. Moreenimuodostumat voidaan jakaa kolmeen luokkaan: aktiivisesti virtaavan jäätikön alla muodostuneisiin drumliineihin, jäätikön reunavyöhykkeissä syntyneisiin moreenikumpuihin ja jäätikön reunassa syntyneisiin reunamoreeneihin. (Johansson ja Kujansuu 2005, 34.)

Moreenin nimeäminen tapahtuu sen sisältämien maalajitteiden mukaan. Moreenin sisältäessä yhtä aikaa vähintään 5 % soraa- ja hienoainesta, sitä voidaan nimittää moreeniksi. Lisänimi määräytyy sen mukaan mitä lajitetta se sisältää yli 30 %. Moreeni on sekalajitteista kivimurskaa, jossa on kaikkia kivilajeja raekokoja savesta lohkareisiin. Ominaisuuksia tarkasteltaessa voidaan huomioida huono vedenjohtavuus, johtuen sen sisältämästä hienoaineksesta. Jäätikön kallioperästä on irronnut, murskautunut ja hioutunut kiviainesta, joka on synnyttänyt moreenin. (Ronkainen, 2012, 10–11.)

6 TEORIAA TUTKIMUSPROSESSISSA KÄYTETTÄVISTÄ MENETELMISTÄ

6.1 Maaperänäytteenotto kiviainestutkimuksissa

Maaperänäytteenotossa tavoitteena on saada edustava näyte, joka kuvaa tutkittavaa kohdetta. Näytteenoton suunnitteleminen auttaa näytteenottamisessa ja vähentää virheitä. Sen avulla saadaan laadukkaampia näytteitä ja parempia tuloksia. Näytteenottosuunnitelmassa on otettava huomioon näytteenoton tarkoitus, menetelmä (koekuoppa/lapio näytteenotto), tutkimuspisteet, näytteiden lukumäärä, kenttämittaukset ja aikataulu. Maalaboratoriossa voidaan varmentaa, onko kyseessä moreeni. Moreenin tunnistaminen kentällä on hyvin hankalaa. Maalaboratoriossa voidaan selvittää maa-aineksen geologisia, fysikaalisia, kemiallisia ja teknisiä ominaisuuksia. Näistä yleisimpiä tutkimuksia ovat raekoon, orgaanisen aineksen pitoisuuden ja vesipitoisuuden määrittäminen. Näytteenotossa on myös epävarmuustekijöitä, jotka on huomioitava. Vaikuttavia tekijöitä ovat kohteen ominaisuudet (maalajivaihtelut), näytteenottotekniikan valinta, näytteenottostrategia, näytteenotto, näytteiden käsittely kentällä, sekä kuljetus. (Lepistö, Westerholm, Schultz, Uljas ja Björklöf 2014, 12,14,18,46.)

Kokoomänäytteenoton avulla saadaan otettua edustava näyte. Näytteet on otettava eri paikoista, jotta saadaan osanäytteet, jotka yhdistetään yhdeksi näytteeksi. Kokoomänäytteitä käytetään yleensä analyysimäärien vähentämiseksi ja tarkemman alueellisen edustavuuden saavuttamiseksi. Näytteenotossa kaikkien osanäytteiden on oltava noin samankokoisia. (Lepistö, Westerholm, Schultz, Uljas ja Björklöf 2014, 16.)

Maaperänäytteenotossa näytteet ovat häiriintyneitä tai häiriintymättömiä. Näyte on häiriintynyt, kun maa-aineksen sisäinen rakenne on särkynyt, mutta maan ainesosat ovat tallella alkuperäisessä suhteessa. Tällöin näytteestä on määritettävissä rakeisuus ja humuspitoisuus sekä pohjaveden yläpuolisista näytteistä vesipitoisuus. Häiriintymätön näyte on rakenteeltaan ehjää luonnontilaista maata. Häiriintymättömän näytteen rakenne voi kuitenkin muuttua, kun se siirretään maasta laboratorio kokeisiin. Siksi laboratoriokokeissa on mahdollista olla pieniä virheitä maa-aineksen määrittämisessä. (Ronkainen, 2012, 17.)

6.2 Rakeisuus

Rakeisuuskokeen avulla voidaan määrittää maalaji ja nimetä se. Rakeisuustietoja voidaan käyttää, kun arvioidaan maan vedenläpäisevyyttä, routivuutta, tiivistettävyyttä tai soveltuvuutta maarakanteisiin ja stabilointiin. Termiä rakeisuus määriteltäessä, sillä tarkoitetaan erisuuruisten rakeiden suhteellista painojakaumaa maanäytteessä. Rakeisuus määrittäminen koostuu seulonnasta, jossa määritetään 0,074 mm suurempien rakeiden jakaumaa, sekä sitä pienemmät areometrin avulla. Kokeen aloittamisessa otetaan huomioon maalaji, jotta tiedetään, käytetäänkö seulontaa vai areometrikokeita. On myös mahdollista käyttää seulontaa ja areometrimenetelmää yhdessä. (Savonian työohje, Rakeisuus.)

6.3 Pesuseulonta

Kun maalajissa on karkeiden lajitteiden lisäksi myös hienoainesta (moreeni), on suoritettava pesuseulonta oikean rakeisuuskäyrän saavuttamiseksi. Näytteestä erotetaan hienoaines pesemällä se, jotta saadaan selville hienoainesten raekoko. Koe suoritetaan pesuseulan avulla, johon tarvitaan noin 1 kg näytettä. Näyte kaadetaan seulalle ja siihen virtaavan veden ja tärytyksen avulla hienoaines tippuu alemmalle seulalle. Pesuseulalta lähtee poistoletku, josta vesi virtaa laitteesta ulos. Tarkoituksena on, että vesi muuttuu kirkkaaksi, jolloin koe on valmis. Kokeessa vettä juoksutetaan näytteen läpi, jolloin hienoaines laskeutuu alemmalle seulalle ja hiukan karkeampi jää ylemmälle seulalle. Kokeessa on hyvin todennäköistä, että laite tukkeutuu, koska hienoaines ei päästä vettä läpi, mutta silloin veden juoksutus on hetkeksi lopetettava ja näytettä on pyöräytettävä, jotta vesi alkaa virrata. Seulonnan ollessa valmis astiassa ja seulalla olevat näytteet yhdistetään astiaan ja laitetaan kuivumaan kuivauskaappiin. Seuraavana päivänä näytteen kuivettua voidaan suorittaa kuivaseulonta. (Savonian työohje, Rakeisuus.)

6.4 Kuivaseulonta

Materiaali on asetettava kuivumaan kuivauskaappiin mielellään edellisenä päivänä, jotta näyte ehtii kuivua kokonaan ennen seulontaa. Seuraavana päivänä, kun näyte on kuivunut, niin se saattaa olla paakkuuntunut, jolloin se on hienonnettava. Kuivaseulonnassa käytettävä seulasarja on 0,074, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 ja 64 mm. Näyte punnitaan ja kaadetaan seulasarjalle. Kun näyte on saatu laitettua seulaan, niin se laitetaan tärytykseen, jossa sitä on pidettävä vähintään kymmenen minuuttia. Tärytyksen päätyttyä punnitaan jokaiselle seulalle jäänyt näytemäärä ja mikäli näyte sisältää yli 10 % alle 0,074 mm ainesta, siitä määritetään areometrikoe. (Savonia työohje, Rakeisuus.)

6.5 Areometrikoe

Areometrikokeen avulla määritetään 0,074 mm pienempien rakeiden rakeisuusjakauma. Koe voidaan tehdä kuivatusta tai kuivaamattomasta näytteestä. Laitteita, joita kokeessa tarvitaan, ovat kalibroitu areometri, areometrilasit, vaaka, kuivauskaappi, lämpömittari, sekuntikello, sekoitin, tislattuvesi, peptisaattoriliuos (Na^4), alkoholi (amyylialkoholi). Areometrissä käytettävä näytemäärä riippuu maalajista (kuva 7). (Savonia työohje, Rakeisuus.)

Maalaji	Näytemäärä
Hiekka ja moreeni	100 g
Siltti	50 g
Savi	50 g
Savi (ilmakuivattu näyte)	52 g

Kuva 7. Areometrin näytemäärät (Savonia työohje, Rakeisuus)

6.6 Proctor-koe

Proctor-kokeen tarkoitus on maalajien tiiveyden ja tiivistyvyyden määrittäminen. Etenkin vedenläpäisevyydessä on tärkeää tietää proctor tulokset, jotta näytteen tiiveys tiedetään. Kokeen avulla voidaan selvittää tiiveyden ja vesipitoisuuden välinen riippuvuus, joka on olennainen osa myös vedenläpäisevyyssuorituksessa valmistautuessa. Proctor-kokeessa suoritetaan näytteen kuivatilavuuspainon (kN/m^3) määrittäminen, johon käytetään parannettua Proctor-koetta. (Savonia työohje, Proctor-koe.)

6.7 Vedenläpäisevyyskoe

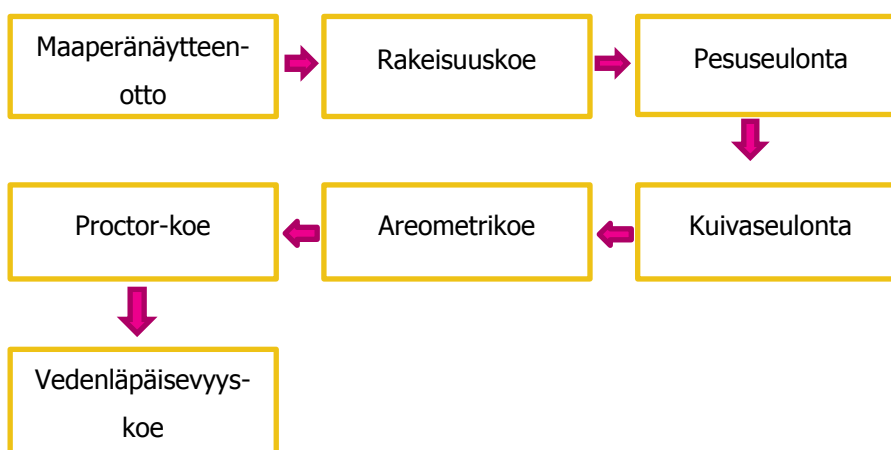
Kaikki maalajit ovat vettä läpäiseviä. Vedenläpäisevyys riippuu maalajin ominaisuuksista kuten tekstuurista, tiiveydestä, vesipitoisuudesta, huokoisuudesta ja struktuurista. Hydraulisella johtavuudella eli vedenläpäisyllä (m/s) tarkoitetaan tietyn pinta-alan läpi virtaavaa veden määrää aikayksikössä. Vedenjohtavuus maamateriaaleissa on tärkeä maan hydraulinen ominaisuus mm. hydrologisessa, rakennusteknisessä ja muussa tieteellisessä tutkimuksessa. Concell-laitteistoa käytetään huonosti vettä johtavien maalajien lisäksi, myös kohtalaisen hyvin vettä läpäisevien materiaalien mittaamiseen. Mittalaitteisto-Concell täyttää ASTM 5084-90 ja DIN 18130 (Deutsches Institut für Normung) -standardit. Laitteistoa kutsutaan joustavaseinäiseksi, kun näyte ympäröidään membraanikumilla ja laitetaan vedellä täytettävään selliin. Vedenpaineella kumi tiivistyy näytekalvon pintaan ja estää veden virtaamisen kumin ja näytteen välistä, mikä parantaa mittaustarkkuutta. (Geo-Petech Oy 2002, 1.)

Kyllästysvaihe ennen vedenläpäisevyyskoea voi kestää useista päivistä viikkoihin, riippuen mittauksessa käytettävästä materiaalista. Ilmattoman veden käytöllä kyllästyksen ja mittauksen aikana, voidaan vähentää huokosten tukkeutumista ja parantaa mittaustarkkuutta. Nostamalla näytettä ympäröivä sellipaine suureksi ja käyttämällä etupaineen lisäksi takapainetta, saadaan näytteeseen jäänyt ilma liuotettua veteen. Nostamalla etupaine takapainetta suuremmaksi, saadaan näytteen sisälle hydraulinen gradientti eli paine-ero, jolloin vesi virtaa näytteessä alhaalta ylöspäin. Näytteen läpi liikkuvan veden tilavuusvirta kirjataan mittausvaiheessa usealla eri gradientilla sekä lämpötila huomioidaan. Vedenjohtavuus määritetään Darcyn lakiin perustuvalla laskentakaavalla ja korjataan vastaamaan $20\text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaa. Mittalaitteistossa ovat paineensäätöyksikkö, näytesellit, vedentäyttöselli ja etu- ja takapainesellit. (Geo-Petech Oy, 2.)

7 TUTKIMUSPROSESSIN KOKEIDEN SUORITUS

7.1 Tutkimusprosessin kulku

Tutkimusprosessi aloitettiin maaperänäytteenotolla moreenikasasta (kaavio 1). Työssä tarvittiin myös bentoniittia, jonka Jätekuukko toimitti kokeita varten. Moreenista selvitettiin rakeisuuskokeilla maalaji, jonka jälkeen valmistettiin bentoniitti—moreeni-seoksia proctor-koetta varten. Proctor-koekesta saatavia maksimikuivatilavuuspainon tuloksia hyödynnettiin vedenläpäisevyyden määrittämisessä. Kokeissa tutkittiin 3 % -ja 5 % bentoniitti—moreeni-seoksia, sekä pelkkää moreenia.



Kaavio 1. Tutkimusprosessin vaiheet

7.2 Maaperänäytteenotto

Projektissa näytteenotto suoritettiin 16.1.2017 ja 24.2.2017 suuresta moreenikasasta heinälammenrinteen jätekeskukselta. Kaivurin avulla roudassa olevasta moreenikasasta saatiin poistettua kova pinta ja tämän jälkeen näytteenotto onnistui lapiolla. Näytteet kerättiin 10 kg sankoihin ja yhteensä näytettä otettiin 40 kg käyntikerralla. Kokoomänäytteenotto on talvella hankalaa, joten näytteet jouduttiin ottamaan samasta kohdasta ja samalla tavalla. Kokeissa tarvittava bentoniitti noudettiin Jätekuukolta. Näytteenoton jälkeen moreeni kuljetettiin koululle ja säilytettiin huoneenlämmössä.

7.3 Rakeisuus

Rakeisuuskokeet suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun kiviaineslaboratoriossa, sekä Suomen GPS mittauksen tiloissa. Kokeeseen tarvittiin useita laitteita, joten määrittäminen ei onnistunut ilman riittäviä tiloja ja laitteita. Seulonnassa toimiva seulasarja on 0,074, 0,125, 0,25, 0,5, 1, 2, 4, 8, 16, 32 ja 64 mm. Muita tarvittavia laitteita olivat kuivausuuni, tärytin, näytteenjakaja, vaaka, punnitusastiat ja pesuseula. Ennen kokeen aloittamista selvitettiin pesuseulonnan tarve, koska pelkkä kuivaseulonta voi riittää. Karkearakeisille maalajeilla kuten soralla ja hiekalla riittää yleensä kuivaseulonta, mutta muissa

tapauksissa on käytettävä myös pesuseulontaa. Näytemäärä on arvioitava ennen koetta ja mikäli kyseessä on hiekka, niin näytemäärä on noin 0,2—1,0 kg kun taas soralla vastaava näytemäärä on 1—3 kg.

7.4 Pesuseulonta

Näytteestä erotettiin hienoaines pesemällä se, jotta saatiin selville hienoainesten raekoko. Koe suoritettiin pesuseulan avulla, johon tarvittiin noin 2 kg näytettä. Näyte kaadettiin seulalle ja siihen virtaavan veden ja tärytyksen avulla hienoaines tippui alemmalle seulalle. Pesuseulalta lähtevästä poistoletkusta vesi virtaa ulos laitteesta. Tarkoituksena on, että vesi muuttuu kirkkaaksi, jolloin koe on valmis. Kokeessa vettä juoksutettiin näytteen läpi, jolloin hienoaines laskeutui alemmalle seulalle ja hiukan karkeampi jäi ylemmälle seulalle. Kun seulonta saatiin valmiiksi, niin astiassa ja seulalla olevat näytteet kaadettiin astiaan ja laitettiin kuivumaan kuivauskaappiin. Seuraavana päivänä näytteen kuivettua pystyttiin suorittamaan kuivaseulonta.

7.5 Kuivaseulonta

Materiaali laitettiin kuivumaan kuivauskaappiin edellisenä päivänä, jotta näyte ehtii kuivua kokonaan ennen seulontaa. Seuraavana päivänä, kun näyte on kuivunut, näyte saattaa olla paakkuuntunutta, jolloin se on hienonnettava. Kokeen aluksi oli otettava esille oikea seulasarja, johon näyte punnittiin ja kaadettiin. Tämän jälkeen näyte laitettiin seulasarjaan ja sitten vietiin tärytykseen, joka kestää vähintään kymmenen minuuttia. Tärytyksen päätyttyä, punnittiin jokaiselle seulalle jäänyt näytemäärä ja kirjattiin tulokset mittauspöytäkirjaan.

7.6 Areometrikoe

Areometrikokeen avulla määritettiin 0,074 mm pienempien rakeiden rakeisuusjakauma ja koe tehtiin kuivatusta näytteestä. Laitteita, joita kokeessa tarvittiin, olivat kalibroitu areometri, areometrilasit, vaaka, kuivauskaappi, lämpömittari, sekuntikello, sekoitin, tislattuvesi, peptisaattoriliuos, alkoholi. Areometrikoe aloitettiin punnitsemalla 100 g seulottua moreenia hydrometrilasiin, jonka jälkeen lisättiin 50 ml peptisaattoriliuosta. Lopuksi lisättiin tislattua vettä, kunnes hydrometrilasi tulee täyteen. Kun näyte oli valmistettu koetta varten, siihen laitettiin korkki tiiviisti kiinni. Tämän jälkeen näyte kiinnitettiin kääntölaitteeseen, jossa sitä sekoitetaan noin 15 minuutin ajan ja jätetään yöksi tekeytymään. Seuraavana päivänä suoritettiin sekoitus uudelleen ja käynnistetään kello. Näytteestä mitattiin lämpötila ja areometrilukema, kun sekoituksesta oli kulunut 1 min, 2 min, 4 min, 20min, 1 h, 4 h ja vuorokausi. Lopuksi tulokset kirjattiin mittauspöytäkirjaan.

7.7 Proctor-koee

Kokeessa tarvittavia laitteita olivat: koesylinteri (sisähalkaisija 102 mm ja korkeus 116 mm), kaulusrenkas, proctor-vasara (liikkuvan osan massa 4,54 kg ja pudotuskorkeus 457 mm), aluslevy ja vaaka. Valmistelut proctor-koee aloitettiin kuivaamalla näytettä noin 12 kg uunissa. Seuraavaksi näyte seulottiin 16 mm seulan läpi ja sitä suuremmat rakeet punnittiin. 16 mm seulan läpäissyt aines punnittiin ja sekoitettiin. Näytteen valmistus jatkui jakamalla se noin 3 kg suuruisiin osiin ja arvioiden silmämääräisesti sen optimivesipitoisuus. Karkeilla maalajeilla, kuten moreenilla, optimivesipitoisuus on 5–15 % ja hienorakeisilla 15–30 %. Tämän jälkeen arvioitiin lisättävät vesiprosentit, kun neljälle näytteelle on neljä eri vesipitoisuutta. Käytössä olevat prosentit olivat 4-12 % väliin. Näytteet jätettiin homogeenisoitumaan yön yli suljettuun astiaan, jotta kosteus ehti tarttua ja sekoittua koko näytteeseen.

Proctor-koee aloitettiin sullonnalla siten, että näyte tiivistettiin sylinterissä (kuva 8) viidessä kerroksessa. Näyte jaettiin tasaisesti viiteen osaan ja se tiivistettiin 25:llä proctor-vasaran iskulla, jonka jälkeen tehtiin uusi lisäys. Proctor-laite kykenee itse kääntämään koesylinteriä iskujen välissä, jotta näyte tiivistyy tasaisesti. Kun tarvittavat vasaran iskut oli suoritettu, kaulus poistettiin ja näytteen pinta tasoitettiin viivoittimen avulla. Tämän jälkeen näyte punnittiin ja näytteestä otettiin noin 200g osanäyte vesipitoisuuden määrittämistä varten. Nämä vaiheet toistettiin kaikille neljälle vesipitoisuudelle. Koekkeesta saatavat tulokset piirrettiin koordinaatistoon, josta määritettiin optimivesipitoisuus ja maksimikuivatilavuuspaino.



Kuva 8. Proctor-laite (Kinnunen, 2017)

7.8 Vedenläpäisevyyskoe

Ennen vedenläpäisevyyssmittauksen aloittamista näyte kyllästettiin. Kyllästysvaihe kesti moreenilla muutaman päivän ja bentoniitti—moreeni-seoksella noin 6 viikkoa. Proctor-koe oli tehtävä ennen vedenläpäisevyyskoetta, jotta saatiin selville maksimikuivatilavuuspaino ja optimi vesipitoisuus. Ennen varsinaista vedenläpäisevyyskoetta laskettiin näytemäärä, joka on noin 2 kg. Näytemäärän laskua varten käytettiin excel-laskenta ohjelmaa, johon syötettiin lukemat. Ohjelmisto laskee näytemäärät seokselle ja näytteen valmistus voidaan aloittaa. Näytteen valmistuksessa näyte sullottiin muottiin viidellä tasaisella lisäyksellä, eli noin 2 kg näyte jaettiin viiteen osaan ja sullottiin muottiin kymmenellä proctor-vasaran iskulla. Eli jokaisen näytteen lisäyksen jälkeen suoritettiin proctor-vasaran isku. (kuva 9).



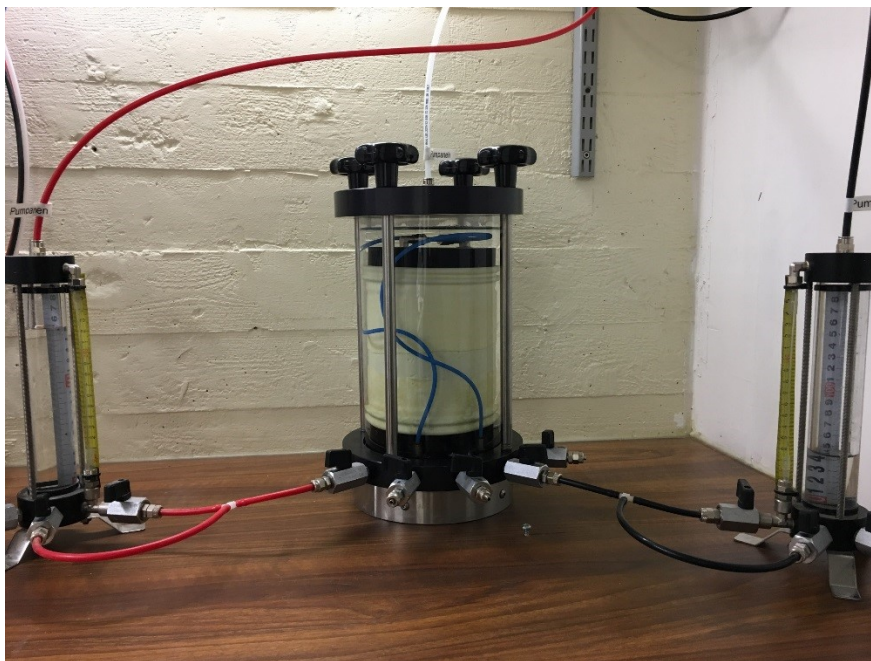
Kuva 9. Proctor-vasara ja sullontamuotti (Kinnunen, 2017)

Näytekakun valmistuksen jälkeen näyte asetettiin näyteselliin (kuva 10) ja näytteen päälle laitettiin membraanikumi, jolla estettiin veden virtaaminen näytteen ja kumin välissä. Näytteen ylä- ja alapuolelle laitetaan huokoskivet ja suodatinpaperit. Huokoskiviä käytettiin, jotta vedenvirtaus pysyy tasaisena ja näyte pysyy kasassa. Huokoskiville suoritetaan ilmaus ennen mittausten aloittamista, jotta vesi pääsee virtaamaan tasaisesti. Sen jälkeen näyteselli täytettiin vedellä. Seuraavaksi näyteselliin liitettiin etu- ja takapainesellit, joihin lisättiin vesi, sekä sellit paineistetaan paineensäätöyksikön avulla. Sitten aloitetaan kyllästysvaihe, joka oli valmis, kun etupainesellin vedenpinta oli laskenut yhtä paljon kuin takapainesellin vedenpinta oli noussut.



Kuva 10. Näytekakku vedenläpäisevyyteen (Kinnunen, 2017)

Varsinainen mittausvaihe aloitettiin ja valittiin neljä käytettävää gradienttia. Jokaiselle gradientille tehtiin neljä mittausta. Mittauksessa seurattiin laitteiston etu- ja takapainesellien vedenpinnan muutoksia (kuva 11) ja tulokset kirjattiin mittauspöytäkirjaan. Näytteen valmistus, kyllästysvaihe, sekä mittausvaihe suoritettiin moreenille, sekä bentoniitti—moreeni-näytteille. Kun tulokset oli saatu jokaiselta gradientilta, tulokset kirjattiin excel-taulukon laskentaan ja laskennasta saatiin vedenläpäisevyyden k-arvo.



Kuva 11. Vedenläpäisevyyslaitteisto (Kinnunen, 2017)

8 TULOKSET

Tulokset saatiin viidelle eri seokselle, joista tutkimusaiheina olivat bentoniitti ja moreeni. Kaksi muuta tulosta ovat lentotuhka—moreeni-seokselle. Tuloksia saatiin vedenläpäisevyydestä, maksimikuivatilavuuspainosta, rakeisuudesta ja optimivesipitoisuudesta. Bentoniitti-moreeniseoksessa käytettävät bentoniitin määrät massasta ovat 3 % ja 5 %, sekä lentotuhka-moreeni seoksella tuhkan määrät massasta ovat puolestaan 10 % ja 30 %. Lentotuhka—moreeni-seoksen rakeisuus-, proctor- ja vedenläpäisevyydet tulokset ovat Joni Mutasen opinnäytetyöstä (Mutanen 2017, 25). Suoritimme mittaukset yhdessä, joten halusin myös lentotuhkan tulokset nähtäville. Saavutetuista tuloksista tutkitaan, soveltuuko bentoniitti-moreeni seos kaatopaikan rakenteeksi. Excel-taulukkoon koottiin saavutetut vedenläpäisytulokset, josta määritettiin k-arvo.

Tuloksista nähdään (taulukko 2) bentoniitti 5 %:n k-arvo oli pienin $1,32 \cdot 10^{-9}$ m/s ja bentoniitti 3 % k-arvo oli $8,81 \cdot 10^{-9}$ m/s. Lentotuhka-moreeni-seoksien k-arvot olivat $9,77 \cdot 10^{-7}$ m/s (lentotuhka 10 %) ja $3,30 \cdot 10^{-6}$ m/s. Moreenin k-arvo oli puolestaan $3,97 \cdot 10^{-7}$ m/s. Bentoniitti-moreeni-seoksen vedenläpäisevyys kokeet kestivät noin 5—6 viikkoa, kun tuhkanäytteiden tulokset saatiin muutamassa vuorokaudessa.

Taulukko 2. Yhteenveto tuloksista

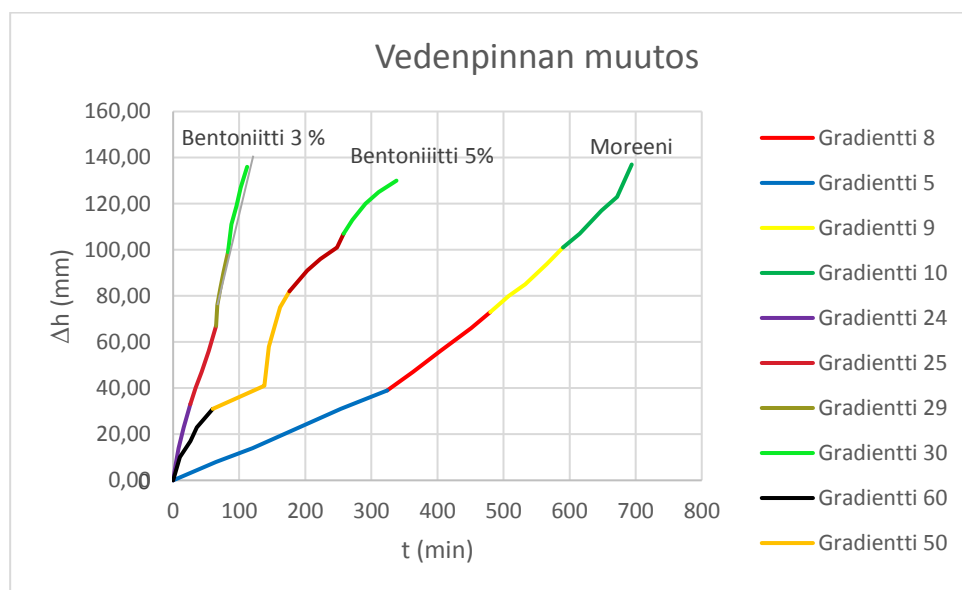
Seos	Vedenläpäisevyys (m/s)	Maksimikuivatilavuuspaino (kN/m^3)	Optimivesipitoisuus (%)
Bentoniitti 3 %- moreeni	$8,81 \cdot 10^{-9}$	21,3	7,0
Bentoniitti 5 %- moreeni	$1,32 \cdot 10^{-9}$	20,5	9,0
Lentotuhka 10 %- moreeni	$9,77 \cdot 10^{-7}$	21,0	8,0
Lentotuhka 30 %- moreeni	$3,30 \cdot 10^{-6}$	19,0	12,0
Moreeni	$3,97 \cdot 10^{-7}$	21,6	5,5

Vedenpinnan muutosta seurattiin vedenläpäisykokeen aikana etu- ja takapaineselleistä. Painetta vaihdeltiin gradienttien mukaan ja seuranta tapahtui tarkkailemalla vedenpinnan muutosta ja kulunutta aikaa. Tulokset kirjattiin mittauspöytäkirjaan, josta ne siirrettiin excel-laskentaan. Vedenpinnan muutokseen vaikuttava tekijä on gradientti, eli paine-ero, joka vallitsee etu- ja takapaineselleissä. Kuvajaan on kirjattu gradienttien muutokset vedenpinnan korkeuden ja ajan suhteen (kuviot 1).

Moreenissa käytetyt neljä gradienttia ovat 5, 8, 9 ja 10. Ajallisesti moreeni on ollut hitain, koska siinä on mennyt puolet enemmän aikaan kuin bentoniitti 5 % ja lähes seitsemän kertaa enemmän kuin bentoniitti 3 %:ssa. Huomataan, että gradientin nostamisella on ollut vaikutusta vedenläpäisyn nopeuteen, koska ensimmäinen gradientin nostaminen on kiihdyttänyt vedenpinnan nousua. Toinen gradientin nostaminen ei puolestaan ole juurikaan kiihdyttänyt vedenpinnan vaihtelua, mutta viimeisessä

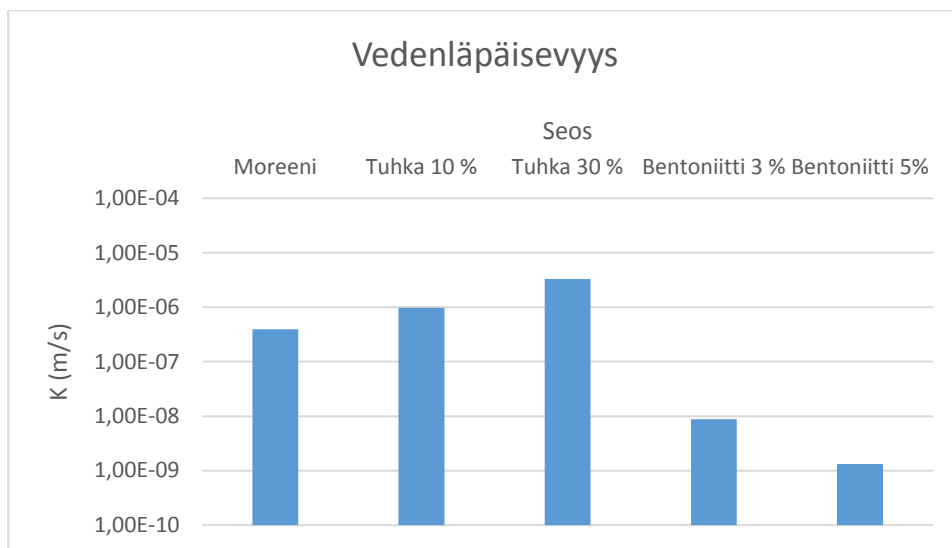
gradientissa on näkyvä vedenpinnan jyrkempi nousu. Gradientti 10 on tullut yli kolme kertaa nopeammin kuin ensimmäinen gradientti 5, joka on selvästi pitkä kestoisin vaihe.

Bentoniitti 3 %:lla gradientin nostaminen ei vaikuttanut selvästi vedenläpäisyn nopeuteen, koska mitaus suoritettiin lopulta pienen putken avulla tuloksen saamiseksi. Pienellä putkella vedenpinnan vaihtelu pystyttiin huomaamaan nopeasti, kun isolla putkella siihen olisi kulunut useita kuukausia. Myös bentoniitti 5 %:n tulokset saatiin pienen putken avulla ja näin ollen gradientin vaihtelusta ei voida nähdä suurta eroa. Bentoniitti 5 % on tehty gradienttia pienentämällä, koska mitaus aloitettiin suurimmalla gradientilla, joten ei ollut mahdollisuutta mennä ylöspäin. Paine-eroa pienennettiin suuremmin harppauksin kuin alemmilla gradienteilla, koska isommilla gradienteilla on suuremmat paine-erot.



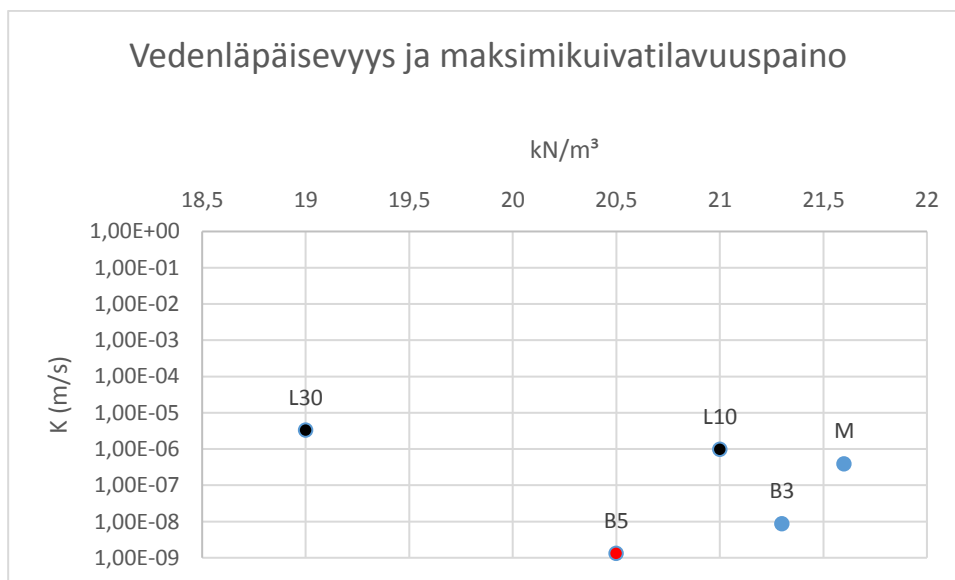
Kuvio 1. Vedenpinnan muutos

Vesi läpäisee bentoniitti-moreeni-seoksen huomattavasti heikommin kuin lentotuhka-moreeniseoksen. Nähdään, että tuhka 30 %:n vedenläpäisevyys on tuhat kertaa suurempi kuin bentoniitti 5 %:lla (kuvio 2). Moreenin ja tuhkan välillä erot ovat paljon pienempiä. Bentoniitti 5 %:n vedenläpäisevyys on lähes kymmenen kertaa heikompaa kuin bentoniitti 3 %:lla.



Kuvio 2. Vedenläpäisevyys

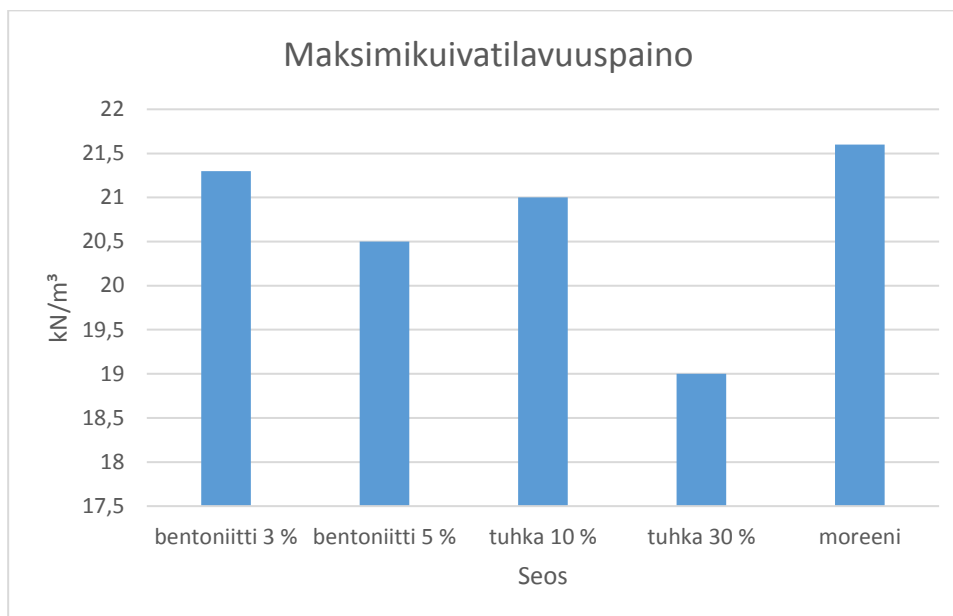
Bentoniitti 5 %:n maksimikuivatilavuuspaino ja vedenläpäisevyysarvo ovat pienempiä kuin bentoniitti 3 %:lla (kuvio 3). Moreenin maksimikuivatilavuuspaino ja vedenläpäisevyys ovat suurempia kuin bentoniiteilla. Lentotuhka 30 %:n maksimikuivatilavuuspaino on pienempi kuin lentotuhkan ollessa 10 %. Lentotuhka 30 %:n vedenläpäisevyys arvo on puolestaan suurempi kuin lentotuhka 10 %:lla. Moreenin maksimikuivatilavuuspaino on suurempi kuin lentotuhkilla, mutta k-arvo on pienempi kuin tuhkillä. Tuhkien k-arvot ovat suurempia kuin bentoniittien. Lentotuhka 10 %:n maksimikuivatilavuusarvo on pienempi kuin bentoniitti 3 %:lla, mutta suurempi kuin bentoniitti 5 %:lla. Lentotuhka 30 %:lla puolestaan on pienempi maksimikuivatilavuuspaino kuin bentoniiteilla.



Kuvio 3. Vedenläpäisevyys ja maksimikuivatilavuuspaino

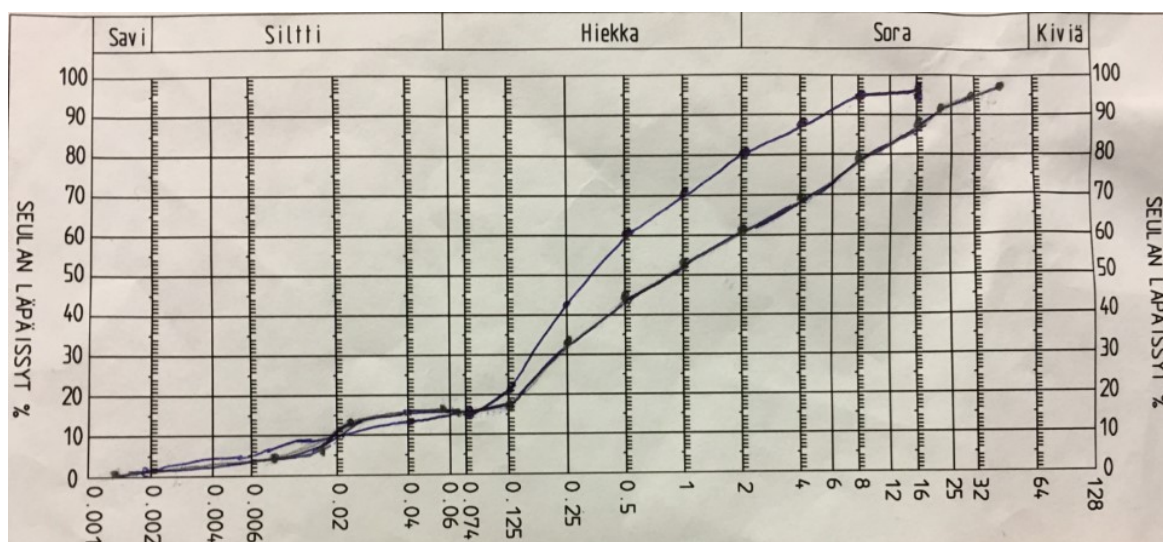
Moreenin maksimikuivatilavuuspaino on kaikista suurin 21,6 kN/m³ (kuvio 4). Bentoniitti-moreeni-seoksen (bentoniitti 3 %) tulos 21,3 kN/m³ on suurempi kuin bentoniitti 5 % tulos, joka on 20,5 kN/m³. Tuhka-moreeni-seoksessa tuhkan määrän ollessa 30%, on kaikista pienin maksimikuivatilavuuspaino 19 kN/m³. Tuhka 10 %:n tulos on 21 kN/m³. Moreenille ja lentotuhka—moreeni 30 %-

seokselle proctor-kokeiden tulokset saatiin käsin käytettävällä vasaralla. Koneellista proctor-laitetta hyödynnettiin puolestaan moreeni-lentotuhka-seoksen ollessa 10 % ja molemmissa bentoniitti näytteissä.



Kuvio 4. Maksimikuivatilavuuspaino

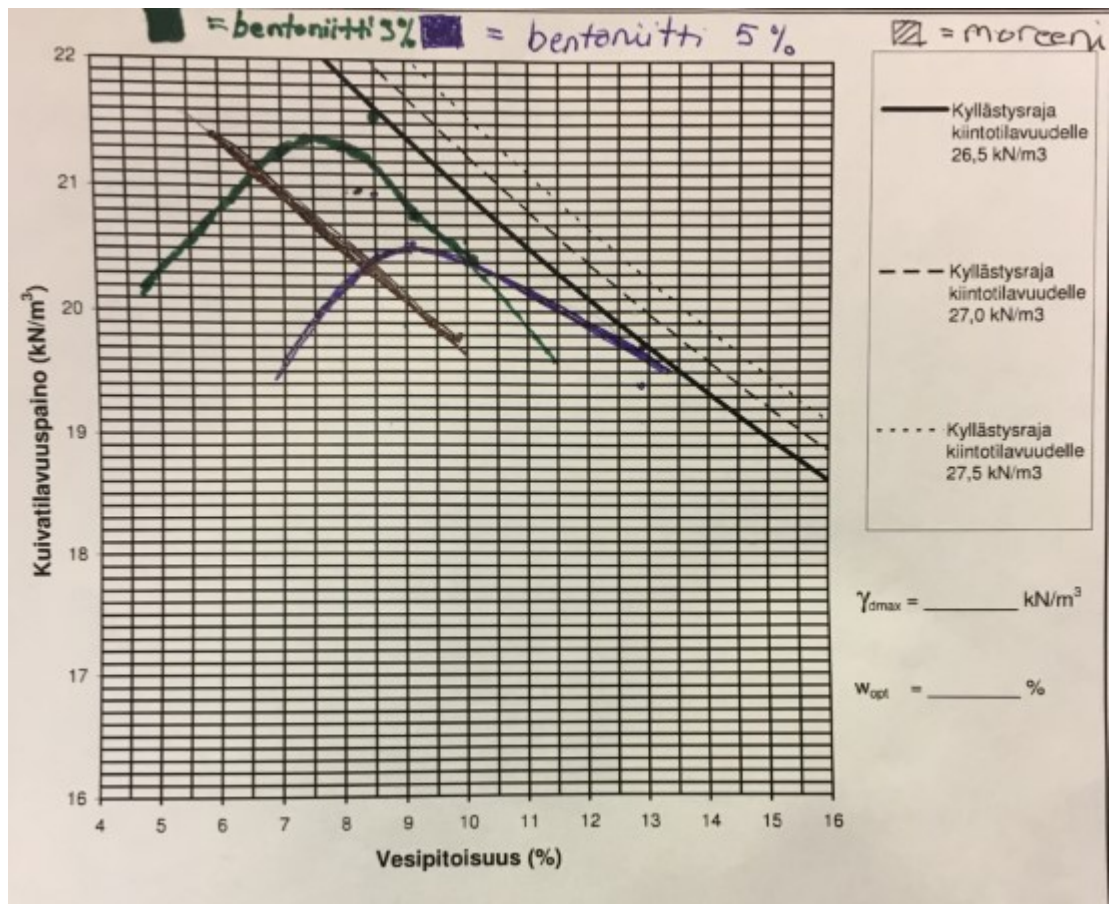
Rakeisuuskokeiden avulla pystyttiin piirtämään maa-aineksien rakeisuuskäyrät (kuva 12). Rakeisuuskäyrästä voidaan nähdä, että maalaji on hiekkamoreeni, koska se sisälsi yli 5 % soraa, että hienoainesta. Lisäksi se sisälsi toista lajitetta yli 30 % eli tässä tapauksessa hiekkaa, joten sen lisänimi on hiekkamoreeni. Kokeissa käytettiin kahta eri maa-ainesta, joiden rakeisuuskäyrät olivat samanlaiset.



Kuva 12. Rakeisuus kuvaaja (Kinnunen, 2017)

Tulokset on piirretty proctor-taulukkoon (kuva 13), josta nähdään näytteiden maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus. Tuloksista saatavan maksimikuivatilavuuspainokäyrän tulisi olla paraabeli, mutta nähdään että moreenilla on suora. Bentoniiteilla puolestaan syntyy paraabeli, jonka korkein

arvo on maksimikuivatilavuus ja optimivesipitoisuusarvo. Tulokset luetaan käyrän korkeimmasta kohdasta, mutta moreenin suorasta tulkittiin eri tavalla, koska se ei ollut paraabeli. Oletetaan, että moreenikäyrä käy korkeimmassa kohdassa kuvaajassa.



Kuva 13. Proctor-kokeiden kuvaajat (Kinnunen, 2017)

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Bentoniitti 3 %:n tuloksista nähdään, että vedenläpäisevyyden k arvo ei kohtaa asetettua arvoja, jonka pitäisi olla $1,0 \cdot 10^{-9}$ m/s. Tulokseksi saatiin $8,81 \cdot 10^{-9}$ m/s, joka on vielä kaukana kaatopaikan pohjan- ja pinnan ohjearvosta. Näin ollen se ei soveltuisi kaatopaikan pohja- tai pintarakenteeksi vedenläpäisy ominaisuuksiltaan. Toiseksi näytteeksi valittiin bentoniitti 5 %. Mietittiin, että bentoniitin määrän ollessa 4 % se on vielä liian vähän, mutta mikäli bentoniitti 5 % on liikaa, niin sitten tehdään tarvittaessa lisätutkimuksia pienemmällä bentoniitti määrällä. Bentoniitti 5 % vedenläpäisy tulos on $1,32 \cdot 10^{-9}$ m/s, joka on hyvin lähellä asetettua arvoa, mutta ei kuitenkaan aivan soveltuisi käytettäväksi pohjamateriaaliksi. Olisi kuitenkin suositeltavaa tehdä lisätutkimuksia, koska se on jo todella lähellä ohjearvoa. Moreenin k -arvoksi saatiin $3,97 \cdot 10^{-7}$ m/s. Lentotuhka 30 %—moreenista nähdään, että sen vedenläpäisy arvo on kaukana tavoite arvosta, joten se on hyvin vettä läpäisevää ja ei näin ollen sovellu käytettäväksi materiaaliksi.

Proctor-tuloksista voidaan todeta, että lentotuhka pienentää maksimitilavuuspainoa, joten seos ei ole niin tiivistä, kun tuhkan määrä lisääntyy. Bentoniitilla myös maksimikuivatilavuuspaino pienenee lisäämällä sen määrää, mutta ei niin voimakkaasti kuin tuhkillä. Moreenilla on puolestaan kaikista suurin kuivatilavuuspaino, koska se pääsee tiivistymään paremmin, ilman siihen lisättäviä seoksia.

Rakeisuuskäyrän avulla saatiin selvitettyä kokeissa käytetty maalaji, joka oli hiekkamoreeni. Maalaji oli moreeni, koska se sisälsi yli 5 % soraa, että hienoainesta. Lisäksi se sisälsi toista lajitetta yli 30 %, joten lisänimike oli hiekka. Rakeisuuskäyrän tuloksia voidaan pitää hyvinä, kun tuloksia verrattiin viime syksynä tekemiin rakeisuuskokeiden tuloksiin.

Projektin työvaiheissa oli tiettyjä hankaluuksia, koska vedenläpäisevyyskoetta en ole aiemmin suorittanut. Suomen GPS-mittauksen henkilökunnan avustuksella laitteen käyttäminen opeteltiin ja kokeet sujuivat lopulta hyvin. Bentoniitissa tuloksia ei olisi saatu, mikäli ei olisi käytetty pieniä putkia mittauksessa. Niiden avulla havaittiin vedenpinnan korkeuden vähäinen vaihtelu. Myöskään GPS:n henkilökunta ei ollut aiemmin käyttänyt pieniä putkia, joten niiden käyttämisen opettelu oli hidasta. Rakeisuus ja proctor-kokeissa mahdollisia virheitä saattoi aiheuttaa moreenin laatu. Moreenin näytteenottaminen täytyi tehdä talvella, joten moreenikasa oli lumen ja roudan peitossa. Näin ollen moreenin laatu vaihteli ja osa näytteistä jouduttiin kaatamaan pois, koska huomattiin että näyte sisälsi ainoastaan hiekkaa ja jäätä.

10 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Bentoniitti—moreeni-seoksien soveltuvuutta kaatopaikan pohja- ja pintarakenteena. Työ tehtiin Kuopion Jätekuukko Oy:lle ja tavoite oli löytää sellainen seos, jota voidaan käyttää kaatopaikan pohja- ja pintarakenteena. Kaatopaikassa olevilla rakenteilla pyritään estämään suovesien kulkeutumista ja imeytymistä ympäristöön. Tutkimuksessa käytettäviä kokeita olivat rakeisuus-, proctor-, ja vedenläpäisevyyskoe, joilla tutkittiin bentoniitti—moreeni-seosta. Kokeita tehtiin myös lentotuhka—moreeni-seokselle ja pelkälle hiekkamoreenille. Bentoniitin vedenläpäisevyyden k-arvoiksi saatiin $8,81 * 10^{-9}$ m/s ja $1,32 * 10^{-9}$ m/s. Lentotuhka—moreeni-seoksen k-arvot puolestaan olivat $9,77 * 10^{-7}$ m/s ja $3,30 * 10^{-6}$ m/s ja pelkän moreenin vedenläpäisevyyden arvo on $3,97 * 10^{-7}$ m/s. Tulosten perusteella yksikään näistä seoksista ei sovellu käytettäväksi kaatopaikan pohjamateriaalina, mutta bentoniitin osalta kannattaisi tehdä lisätutkimuksia, koska bentoniitti 5 %:n tulos on lähellä lainsäädännön vaatimaa k-arvoa. Bentoniitin turpoamisominaisuudet sopivat vettä pidättäväksi kerrokseksi, mutta muut bentoniitin ominaisuudet olisi selvitettävä, jotta sitä voitaisiin käyttää kaatopaikan materiaalina.

11 LÄHTEET

- ALUEHALLINTOVIRASTO. 2015. Kuopion jätekeskuksen ympäristöluvan muutos ja toiminnanaloittamislupa, Kuopio. [verkkoaineisto].2015[Viitattu 2017-5-24]. Saatavissa: file:///C:/Users/Omistaja/Downloads/isavi_paatos_68_2015_1-2015-10-16-1.pdf
- GEO-PETECH OY 2002. Työohjeet maalajien hydraulisen johtavuuden määrittämiseen laboratoriossa concell-flexible-wall-tutkimuslaitteistolla.
- GTK, MOREENIKERROSTUMAT. [verkkoaineisto]. [viitattu 2017-04-06.] Saatavissa: <http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/moreenit.htm>
- INTERNATIONAL JOURNAL OF THE PHYSICAL SCIENCES, PERMEABILITY AND SWELLING CHARACTERISTICS OF BENTONITE. [Viitattu 2017-5-17] Saatavissa: [file:///C:/Users/Omistaja/Downloads/Bentonite_water_permeabilty_2010%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Omistaja/Downloads/Bentonite_water_permeabilty_2010%20(1).pdf)
- JOHANSSON, Peter ja KUJANSUU, Raimo 2005. Pohjois-Suomen maaperä. Espoo: Geologian tutkimuskeskus. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-5-17] Saatavissa: http://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/ej_046.pdf
- KESKINEN, Raimo ja NIEMI, Pekka 2011. Savidieaineet. Tampere: Tampereen ammattiopisto. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-5-16.] Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_kaavausaineet_13.pdf
- KINNUNEN, Valtteri 2017-03-15. [valokuva]. Sijainti: Kuopio.
- KUOPION JÄTEKUKKO OY. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-5-15] Saatavissa: <http://www.jatekukko.fi/palvelut/kuopion-jatekeskus.html>
- LEPISTÖ, Jani, WESTERHOLM, Henrik, SCHULTZ, Eija, ULJAS, Jenni, BJÖRKLÖF, Katarina 2014. Hyvät käytännöt pilaantuneiden maiden kenttätutkimuksissa. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-5-4] Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/42681/YO_2014.pdf?sequence
- LHJ KONSERNI, LOPPUSIJOITUS. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-5-17] Saatavissa: <http://www.lhj.fi/lhj-konserni/jatteenkasittely/loppusijoitus/>
- MUTANEN, Joni 2017. Lentotuhka—moreeni-seos kaatopaikan pohjarakenteen materiaalina. Savonia-ammattikorkeakoulu. Ympäristöteknologian koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [viitattu 2017-06-02].
- RONKAINEN, Nanna 2012. Suomen maalajien ominaisuuksia. Helsinki: Suomen Ympäristökeskus. [verkkoaineisto].[viitattu].Saatavissa:https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU. Työohje: Proctor-koe.

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU. Työohje: Rakeisuus.

SUOMEN YMPÄRISTÖKESKUS 2002. Kaatopaikan tiivistysrakenteet. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2017-5-3.] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/palvelut/julkaisu/elektro/yo36/yo36.htm>

VALTIONEUVOSTON ASETUS KAATOPAIKOISTA. 2013/331. Finlex. Lainsäädäntö. [Viitattu 2017-5-10]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130331>

LIITE 1: PROCTOR KOKEIDEN TULOKSET

Näytteen valmistus: Moreeni

Näyte	1	2	3	4
Näytteen massa (g)	3000	3000	3000	3000
Haluttu kosteus (%)	7	8	9	10
Lisättävä vesimäärä (g)	210	240	270	300
Näytteen vesipitoisuus				
Kostea näyte (g)	331,5	315,8	305,7	315,9
Kuiva näyte(g)	311,4	291,9	279,3	287,6
Veden massa (g)	20,1	23,9	26,4	28,3
Näytteen vesipitoisuus (%)	6,45	8,19	9,45	9,84
Sullottu näyte				
Kostean näytteen massa (g)	2202,6	2179,8	2089,4	2084,3
Kuivan näytteen massa (g)	2069,1	2014,8	1909	1897,6
Näytteen kuivatilavuuspaino (kN/m³)	21,5	20,98	19,9	19,8

Näytteen valmistus: Bentoniitti 3

Näyte	1	2	3	4
Näytteen massa (g)	3000	3000	3000	3000
Haluttu kosteus (%)	7	8	9	10
Lisättävä vesimäärä (g)	210	240	270	300
Näytteen vesipitoisuus				
Kostea näyte (g)	339,9	319,5	337,7	315
Kuiva näyte(g)	317,6	294,3	309,3	286,1
Veden massa (g)	22,3	25,2	28,4	28,9
Näytteen vesipitoisuus (%)	7	8,56	9,18	10,1
Sullottu näyte				
Kostean näytteen massa	2127,7	2150,7	2163,2	2134,7
Kuivan näytteen massa	2044,2	2070,5	1993,8	1960,7
Näytteen kuivatilavuuspaino (kN/m³)	21,3	21,6	20,8	20,4

Näytteen valmistus: Bentoniitti**5%**

Näyte	1	2	3	4
Näytteen massa (g)	3000	3000	3000	3000
Haluttu kosteus (%)	8	9	10	11
Lisättävä vesimäärä (g)	240	270	300	330
Näytteen vesipitoisuus				
Kostea näyte (g)	348,2	335,1	410,9	325,2
Kuiva näyte(g)	320,9	307,2	372,4	288,3
Veden massa (g)	27,3	27,8	38,5	36,9
Näytteen vesipitoisuus (%)	8,5	9,05	10,3	12,8
Sullottu näyte				
Kostean näytteen massa	2187,3	2247,7	2176,8	2158,7
Kuivan näytteen massa	1961,2	1972,2	1961,2	1892,5
Näytteen kuivatilavuuspaino (kN/m³)	20,9	20,5	20,4	19,7

LIITE 2: VEDENLÄPÄISEVYYS MITTAUSPÖYTÄKIRJA

Bentoniitti 3 %

bar	bar	bar			mm	mm	mm	mm
sellipaine	etupaine	takapaine	aika alussa	aika lopussa	mevesi alu.	mevesi lop.	tuvesi al.	tuvesi lo.
2	1,49	1,2	13.2.2017 12:00:00	13.2.2017 12:04:00	200,00	193,00	12,00	19,00
2	1,49	1,2	13.2.2017 12:04:00	13.2.2017 12:08:00	193,00	186,00	19,00	26,00
2	1,49	1,2	13.2.2017 12:08:00	13.2.2017 12:16:00	186,00	177,00	26,00	35,00
2	1,49	1,2	13.2.2017 12:16:00	13.2.2017 12:26:00	177,00	167,00	35,00	45,00
2	1,51	1,2	13.2.2017 12:28:00	13.2.2017 12:36:00	167,00	160,00	46,00	53,00
2	1,51	1,2	13.2.2017 12:36:00	13.2.2017 12:45:00	160,00	153,00	53,00	60,00
2	1,51	1,2	13.2.2017 12:45:00	13.2.2017 12:56:00	153,00	144,00	60,00	69,00
2	1,51	1,2	13.2.2017 12:56:00	13.2.2017 13:07:00	144,00	133,00	69,00	80,00
2,2	1,55	1,2	13.2.2017 13:12:00	13.2.2017 13:14:00	133,00	124,00	100,00	109,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 13:53:00	13.2.2017 14:03:00	124,00	115,00	45,00	54,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 13:53:00	13.2.2017 14:03:00	115,00	106,00	45,00	54,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 13:53:00	13.2.2017 14:03:00	106,00	97,00	45,00	54,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 13:53:00	13.2.2017 14:03:00	97,00	88,00	45,00	54,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 13:53:00	13.2.2017 14:03:00	88,00	79,00	45,00	54,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 13:53:00	13.2.2017 14:03:00	79,00	70,00	45,00	54,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 13:53:00	13.2.2017 14:03:00	70,00	61,00	45,00	54,00

Bentoniitti 5 %

bar	bar	bar			mm	mm	mm	mm
sellipaine	etupaine	takapaine	aika alussa	aika lopussa	mevesi alu.	mevesi lop.	tuvesi al.	tuvesi lo.
2,2	1,93	1,2	13.2.2017 12:00:00	13.2.2017 12:10:00	200,00	190,00	25,00	35,00
2,2	1,93	1,2	13.2.2017 12:10:00	13.2.2017 12:26:00	190,00	183,00	35,00	42,00
2,2	1,93	1,2	13.2.2017 12:26:00	13.2.2017 12:36:00	183,00	177,00	42,00	48,00
2,2	1,93	1,2	13.2.2017 12:36:00	13.2.2017 13:00:00	177,00	169,00	48,00	56,00
2,2	1,81	1,2	13.2.2017 13:00:00	13.2.2017 14:18:00	169,00	159,00	11,00	21,00
2,2	1,81	1,2	13.2.2017 15:51:00	13.2.2017 15:58:00	159,00	142,00	40,00	57,00
2,2	1,81	1,2	13.2.2017 15:58:00	13.2.2017 16:15:00	142,00	125,00	57,00	74,00
2,2	1,81	1,2	13.2.2017 16:15:00	13.2.2017 16:29:00	125,00	118,00	74,00	81,00
2,2	1,69	1,2	13.2.2017 16:30:00	13.2.2017 16:57:00	118,00	109,00	81,00	90,00
2,2	1,69	1,2	13.2.2017 16:57:00	13.2.2017 17:17:00	109,00	104,00	90,00	95,00
2,2	1,69	1,2	13.2.2017 17:17:00	13.2.2017 17:42:00	104,00	99,00	95,00	100,00
2,2	1,69	1,2	13.2.2017 17:42:00	13.2.2017 17:52:00	99,00	93,00	100,00	106,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 18:05:00	13.2.2017 18:18:30	93,00	87,00	104,00	110,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 18:18:30	13.2.2017 18:38:00	87,00	80,00	110,00	117,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 18:38:00	13.2.2017 18:58:00	80,00	75,00	117,00	122,00
2,2	1,57	1,2	13.2.2017 18:58:00	13.2.2017 19:25:00	75,00	70,00	122,00	127,00

LIITE 3: GRADIENTTI TAULUKKO

Esimerkki käytettävistä paineista 12 cm korkealle näytekakulle

GRADIENTTI	SELLIPAIN [bar]	ETUPAIN [bar]	TAKAPAIN [bar]	PAINE-ERO [bar]
2	0.80	0.40	0.38	0.02
3	0.80	0.42	0.38	0.04
4	1.00	0.81	0.76	0.05
5	1.50	0.82	0.76	0.06
6	1.50	0.83	0.76	0.07
7	1.50	0.89	0.80	0.09
8	1.50	0.92	0.82	0.10
9	1.50	1.01	0.90	0.11
10	2.00	1.12	1.00	0.12
11	2.00	1.23	1.10	0.13
12	2.00	1.25	1.10	0.15
13	2.00	1.28	1.12	0.16
14	2.00	1.29	1.12	0.17
15	2.00	1.30	1.12	0.18
16	2.00	1.32	1.12	0.20
17	2.00	1.34	1.13	0.21
18	2.00	1.37	1.15	0.22
19	2.00	1.38	1.15	0.23
20	2.00	1.44	1.20	0.24
21	2.00	1.46	1.20	0.26
22	2.00	1.47	1.20	0.27
23	2.00	1.48	1.20	0.28
24	2.00	1.49	1.20	0.29
25	2.20	1.51	1.20	0.31
26	2.20	1.52	1.20	0.32
27	2.20	1.53	1.20	0.33
28	2.20	1.54	1.20	0.34
29	2.20	1.55	1.20	0.35
30	2.20	1.57	1.20	0.37
40	2.20	1.69	1.20	0.49
50	2.20	1.81	1.20	0.61
60	2.20	1.93	1.20	0.73