

Timo Kalaja

**RAETUHKAN MEKAANISET OMINAISUUDET**

# **RAETUHKAN MEKAANISET OMINAISUUDET**

Timo Kalaja  
Opinnäytetyö  
Kevät 2020  
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Rakennustekniikka, Yhdyskuntatekniikan suuntautumisvaihtoehto

---

Tekijä: Timo Kalaja  
Opinnäytetyön nimi: Raetuhkan mekaaniset ominaisuudet  
Työn ohjaajat: Vesa Kallio ja Esa Perälä  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2020  
Sivumäärä: 38

---

Raetuhka on biotuhkasta valmistettava kierrätysmateriaali, jota käytetään tällä hetkellä metsälannoitteena. Opinnäytetyön aiheena oli Rakeistus Oy:n raetuhkan mekaanisten ominaisuuksien tutkiminen laboratoriokokeilla. Kokeiden tavoitteena oli selvittää, täyttääkö raetuhka teiden suodatinkerroksen vaatimukset.

Opinnäytetyössä testattiin viittä eri raetuhkalaatua, jotka sisälsivät bio- tai kivituhkaa, opasakkaa ja Mfibrils Oy:n Allfix-selluemulsiota. Testatut raetuhkalaadut on valmistettu rumpurakeistus-menetelmällä Oulun Nuottasaaren voimalaitoksen yhteyteen rakennetussa rakeistuslaitteistossa tai Rakeistus Oy:n laboratoriolaitteistolla. Kaikki näytteet tutkittiin Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa.

Raetuhkan ominaisuudet määritettiin standardisoitujen laboratoriokokeiden avulla. Kokeiden tuloksia verrattiin eri tahojen antamiin raja-arvoihin sekä rinnakkaistestattuihin hiekan arvoihin. Laboratoriokokeissa keskityttiin raetuhkan fyysisiin ominaisuuksiin sekä lujuuteen ja routivuuteen vaikuttavien ominaisuuksien määrittämiseen.

Laboratoriokokeiden perusteella testatut reseptit eivät täyttäneet suodatinkerrokselle asetettuja vaatimuksia. Ongelmia aiheuttivat tuhkarakeiden hiukkasten sitoutumattomuus ja lujuuden puute.

Heikot rakeet hienontuvat etenkin tiivistettäessä, mikä johtaa hienoainespitoisuuden kasvuun. Korkea hienoainespitoisuus lisää maa-aineksen routivuusriskiä, mikä nähdään korkeina kapillaarisuus- ja adsorptio-arvoina. Laboratoriokokeiden perusteella raetuhkan tuotekehityksen suuntana on lisätä yksittäisten rakeiden lujuutta ja tuhkan sitoutumista.

---

Asiasanat: raetuhka, tuhka, suodatinkerros, kierrätysmateriaalit

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Civil Engineering, Municipal Engineering

---

Author: Timo Kalaja

Title of thesis: Mechanical Properties of Granulated Ash

Supervisors: Vesa Kallio ja Esa Perälä

Term and year when the thesis was submitted: Spring of 2020

Pages: 38 + 10 appendices

---

The aim of this thesis was to examine different properties of granulated ash for Rakeistus Ltd. Granulated ash is recycled product made by agglomerating ash and varying celluloid products. Rakeistus Ltd is developing granulated ash to a form in which it is suitable to be used as a filter layer material in roadbuilding. Previously granulated ash has been used successfully as forest fertilizer.

The research methods used in testing the products were done according to Finnish and European standards for road materials. Granulated ash was supplied by Rakeistus Ltd. The testing of the properties was done in Oulu University of Applied Sciences Construction laboratory for five different models of granulated ash.

The main focus of tests was directed towards physical properties of the ash granules, their strength and how they react with water. The test results were compared to the limits in the standards and the measured properties of filter layer sand.

The results of this thesis show that the current form granulated ash needs more development to be used as roadbuilding material. Granulated ash has issues regarding moisture and strength. Granulated ash needs to be developed more waterproof in order to work as a filter layer.

---

Keywords: granulated ash, ash, recycled materials, agglomerating

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	7
2 SUODATINKERROS	8
2.1 Tien rakenne	8
2.2 Uusiomateriaalien ja suodatinmateriaalin laatuvaatimukset	8
3 RAETUHKA	11
3.1 Rumpurakeistus	11
3.2 Testatut rakeet	12
4 VESIPITOISUUS	13
4.1 Vesipitoisuuden määrittäminen	13
4.2 Rakeiden vesipitoisuudet	14
5 KIINTOTIHEYS	15
5.1 Kiintotiheyden määrittäminen	15
5.2 Kiintotiheyden tulokset	16
6 RAKEISUUS	17
6.1 Kuivaseulonta	17
6.2 Rakeisuuskäyrän määrittäminen	18
6.3 Rakeisuuskäyrät	19
7 OPTIMIVESI-PITOISUUS JA MAKSIMI KUIVATILAVUUSPAINO	20
7.1 Proctor-koe	20
7.2 Proctor-kokeen laskutoimitukset	22
7.3 Proctor-kokeen tulokset	22
8 PURISTUSLUJUUS	23
8.1 ICT-kappaleiden valmistus	23
8.2 Puristuskoe	23
8.3 Puristuskokeen laskutoimitukset	24
8.4 Puristuskokeen tulokset	24
9 VEDEN ADSORPTIO	26
9.1 Adsorptiokoe	26
9.2 Adsorptiokokeen laskutoimitukset	27

9.3 Adsorptiokokeen tulokset	27
10 KAPILLAARINEN NOUSUKORKEUS	28
10.1 Kapillaarisuusko	28
10.2 Kapillaarisuustestin tulokset	29
11 RASIALEIKKAUSKOE	30
11.1 Rasialeikkauskokeen suoritus	30
11.2 Rasialeikkauskokeen laskutoimitukset	31
11.3 Rasialeikkauskokeen tulokset	31
12 VEDENLÄPÄISEVYYS	32
12.1 Vedenläpäisevyyskokeen laskutoimitukset	33
12.2 Vedenläpäisevyyskokeen tulokset	33
13 JOHTOPÄÄTÖKSET	34
LÄHTEET	36
LIITTEET	

# 1 JOHDANTO

Suomen energiakulutuksesta 7 % on turve-energiaa. Turvevoimalaitoksissa muodostuva tuhka on aiemmin nähty jätteenä ja sitä on ajettu pääasiassa läjitysalueille. Viime vuosina kierrätysmateriaalien suosion kasvaessa tuhkaa on kuitenkin alettu käyttää lannoitteina ja maarakennusaineina. (1.)

Rakeistus Oy tuottaa rakeistettua tuhkaa, joka on koostumuksensa ansiosta helpompaa kuljettaa ja työstää. Rakeistus Oy:n raetuhkaa myydään tällä hetkellä metsälannoitteeksi. (2.)

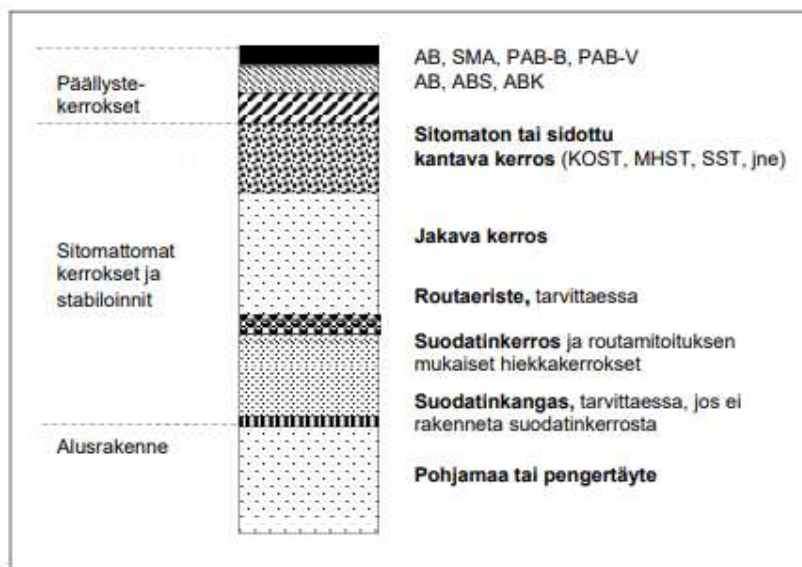
Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää Rakeistus Oy:n tuhkarakeiden mekaanisia ominaisuuksia ja sitä, miten ne vastaavat maarakennuksen vaatimuksia ja luonnonmateriaaleja. Raetuhkan suunniteltu käyttökohde on tien suodatinkerroksessa, jonka tarkoituksena on erottaa pohjamaa ylemmistä rakennekerroksista sekä estää routimista. Rakeistetun tuhkan käyttö rakennusmateriaalina vaatii ilmoitusmenettelyn tai ympäristöluvan ja sen käytöstä on aina sovittava erikseen (3).

Työssä kerrotaan, mitä jokainen testattu mekaaninen ominaisuus kuvaa käytännössä ja miten tietoa hyödynnetään rakentamisessa. Opinnäytetyössä esitetään eri ominaisuuksien vaatimien laboratoriokokeiden menettelyt ja niiden tulokset sekä niitä verrataan mahdollisiin raja-arvoihin tai luonnollisten maa-aineisten vertailuarvoihin. Tutkimuksessa materiaalien tekniset ominaisuudet määritetään viidelle eri raetuhka-laadulle.

## 2 SUODATINKERROS

### 2.1 Tien rakenne

Suomalaisen tien rakenne rakennetaan useista eri kerroksista, jotka suunnitellaan tien liikenteen, alusrakenteen ja käytettävien materiaalien mukaan. Tien kerrokset jakautuvat alusrakenteeseen, sitomattomiin kerroksiin ja päällystekerroksiin (kuva 1). Raetuhkan käyttökohteena suunnitellaan tiensuodatinkerrosta. (4.)



KUVA 1. Tien rakennekerrokset (4, s.13)

Tien suodatinkerros on tarvittaessa rakennettava rakennekerros, joka eristää tien ylempät rakennekerrokset pohjamaasta. Suodatinkerroksen tehtävinä on läpäistä vettä, estää pohjamaan ja päällysrakenteen sekoittuminen, vähentää veden kapillaarista nousua rakenteeseen sekä hidastaa pohjamaan routimista. (5.)

### 2.2 Uusiomateriaalien ja suodatinmateriaalin laatuvaatimukset

Luonnon ympäristö- ja virkistys-arvot korostuvat nykyisessä päätöksenteossa, mikä heikentää luonnonmateriaalien saatavuutta. Kiviainesten saatavuusongelmat lisäävät materiaalikustannuksia ja kuljetusmatkojen pituuksia. Tämä lisää



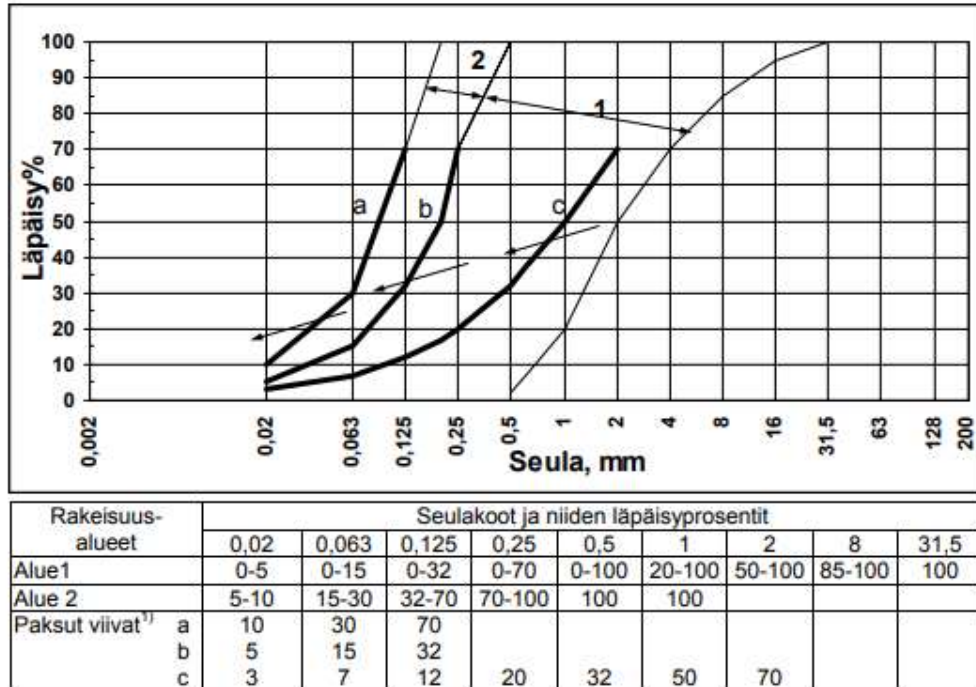
kiinnostusta korvaavien, rakentamiseen soveltuvien uusiomateriaalien käyttöön, jotka soveltuvat rakentamiseen. (6.)

Uusiomateriaaleja voidaan standardin EN-13242 mukaan käyttää luonnonkiviaineksen sijasta, jos niillä on käyttöhistoriaa Suomessa. Nämä toimivaksi koetut materiaalit voidaan CE-merkitä, jolloin niiden valitseminen rakennemateriaaliksi helpottuu. Materiaalit, joiden käyttökokemukset Suomessa ovat vähäisiä, vaativat materiaali- tai rakennekohtaisia kokeita ja niiden täytyy täyttää laissa ja ympäristöluvassa asetetut ehdot. Kiviaineksille asetettuja laatuvaatimuksia sovelletaan uusiomateriaalien laatuvaatimuksissa. Materiaalien on lisäksi oltava tasa-laatuksia ja ne eivät saa vaurioittaa muita kosketuksissa olevia rakenteita. (7.)

Väylävirasto asettaa suodatinkerroksen materiaaleille seuraavat laatuvaatimukset:

1. Suodatinkerroksessa käytettävän kiviaineksen on täytettävä kuvan 2 rakeisuuden raja-arvot.
2. Suodatinmateriaalin rakeisuus varmistetaan pesuseulonnalla standardin SFS-EN 933-1 mukaan materiaalin hankinnan yhteydessä.
3. Näytteistä, joissa 0,063 mm:n seulan läpäisy-% on yli 2 % suurempi kuin suurin sallittu läpäisy-% 0,02 mm:n seulan kohdalla, määritetään 0,02 mm:n seulan läpäisyprosentti hydrometrikokeella (PANK 2103).
4. Suodatinkerroksen rakeisuuden on täytettävä seuraavat ehdot:
  1.  $d_{20_{\text{jakava}}}/d_{20_{\text{suodatin}}} \leq 40$
  2.  $d_{20_{\text{suodatin}}}/d_{20_{\text{pohjamaa}}} \leq 40$

d20 = läpäisyprosenttia 20 vastaava raekoko, mm



Kuva 4410.3 Suodatinkerroksen rakeisuuden tulee normaalisti olla alueella 1. Alueen 2 käyttö on sallittu suunnitelmissa osoitetuissa kohdissa. Rakeisuuskäyrä ei saa ylittää paksuja viivoja nuolen suunnassa.

**KUVA 2. Suodatinkerroksen rakeisuusvaatimukset (5, s.42)**

5. Suodatinkerroksen materiaalissa ei saa käyttää ainesta joka sisältää savea, silttiä tai haitallisia epäpuhtauksia. Ottopaikalla havaitut kerrostumat on erotettava rakenteisiin vietävästä materiaalista.
6. Suodatinkerroksen materiaali ei saa sisältää 31,5 mm:n seulalle jääviä kiviä, jos kerroksen paksuun on puolimetriä tai vähemmän. Kerroksen ollessa paksumpi sallitaan siihen 5 painoprosenttia 31,5... 200 mm:n kiviä.
7. Valmiista rakenteesta tarkastetaan rakeisuus sekä tiiviysaste. Alin sallittu yksittäinen tiiviysaste on 90 % ja pienin sallittu keskimääräinen tiiviysaste 95 % (5.)

### 3 RAETUHKA

Raetuhka on rakeistamalla valmistettua kierrätysmateriaalia. Voimalaitosten polttamasta turpeesta ja puusta muodostuu palamistuotteena biotuhkaa, joka käsitellään eri kemikaaleilla, kuten boorilla ja kaliumsuolalla. (2.)

Raetuhka on rakeistettua bio- tai kivituhkaa, joka on koostumuksensa ansiosta vähemmän pölyävämpää ja helpompaa kuljettaa kuin sitomaton tuhka. Työssä analysoiduissa raetuhka-resepteissä on käytetty sekä bio- ja kivituhkaa ja ne on valmistettu rumpurakeistuksella. Rakeistetun biotuhkan tämän hetken pääkäyttökohde on metsälannoitus ja sen uudeksi käyttökohteeksi on suunniteltu teiden suodatinkerrosta. (2.)

#### 3.1 Rumpurakeistus

Rakeistus on tuhkapölyn sitomiseen käytetty menetelmä, jossa tuhka tiivistyy rakeiksi. Rakeistuksen yhteydessä tuhkapölyyn voidaan lisätä tavoiteltuja ominaisuuksia parantavia kemikaaleja. Rumpurakeistus on rakeistusmenetelmä, jossa sekoitetut raaka-aineet rakeistetaan vaakasuorassa sylinterissä. Tällöin tuhkarakeet muodostuvat, kun kostutettu tuhka valuu rummun seiniltä sen pohjalle. Rakeistin on kalteva, jolloin rakeet valuvat ulos. (Kuva 3.) (2.)



KUVA 3. Rakeistinlaitteisto

### 3.2 Testatut rakeet

Testattujen raetuhkalaatujen reseptit on eritelty taulukossa 1. Ensimmäisen reseptin raenäytteet on rakeistettu Nuottasaaren voimalaitoksen yhteyteen rakennetulla rakeistimella. Reseptien 2 – 5 rakeet on valmistettu Rakeistus Oy:n laboratoriotiloissa.

Raetuhkan muut pääainekset ovat tuhkan tavoin kierrätysmateriaaleja. Raetuhkan kehityksessä testattiin Opasakka-kuitusaven ja Allfix-selluemulsion vaikutuksia tuhkarakeiden ominaisuuteen. Opasakka-kuitusavea syntyy Stora Enson paperitehtaan poistovesilaitoksella. Allfix on Mfibrils Oy:n valmistamaa modifioitua kuitulietettä, mitä muodostuu selluloosateollisuuden sivutuotteena. (8.)

*TAULUKKO 1. Raetuhkien reseptit*

Rae 1	lentotuhka	vesi	-
Rae 2	lentotuhka	vesi	opasakka
Rae 3	lentotuhka	allfix	opasakka
Rae 4	kivituhka	allfix	opasakka
Rae 5	kivituhka	allfix	-

Lento- ja kivituhka ovat raetuhkan runkoaineita. Allfix ja opasakka ovat lisäaineita, joiden määrä resepteissä on muutamia prosentteja. Tutkimuksessa hiekan vastaavia laboratorioarvoja on käytetty vertailuarvona.

## 4 VESIPITOISUUS

Vesipitoisuuden määrittäminen on tärkeää, kun tavoitellaan mahdollisimman hyvin tiivistyvää massaa. Jokaisella maalajilla on sille ominainen vesipitoisuus, jossa se tiivistyy parhaiten. Tätä nimitetään optimivesipitoisuudeksi. Maarakentamisessa on tärkeää tietää, kuinka lähellä optimivesipitoisuutta ollaan. (5.)

### 4.1 Vesipitoisuuden määrittäminen

Määrittäminen tarkoituksena on selvittää valmistetun näytteen vesipitoisuus massasuhteena. Vesipitoisuuden määrittäminen tehdään standardin SFS-EN 1097-5:2008 mukaisesti. (9.)

Menetelmässä tasalaatuinen näyte punnitaan alkuperäiskosteudessa ja asetetaan kuivumaan lämpökaappiin 110 °C:n lämpötilaan. Lämpökaapissa pidettävä näyte punnitaan useaan kertaan lämmityksen aikana, kunnes voidaan todeta, ettei sen massa muutu. Tällöin vesi on haihtunut pois näytteen huokosista. Näytteen viimeisin massa kirjataan ylös kuivamassaksi. Vesipitoisuus ilmoitetaan prosenttilukuna, jossa näytteen sisältämän veden massa on jaettu näytteen kuivalla massalla (kaava 1). (9.)

$$w = (m_m - m_k) / m_k * 100 \%$$

KAAVA 1

$w$  = vesipitoisuus (%)

$m_m$  = kostean näytteen massa (g)

$m_k$  = kuivan näytteen massa (g)

## 4.2 Rakeiden vesipitoisuudet

Taulukossa 2 on esitetty tutkittujen raetuhkareseptien vesipitoisuudet.

*TAULUKKO 2. Rakeiden alkuperäiset vesipitoisuudet*

Resepti	Vesipitoisuus (%)
Rae 1	35,0 %
Rae 2	42,9 %
Rae 3	30,3 %
Rae 4	25,2 %
Rae 5	13,5 %

Suomen Ympäristökeskuksen tekemien tutkimuksen mukaan suomalaisen hiekan vesipitoisuuden keskiarvo on 17,9 % (10).

## 5 KIINTOTIHEYS

### 5.1 Kiintotiheyden määrittäminen

Kiintotiheys kertoo aineen tiheyden, kun rakeiden välejä ja tyhjätiloja ei oteta huomioon. Kiintotiheys määritettiin pyknometrinen menetelmällä standardin SFS-EN 1097-6:2014 mukaisesti. Testissä massan tilavuuden ratkaisu perustuu tunnetun vedellä täytetyn mittapullon tilavuuden ja näytteen syrjäyttämän veden tilavuuden erotuksen ratkaisemiseen. Määrittämisessä käytettiin kuivattua ja seulottua, 0/16 rakeisuuden raetuhkaa. (11.)

Kuiva näyte asetetaan mittapulloon ja niiden yhteismassa punnitaan. Mittapullossa oleva näyte peitetään vedellä ja sekoitetaan, minkä jälkeen mittapullo asetetaan vakuuilaiteistoon (kuva 4). Vakuumiin imetään pumpulla alipaine, jossa näytettä pidetään 30 minuuttia. Vakuumissa pitämisen jälkeen mittapullo täytetään vedellä pintajännitykseen saakka ja suljetaan kannella liu'uttaen, jolloin mittapullon sisälle ei jää ilmaa. Täysi mittapullo kuivataan pinnasta ja punnitaan. (11.)



*KUVA 4. Mittapullot vakuuilaiteistossa*

Kiintotiheys lasketaan seuraavalla yhtälöllä kaavan 2 mukaisesti (11).

$$\rho = (m_{k+n} - m_k) / ((m_{k+n} - m_k) - (m_{m+n} - m_m))$$

KAAVA 2

$\rho$  = kiintotiheys ( $\text{g/cm}^3$ )

$m_k$  = kuivan mittapullon massa ( g )

$m_{k+n}$  = kuivan mittapullon ja kuivan näytteen massa (g)

$m_m$  = vedellä täytetyn mittapullon massa (g)

$m_{m+n}$  = vedellä täytetyn mittapullon ja märän näytteen massa (g)

## 5.2 Kiintotiheyden tulokset

Taulukossa 3 on esitetty tutkittujen tuhkareseptien kiintotiheydet.

TAULUKKO 3. Kiintotiheys

Resepti	Kiintotiheys $\text{g/cm}^3$
Rae 1	2,53
Rae 2	2,52
Rae 3	1,89
Rae 4	2,03
Rae 5	2,25

Suomalaisen hiekan kiintotiheyden keskiarvo on  $2,66 \text{ g/cm}^3$  (10).

Hiekan kiintotiheyden arvoon verrattuna raetuhka on kevyempää. Raetuhkan keveys johtuu sen huokoisuudesta, joka kävi ilmi kapillaarisuus, vedenläpäisevyys ja Proctor-kokeissa.



## 6 RAKEISUUS

Rakeisuuskäyrä kertoo maa-aineksen rakeiden jakauman, jonka avulla sen soveltuvuutta eri käyttötarkoituksiin voidaan selvittää. Rakeisuuskäyrän avulla nähdään lajitepitoisuudet, joiden perusteella tapahtuu maalajin nimeäminen. Näin sen käyttäytymistä voidaan arvioida esimerkiksi routivuuden suhteen. (12.)

### 6.1 Kuivaseulonta

Rakeisuus määritettiin kuivaseulonta-menetelmällä standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti. Seulonta suoritettiin seulakoneella (kuva 5). Seulomisprosessissa kuivattu ja punnittu näyte kaadetaan seulasarjaan, jossa on taulukon 4 mukaiset seulat alaspäin pienenevässä järjestyksessä sekä seulasarjan pohja-astia ja kansi. (12.)



KUVA 5. Seulasarja seulakoneessa

TAULUKKO 4. Seulasarjan silmäkoot (mm)

22,5	16,0	11,2	8,0	5,6	4,0	2,0	1,0	0,5	0,25	0,125	0,063
------	------	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-------	-------

Seulakone heiluttaa paikoilleen hydraulisesti lukittua seulasarjaa vertikaalisessa ja horisontaalisessa suunnassa 15 minuutin ajan, jolloin seulasarjan ylä-

päähän kaadettu maa-aines läpäisee seulat, kunnes se saavuttaa raetta pienemmän seulakoon. Seulomisen jälkeen seulasarja puretaan ylhäältä alkaen ja jokaiselle seulalle jäänyt massa punnitaan erikseen (kuva 6). (12.)



KUVA 6. Seula

## 6.2 Rakeisuuskäyrän määrittäminen

Jokaisen seulakoon läpäissyt massa ratkaistaan kaavan 3 mukaisesti (12).

$$m_x = m - m_s$$

KAAVA 3

$m_x$  = seulan läpäissyt massa

$m_s$  = seulalle jäänyt massa

$m$  = näytteen massa

Kaavasta 3 saatujen seulan läpäisseen massan arvojen avulla lasketaan seulan läpäisyprosentti kaavan 4 avulla (12).

$$s_x = (m - m_x) / m * 100 \%$$

KAAVA 4

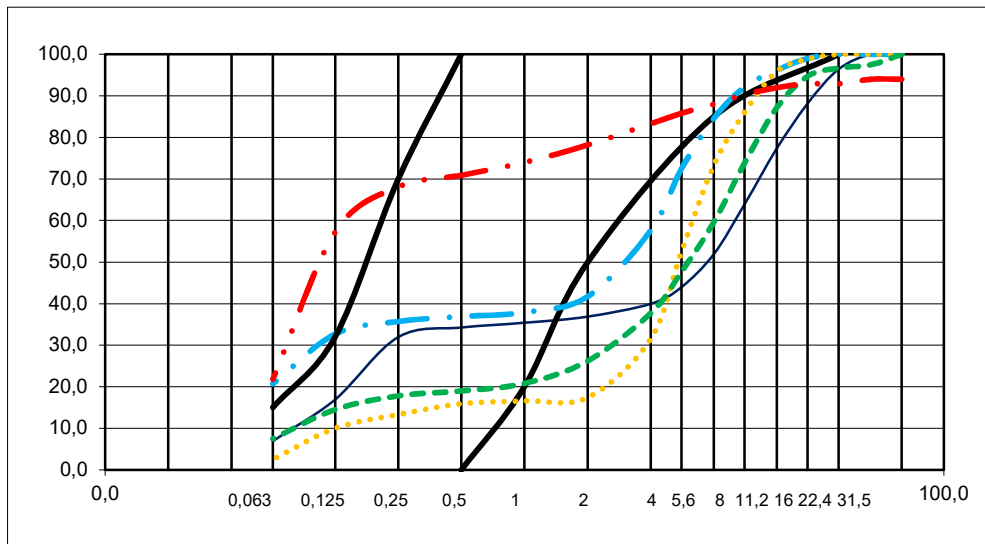
$$s_{x+1} = (m_x - m_{x+1}) / m * 100 \%$$

$s_x$  = seulan läpäisyprosentti

$m_{x+1}$  = alapuolen seulan läpäissyt massa

### 6.3 Rakeisuuskäyrät

Rakeisuuskäyrän x-akselille on kirjattu seulakoot, jotka ilmoittavat rakeiden halkaisijan. Rakeisuusasteikko on logaritminen. Käyrän y-akseli kertoo seulan läpäisyprosentin eli sen, kuinka monta prosenttia massasta läpäisi seulan. Rakeisuuskäyrän huippupisteestä nähdään maksimirakekoko. Käyrän alkupää kertoo pienimmän raekoon tai sen, kuinka monta prosenttia rakeesta oli pohjamateriaalia eli 0,063 mm seulan läpäisyyttä. Kuvassa 7 on esitetty tutkittujen tuhkarakeiden rakeisuudet sekä Väyläviraston asettamat raja-arvot suodatinhiekan rakeisuudelle.



Rae 1 — Rae 2 - - - - - Rae 3 ..... Rae 4 - - - - - Rae 5 - - - - -

KUVA 7. Raetuhkan rakeisuuskäyrät

Mustat rajakäyrät ovat väyläviraston ohjeen mukaiset käyrät suodatinkerroksen rakeisuudelle. Tarkempi ohjeistus on saatavilla Väyläviraston julkaisusta. (5.)

Rakeisuuskäyrät on eritelty omiin kuvaajiin liitteissä. Rakeisuuskäyrien mukaan tuhkarakeissa on paljon hieno-ainesta ja välilajitteet puuttuvat lähes kokonaan. Tällöin keskikokoisten rakeiden määrä on olematon, jolloin tuhkarakeet lajittuvat pelkkään hienoainekseen ja isoihin tuhkarakeisiin. Raetuhkan rakeisuudet eivät täytä Väyläviraston suodatinkerroksen hiekalle asetettuja vaatimuksia (kuva 7). (5.)

## 7 OPTIMIVESI-PITOISUUS JA MAKSIMI KUIVATILAVUUSPAINO

Optimivesipitoisuus kertoo, millä vesipitoisuudella maa-aines tiivistyy parhaiten. Tiivistystyön laadunvalvonta perustuu maksimikuivatilavuuspainon määrittämiseen. Kentällä tiivistettävästä kerroksesta mitattua kuivatilavuuspainoa verrataan laboratoriossa määritettyyn teoreettiseen maksimikuivatilavuuspainoon. Tiivistystyölle annetaan laatuvaatimus vaadittavan tiiveysasteen kautta (kaava 5). (5.)

$$D = \gamma_d / \gamma_{dmax} * 100 \%$$

KAAVA 5

$D$  = tiiveysaste (%)

$\gamma_d$  = mitattu kuivatilavuuspaino ( $kN/m^3$ )

$\gamma_{dmax}$  = maksimi kuivatilavuuspaino ( $kN/m^3$ )

### 7.1 Proctor-koe

Proctor-kokeella, SFS-EN 13286-2:en:2011 määritetään maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus. Kokeessa maa-ainesmassa tiivistetään viidessä kerroksessa 4,5 kg:n iskuvasaralla Proctor-muottiin (kuva 8). Kukin osakerros tiivistetään 25 vasaran iskulla. (13.)

Muotti koostuu pohjalevystä, jolla on 100 mm:n halkaisija ja kahdesta päällekkäin kasattavasta lieriöstä, jotka ovat 100 mm korkeita. Muotin ylempi lieriö irrotetaan ja jäljelle jääneen muotin pinta tasataan leikkaamalla ylimääräinen maa-aines pois. Tämän jälkeen muotin sisälle jäänyt massa punnitaan ja siitä otetaan erillinen kosteusnäyte tarkan vesipitoisuuden määrittämiseksi. (13.)

Varsinaisen Proctor-muotin mitat ovat  $d = 100$  mm ja  $h = 100$  mm. Muotissa käytetään korotusosaa, jotta se saadaan tiivistettyä täyteen. (13.)



*KUVA 8. Proctor-muotti*

Useassa eri vesipitoisuudessa tehtyjen kokeiden tuloksista muodostetaan kuivatilavuuspaino – vesipitoisuus kuvaaja. Kuvaaja käyttäytyy paraabelisesti, jolloin sen huippukohta, maksimi kuivatilavuuspaino, voidaan ratkaista matemaattisesti. (13.)

Tämä koe toistetaan vähintään 5 eri vesipitoisuudella esimerkiksi 4, 7, 10, 13 ja 16 %:n pitoisuuksilla. Massan tarkan vesipitoisuuden avulla saadaan ratkaistua kuivan massan paino, jota käytetään kuivairtoteiheyden laskennassa ja sen jälkeen kuivatilavuuspainon laskennassa. Proctor-kokeen tulokset on esitetty taulukossa 4. (13.)

## 7.2 Proctor-kokeen laskutoimitukset

Kuivairtitiheys voidaan jokaisen Proctor-sullonnan jälkeen laskea kaavalla 6 (13).

$$\rho_d = m_d / V$$

KAAVA 6

$\rho_d$  = kuivairtitiheys ( $g/cm^3$ )

$m_d$  = kuivan näytteen massa (g)

$V$  = muotin tilavuus ( $cm^3$ )

Tämän jälkeen kuivatilavuuspaino voidaan laskea irtotiheyden avulla kaavalla 7 (13).

$$\gamma_d = \rho_d \cdot g$$

KAAVA 7

$\gamma_d$  = tilavuuspaino ( $kN/m^3$ )

$g$  = putoamiskiihtyvyyys ( $m/s^2$ )

$$\gamma_d = \gamma / (1 + w/100)$$

$\gamma_d$  = kuivatilavuuspaino ( $kN/m^3$ )

$w$  = vesipitoisuus

## 7.3 Proctor-kokeen tulokset

Optimivesipitoisuudet ovat huomattavasti suodatinhiekan vastaavia arvoja suurempia ja maksimikuivatilavuuspainot hiekan vastaavia arvoja pienempiä. Poikkeuksen tästä tekee rae 5, jossa kyseessä olevat arvot ovat lähellä suodatinhiekan vastaavia arvoja. Arvot on esitetty taulukossa 5.

TAULUKKO 5. Proctor-kokeen tulokset

Resepti	Optimivesipitoisuus (%)	Maksimi kuivairtitiheys ( $g/cm^3$ )	Maksimi kuivatilavuuspaino ( $kN/m^3$ )
Rae 1	34,5	1,18	11,6
Rae 2	38,0	1,14	11,2
Rae 3	28,4	1,11	10,9
Rae 4	19,0	1,44	14,1
Rae 5	13,1	1,77	17,4

## 8 PURISTUSLUJUUS

Puristuslujuuden perusteella voidaan arvioida maa-aineksen kuormituskestävyyttä. Kuormituskestävyys ilmaisee, kuinka suuria massoja tie kestää. (14.)

### 8.1 ICT-kappaleiden valmistus

Tässä työssä koekappaleet valmistettiin ICT-kiertotiivistyslaitteella. ICT-laitteella tiivistetään hydraulisesti muotissa olevaa massaa. Tietokoneohjattu ICT-laitte seuraa kappaleen tiheyttä, korkeutta ja leikkausvoimaa. ICT-laitteen muotti on 100 mm halkaisijaltaan oleva lieriö, jonka sisään maa-aines asetetaan kahden levyn väliin. (14.)

Luonnonoloja kuvaavan testin toteuttamiseksi raetuhka-kappaleet valmistettiin käyttämällä kappaleiden massassa ainoastaan raetuhkaa ja vettä. Kappaleiden vesipitoisuudeksi valittiin aiemmin määritetty optimivesipitoisuus, jotta kappaleet saataisiin mahdollisimman tiiviiksi. Tavoitteena oli puristaa kappaleista 100 x 100 mm:n lieriötä, jolloin kappaleiden vaatima massa ratkaistiin tiheyden ja kappaleen vaatiman tilavuuden avulla.

Jokaisesta tuhkareserptistä tehtiin kaksi vertaista kappaletta, ensimmäiset valmistettiin heti veden lisäyksen ja massan sekoittamisen jälkeen. Toiset kappaleet valmistettiin veden imeytyttyä raetuhkamassaan yön yli. Kappaleiden tiiveys teoreettisesta maksimikuivatilavuus painosta vaihteli välillä 92-98 %. Kappaleiden fyysiset mitat määritettiin työntömitalla ja kappaleiden massa punnittiin.

### 8.2 Puristuskoe

Testissä EN 13286-41:2003 ICT-laitteella valmistettu koekappale puristetaan standardista poiketen hitaalla vakio siirtymänopeudella, kunnes kappaleen lujuus pettää.

Raetuhka-kappaleet puristettiin välittömästi valmistuksen jälkeen, koska niissä ei ollut reagoivia aineita, jotka olisivat lisänneet lujuutta ajan kuluessa. Puristuskokeessa kappaleet asetettiin tietokoneohjattuun aineenkoetuskoneeseen, jossa ne puristettiin hitaalla vakionopeudella, yksiaksaalipuristuksella, kunnes kappaleen lujuus petti (kuva 9). Kappaleeseen kohdistettu maksimivoima kirjattiin ylös.



*KUVA 9. Raetuhkakappaleen puristuslujuus-ko*

### **8.3 Puristuskokeen laskutoimitukset**

Kappaleen puristuslujuus lasketaan standardin mukaisella kaavalla 8 (14).

$$R_c = F/A_c$$

*KAAVA 8*

$R_c$  = puristuslujuus ( $kN/m^2$ )

$F$  = maksimivoima ( $kN$ )

$A_c$  = poikkileikkauksen pinta-ala ( $m^2$ )

Kappaleiden tiivistymisasteen ratkaisemiseksi laskettiin valmistettujen kappaleiden kuivairtitiheys, jota verrattiin teoreettiseen maksimikuivairtitiheyteen.

### **8.4 Puristuskokeen tulokset**

Taulukossa 6 on esitetty testattuihin kappaleisiin kohdistunut puristusvoima, kappaleiden puristuslujuus ja tiiveysaste.



TAULUKKO 6. Puristuslujuus

A.	F (N)	R <sub>c</sub> (kPa)	ρ <sub>dnäyte</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	ρ <sub>dmax</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	D (%)
Rae 1	2855	363,7	1,14	1,18	96,6
Rae 2	2040	259,9	1,07	1,14	93,8
Rae 3	2144	273,1	1,04	1,11	93,2
Rae 4	2810	358,0	1,37	1,44	95,2
Rae 5	2265	288,5	1,64	1,77	92,9
B.					
Rae 1	2150	273,9	1,14	1,18	96,3
Rae 2	1953	248,8	1,05	1,14	92,5
Rae 3	1890	240,8	1,04	1,11	93,7
Rae 4	2087	265,9	1,34	1,44	92,7
Rae 5	2194	279,5	1,67	1,77	94,1

Taulukon A kappaleet valmistettiin samana päivänä, kun massa kasteltiin. Taulukon B kappaleet valmistettiin veden imeytyttyä yön yli. Kappaleiden massojen vesipitoisuudet ovat kohdan 7 optimivesipitoisuuden mukaiset. Taulukoissa esitetyt tiheydet ovat kuivairtoteiheyksiä. Tiiveysaste kertoo, montako prosenttia kappaleen tiheys on teoreettisesta maksimikuivairtoteiheydestä.

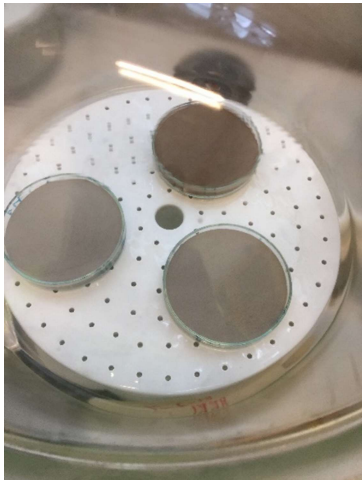
Koekappaleiden tiiveysasteet täyttäisivät hyvin suodatinhiekkakerroksen laatuvaatimukset. Puristuslujuuden perusteella ei suoraan voida päätellä rakenteen kantavuutta. Kantavuuden voisi arvioida olevan riittävän suodatinhiekkakerrokselle, mikäli materiaali voitaisiin myös käytännön rakentamiskohteessa tiivistää rakeiden rikkoontumatta. (15.)

## 9 VEDEN ADSORPTIO

Veden adsorptio kertoo, paljonko kuivatun maa-aineksen hienoaines kerää itseensä kosteutta tilassa, jossa on korkea ilmankosteus. Suuri veden adsorptioarvo (>1 %) kertoo kiviaineksen olevan altis toistuvien jäätymis-sulamissykliä aiheuttamalla rapautumiselle. (16.)

### 9.1 Adsorptiokoe

Tuhkarakeiden veden adsorptio määritettiin standardin PANK-2108 menetelmällä. Menetelmässä 0,063 mm:n seulan läpäissyt kuivattu maa-aines punnitaan petrimaljalla ja asetetaan eksikaattoriin (kuva 10).



*KUVA 10. Näytteet eksikaattorissa*

Eksikaattorin pohjalla on vettä, jonka yläpuolella on avoin taso, jolle petrimaljat asetetaan (kuva 11). Eksikaattori suljetaan tiiviisti ja näytteitä pidetään eksikaattorissa 7 vuorokautta, jonka jälkeen näytteet punnitaan. (17.)



KUVA 11. Eksikaattorin mallikuva (10, s.3)

## 9.2 Adsorptiokokeen laskutoimitukset

Kaavan 9 avulla lasketaan veden adsorptioprosentti (17).

$$A = 100 \cdot (N - M) / M$$

KAAVA 9

$A$  = veden adsorptio (%)

$N$  = näyte märkänä (g)

$M$  = näyte kuivana (g)

## 9.3 Adsorptiokokeen tulokset

Taulukossa 7 on esitetty tutkittujen tuhkareseptien veden adsorptio kokeen tulokset. Arvojen perusteella kivituhkalla on vähemmän adsorptiota kuin lentotuhkalla. Sellutuotteet lisäsivät adsorptiota lentotuhkasta tehdyissä rakeissa. Rakeissa 1 – 3 veden adsorptioarvot ylittävät hyvälle kiviainekselle Väyläviraston antaman raja-arvon 1 %. (16.)

TAULUKKO 7. Veden adsorptio

Resepti	Adsorptio %
Rae 1	3,1
Rae 2	7,6
Rae 3	7,2
Rae 4	0,7
Rae 5	0,8

## 10 KAPILLAARINEN NOUSUKORKEUS

Veden kapillaarinen nousukorkeus kertoo, kuinka korkealle maassa oleva kosteus nousee maa-aineskerroksessa. Maa-aineksessa oleva vesi voi aiheuttaa routimisongelmia ja kantavuuspuutteita maa-aineksen vesipitoisuuden muuttuessa. Routivana pidetään maa-ainesta, jonka kapillaarinen nousukorkeus on enemmän kuin metrin. (18.)

### 10.1 Kapillaarisuuskoe

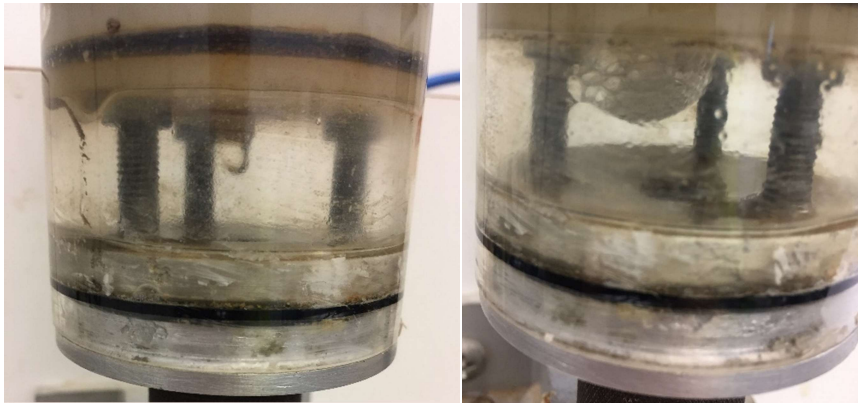
Kapillaarisuuskokeessa veden kapillaarisuutta tutkittiin menetelmällä, jossa vedellä kyllästetyn 0/8 rakeisuuden raetuhka kerroksen läpi imettiin kosteutta alipaineella. Kapillaarisuuskoelaitteen säiliö täytetään merkkiin asti kyllästetyllä maa-aineksella ja tiivistetään käsin tiivistystangolla (kuva 12). Säiliön pohjassa on reikä, jonka läpi alipaine imee vettä näytteestä. Testi suoritetaan kahdesti rinnakkaisnäytteille, ensimmäisessä testissä etsitään suuntaa antava arvo kapillaarisuudelle, toisessa testissä määritetään tarkka tulos. (19.)



KUVA 12. Kapillaarisuuskoe laitteisto

Ensimmäisessä testissä alipainetta nostetaan järjestelmän mittausyksikössä, kunnes vesi on läpäissyt näytteen. Veden läpäisy havaitaan, kun tippuva vesi alkaa kuplimaan (kuva 13). Saatua tulos kerrotaan kertoimella 0,8, joka on aloituspaine tarkalle testille. Tarkassa testissä painetta nostetaan, kunnes vesi on

läpäissyt näytteen. Veden läpäistyä näytteen mittarilukema kertoo kapillaarisuuden arvon. (19.)



*KUVA 13. Kapillaarisuusnäyte ennen ja jälkeen testin*

## 10.2 Kapillaarisuustestin tulokset

Taulukossa 8 on esitetty veden kapillaarisen nousukorkeustestin tulokset.

*TAULUKKO 8. Veden kapillaarinen nousukorkeus*

Resepti	Kapillaarisuus cm
Rae 1	121
Rae 2	88
Rae 3	30
Rae 4	30
Rae 5	124
Hiekka	30

Taulukon 8 tuloksien perusteella rakeet 2, 3 ja 4 ovat routimattomia, koska kapillaarisuus arvo oli alle metrin. Rakeiden 1 ja 5 kapillaarinen nousu oli 1,2 metriä, jolloin ne ovat lievästi routivia. Rinnakkaiskokeena testatun hiekan arvo oli 30 cm. (18.)

## 11 RASIALEIKKAUSKOE

Rasialeikkauskokeella määritetään maa-ainesten leikkauslujuutta. Leikkauslujuus syntyy koheesion ja kitkanvaikutuksesta. Kitkan antama leikkauslujuus perustuu rakeiden väliseen kitkaan, koheesion lujuus rakeiden välisiin sähköstaattisiin voimiin. Kitkakulma on kulma, johon maa-aines jää pitkän ajan kuluessa. (20.)

### 11.1 Rasialeikkauskokeen suoritus

Rasialeikkauskokeessa standardin CEN-ISO/TS 17892-10:fi mukaan pystysuorassa normaalijännityksessä oleva maa-aineskerros leikataan vaakasuoralla voimalla, kunnes näyte pettää. Rasialeikkauskokeessa näyte leikataan useilla normaalijännityksen arvoilla. Tulosten perusteella sovitetaan suora, miten leikkauslujuus riippuu normaalijännityksestä. Kyseisen suoran kaltevuuskulma on kitkakulman ja y-akselin leikkauspisteestä saadaan määritettyä koheesio. (20.)

Standardin mukaan näytteen maksimiraekoko ei saa olla suurempi kuin  $1/5$  näytteen korkeudesta (kuva 14). Rasialeikkauskokeen rasiän mitat ovat 100 mm x 100 mm x 50 mm, joten näytemateriaaliksi valittiin 10 mm seulan läpäissyt massa, joka kostutettiin teoreettiseen optimivesipitoisuuteen. (20.)



KUVA 14. Rasialeikkauskokeen näyte rasiassa

Standardista poiketen näytteen konsolidoitumista ei otettu huomioon testissä, näyte tiivistettiin leikkausmuottiin painelemalla. Leikkaus suoritetaan vakionopeudella.

### **11.2 Rasialeikkauskokeen laskutoimitukset**

Rasialeikkauskokeesta saaduilla arvoilla ratkaistaan raetuhkakerroksen leikkausjännitys kaavalla 10 (20).

$$\tau = P/A$$

KAAVA 10

$\tau$  = leikkausjännitys (kPa)

$P$  = leikkausvoima (kN)

$A$  = näytteen alkuperäispinta-ala (m<sup>2</sup>)

### **11.3 Rasialeikkauskokeen tulokset**

Rasialeikkauskokeessa tuhkanäytteet käyttäytyivät luonnon maa-aineksista poikkeavasti. Maa-aineskokeissa näytteen leikkauslujuus kasvaa normaalivoiman kasvaessa. Tuhkanäytteiden kokeissa leikkauslujuus välillä myös laski normaalijännitystä lisättäessä. Normaalijännitys hienonsi tuhkarakeita ja sen takia koetuloksista ei pystynyt laskemaan kittakulmaa ja koheesiota. Rasialeikkauskokeiden tulokset on esitetty liitteissä 6-10 normaalijännitys–leikkausjännityskvaajina.

## 12 VEDENLÄPÄISEVYYS

Vedenläpäisevyys koe kertoo, kuinka nopeasti vesi etenee kyllästetyssä maaineskerroksessa. CEN ISO/TS 17892-11:fi -standardin vedenläpäisevyys koeksessa ICT-laitteella valmistettujen kappaleiden läpi johdetaan vettä vakiopaineella. Kappaleet valmistetaan luvun 7.2 mukaisesti. (21.)

Näytekappale asetetaan kolmiaksisiaalisiin (kuva 15), jossa se lukitaan paikoilleen huokoskivien väliin kumikalvolla. Selli täytetään vedellä ja sinne luodaan sellipaine, joka estää kappaleen hajoamisen vedenläpäisykokeen aikana. Kappale on järjestelmässä molemmiin puolin yhdistetty mittaussylintereihin, joissa vesi juoksee paineella kappaleen läpi sylinteristä toiseen. (21.)



KUVA 15. Vedenläpäisevyyslaitteisto



Etupuolen mittaussylinteri täytetään vedellä, joka johdetaan kappaleen läpi sen kyllästämiseksi. Vettä lisätään mittaussylinteriin, kunnes näyte on täysin kyllästynyt, eli kun mittaussylinterien välillä ei tapahdu häviöitä veden määrässä. Kylästynyt näyte on valmis testattavaksi. Testissä mitataan aika, jossa tunnettu tilavuus vettä johtuu etupuolen mittaussylinteristä takapuolen mittaussylinteriin vakioaineessa. (21.)

### 12.1 Vedenläpäisevyysskoeken laskutoimitukset

Vedenläpäisevyysskoekkeesta saaduilla arvoilla ratkaistaan vedenläpäisevyysarvo kaavalla 11 (21).

$$K_t = Qh/AHt$$

KAAVA 11

$K_t$  = vedenläpäisevyys arvo (m/s)

Q = kappaleen läpi johdettu vesimäärä (m<sup>3</sup>)

h = näytekappaleen korkeus (m)

A = näytekappaleen pinta-ala (m<sup>2</sup>)

H = mittaussylinterien paine-ero (m)

t = mittausaika (s)

### 12.2 Vedenläpäisevyysskoeken tulokset

Taulukossa 9 esitetään testattujen raetuhkakappaleiden vedenläpäisevyysarvot ja tiiveysasteet.

TAULUKKO 9. Vedenläpäisevyys

Resepti	K <sub>t</sub> (m/s)	D (%)
Rae 1	6,1E-07	92,3
Rae 2	6,5E-07	90,9
Rae 3	7,2E-06	92,5
Rae 4	1,6E-06	91,0
Rae 5	2,9E-07	92,8

Hiekan vedenläpäisevyyden keskiarvo on noin 1E-5 m/s. Luonnollisista maala-jeista raetuhka on lähimpänä siltin arvoa 1E-6 m/s – 1E-7 m/s (10).

## 13 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli selvittää, täyttääkö raetuhka teiden suodatinkerroksen vaatimukset. Työssä keskityttiin raetuhkan fyysisiin ominaisuuksiin sekä routivuuteen vaikuttaviin ominaisuuksiin. Raetuhkan ominaisuudet määritettiin yleisten standardisoitujen maa-aineskokeiden avulla Oulun ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa.

Rakeet ovat koostumukseltaan hienoa kerrostunutta tuhkaa. Reseptien 2, 3 ja 4 pohjalta rakeistetut rakeet sisältävät opasakka-sydämen. Tämä lisäaine tekee rakeista lujempia. Tuhkarakeet ovat sitomattomia, minkä vuoksi niiden pinnasta irtoaa tuhkapölyä eri testien aikana. Tällöin kuivaseulonta ei anna täysin aitoa kuvaa näytteen rakeisuudesta, koska hienoaines on pääosin rakeista irronnutta tuhkaa.

Tuhkarakeiden koostumus vaikuttaa myös tiiveys- ja lujuuskokeisiin. Proctor-kokeessa tuhkarakeet hienontuvat täysin tiivistäessä. Tällöin tiivistetty massa on tuhkarakeiden sijasta hienoa tuhkaa. Oulun kaupungin Katurakenteiden suunnitteluohje suosittelee tästä syystä mittaamaan raetuhkan tiivistymisen rakennetuista tierakenteista (3).

Rakeiden hienontuminen vaikeuttaa rakeen geoteknisten lujuusarvojen määrittämistä. Tällöin raetuhka käyttäytyy enemmän yhtenäisenä irtotuhka kerroksena. Rasialeikkauskoe ei anna selvää kuvaa ehjien rakeiden ominaisuuksista.

Tuhkarakeiden kapillaarisuuteen suurin vaikuttava tekijä on näytteen sisältämän hienoaineksen määrä. Näytteiden 3 ja 4 kapillaarisuudet olivat pienimmät ja ne sisälsivät vähiten hienoainesta. Kapillaarisuuskokeessa näytteitä ei tiivistetty samalla voimalla kuin Proctor-kokeessa, jolloin rakeiden todellinen kapillaarisuus saattaa nousta työmaaolosuhteissa. Vedenläpäisevyys oli suurin näytteissä 3 ja 4, joissa hienoainespitoisuus oli pienin. Vastaavasti vedenläpäisevyys oli pienin

näytteessä 5, jossa hienoainesmäärä oli suurin. Hienoainesmäärä korreloi vedenläpäisevyyden kanssa. Näytteissä 3 ja 4 vedenläpäisevyydet olivat suurimmat.

Tehtyjen tutkimusten perusteella raetuhka ei tällaisenaan sovellu kovin hyvin suodatinhiekkakerroksen materiaaliksi. Suurin ongelma liittyy rakeiden mureneeseen fyysisen rasituksen tai veden vaikutuksesta. Hienonimisen seurauksena materiaalin kantavuus huononee ja se muuttuu routivaksi. Tämän johdosta materiaalin tuotekehityksessä olisi jatkossa syytä panostaa rakeiden lujuuden kasvattamiseen.

## LÄHTEET

1. Turpeen tuotanto ja käyttö, VTT Tiedotteita 2550. 2010. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2010/t2550.pdf>. Hakupäivä 18.10.2018.
2. Kiviniemi, Sakari 2018. Toimitusjohtaja, Rakeistus Oy. Keskustelut 2018.
3. Katurakenteiden suunnitteluohje. 2017. Oulun Kaupunki. Saatavissa: [https://www.ouka.fi/documents/64248/17062568/Oulun+kaupunki\\_Sunnitteluohje.pdf/55f8f719-9623-488b-a623-83965ab42778](https://www.ouka.fi/documents/64248/17062568/Oulun+kaupunki_Sunnitteluohje.pdf/55f8f719-9623-488b-a623-83965ab42778). Hakupäivä 18.10.2018.
4. Tierakenteen suunnittelu, Liikenneviraston ohjeita 38/2018. 2018. Liikennevirasto. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo\\_2018-38\\_tierakenteen\\_suunnittelu\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf). Hakupäivä 23.3.2020.
5. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset, Penger- ja kerrosrakenteet. 2005. Tiehallinto. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2200043-v-04penger\\_ja\\_leikk.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2200043-v-04penger_ja_leikk.pdf). Hakupäivä 18.10.2018.
6. Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. 2007. Tiehallinto. Saatavissa: <https://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100041-v-07-sivutuoteohje.pdf>. Hakupäivä 26.3.2020.
7. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. 2019. Rakennustieto Oy. Saatavissa: [https://ryl.rakennustieto.fi/InfraRYL/21100?version=2019\\_1](https://ryl.rakennustieto.fi/InfraRYL/21100?version=2019_1). Hakupäivä 25.3.2020.
8. Mäentausta, Olli 2018. Kehityspäällikkö Mfibrils Oy. Keskustelut 2018.
9. SFS-EN 1097-5. 2008. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 5: Kosteuspitoisuuden määrittäminen kuivaamalla tuuletetussa lämpökaapissa. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/143899.html.stx> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 5.3.2020.

10. Ronkainen, Nanna 2012. Suomen ympäristö 2/2012 Suomen maalajien ominaisuuksia. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2\\_2012\\_Suomen\\_maalajien\\_ominaisuuksia.pdf](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38773/SY2_2012_Suomen_maalajien_ominaisuuksia.pdf). Hakupäivä 5.3.2020.
11. SFS-EN 1097-6. 2014. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimukyvyyn määrittäminen. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/400479.html.stx> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 5.3.2020.
12. SFS- EN 933-1. 2012. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/9/201534.html.stx> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 5.3.2020.
13. SFS-EN 13286-2:en 2011. Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content. Proctor compaction. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/159431.html.stx> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 5.3.2020.
14. SFS-EN 13286-41:en. 2003. Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/6162.html.stx> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 5.3.2020.
15. Kallio, Vesa 2020. Lehtori, Oulun ammattikorkeakoulu. Keskustelut 2020.
16. Väylärakenteiden valtakunnallinen kiviainestutkimus, Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/ 2016. 2016. Helsinki. Liikennevirasto. Saatavissa: [https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts\\_2016-18\\_vaylarakenteiden\\_valtakunnallinen\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-18_vaylarakenteiden_valtakunnallinen_web.pdf). Hakupäivä 26.3.2020.

17. PANK-2108. 1997 Kiviainekset, yleisominaisuudet Veden adsorptio. Saatavissa: [http://pank.fi/file/368/399\\_pank2108-2009.pdf](http://pank.fi/file/368/399_pank2108-2009.pdf). Hakupäivä 18.10.2018.
18. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset, Yleiset perusteet. Tiehallinto. 1993. Saatavissa: [https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf2/yleiset\\_perusteet.pdf](https://julkaisut.liikennevirasto.fi/thohje/pdf2/yleiset_perusteet.pdf). Hakupäivä 18.10.2018.
19. Perälä, Esa 2018. Laboratorioinsinööri, Oulun ammattikorkeakoulu. Keskustelut 2018.
20. CEN ISO/TS 17892-10:fi. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 10: Suorat leikkauskokeet. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID9/1/41962.html.stx> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 5.3.2020.
21. CEN ISO/TS 17892-11:fi. 2004. Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokeet. Osa 11: Vedenläpäisyvyyden määrittäminen. Vakiopaine- ja muuttuvapainekoe. Suomen Standardisoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID9/1/41963.html.stx> (vaatii käyttäjälisenssin). Hakupäivä 5.3.2020.

## **LIITTEET**

Liite 1 Rae 1, rakeisuuskäyrä

Liite 2 Rae 2, rakeisuuskäyrä

Liite 3 Rae 3, rakeisuuskäyrä

Liite 4 Rae 4, rakeisuuskäyrä

Liite 5 Rae 5, rakeisuuskäyrä

Liite 6 Rae 1, rasialeikkauskokeen kuvaaja

Liite 7 Rae 2, rasialeikkauskokeen kuvaaja

Liite 8 Rae 3, rasialeikkauskokeen kuvaaja

Liite 9 Rae 4, rasialeikkauskokeen kuvaaja

Liite 10 Rae 5, rasialeikkauskokeen kuvaaja

