



JÄTEVOIMALAN ARINAKUONAN VASTAAVUUSTESTAUS

Tomi Sahlman

Opinnäytetyö
Toukokuu 2013
Rakennustekniikka
Infrarakentaminen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Infrarakentamisen suuntautumisvaihtoehto

TOMI SAHLMAN:
Jätevoimalan arinakuonan vastaavuustestaus

Opinnäytetyö 51 sivua, joista liitteitä 11 sivua
Toukokuu 2013

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan Ekokem Oy Ab yhdyskuntajätteen poltosta syntyvän arinakuonan geoteknisiä ominaisuuksia, sekä verrataan laboratoriotutkimusmenetelmien tuloksia edellisvuosien tutkimustuloksiin.

Riihimäelle valmistui kesällä 2012 toinen jätevoimala, jonka seurauksena arinakuonan tuotannon määrä kasvoi Riihimäellä n. 45 000 tonniin vuodessa. Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää vastaavatko uuden jätevoimalan arinakuona ja sen tuhka-seos edellisten vuosien arinakuonan tutkittuja geoteknisiä arvoja. Tutkimus on varmistusta siihen, että uusi arinakuona vastaa ominaisuuksiltaan ja laadultaan edeltäjänsä sen hyötykäytössä kenttärakenteissa.

Työssä tutkittiin laboratorionkokeilla molempien Riihimäen jätevoimaloiden kuonia ja niiden tuhkaseoksia. Menetelmät pyrittiin valitsemaan niin, että niistä saadut tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia jo aiemmin tutkittuihin kuoniin nähden. Tulosten vertailu kohdistuu suurimmaksi osaksi vuonna 2009 tehdyn Markus Lehtosen diplomityön tuloksiin.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Degree programme of Civil engineering
Option of the Infrastructure

TOMI SAHLMAN:

Correspondence Analysis of Municipal Solid Waste Incineration Plant's Bottom Ash

Bachelor's thesis 51 pages, appendices 11 pages
May 2013

In this thesis we explore the geotechnical characteristics of the bottom ash produced by the municipal solid waste incineration plant of Ekokem Ltd. This thesis also compares laboratory results to test results among of the previous years.

On summer 2012 the second incineration plant was completed in Riihimäki which increased the production of bottom ash capacity to about 45 000 tons a year. The purpose of thesis was to define does the bottom ash and its fly ash mixture of the new incineration plant correspond the geotechnical characteristics of the bottom ashes that were anatomized of the previous years. The research is to confirm that the current bottom ash represents both in features and in quality to its predecessors in utilization and field structures.

In the thesis both of the Riihimäki incineration plants bottom ash and fly ash mixtures were studied by laboratory exams. The methods were chosen so that the results would be comparable to bottom ashes that have already been previously researched. The comparison of the results is mostly directed at the results of Markus Lehtonen's thesis required for a diploma from year 2009.

Key words: bottom ash, utilization, municipal solid waste incineration plant

SISÄLLYS

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 7 |
| 2 | YHDYSKUNTAJÄTTEEN POLTON ARINAKUONA | 8 |
| 2.1 | Polttoprosessi | 8 |
| 2.2 | Arinakuonan esikäsittelymenetelmät | 9 |
| 2.3 | Arinakuonan ominaisuudet | 10 |
| 2.4 | Arinakuonan hyötykäyttö maarakentamisessa..... | 10 |
| 3 | TUTKIMUSMENETELMÄT | 12 |
| 3.1 | Näytteiden valmistelu | 12 |
| 3.2 | Rakeisuudet..... | 13 |
| 3.2.1 | Pesuseulonta..... | 13 |
| 3.2.2 | Seossuhteet..... | 14 |
| 3.2.3 | Rakeisuuskäyrät | 15 |
| 3.3 | Parannettu Proctor -koe | 16 |
| 3.3.1 | Kokeen suoritus..... | 16 |
| 3.3.2 | Tulokset..... | 17 |
| 3.4 | Puristuslujuuden määrittäminen..... | 19 |
| 3.4.1 | Koekappaleiden valmistus ja kokeen suoritus | 19 |
| 3.4.2 | Tulokset..... | 20 |
| 3.5 | Kolmiaksiaalikoeket | 23 |
| 3.5.1 | Koekappaleiden valmistus | 23 |
| 3.5.2 | Dynaaminen kolmiaksiaalikoeket | 23 |
| 3.5.3 | Staattinen kolmiaksiaalikoeket | 24 |
| 3.5.4 | Tulokset..... | 24 |
| 3.6 | Kapillaarisuus | 25 |
| 3.6.1 | Yleistä | 25 |
| 3.6.2 | Kapillaarimetri | 26 |
| 3.6.3 | Suora menetelmä..... | 26 |
| 3.6.4 | Tulokset..... | 27 |
| 3.7 | Routanousukoe..... | 29 |
| 3.7.1 | Routa lyhyesti | 29 |
| 3.7.2 | Menetelmä ja koekappaleiden valmistus | 29 |
| 3.7.3 | Tulokset..... | 30 |
| 3.8 | Lämmönjohtavuus | 31 |
| 3.8.1 | Kokeen periaate..... | 31 |
| 3.8.2 | Testinäytteiden valmistus..... | 31 |
| 3.8.3 | Tulokset..... | 31 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.9 | Kiintotiheys..... | 32 |
| 3.9.1 | Testinäytteiden valmistus..... | 32 |
| 3.9.2 | Periaate pyknometrillä | 32 |
| 3.9.3 | Tulokset..... | 33 |
| 3.10 | Los Angeles & Micro Deval | 33 |
| 3.10.1 | Los Angeles -koe..... | 33 |
| 3.10.2 | Micro Deval -koe | 33 |
| 3.10.3 | Testinäytteiden valmistus..... | 34 |
| 3.10.4 | Tulokset..... | 34 |
| 3.11 | Orgaaninen aines..... | 35 |
| 3.11.1 | Hehkutushäviö | 35 |
| 3.11.2 | Tulokset..... | 36 |
| 4 | JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA | 37 |
| | LÄHTEET..... | 39 |
| | LIITTEET | 41 |
| | Liite 1. Rakeisuuskäyrät | 41 |
| | Liite 2. Puristuslujuus - Koekappaleet | 43 |
| | Liite 3. Kolmiakksiaalikoheet | 44 |
| | Liite 4. Routanousukoe..... | 48 |

LYHENTEET

| | |
|------|--|
| EKP | Ekokem-Palvelu Oy |
| JV1 | Ekokemin Riihimäen ensimmäinen jätevoimala |
| JV2 | Ekokemin Riihimäen toinen jätevoimala |
| TAMK | Tampereen ammattikorkeakoulu |
| TTY | Tampereen teknillinen yliopisto |
| VTT | Valtion teknillinen tutkimuslaitos |

1 JOHDANTO

Riihimäelle valmistui vuonna 2007 yhdyskuntajätteen polttolaitos, jonka vuosittainen kapasiteetti on n. 150 000 tn poltettavaa jätettä. Ekokem Oy Ab sai toisen jätevoimalan valmiiksi vuonna 2012, minkä seurauksena yhdyskuntajätteen polton kapasiteetti kasvoi n. 125 000 tn. Molempien jätevoimaloiden polttoprosessit tapahtuvat arinatekniikalla. Jätevoimala-1 tuottaa vuodessa n. 25 000 tn jätteen poltosta syntyvää arinakuonaa ja jätevoimala-2 n. 20 000 tn.

Suomen lainsäädäntö säätelee jättemateriaalien ja teollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttöä, mikä vaikuttaa arinakuonan hyötykäyttöön. Kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrää pyritään vähentämään. Arinakuonan ominaisuuksia on tutkittu viime vuosina, varsinkin sen hyötykäyttökelpoisuutta maarakentamisessa. Arinakuona on todettu aikaisemmissa tutkimuksissa hyvinkin potentiaaliseksi vaihtoehdoksi korvaamaan luonnonkiviainesta, kuten soraa, materiaalina jakavassa ja kantavassa kerroksessa kenttärakenteissa. Kuonasta on jo tehty rakenteita asfaltoidulle kentälle Kuulojaan koerakenteiden lisäksi.

Vuonna 2012 käyttöön otetun jätevoimalan arinakuonan geoteknisiä ominaisuuksia ei ole vielä tutkittu. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena onkin toimia eräänlaisena varmuutena sille, että arinakuonan ominaisuudet ovat säilyneet edeltäjiään vastaavina. Laboratoriotutkimusten tuloksia hyödynnetään rakenteiden mitoituksessa.

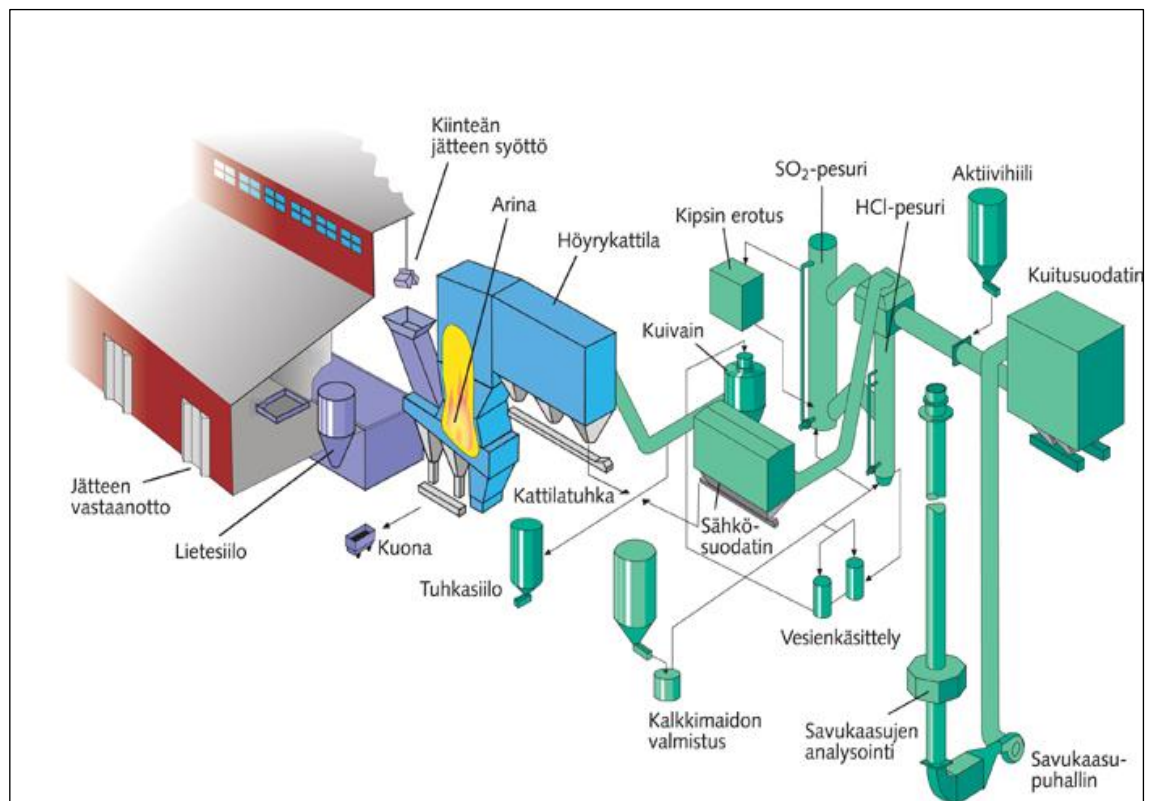
2 YHDYSKUNTAJÄTTEEN POLTON ARINAKUONA

2.1 Polttoprosessi

Arinakuona on yhdyskuntajätteen polttoprosessin sivutuote. Ekokemin jätteen polttovoimalat käyttävät polttoaineenaan Riihimäen, Hyvinkään ja Hämeenlinnan alueella syntyvää paikallisesti lajiteltua yhdyskuntajätettä. Jäte on peräisin pääosin kotitalouksista, teollisuuksista ja kaupoista. Arinatekniikka perustuu viisivyöhykkeiseen porrastamiseen. (Marttila 2009, 10.)

Voimalat tuottavat uuden voimalan myötä sähköä 115 gigawattituntia ja kaukolämpöä 500 gigawattituntia vuodessa. Jäteperäisen kaukolämmön osuus Hyvinkäällä on tällä hetkellä 70 % ja Riihimäellä 90 %. (Rakennuslehti 2012)

Riihimäen ensimmäisen jätevoimalan polttoprosessi alkaa jätteen vastaanottohallista, josta jätepolttoaine annostellaan arinakattilaan jätekahmarilla. Jätteitä sekoitetaan keskenään jatkuvasti, jotta laatu olisi tasaista ja polttoaineen palaminen olisi näin mahdollisimman puhdasta. Jätteestä jää jäljelle palamisen jälkeen noin 17 % arinakuonaa ja lentotuhkaa. Palamisreaktiosta syntyvä lämpö siirtyy kuumien savukaasujen kiertäessä höyrykattilaa paineelliseen vesihöyryyn, josta se jatkaa matkaansa energian tuotantoon. Vesihöyry kulkee turbiinin läpi pyörittäen generaattoria ja tuottaen näin sähköä. Tämän jälkeen höyryn lämpö ohjataan lämmönvaihtimien kautta kaukolämpöverkkoon. (Manninen 2008) Kuvassa 1 on esitetty Riihimäen ensimmäisen jätevoimalan prosessikaavio.



KUVA 1. Jätevoimalan prosessikaavio (Ekokem 2013)

Polttoprosessin tärkeä osa on jätevoimalan päästöjen ja savukaasujen hallinta, jotka ovat tiukasti säädeltyjä. Jäähtyneet savukaasut puhdistetaan monivaiheisella puhdistustekniikalla. Prosessin periaatteena on erottaa savukaasuista lentotuhka, pestä kloori- ja rikkiyhdisteet ja poistaa raskasmetallit (Manninen 2008).

2.2 Arinakuonan esikäsittelymenetelmät

Jätevoimalan polttoprosessista syntyvää arinakuonaa ei pystytä hyödyntämään maarakentamisessa heti, vaan sitä on ensiksi esikäsiteltävä sen metallipitoisuuksien ja suurten rae-fraktioiden vuoksi. Varsinaisia pääesikäsittelymenetelmiä on kolme eri tyyppiä: seulonta, metallienerottelu ja ikäännyttäminen, joista seulonta ja metallienerottelu tapahtuvat samassa työvaiheessa. (Lehtonen 2009, 6.)

Molempien jätevoimaloiden arinakuonat on seulottu Kuulojan käsittelykeskuksen alueella Metso Lokotrack ST 3.8 -seulalla. Ei-magneettiset metallit, kuten alumiini, erotellaan kuonasta seulonnan yhteydessä pyörrevirtaerottelulla (Marttila 2010, 39).

Arinakuonan ikäännyttämisellä tarkoitetaan periaatteessa kuonan läjittämistä. Ulkoilman sisältämä hiilidioksidi vaikuttaa kuonaan tietyn ajan, kunnes kuona on kemiallisesti stabiilissa tilassa. Menetelmällä kuonan raskasmetallien liukeneminen vähentyy ja sen pH-arvo neutralisoiuu. (Chandler, Eighmy, Hjelmar, Kosson, Sawell, Vehlow, van der Sloot, Hartlén 1997, 83.; Marttila 2010, 19.)

2.3 Arinakuonan ominaisuudet

Arinakuona on hyvin huokoistunut heterogeeninen sekoitus kuonaa, rauta- ja ei-rautapitoisia metalleja, keraameja, lasia ja palamattomia orgaanisia sekä epäorgaanisia aineksia. Kuonan kemiallinen koostumus tekee siitä ympäristölle haitallista. Arinakuona voi sisältää muun muassa hivenmetalleja, vesiliukoisia suoloja, klorideja, kadmiumia sekä lyijyä. (Wiles 1996, 329.)

Arinakuona on yleisesti väriltään harmaata, ja sillä on oma tyypillinen hajunsa. Haju ei ole voimakasta. Hienoainesta sisältävä kuona on sitä käsiteltäessä helposti pölisevää. Kuonan huokoistuneisuus vaikuttaa sen hienontumiseen rasituksen alla sekä sen kykyyn imeä vettä (Wiles 1996, 336.).

Arinakuonan rakeisuuskäyrä on jatkuva ja vastaa yleensä luonnon kiviaineksista hiekaista soraa (hkSr) (Arm 2003, 23.). Vastaavuus perustuu siihen, että kuonan lajitteista yli 50 % on soralajitteen alueella ja yli 30 % lajitteista on hiekkaisen lisänimen alueella (Jääskeläinen 2011, 25.).

2.4 Arinakuonan hyötykäyttö maarakentamisessa

Arinakuonan hyötykäyttöä ja sijoitusta ohjataan tiukasti lainsäädännöillä, jotka korostavat kestävästä kehityksestä ja jättemateriaalien järkevää hyötykäyttöä. Hyötykäyttöä koskevaa lainsäädäntöä ovat Jätelaki (1993/1072), Ympäristönsuojelulaki (2000/86), Valtioneuvoston asetukset ja päätökset, sekä uudistettu Jäteverolaki (2010/1126). Valtioneuvoston asetukset perustuvat Euroopan parlamentin ja neuvoston antamiin direktiiveihin. Valtioneuvoston asetus jätteen poltosta ohjaa vähentämään ja hyödyntämään polttolaitoksen toiminnasta syntyvää jätettä (VNa 2003/362).

Jäteverolain 1 § mukaan kaatopaikalle sijoitetusta jätteestä on maksettava veroa valtiolle. Vuoden 2013 alusta kyseisen jäteveron suuruus on 50 € tonnilta jätettä. Jäteverolaki ja sen 6 § siis kannustavat taloudellisesti arinakuonan hyötykäyttöä maarakentamisessa: ”Veroa ei ole suoritettava kaatopaikalle muista jätteistä eroteltuna toimitettavasta jätteestä, joka hyödynnetään kaatopaikalla sen perustamiseen, käytön tai käytöstä poistamisen kannalta välttämättömissä rakenteissa tai rakennuksissa.” (Jäteverolaki 2010/1126)

Arinakuonan hyötykäyttöä maarakentamisessa varten täytyy hakea Aluehallintoviraston myöntämä ympäristölupa Valtioneuvoston asetuksen 591/2006 mukaisesti. Arinakuona ei kuulu toistaiseksi ns. ilmoitusmenettelyn piiriin, jossa luvan sijasta asia hoidetaan ilmoituksella. Menettely edellyttää asetuksen mukaisia vaatimuksia hyötykäyttökohteelta ja ilmoituksen tietojen syöttämistä ympäristönsuojelun tietojärjestelmään. (Lehtonen 2009, 13.) Hyötykäyttämällä jätteen polttolaitoksen läheisyydessä voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä verotuksen kannalta.

Lupamenettelyn keston vuoksi taloudellisesti järkevä sijoituskohde arinakuonalle olisi isomman mittakaavan kaatopaikkarakenteet. Jo olemassa olevilla rakenteilla arinakuonalla on pystytty säästämään luonnon kiviaineksia, kuten soraa ja mursketta. Arinakuonan tutkittujen geoteknisten ominaisuuksien kannalta paras sijoituskohde olisi toistaiseksi jakava tai kantava kerros kenttärakenteissa. (Lehtonen 2009, 15.)

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

3.1 Näytteiden valmistelu

Laboratoriokokeita varten tarvittiin yhteensä yli neljä 200 litran tynnyrillistä arinakuonaa. Kuonat haettiin Kuulojan käsittelykeskukselta, jossa oli käynnissä kuonien seulon-
tavaihe. Seulonnan ja metallien erottelun jälkeen kuonanäytteet lapiotiin tynnyreihin ja
ne kuljetettiin Ekokem-Palvelun omaan maalaboratorioon. Kuonat olivat siis vielä tässä
vaiheessa sekoittamattomia. Kaksi ensimmäistä tynnyriä sisälsivät raekooltaan # 0-5
mm kokoista kuonaa ja kaksi jälkimmäistä sisälsivät raekooltaan # 5-35 mm kokoista
kuonaa. Tynnyrit ja sekoituslaatikot on esitetty kuvassa 2.



KUVA 2. Arinakuonanäytteiden säilytystynnyrit ja sekoituslaatikot

Kaikkien tynnyreiden lajikkeille tehtiin pesuseulonta ja vesipitoisuuden määrittäminen. Molempien jätevoimaloiden kuonat sekoitettiin erikseen omissa laatikoissaan oikeissa seossuhteissa. Kuoniin sekoitettava tuhka säilytettiin erillään kuonista ja sekoitettiin vasta myöhemmin. Osa näytteistä esivalmisteltiin laboratoriotuotteiksi VTT:n ja TTY:n suoritettavaksi.

3.2 Rakeisuudet

3.2.1 Pesuseulonta

Molempien jätevoimaloiden arinakuonille tehtiin standardin SFS-EN 933-1 -mukainen pesuseulonta niiden rakeisuuden määrittämiseksi. Tutkimuksiin valitulle tuhkalta tehtiin hienopesuseulonta. Ensimmäisenä pesuseulottiin raekooltaan # 0-5 mm kokoiset kuonat ja tämän jälkeen suuremmat, # 5-35 mm kokoiset kuonat. Viimeisenä tehtiin kuonista seossuhteilla yhdistetyille # 0-35 mm sekoituksille pesuseulonnat. Seulonnoissa käytettiin kuvassa 3 näkyvää seulasarjaa.

Pesuseulonnassa ideana on pestä tutkittavasta materiaalista 0,074 mm seulan läpi ensin hienoimmat rakeet pois. Tämän jälkeen karkeampi loppumateriaali kuivaseulotaan ja lopuksi lasketaan koko materiaalin rakeisuuskäyrä huomioiden poispesty hienoaines. (Jääskeläinen 2011, 29.)



KUVA 3. Standardin SFS-EN 933-2 mukainen seulasarja

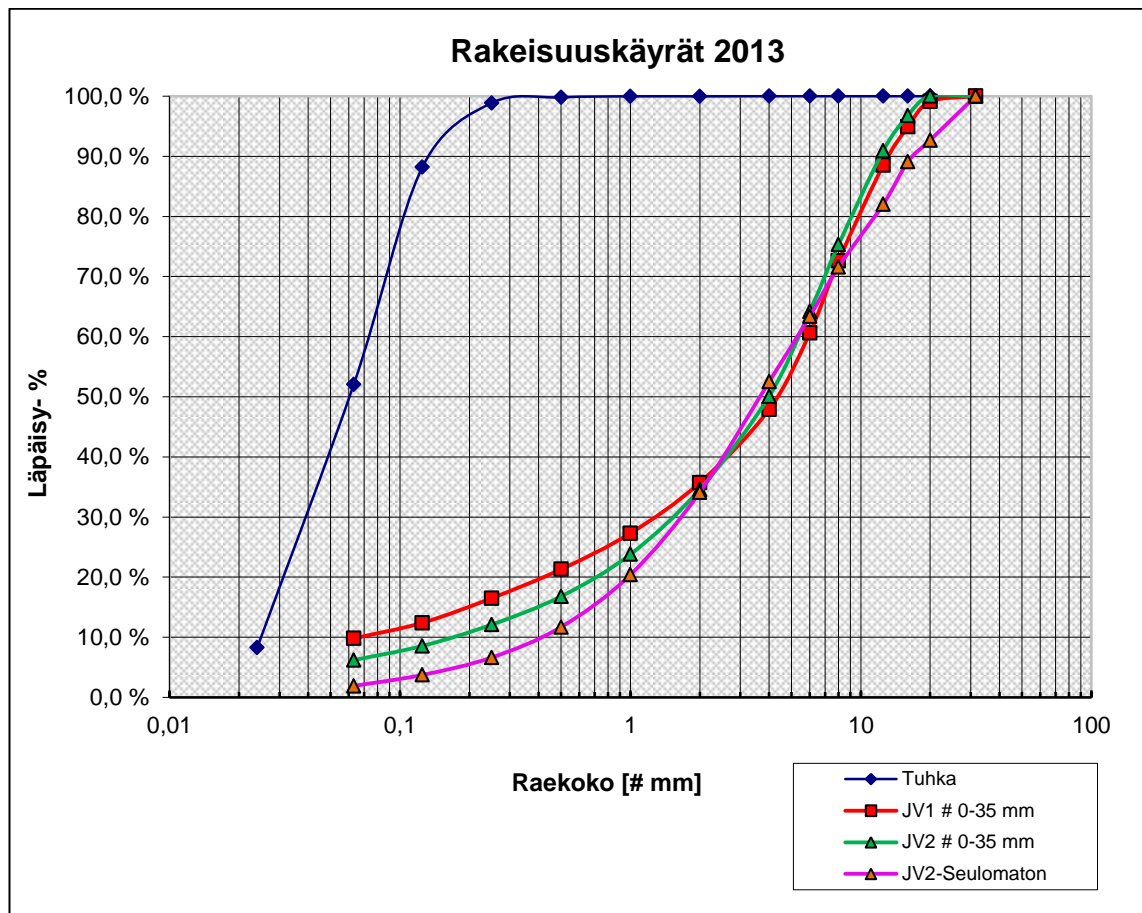
3.2.2 Seossuhteet

Kuonien esikäsittelymenetelmistä johtuen kuonat olivat jakautuneet raekooltaan kahteen eri lajikkeeseen, jotka myöhemmin yhdistettiin tietyllä suhteella # 0-35 mm rakeisuuteen.

Seossuhteiden yhdistäminen pyrittiin sovittamaan aikaisempia kuonien rakeisuuskäyriä ja tavoiterakeisuuskäyrää mahdollisimman hyvin mukaileviksi. JV1 -kuonalla seossuhde koostui 48 % # 0-5 mm rakeista ja loput 52 % # 5-35 mm rakeista. JV2 -kuonalla kyseinen suhde oli 54 % ja 46 %.

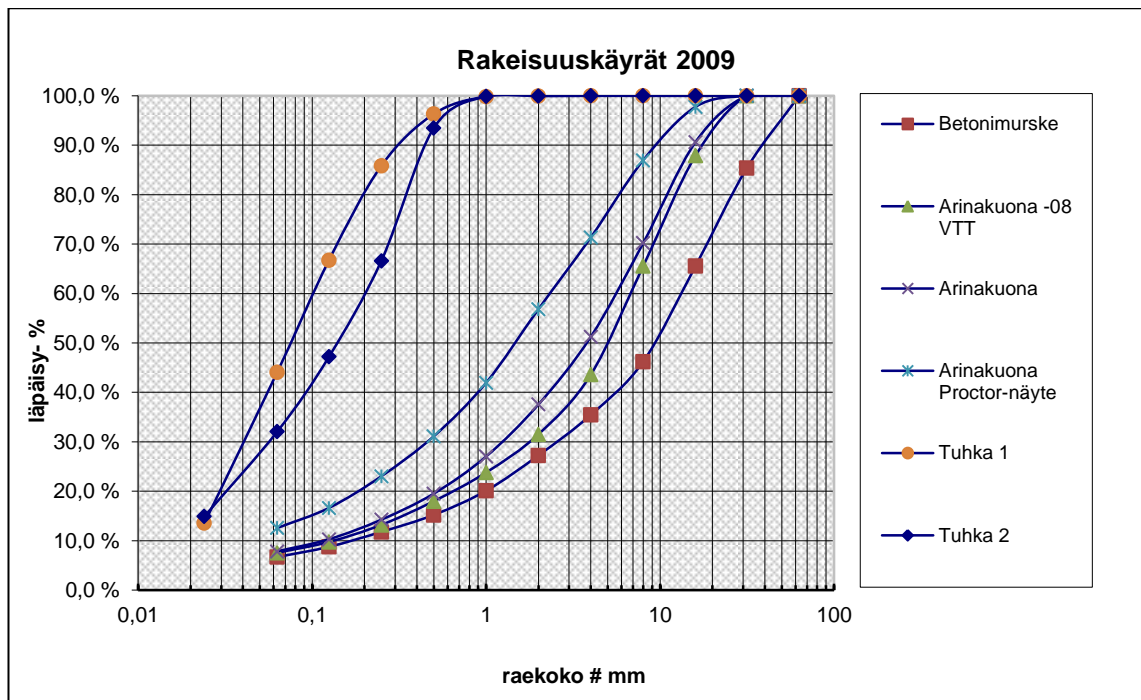
3.2.3 Rakeisuuskäyrät

Jääskeläisen (2011) mukaan maa-aines on suhteistunutta, kun raekokosuhdeluku C_u ylittää arvon 15. Kuonien rakeisuuskäyriä tutkittaessa, kuva 4, voidaan todeta, että arinakuonat ovat suhteistuneita. Esimerkiksi JV2-kuonalla kyseinen raekokosuhte $C_u = C_{60} / C_{10}$ on rakeisuuskäyrän mukaan 30.



KUVA 4. Arinakuonien ja tuhkan rakeisuuskäyrät

Verrattaessa kuonien rakeisuuskäyriä vuonna 2009 seulottuihin kuonien rakeisuuskäyriin, voidaan havaita niiden olevan melko samankaltaiset. Arinakuonien keskiläpimittaa C_{50} vastaavat raekoot ovat JV1-kuonalla tasan 4 mm ja JV2-kuonalla 4,2 mm. Vuoden 2009 JV1-kuonalla kyseistä keskiläpimittaa vastaava raekoko on 3,8 mm. Vuoden 2009 rakeisuudet ovat esitetty kuvassa 5.



KUVA 5. Kuonien ja tuhkien rakeisuudet vuonna 2009 (Lehtonen 2009)

3.3 Parannettu Proctor -koe

3.3.1 Kokeen suoritus

Kaikille tutkittaville jätteen polton kuonille ja niiden tuhkasekoituksille tehtiin standardin ASTM D 698-07 mukaisesti parannettu Proctor -koe. Kokeessa ideana on tiivistää tutkittava materiaali mahdollisimman tiiviiksi kappaleeksi tietyllä kosteuspitoisuudella ja vakio työmäärällä (Jääskeläinen 2011, 54.). Näin menetelmällä saatiin selville tutkittavien materiaalien optimivesipitoisuudet ja maksimikuivatilavuuspainot, jotka ovat hyvin oleellisia muita tässä opinnäytetyössä käytettyjä tutkimusmenetelmiä ajatellen.

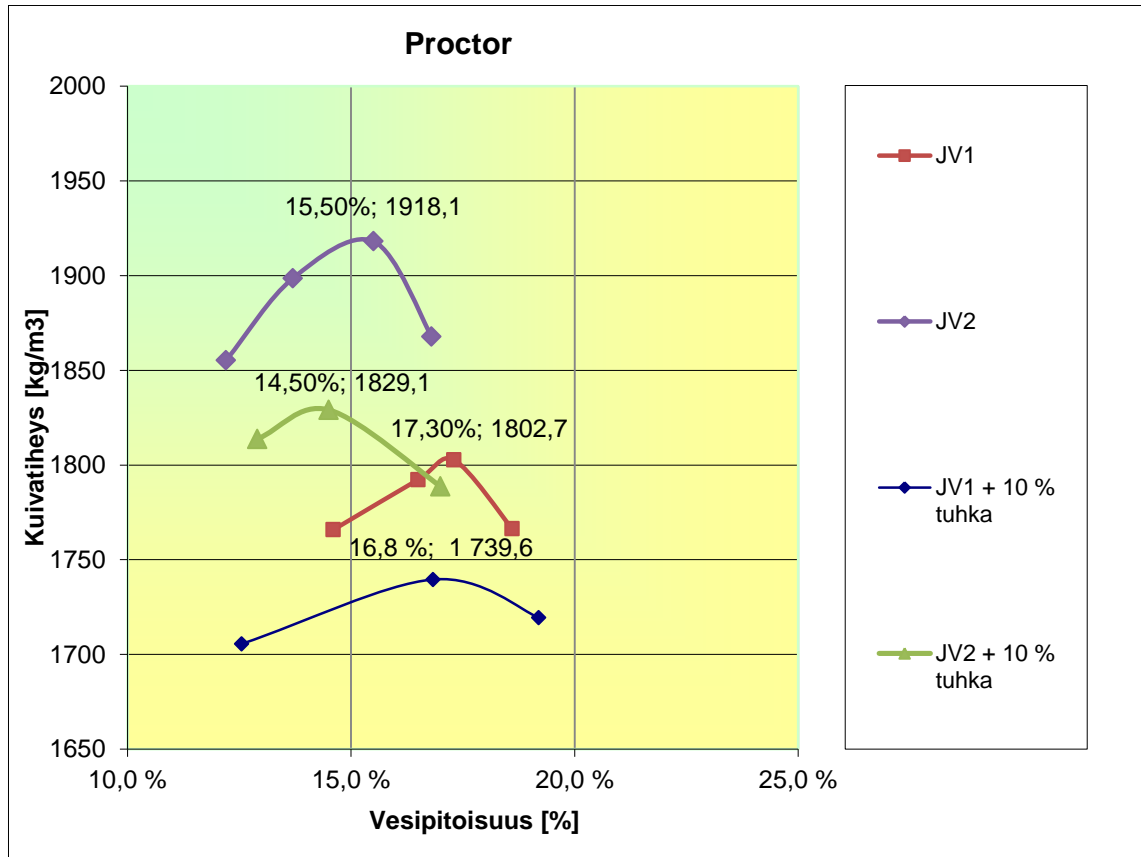
Koe tehtiin EKP:n maalaboratoriossa neljälle tutkittavalle arinakuonanäytteelle käyttämällä automaattista Proctor-sulloinlaitetta. Koenäytteet sullottiin halkaisijaltaan 152,4 mm -leveään ja 116 mm -korkeaan sullontamuottiin, kokeilemalla eri vesipitoisuuksia. Automaattinen sulloinlaite pudotti tasaisesti 4500 g vasaraa 25 kertaa jokaiselle näytteen viidelle tiivistyskerrokselle. Koetta suoritettaessa tutkittava näyte tulee hienonemaan jonkin verran, kuten nähdään edellisestä kappaleesta 3.2.3 kuvasta 5 (Lehtonen 2009, 67.).



KUVA 6. Työssä käytetty automaattinen Proctor-sulloin

3.3.2 Tulokset

Maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet saatiin määritettyä kuvaajasta, jossa pystyakselilla on kuivatilavuuspaino ja vaaka-akselilla kosteuspitoisuus prosentteina. Kuvaajalle muodostuu koekappaleista käyrä, jonka lakipiste kertoo maksimikuivatilavuuspainon tietyssä vesipitoisuudessa. (Jääskeläinen 2011, 55.) Proctor-kokeen tulokset ovat esitetty kuvassa 7 ja niistä saadut maksimikuivatilavuuspainot, sekä optimivesipitoisuudet taulukossa 1.



KUVA 7. Proctor -kokeen tulokset

TAULUKKO 1.

| PROCTOR 2013 | JV1 | JV1+TUHKA | JV2 | JV2+TUHKA |
|---|--------|-----------|--------|-----------|
| Optimivesipitoisuudet [%] | 17,3 | 16,8 | 15,5 | 14,5 |
| Maksimikuivatiheys [kg/m ³] | 1802,7 | 1739,6 | 1918,1 | 1829,1 |

Molempien voimaloiden arinakuonien maksimikuivatilavuuspainot vastaavat melko hyvin vanhoja tutkittuja arvoja. JV2-kuonilla havaitaan kuitenkin suurimmat maksimikuivatilavuuspainot. Tuhka sekoituksilla maksimikuivatilavuuspaino alenee JV1-kuonalla, mutta JV2-kuonalla se nousee hieman verrattuna pelkkään kuonaan. Kyseistä ilmiötä on vaikeahko selittää. Vesipitoisuuksissa ei ole kuin parin prosentti-yksikön heittoa, mikä on tyypillistä myös arinakuonien vanhoille tuloksille. Näytteiden tuhka-sekoituksilla optimivesipitoisuus on hieman alhaisempi kuin pelkillä kuonilla. Samoin myös JV2-näytteillä optimivesipitoisuus on JV1-näytteitä hieman alhaisempi.

Vuonna 2001 Espanjassa Maria Izquierdo ja muut tutkijaryhmän jäsenet määrittivät, että pohjatuhkan Proctor-kokeen maksimikuivatilavuuspainot voivat vaihdella välillä

1520-1580 kg/m³ ja optimivesipitoisuudet välillä 13,9 – 18 % (Izquierdo, M., Vazquez E., Barra, M., Querol, X., López, Á., Plana, F. 2001). Näihin arvoihin verrattuna Ekokemin arinakuonien optimivesipitoisuudet ovat tyypillisiä jätteen polton kuonille. Arinakuonien vanhat Proctor-kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2.

| VANHAT PROCTOR-TULOKSET | Maksimikuivatilavuuspaino [kg/m ³] | Optimivesipitoisuus [%] |
|---------------------------------|--|-------------------------|
| JV1 2009 # 0-32 mm | 1880 | 12,6 |
| JV1 2008 # 0-35 mm | 1882 | 15,1 |
| JV1 2008 # 0-16 mm | 1973 | 16,7 |
| JV1+TUHKA 2009 # 0-32 mm | 1877 | 12,7 |
| JV1+BETONIMURSKE 2009 # 0-32 mm | 1893 | 12,8 |

3.4 Puristuslujuuden määrittäminen

3.4.1 Koekappaleiden valmistus ja kokeen suoritus

Arinakuonien tuhcaseoksien puristuslujuuden määrittämistä varten tiivistettiin ICT-kiertotiivistyslaitteella kolmet rinnakkaiskoekappaleet jokaisesta tutkittavasta materiaalista. Tutkittavien materiaalien tuhkapitoisuudeksi valittiin 10 %. # 0-16 mm kokoiset koekappaleet tiivistettiin halkaisijaltaan 100 mm muottiin optimivesipitoisuuksissa. Tiivistyö tehtiin samoilla työmäärillä, kuin Lehtosen määrittämässä kokeissa (2009), jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Tiivistystyömäärä oli 20 kierrosta, paineen ollessa 300 bar, 29,7 kierroksella minuuttia kohden ja 40 mrad kallistuskulmalla. Tarkemmat tiedot koekappaleiden valmistuksesta on esitetty liitteessä 2.

Puristuslujuudet määriteltiin koekappaleille 7, 28 ja 91 vuorokauden iässä. Aikataulusta johtuen, 91 vuorokauden ikäisten kappaleiden puristus ei ehtinyt tähän opinnäytetyöhön. Koekappaleita säilytettiin kosteuskaapissa, jossa oli yli 95 % suhteellinen kosteus.

Puristuslujuuskoe tehtiin standardia SFS-EN 13286-41 mukailleen. Standardista poikettiin muutamissa kohdissa ja puristus suoritettiin samalla tavalla kuin edellisvuosina. Laite kuormittaa koekappaletta kasvavalla voimalla ja tietyllä nopeudella, kunnes kappale murtuu. Standardista poiketen koekappaleet valmistettiin ICT-kiertotiivistyslaitteella, kappaleiden päitä ei rikitetty tasaisiksi, sekä puristus tehtiin vakiosiiirtymänopeudella n. 1 % kappaleen korkeudesta minuutissa.



KUVA 8. Puristuslujuuden määrittämiseen käytetty laitteisto

3.4.2 Tulokset

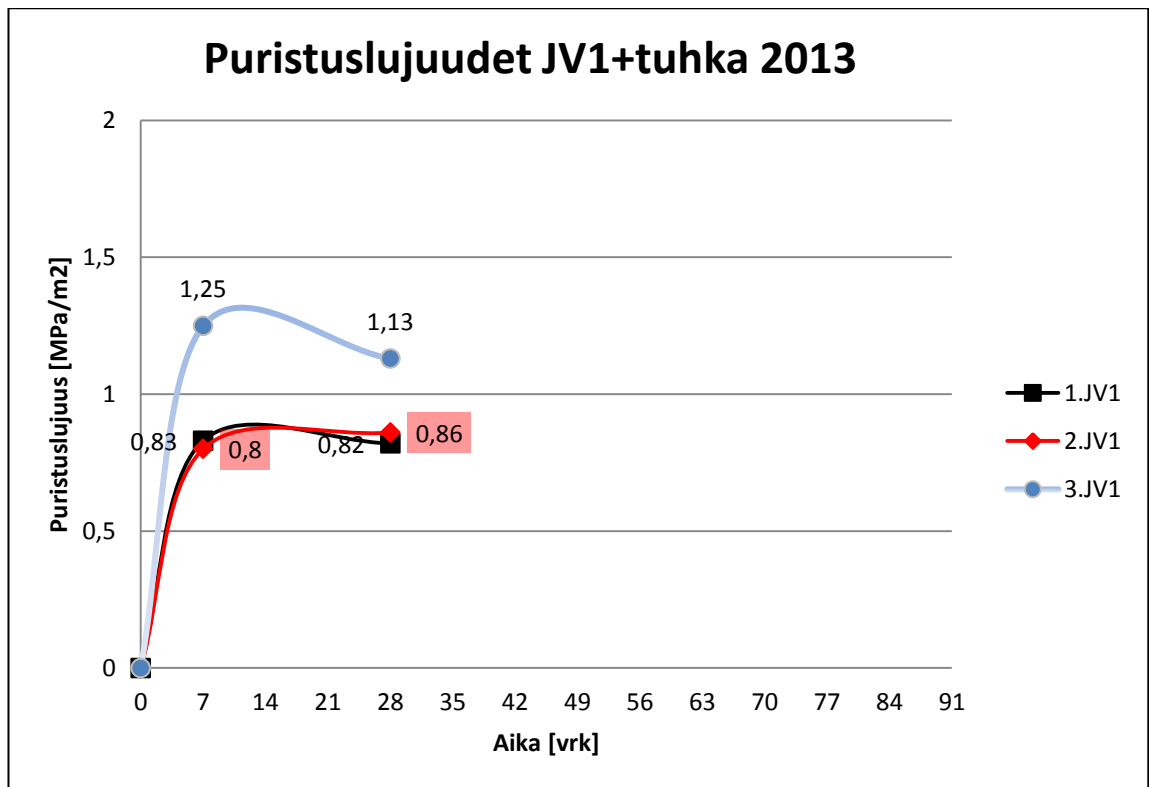
Markus Lehtosen suorittamissa arinakuonien puristuslujuuksien määrittämissä (2009) laskettiin puristuslujuuksien lisäksi koemateriaaleille myös kappaleiden 50 % jännitystä vastaavat muodonmuutosmoduulit E_{50} -moduulit ja elastisuusmoduulit. Puristuslujuuksien määrittämisestä saadut tulokset ovat esitetty taulukossa 3.

TAULUKKO 3.

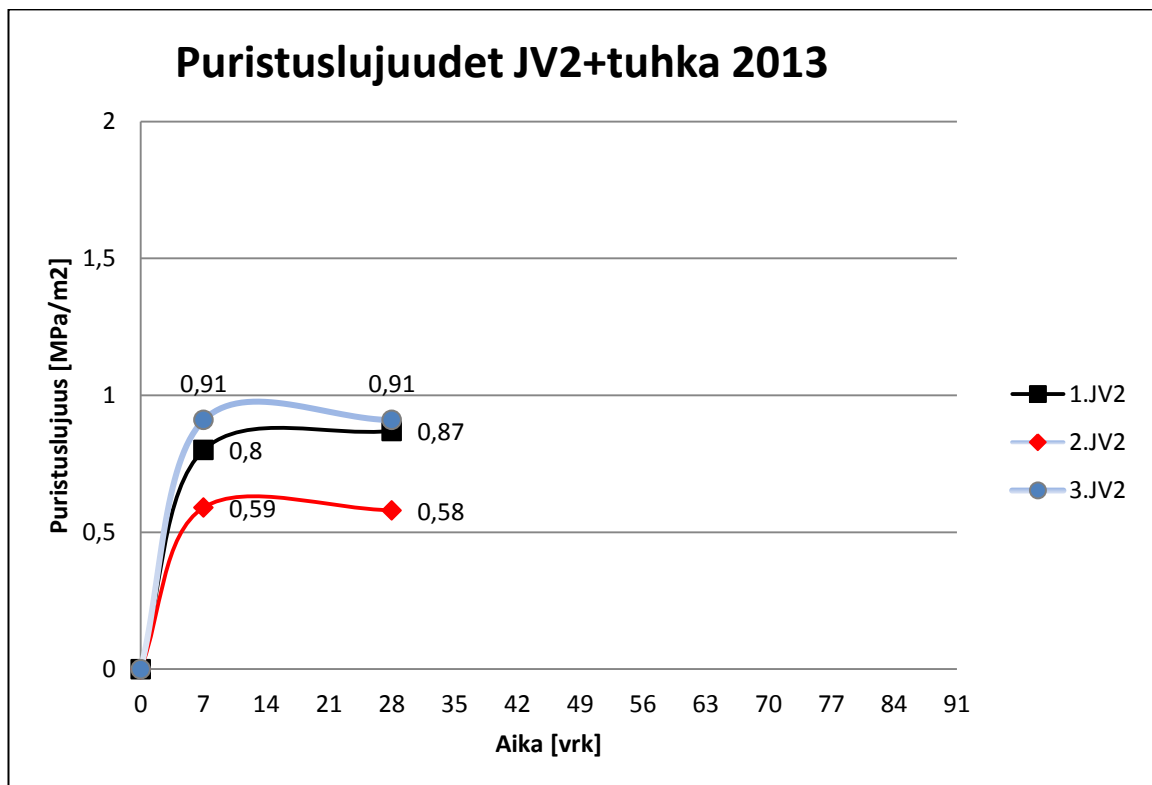
10 % TUHKASEOS

| Pvm. | Kappale | Kuonanäyte | Paino [kg] | Puristuslujuus [MPa] | Kuormitukseen käytetty max voima [kN] | Puristus painuma [mm] |
|-----------|------------|--------------------|------------|----------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| 28.2.2013 | 3976/24/4 | JV2 # 0-16, 7 vrk | 1546,8 | 0,8 | 6,291 | 3,07 |
| | 3976/24/7 | JV2 # 0-16, 7 vrk | 1538,9 | 0,59 | 4,627 | 2,59 |
| | 3976/24/10 | JV2 # 0-16, 7 vrk | 1542,6 | 0,91 | 9,136 | 3,49 |
| 1.3.2013 | 3976/24/17 | JV1 # 0-16, 7 vrk | 1547,2 | 0,83 | 6,49 | 3,63 |
| | 3976/24/20 | JV1 # 0-16, 7 vrk | 1547 | 0,8 | 6,291 | 3,5 |
| | 3976/24/23 | JV1 # 0-16, 7 vrk | 1545,8 | 1,25 | 9,837 | 3,44 |
| 21.3.2013 | 3976/24/5 | JV2 # 0-16, 28 vrk | 1533,3 | 0,87 | 6,848 | 3,15 |
| | 3976/24/8 | JV2 # 0-16, 28 vrk | 1530,1 | 0,58 | 4,589 | 3,48 |
| | 3976/24/11 | JV2 # 0-16, 28 vrk | 1530,6 | 0,91 | 7,162 | 3,04 |
| 21.3.2013 | 3976/24/18 | JV1 # 0-16, 28 vrk | 1535 | 0,82 | 6,458 | 4,14 |
| | 3976/24/21 | JV1 # 0-16, 28 vrk | 1541,1 | 0,86 | 6,733 | 4 |
| | 3976/24/24 | JV1 # 0-16, 28 vrk | 1538,5 | 1,13 | 8,864 | 4,82 |

Tuloksia analysoidessa, voidaan suurimman lujittumisen todeta tapahtuvan ensimmäisen lujittumisviikon aikana. Aikaisempien vuosien kokeissa on myös todettu sama kyseinen lujittumisilmiö. Kolmesta rinnakkaiskappaleesta löytyy vähän hajontaa. Yksi käyrä eroaa muista kahdesta käyrästä molempien kuonien tapauksissa. Tuloksista piirretyt puristuslujuuksien kehittymiskäyrät on esitetty kuvissa 9 ja 10.



KUVA 9. JV1-tuhkaseoksen puristuslujuudet



KUVA 10. JV2-tuhkaseoksen puristuslujuudet

Aikaisempiin tutkimuksiin vedoten voidaan olettaa, että 91 vuorokauden jälkeisissä puristuslujuuskokeissa ei esiinny merkittävää lujuudenkehittymistä.

3.5 Kolmiaksaalikokeet

3.5.1 Koekappaleiden valmistus

Kolmiaksaalikokeita varten TTY:lle toimitettiin kutakin # 0-32 mm rakeista näytemateriaalia n. 30 kg. Staattiset kolmiaksaalikokeet tehtiin samoille koekappaleille kuin dynaamisessa kokeessa heti dynaamisen kokeen jälkeen. Koekappaleet valmistettiin TTY:n maalaboratoriossa niiden optimivesipitoisuuksia ja 86-87 % tiiveysastetta tavoitellen. Arinakuonien 10 % -tuhkaseokset sekoitettiin vasta kokeiden suorituspaikalla ja niiden annettiin lujittua 7 vuorokautta ennen kokeiden suorittamista, koska aikaisemmin tehdyissä kokeissa kuonalle on todettu viikon lujittumisaika.

3.5.2 Dynaaminen kolmiaksaalikoe

Dynaamisia kolmiaksaalikokeita käytetään tutkittavan aineksen jäännösmoduulin ja palautumattomien muodonmuutoksien tutkimiseen. Kokeista saadaan myös selville aineksen leikkauslujuus, sekä kitkakulma Mohrin menetelmällä. (Ehrola 1996, 193.; Jääskeläinen 2011, 111; Youtube 2010) TTY:n (2013) mukaan resilient-moduulien määrittäminen toteutettiin standardin SFS-EN 13286-7 mukaisella tavalla B, eli käyttämällä määrittämisessä alhaisten jännitystasojen kuormitussarjoja.

Dynaamisessa kolmiaksaalikokeessa koekappaleita kuormitetaan sykleittäin pääjännityssuuntaisesti, sekä sellipaineen avulla. Laitteiston koko määräytyy tutkittavan kappaleen raekoon mukaan ja on siten perinteistä kolmiaksaalikoeita suurempi. Siirtymäanturit mittaavat syklisen kuormituksen aiheuttamia muodonmuutoksia. Syklisen kuormituksen ideana on kohdistaa näytteeseen mahdollisimman hyvin liikenteestä aiheutuvaa kuormitusta vastaava kuormitus. (Ehrola 1996)

3.5.3 Staattinen kolmiaksaalikoe

Dynaamisen, eli syklisen, kolmiaksaalikokeen jälkeen samoille näytteille tehtiin moniportainen staattinen avoin kolmiaksaalikoe, jossa käytettiin 20, 40, 70 ja 130 kPa sellipaineita. Kuormitus lopetettiin koekappaleiden lähestyessä murtumista. (Kolisoja 1993, 54.; TTY 2013, 2.)

3.5.4 Tulokset

Kolmiaksaalikokeiden tarkemmat tulokset ovat esitettynä liitteessä 3 ja koekappaleiden ominaisuudet taulukossa 4.

Pelkkien arinakuonien resilient-moduulit ovat hyvin samankaltaiset keskenään. Resilient-moduulit määritettiin pääjännitysten summan ollessa 200 kPa. Arvot ovat suhteellisen lähellä Lehtosen (2009) määrittämiä arvoja. Vuoden 2009 arinakuonien resilient-moduulien arvot vaihtelivat välillä 113-185 MPa.

Tuhkalla on tulosten perusteella huomattava materiaalien jäykkyyttä parantava vaikutus. Tuhkaseoksilla voidaan kuitenkin havaita myös eroavaisuuksia keskenään. JV1-kuonan tuhkaseoksella on huomattavasti korkeampi resilient-moduuli kuin JV2-kuonan tuhkaseoksella. Tuhkaseosten tulokset ovat jonkin verran vuoden 2009 tuloksia suurempia. Edellisvuosien tuhkaseoksilla saavutettiin resilient-moduuleiksi 660-800 MPa.

Staattisesta kolmiaksaalikokeesta määritettiin JV1-kuonan kitkakulmaksi 35,0° koheesion ollessa 61 kPa ja JV2-kuonan kitkakulmaksi 39,6° koheesion ollessa 85 kPa. Näitä arvoja verrattaessa Lehtosen (2009) määrittämiin arvoihin, voidaan todeta vuoden 2013 arvojen heikentyneen hieman edellisvuosista. Vastaavasti kuonien tuhkaseosten arvot ovat heikentyneet hieman. Kitkakulmat ja tehokkaat koheesiot ovat kuitenkin pääpiirteittäin melko samaa suuruusluokkaa kuin edellisvuosien tuloksetkin.

TAULUKKO 4.

| Kolmiakselialikokeet: | JV1 # 0-35 mm | JV1+TUHKA # 0-35 mm | JV2 # 0-35 mm | JV2+TUHKA # 0-35 mm |
|--|------------------|------------------------|------------------|------------------------|
| Kuivairtotehiys [kg/m ³] | 1570 | 1530 | 1700 | 1600 |
| Vesipitoisuus, KA [%] | 19,1 | 15,6 | 15,1 | 12,9 |
| Materiaaliparametri moduuliluku k1 | 1068 | 13605 | 1082 | 7748 |
| Materiaaliparametri jännitysekspONENTTI k2 | 0,753 | 0,107 | 0,732 | 0,305 |
| Resilient-moduuli [MPa] | 180 | 1465 | 180 | 957 |

3.6 Kapillaarisuus

3.6.1 Yleistä

Veden kapillaarisella nousulla tarkoitetaan maa-aineksen huokoskäytävissä tapahtuvaa veden etenemistä ylöspäin. Adheesiovoimat saavat vesimolekyylit nousemaan niin ylös, että syntyy tasapainotila ylösnousseen vesipatsaan painon ja kapillaarivoiman välillä. Ilmiötä mitataan korkeuserona pysyvän veden pinnasta kapillaarisesti nousseen veden pintaan. Kapillaarisuus on voimakkaampaa, mitä hieno rakeisemmasta maa-aineksestä on kyse. (Jääskeläinen 2011, 38.)

Kapillaarisuudella on suora yhteys materiaalin routivuuteen. Jos materiaalin kapillaarinen vedennousukorkeus ylittää yhden metrin, todetaan materiaali routivaksi. (Jääskeläinen 2011, 40.) Routimisesta kerrotaan opinnäytetyön kappaleessa 3.7.

Arinakuonien kapillaarisuuksia on tutkittu aiemmin Sahi -kapillaarimetrillä ja niin sanotulla suoralla menetelmällä. Suoralla menetelmällä on tutkittu aikaisemmin vuonna 2009 arinakuonan tuhaseoksia. Tässä opinnäytetyössä jätettiin tuhaseosten kapillaarinen tutkiminen huomioimatta rajallisen näyttemäärän ja ajan vuoksi.

3.6.2 Kapillaarimetri

Sahi -kapillaarimetri on kehitetty Tampereen teknillisen yliopiston laboratoriossa, eikä sille ole olemassa standardia. Periaatteena on, että kyllästettyyn näytteeseen imetään alipaine niin suureksi, jottei siinä oleva vesi pysty enää vastustamaan ilman kulkeutumista näytteen läpi. Tästä saadaan näytteen ylä- ja alapintojen välinen paine-ero, joka muutetaan vesipaineen kautta vastaamaan kapillaarista nousukorkeutta. (Jääskeläinen 2011, 39.; Lehtonen 2009, 70.)

Kapillaarimetrikoetta varten lähetettiin TTY:lle maalaboratorioon raekooltaan # 0-8 mm kokoista JV1- ja JV2-arinakuonaa n. 5 kg. Menetelmässä testattiin kolmea rinnakkaisnäytettä kuonaa kohden (TTY 2013).

3.6.3 Suora menetelmä

Suorassa menetelmässä pyrittiin noudattamaan veden imeytymiskorkeuden määrittämisstandardia SFS-EN 1097-10. Koenäytteen raekooksi valittiin # 0-20 mm ja sitä vastaava standardin mukainen putken halkaisija oli yli 17 cm. Näytteet kuivattiin 105 °C asteisessa uunissa yli vuorokauden kuiviksi. Koetta varten aseteltiin sisäpinta-alaltaan yli 0,65 m² kokoiseen astiaan murskettua ja läpinäkyvää putki. Putki täytettiin kuivalla näytteellä vapaasti pudottamalla ja lopuksi astiaan lisättiin vettä. Vesi pääsi tällöin vapaasti imeytymään putken alapäästä näytteeseen. Veden kapillaarista nousua seurattiin viikon ajan.



KUVA 11. Kapillaarisen veden imeytymiskorkeuden mittaus suoralla menetelmällä

3.6.4 Tulokset

Kapillaarisuus kokeiden tulokset olivat hieman ristiriidassa keskenään. Suoralla menetelmällä materiaaleja tutkittaessa JV2-kuonalla oli suurempi kapillaarinen nousukorkeus kuin JV1-kuonalla. Kapillaarimetrin tulokset näyttävät osaltaan JV1-kuonalle suurempaa nousukorkeutta.

Molempien kuonien kapillaarimetrin tulokset ovat suoraa menetelmää suuremmat. Syy tähän saattaa johtua tutkittavan materiaalin raekoosta. Pienempirakeinen näyte antaa suuremman kapillaarisen nousukorkeuden kuin suurempi rakeinen kapillaarisuuden määrittelyn mukaisesti. TTY:n (2013) mukaan kapillaarimetrikokeessa koekertojen lisääntyessä materiaalista vaikutti irtoavan hienoainesta huokospaperin pintaan, mikä

muodosti mahdollisesti vettä pidättävämmän kerroksen näytteen alaosaan. Kapillaarimetrien tulokset ovat esitettyinä taulukossa 5 ja suoran menetelmän taulukossa 6.

TAULUKKO 5.

| Kapillaarimetri 2013 | Kapillaarinen nousukorkeus [cm] |
|----------------------|---------------------------------|
| JV1 # 0-8 mm | 55,0 |
| JV2 # 0-8 mm | 37,0 |

TAULUKKO 6.

| Suora menetelmä 2013 | Kapillaarinen nousukorkeus [cm] |
|----------------------|---------------------------------|
| JV1 # 0-20 mm | 12,3 |
| JV2 # 0-20 mm | 19,8 |

Tuloksia verrattaessa Markus Lehtosen tekemiin kapillaarisuuskokeisiin, taulukko 7, voidaan todeta, että kuonien raekoolla on merkitystä veden kapillaariseen nousukorkeuteen arinakuonassa. Maksimiraekoon pienentyessä kapillaarinen nousukorkeus näyttäisi kasvavan. Kuitenkin molemmat arinakuonien tulokset alittavat yhden metrin nousukorkeuden ja viittaavat siten arinakuonan routimattomuuteen.

Luonnon kiviaineksista löyhällä keskikarkealla hiekalla saavutetaan 10-35 cm korkuinen kapillaarinen nousukorkeus (Jääskeläinen 2011, 39.).

TAULUKKO 7. (Lehtonen 2009)

| Kapillaarisuus 2009 | Kapillaarinen nousukorkeus [cm] |
|------------------------------|---------------------------------|
| JV1 # 0-8 mm TTY (SAHI) | 25,0 |
| JV1 # 0-8 mm VTT 2008 (SAHI) | 100,0-106,0 |
| JV1 # 0-32 mm | 6,0 |
| JV1 + Bet.murske # 0-32 mm | 7,1 |
| JV1 + Tuhka # 0-32 mm | 5,3 |
| JV1 + Tuhka # 0-32 mm | 7,2 |

3.7 Routanousukoe

3.7.1 Routa lyhyesti

Routimisella tarkoitetaan eräänlaista maa-aineksen jääymistä, minkä yhteydessä tapahtuu maa-aineksen tilavuuden kasvua. Tämä on mahdollista, kun maa-aines sisältää kosteutta, eli vettä. Maa-aineksen tilavuuden kasvu aiheuttaa maarakenteissa rakenteen pinnan kohoamista, eli routanousua. Syy tähän löytyy alapuolisten maakerroksien veden ja pohjaveden kapillaarisesta nousemisesta maa-ainekseen, mikä johtaa routimisprosessin myötä näihin ilmiöihin. Tämä maa-ainekseen imeytynyt vesi voi muodostaa routivaan maahan jäälnssejä, aiheuttaen tilavuuden kasvun myötä routanousua. Ilmiö on esimerkiksi tierakenteiden kannalta hyvin kiusallinen, myös roudan sulaessa. (Ehrola 1996, 96.)

3.7.2 Menetelmä ja koekappaleiden valmistus

Routanousukoe päädyttiin toteuttamaan TTY:n routanousukoelaitteistolla, niin kuin edellisissä tutkimuksissa vuonna 2009, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertauskelpoisia keskenään.

Ennen kokeita seulottiin raekooltaan # 0-16 mm rakeita sisältäviä näytteitä 6 kg jokaista koekappaletta kohden. Näistä näytteistä tiivistettiin optimivesipitoisuuksissa ICT-kiertotiivistyslaitteella koekappaleet viidestä renkaasta koostuvaan muottiin niiden tiettyihin tilavuuspainoihin. Tuhkaseosten koekappaleet tehtiin 7 vuorokautta ennen kokeiden aloitusta.

Routanousukokeen alussa koekappale asetetaan vuorokaudeksi vedenpinnan alapuolelle, jossa vallitsee + 1 °C asteen lämpötila. Tämän jälkeen vedenpintaa lasketaan niin, että koekappaleesta on enää noin 10 mm veden pinnan alapuolella. Vedenpinnan laskun jälkeen koekappale lämpöeristetään. Koekappaleen jäähdytysvaiheessa jäähdytyshatun lämpötila ohjataan - 3 °C asteen lämpötilaan ja koekappaleen alapohja edelleen + 1 °C asteen lämpötilaan. Jäähdytysvaihetta kestää 4-5 vuorokautta, minkä jälkeen koekappale puretaan. (TTY 2013, 3.)

3.7.3 Tulokset

Routanousukokeen tarkemmat tulokset on esitetty liitteessä 4. Koekappaleiden vesipitoisuudet määriteltiin kolmelta eri syvyydeltä koekappaleen purkamisen yhteydessä. Liitteen 4 kuvassa 6 vaakasuorat viivat kuvaavat näytteiden keskimääräisiä vesipitoisuuksien ottamisvälejä ja symbolit sijaitsevat vesipitoisuuksien keskimääräisellä syvyydellä. Routan lopullinen syvyys vaihteli koekappaleilla 111-124 mm välillä, jossa korkein tulos saavutettiin JV2-kuonan tuhkasekoituksella. Kokeissa suurin routanousu 14 mm oli JV1-kuonalla. Kuonien tuhkaseoksilla routanousut jäivät molemmissa tapauksissa alle kahden millimetrin. Routanousukokeen koekappaleiden tiedot on esitetty taulukossa 8.

TAULUKKO 8.

| Koekappale | Kuivairtitiheys [kg/m ³] | Vesipitoisuus alku [%] | Vesipitoisuus loppu [%] | Routimiskerroin [mm ² /Kh] |
|------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| JV1 # 0-16 mm | 1540 | 19,3 | 30,5 | 2,98 |
| JV2 # 0-16 mm | 1690 | 13,9 | 24,1 | 2,25 |
| JV1+10%Tuhka # 0-16 mm | 1550 | 14,8 | 26 | 0,27 |
| JV2+10%Tuhka # 0-16 mm | 1610 | 13 | 24,9 | 0,28 |

Ratahallintokeskuksen julkaisun (Nurmikolu 2004) mukaan materiaali luokitellaan keskinkertaisesti routivaksi routimiskertoimen ollessa 1,6-3,3 mm²/Kh ja routimattomaksi kertoimen ollessa pienempi kuin 0,5 mm²/Kh. Näin ollen pelkät kuonat JV1 ja JV2 ovat routimiskertoimen mukaisesti keskinkertaisesti routivia. Tuhkan sekoituksella on huomattavan suuri merkitys routivuuteen. Käytännössä arinakuonasta tulee routimatonta sekoittamalla siihen oikealla suhteella tuhkaa. Tulokset ovat hyvinkin samankaltaisia verrattuina vuoden 2009 tutkimuksiin, jossa tuhalla todettiin sama kyseinen vaikutus.

3.8 Lämmönjohtavuus

3.8.1 Kokeen periaate

Lämmönjohtavuuden määrittäminen sulalle ja jäätyneelle kuonanäytteelle VTT:n toimesta ASTM- D5334-92 standardia mukailleen. Kokeessa tutkittavan kuonan sisään asetetaan sauvamainen lämmönjohtosondi, eli lämmönjohtavuuspuikko. Sondissa on lämpötila-anturi ja lämmitysvastus. Idea perustuu sondin keksipisteestä mitattavaan lämpötilan muutokseen ajan suhteen. Lämmönjohtavuus saadaan suoran kulmakertoimesta, jonka muodostavat lämpötilan muutos ja kuluneen ajan logaritmi. VTT:n käyttämä laskentakaava on esitetty kaavassa 1. (Tiehallinto 2001)

$$\lambda = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} * (\ln t_2 - \ln t_1) \quad (1.)$$

λ = lämmönjohtavuus (W/Km)

q = lämmitysteho sondin pituusyksikköä kohti (W/m)

T = lämpötila (°C)

t = aika (s)

3.8.2 Testinäytteiden valmistus

Testinäytteitä varten seulottiin kaksi 10 litran ämpärillistä # 0-16 raekokoa sisältävää kuonaa. Koe pyrittiin tekemään 92 % tiivistysasteessa ja optimivesipitoisuuksissa. Molemmat testinäytteet (JV1 ja JV2) lähetettiin VTT:lle lämmönjohtavuuden määrittämiseen. Näytteisiin merkittiin tämän työn kappaleessa 3.3 esitetyn Proctor-sullonnan tuloksista maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet.

3.8.3 Tulokset

Arinakuonien lämmönjohtavuutta on tutkittu aikaisemmin samalla menetelmällä vuonna 2008. Tutkimukset suoritettiin tuolloin # 0-16 mm raekokoon seulotulle JV1-kuonalle. Lämmönjohtavuuden arvoiksi määritettiin VTT:n toimesta sulana 1,10 W/Km ja jäätyneenä 1,20 W/Km. Vuoden 2008 tutkimusten maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet ovat JV1-kuonalla hyvin samaa luokkaa verrattuna tämän työn tuloksiin.

Sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet mitattiin kolmen mittauksen keskiarvona. Vuoden 2013 tutkimustulokset on esitetty taulukossa 9.

TAULUKKO 9.

| Lämmönjohtavuus | JV1, # 0-16 mm | JV2, # 0-16 mm |
|--|----------------|----------------|
| Sulan tilan lämmönjohtavuus [W/Km] | 0,72 | 0,80 |
| Jäätyneen tilan lämmönjohtavuus [W/Km] | 0,80 | 0,92 |

Arinakuonien lämmönjohtavuudet ovat aikaisempia tuloksia huomattavasti alhaisempia. Vastaavilla kuivatilavuuspainoilla ja vesipitoisuuksilla olevilla luonnon maamateriaaleilla on suuremmat jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet, kuin vuoden 2013 kuonanäytteillä (VTT 2013).

3.9 Kiintotiheys

3.9.1 Testinäytteiden valmistus

Kiintotiheyden määrittämiseen toimitettiin TTY:n maalaboratorioon arinakuonaa yhtä koetta varten 7 kg. Näytteiden rakeisuudet olivat kokeen standardin SFS-EN 1097-6 mukaisesti seulottu # 4-31,5 mm rakeisuuksiin. Koetta kohden standardin mukainen näytemäärä oli 5 kg maksimiraekoon ollessa # 31,5 mm.

3.9.2 Periaate pyknometrillä

Kiintotiheys määritetään tutkittavan materiaalin massan suhteesta tilavuuteen. Testinäyte punnitaan kyllästetyssä pintakuivassa tilassa sekä uudestaan uunikuivana. Tämän jälkeen tilavuus määritetään sen veden massasta, jonka koenäyte syrjäyttää pyknometri-menetelmän punnituksessa. (SFS-käsikirja 2003, 241.)

Koe suoritettiin arinakuonille JV1 ja JV2 TTY:n maalaboratoriolla hieman standartista SFS-EN 1097-6 poiketen. Koe tehtiin pesemättömille näytteille käyttäen kahta rinnakaista yksittäisnäytettä. Kiintotiheyksiä ei määritetty pintakuivina.

3.9.3 Tulokset

Taulukosta 10 nähdään, että JV2-kuonalla on hieman suurempi kiintotiheys kuin JV1-kuonalla. Yleisesti arinakuonilla on luonnon materiaaleja alhaisempi kiintotiheys. Luonnon kiviaineksilla käytetään mitoituslaskelmissa yleensä kiintotiheyden arvoa 2650 kg/m^3 (Jääskeläinen 2011, 46.).

TAULUKKO 10.

| Arinakuona | Kiintotiheys [kg/m ³] näennäinen | Kiintotiheys [kg/m ³] uunikuiva | Kiintotiheys alipaine [kg/m ³] | Kiintotiheys alipaine [kg/m ³] uunikuiva |
|-----------------|--|---|--|--|
| JV1 # 4-31,5 mm | 2560 | 2540 | 2810 | 2800 |
| JV2 # 4-31,5 mm | 2620 | 2620 | 2850 | 2830 |

3.10 Los Angeles & Micro Deval

3.10.1 Los Angeles -koe

Arinakuonien iskunkestävyydet määriteltiin standardin SFS-EN 1097-2 mukaisella Los Angeles -kokeella. Kokeen periaatteena on pyörittää tutkittavaa materiaalia teräsrummussa teräskuulien kanssa, jonka jälkeen tutkitaan kuinka paljon materiaalista jää 1,6 mm seulalle. Kokeessa on 400 g ja 445 g välillä painavia teräskuulia 11 kappaletta, joiden halkaisijat ovat 45 ja 49 mm väliltä. LA -luku lasketaan seuraavalla kaavalla 2.

$$LA = \frac{5000-m}{50} \quad (2.)$$

$m = 1,6 \text{ mm}$ seulalle jäänyt lajitteen massa [g]

(SFS-käsikirja 2003, 191-197.)

3.10.2 Micro Deval -koe

Arinakuonien kulutuskestävyydet määriteltiin standardin SFS-EN 1097-1 mukaisella Micro Deval -kokeella. Koe muistuttaa paljon Los Angeles -koetta, mutta se toteutetaan pienemmässä mittakaavassa. Periaatteena on määrittää kulutuskestävyyden arvo jauha-

malla näytettä kuulilla pyörivässä rummussa tiettyjen olosuhteiden vallitessa. Testin loputtua määritellään näytteestä jauhaantuneesta alle # 1,6 mm koon aineksesta prosentuaalinen osuus alkuperäisestä näytteestä. Micro Deval -arvo lasketaan kokeen suorittamisen jälkeen seuraavalla kaavalla 3.

$$M_{DE} = \frac{500-m}{5} \quad (3.)$$

M_{DE} = Micro Deval -arvo (märkä koe)

m = 1,6 mm seulalle jääneen lajitteen massa [g]

(SFS-käsikirja 2003, 181-190.)

3.10.3 Testinäytteiden valmistus

Los Angeles -koetta varten yhteen näytteeseen tarvittiin vähintään 15 kg # 10-14 mm rakeita sisältävää kuonaa. Vastaava Micro Deval -kokeeseen tarvittava # 10-14 mm rakeita sisältävä määrä oli 2 kg. Molempia testinäytteitä varten seulottiin reiluhko määrä, yhteensä n. 55 kg, # 8-16 mm rakeita sisältävää kuonaa. Kuonanäytteet kuljetettiin TTY:n maalaboratoriolle testeihin, missä ne seulottiin oikeaan raekokoonsa, pestiin ja kuivattiin ennen kokeiden suorittamista.

3.10.4 Tulokset

Tuloksia tarkastellessa havaitaan molempien jätevoimaloiden kuonien ominaisuuksien olevan keskenään melkein yhtä suuret. Verrattuna vuonna 2009 määritettyihin arvoihin, vuoden 2013 kuonien Los Angeles ja Micro Deval -tulokset ovat hyvin lähellä edellisvuosien tuloksia, mutta ovat kuitenkin hivenen heikompia. Kuonien kulutus- ja iskunkestävyys ovat säilyneet suurin piirtein samana, eikä niiden laadussa ole tältä osin tapahtunut muutoksia. Arinakuonien iskun- ja kulutuskestävyyskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 11.

TAULUKKO 11.

| Arinakuona | LA | MDE |
|----------------|----|-----|
| JV1 # 10-14 mm | 46 | 31 |
| JV2 # 10-14 mm | 45 | 29 |

3.11 Orgaaninen aines

3.11.1 Hehkutushäviö

Molempien voimaloiden arinakuonien sisältämä orgaanisen aineksen määrä tutkittiin hehkutushäviöllä EKP:n omassa maalaboratoriossa. Menetelmässä käytettiin Ekokem-Palvelu Oy:n maalaboratorion omaa työohjetta, jossa sovellettiin standardeja SFS 3008 ja GLO-85.

Työ suoritettiin näytteille kahdella rinnakkaisnäytteellä, joista lopputulos saatiin laske-
malla niiden keskiarvot. Näytteitä kuivatettiin 105 °C asteisessa uunissa yli vuorokau-
den, minkä jälkeen koe voitiin toteuttaa. Puhtaiden posliiniupokkaiden massat punnit-
tiin, minkä jälkeen näytteet laitettiin upokkaisiin punnitusta varten. Näytteiden alkupai-
no kirjattiin ylös. Upokkaiden yleinen siirtely, sekä vaa'alta uuniin siirto tapahtui pih-
deillä. Näiden työvaiheiden jälkeen näytteitä hehkutettiin 550 °C asteisessa uunissa vä-
hintään 12 tuntia, minkä jälkeen ne punnittiin uudelleen. Hehkutushäviö saadaan las-
kettua kaavalla 4.

$$100 * \frac{[m_1 - (m_3 - m_2)]}{m_1} \quad (4.)$$

m_1 = näytemäärä

m_2 = tyhjän puhtaaksi poltetun upokkaan massa

m_3 = upokkaan ja näytteen massa hehkutuksen jälkeen

100 = % -kerroin



KUVA 12. Hehkutushäviön analyysivaaka, pihdit ja upokas

3.11.2 Tulokset

Rinnakkaisnäytteiden keskiarvoista määritettiin JV1:n hehkutushäviöksi 5,8 % ja vastaavasti JV2:n hehkutushäviöksi 4,6 %. Tulokset eivät ole kovin yllättäviä ja voidaan olettaa jätevoimaloiden polttoprosessien olevan tehokkaita. Yleisesti arinakuonalla on suurempi hehkutushäviö verrattuna esimerkiksi lento-tuhkaan (Marttila 2010).

4 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia laboratoriotutkimusmenetelmillä Ekokem Oy Ab:n Riihimäen jätevoimaloiden arinakuonien tämän hetkisiä geoteknisiä ominaisuuksia ja verrata niitä aikaisempiin tutkimustuloksiin. Tulosten päävertailukohteena olivat Markus Lehtosen diplomityön oheiset tutkimukset vuodelta 2009. Tarve tutkimuksiin korostui uuden vuonna 2012 valmistuneen toisen yhdyskuntajätteen polton voimalan myötä, sillä sen arinakuonan geoteknisiä ominaisuuksia ei ollut vielä tutkittu tarkemmin.

Laboratoriotutkimukset keskittyivät pääosiltaan molempien jätevoimaloiden kuonien ja varsinkin niiden tuhaseoksien mekaanisiin ominaisuuksiin ja routivuuteen. Edellisvuosien tutkimuksissa on todettu arinakuonan tuhaseoksille hyvinkin positiiviset ominaisuudet niiden hyötykäyttöä maarakentamisessa ajatellen. Näiden tutkimusten perusteella on tehty koerakenteita ja sopivin rakennekerros arinakuonille on kantava ja jakava kerros kenttärakenteissa. Hyötykäytön jatkamisen kannalta on hyvä saada lisää varmuutta ja tietoa arinakuonan ominaisuuksista.

Tutkimusmenetelmät lähtivät käyntiin selvittämällä kuonien esikäsitteilymenetelmien jälkeiset rakeisuudet ja siten seossuhteet. Rakeisuuskäyrät saatiin vastaamaan ensimmäisen jätevoimalan kuonien aikaisemmin tutkittuja rakeisuuksia, jotka kuvastavat hyvin kenttärakenteissa hyötykäytettäviä kuonia. Rakeisuuskäyrien samankaltaisuudella on huomattava merkitys kuonien muiden tutkimusmenetelmien kannalta, jotta niistä saadut tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia aikaisempiin tutkimustuloksiin.

Verrattaessa uuden 2-jätevoimalan arinakuonan geoteknisiä ominaisuuksia keskenään 1-jätevoimalan kuonan ominaisuuksiin, voidaan todeta niiden olevan melko samankaltaisia keskenään. Molemmat kuonat omaavat hyvin yhtenevät ominaisuudet puristuslujuuksiltaan sekä kolmiakksiaalikoekiden osalta. Materiaalien routivuutta arvioitaessa JV1-kuonan ja JV2-kuonan tulokset risteävät hieman kapillaarisuuskokeiden ja routanousukokeen puolesta. Johtopäätöksenä voidaan kuitenkin todeta tuhkan sekoittamisella olevan routivuutta huomattavasti vähentävä vaikutus, aivan kuin vuoden 2009 kokeista voidaan olettaa. Myös materiaalien lämmönjohtavuuksilla saattaa olla vaikutuksia routivuuteen.

Nykyisillä arinakuonilla ei ole tapahtunut merkittäviä laadullisia muutoksia edellisvuosien tutkimustuloksiin nähden, vaikka voidaan sanoa, että tulokset ovat kuonien osalta keskimäärin hieman laskeneet niistä. Arinakuonien tekniset ominaisuudet maarakentamisen kannalta ovat siis säilyneet ennallaan ja on hyvin johdonmukaista käyttää kyseisten kuonien hyötykäytössä 10 % -tuhkasekoitusta. Luonnon kiviaineksiin verrattuna arinakuonat ovat jonkin verran hauraampia, sekä ne sisältävät epäpuhtauksia, mutta tuhkaseokset antavat lupaavia lujuus- ja jäykkyytuloksia. Vuoden 2009 tutkimuksien mukaisesti tuhkaseoksien merkittävin lujittuminen tapahtuu edelleen 7 vuorokauden kuluttua, mikä parantaa monia ominaisuuksia huomattavasti. Kaatopaikkarakenteissa olisi luontevaa käyttää arinakuonaa korvaamaan arvokkaita luonnon materiaaleja.

Lujittumisen yhteydessä voidaan havaita ajan kuluessa koekappaleiden pinnassa erivärisiä kemiallisten reaktioiden lopputuotekertymiä. Kuonien sisältämät aineet, kuten kloridit ja metallit, siis hajoavat ja reagoivat ilman sisältämän hiilidioksidin kanssa. Näitä kemiallisia reaktioita kannattaisi tulevaisuudessa ehkä tutkia enemmän. Kuonien puhdistamisella voisi olla vaikutusta niiden hyötykäyttökohteita ajatellen.

Opinnäytetyö toteutui suurimmilta osin aikataulussaan ja saatuja tuloksia voidaan pitää vertailukelpoisina. Tutkimusmenetelmät kannattaa valita myös jatkossa standardien pohjalta vastaamaan mahdollisimman hyvin edellisiä kokeita.

LÄHTEET

ASTM D 698-07. 2007. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))1

Arm, M. 2003. Mechanical Properties of Residues as Unbound Road - experimental tests on MSWI bottom ash, crushed concrete and blast furnace slag. Doctoral Thesis. Stockholm, Sweden.

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki: Rakennustieto Oy

Izquierdo, M., Vazquez E., Barra, M., Querol, X., López, Á., Plana, F. 2001. Use of bottom ash from municipal solid waste incineration as a road material. International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky, Paper #37. [www-sivu]. Luettu 5.4.2013.
<http://flyash.info/2001/conprod3/37izqu.pdf>

Jätelaki. 17.6.2011/646.

Jäteverolaki. 17.12.2010/1126.

Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. Jyväskylä: Tammertekniikka.

Kolisoja, P. 1993. Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet. Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. Tielaitoksen selvityksiä 39/1993. [www-sivu]. Luettu 13.4.2013.
http://alk.tiehallinto.fi/julkaisut/pdf1/3200164-sitom_kerrosten_kiviain_muodonmuut.pdf

Lehtonen, M. 2009. Jätevoimalan arinakuonan hyötykäyttö. Diplomityö.

Manninen, J. 2008. Ekokem hyödyntää jätteet tehokkaasti energiaksi. Ympäristö ja Terveys, 39, 7-8:2008, s. 48-53.

Marttila, A. 2010. Metallierottelu yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta. Diplomityö. 170 s. + liitteet 15 s.

Nurmikolu, A. 2004. Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Helsinki. Ratahallintokeskus. Kunnossapitoyksikkö. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. 193 s.

Chandler, A.J., Eighmy, T.T., Hjelmar, O., Kosson, D.S., Sawell, S.E., Vehlow J., van der Sloot, H.A., Hartlén, J. 1997. Municipal Solid Waste Incinerator Residues. Amsterdam. Elsevier.

Rakennuslehti 2012. [www-sivu]. Luettu 11.3.2013.
http://ekokem.fi/fi/tietopankki/kasittelyprosessit/jatteiden-kasittelyprosessit#voimala_1

Onikki, P. 2007. Moderni jätteenpoltto Ekokemillä. Ympäristö ja Terveys, 38, 10:2007, s. 46-49.

Suomen Standardisoimisliitto SFS Ry. 2003. SFS-käsikirja 157. Kiviainesten testaus. Helsinki: Kyriiri Oy

Tiehallinto 2001. Menetelmäkuvaus TPPT 8. [www-sivu]. Luettu 20.3.2013.
<http://alk.tiehallinto.fi/tppt/pdf/8-lammonjoht.pdf>

Tielaitos 1993. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Yleiset perusteet. [www-sivu]. Luettu 4.4.2013.
http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf2/yleiset_perusteet.pdf

TTY 2013. Yhdyskuntajätteen polton kuonien, JV1 ja JV2, laboratoriotutkimukset. Testausselostus MPR/41/2013. 5 s.

Tuhkarakentamisen käsikirja. 2012. [www-sivu] Luettu 11.4.2013.
http://www.infrary.fi/files/3985_Tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. 2006/591.

Valtioneuvoston asetus jätteistä. 19.4.2012/179.

Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista 4.9.1997/861.

VTT 2013. Polttokuonan sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuus. Tutkimusraportti. Nro VTT-CR-01846-13. 4 s.

VTT 2008. Polttokuonan laboratoriotutkimukset. Tutkimusselostus Nro VTT-S-08771-08. 4 s.

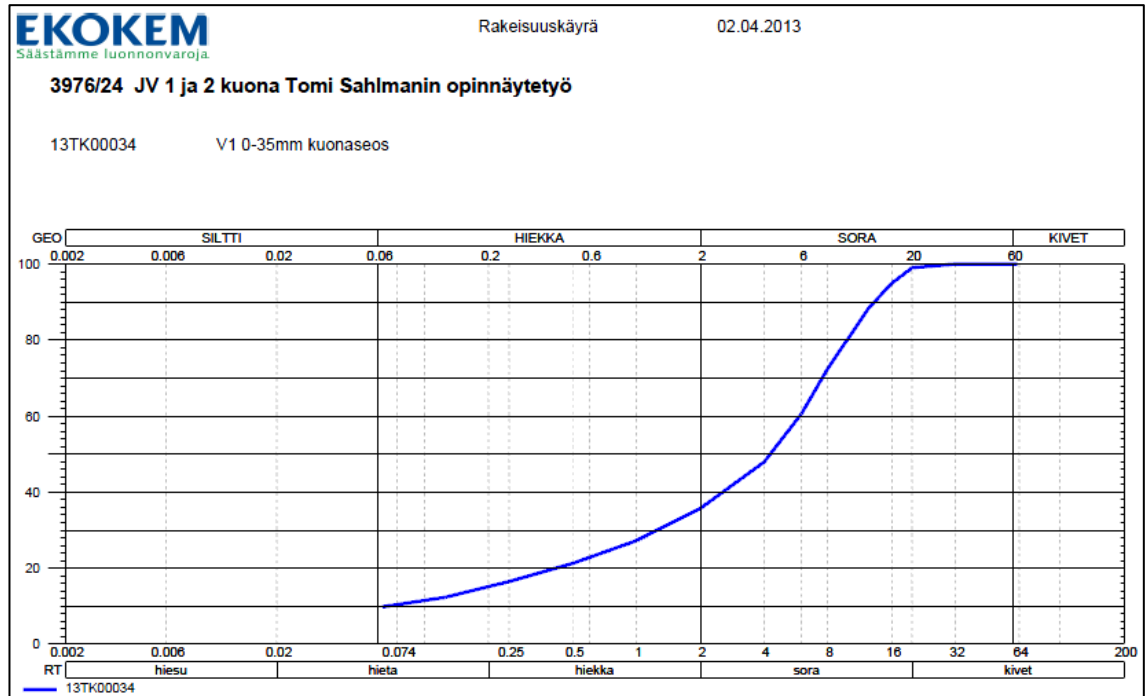
Wiles, C.C. Municipal solid waste combustion ash: State of the knowledge. Journal of Hazardous Materials 47. 1996.

Youtube 2010. [www-sivu]. Luettu. 7.4.2013.
<http://www.youtube.com/watch?NR=1&v=xKSQ3X8p5L0&feature=endscreen>

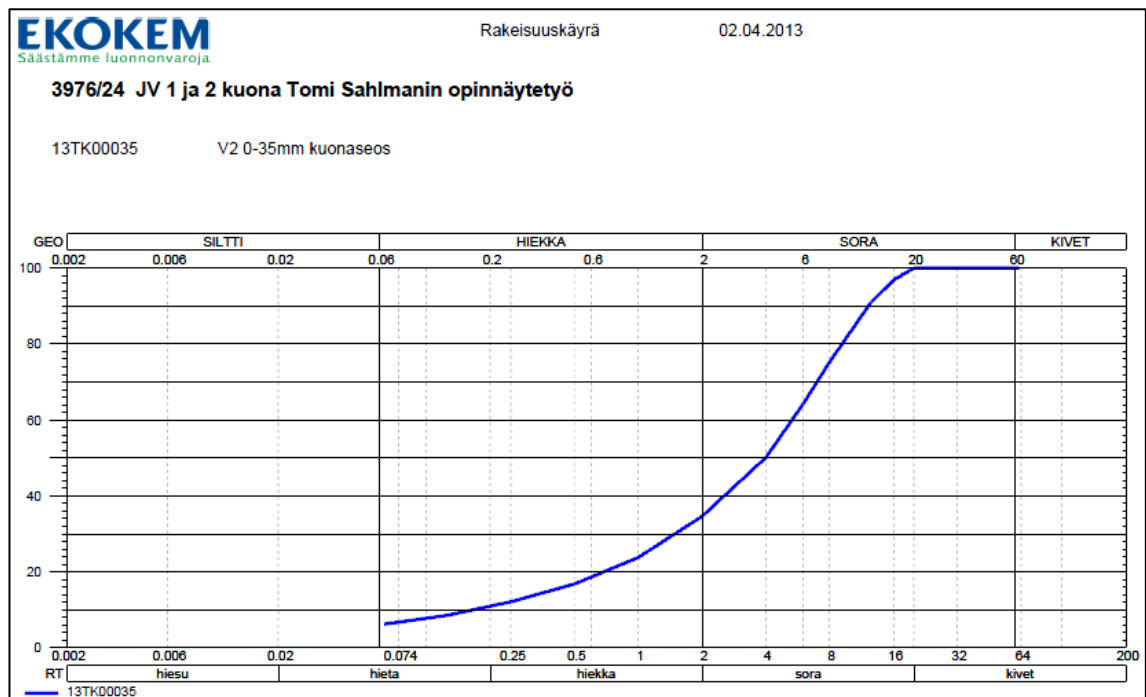
LIITTEET

Liite 1. Rakeisuuskäyrät

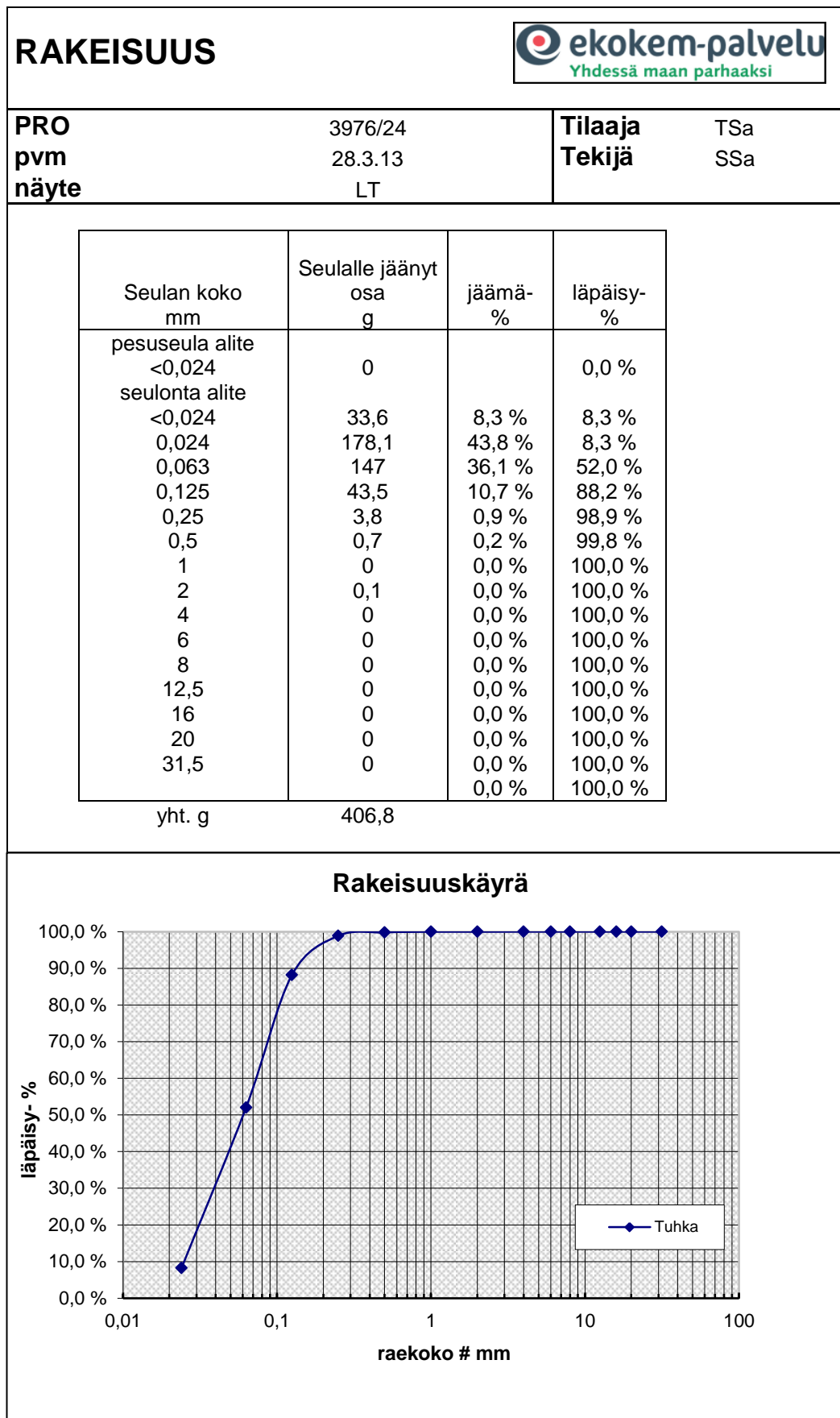
1 (2)



KUVA 1. JV1-kuonan rakeisuuskäyrä



KUVA 2. JV2-kuonan rakeisuuskäyrä



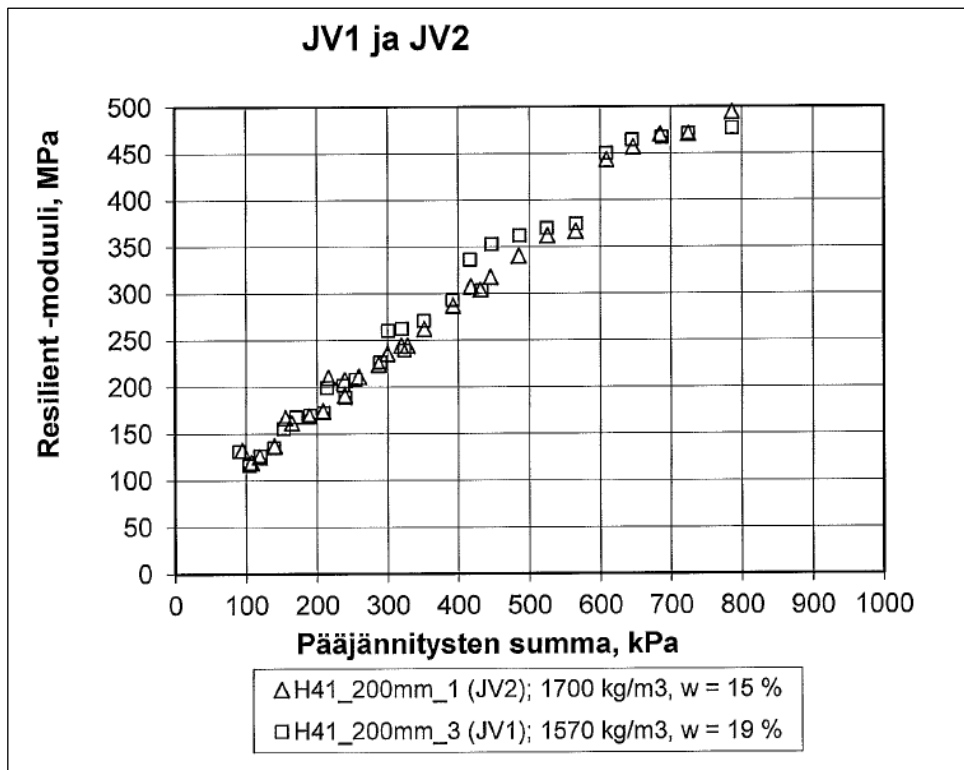
KUVA 3. Tuhkan rakeisuuskäyrä

Liite 2. Puristuslujuus - Koekappaleet

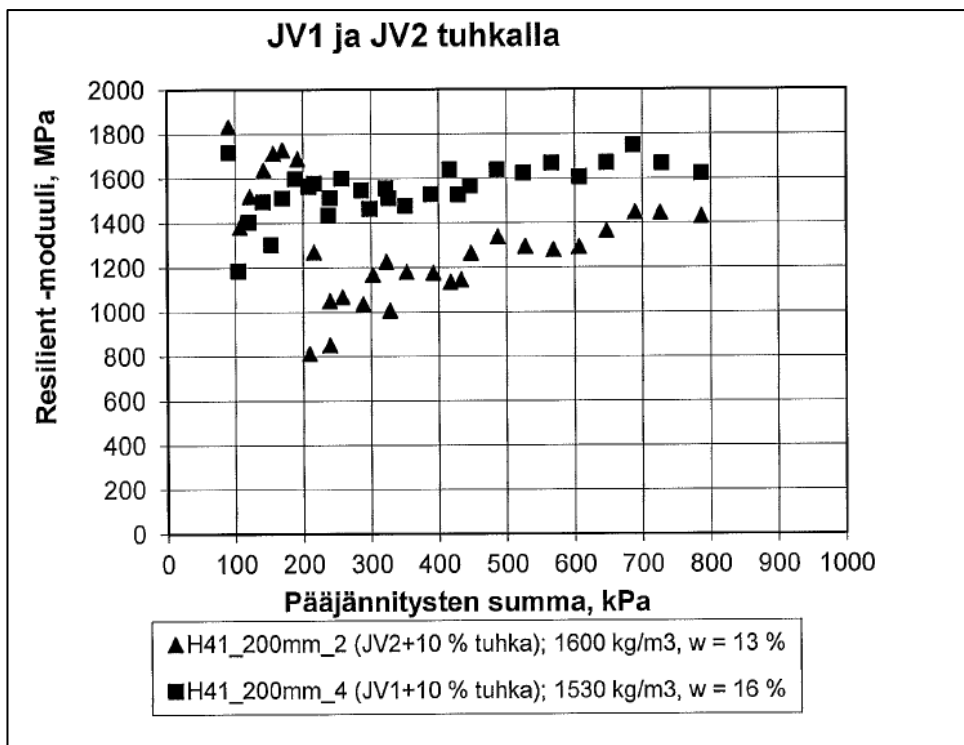
| LAADUNVARMENNUS LIERIÖIDEN VALMISTUS LOMAKE | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|---------------|----------|-----------|-------------|-------------------|--------|-------|----------------|-----------------|----------------|--------------|-----------------|---------|-------|--------|--------|---------------------|---------------------|
| pvm. | Näyte nro | Näyte | Lisävesi | kpl. nro. | näyte määrä | paino tiiv. jälk. | kierr. | paine | saavut. tiheys | korjattu-tiheys | vesipi-toisuus | kuiva-tiheys | kpl. korkeus IC | koe pvm | 7 Pvm | 28 Pvm | 91 Pvm | puristus lujuus Mpa | puristus painuma mm |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 2,0 % | 1. | 1600 | HAJOSI | 20 | 300 | 1743 | | | | 116,7 | | 28.2. | 21.3. | 23.5. | | |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 3 % | 2. | 1600 | HAJOSI | 20 | 300 | 1763 | | | | 115,6 | | 28.2. | 21.3. | 23.5. | | |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 3. | 1550 | HAJOSI | 20 | 300 | | | | | | | 28.2. | 21.3. | 23.5. | | |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 4. | 1550 | 1549,7 | 20 | 300 | 1881 | 1880,6 | 16,2 % | 1618 | 104,9 | 28.2. | 28.2. | 21.3. | 23.5. | 0,8 | 3,07 |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 5. | 1550 | 1548,9 | 20 | 300 | 1865 | 1863,7 | 16,2 % | 1603 | 105,8 | 21.3. | 28.2. | 21.3. | 23.5. | 0,87 | 3,15 |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 6. | 1550 | 1548,7 | 20 | 300 | 1845 | 1843,5 | 16,2 % | 1586 | 107 | | 28.2. | 21.3. | 23.5. | | |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 7. | 1550 | 1549,4 | 20 | 300 | 1795 | 1794,3 | 14,4 % | 1569 | 110 | 28.2. | 28.2. | 21.3. | 23.5. | 0,59 | 2,59 |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 8. | 1550 | 1549,5 | 20 | 300 | 1804 | 1803,4 | 14,4 % | 1577 | 109,4 | 21.3. | 28.2. | 21.3. | 23.5. | 0,58 | 3,48 |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 9. | 1550 | 1541,7 | 20 | 300 | 1801 | 1791,4 | 14,4 % | 1567 | 109,6 | | 28.2. | 21.3. | 23.5. | | |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 10. | 1550 | 1546,4 | 20 | 300 | 1827 | 1822,8 | 14,3 % | 1595 | 108 | 28.2. | 28.2. | 21.3. | 23.5. | 0,91 | 3,49 |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 11. | 1550 | 1549,9 | 20 | 300 | 1826 | 1825,9 | 14,3 % | 1597 | 108,1 | 21.3. | 28.2. | 21.3. | 23.5. | 0,91 | 3,04 |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 12. | 1550 | HAJOSI | 20 | 300 | 1821 | | | | 108,4 | | 28.2. | 21.3. | 23.5. | | |
| 21.2.13 | 13TK35 | JV2 # 0-16 mm | 5 % | 13. | 1550 | 1549,0 | 20 | 300 | 1842 | 1840,8 | 14,3 % | 1611 | 107,2 | | 28.2. | 21.3. | 23.5. | | |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 14. | 1550 | HAJOSI | 20 | 300 | | | | | | | 1.3. | 22.3. | 24.5. | | |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 15. | 1550 | HAJOSI | 20 | 300 | | | | | | | 1.3. | 22.3. | 24.5. | | |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 16. | 1550 | HAJOSI | 20 | 300 | | | | | | | 1.3. | 22.3. | 24.5. | | |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 17. | 1550 | 1549,8 | 20 | 300 | 1826 | 1825,8 | 17,0 % | 1560 | 108,1 | 1.3. | 1.3. | 22.3. | 24.5. | 0,83 | 3,63 |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 18. | 1550 | 1549,2 | 20 | 300 | 1808 | 1807,1 | 17,0 % | 1545 | 109,2 | 21.3. | 1.3. | 22.3. | 24.5. | 0,82 | 4,14 |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 19. | 1550 | 1549,7 | 20 | 300 | 1790 | 1789,7 | 17,0 % | 1530 | 110,3 | | 1.3. | 22.3. | 24.5. | | |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 20. | 1550 | 1549,5 | 20 | 300 | 1792 | 1791,4 | 20,4 % | 1488 | 110,1 | 1.3. | 1.3. | 22.3. | 24.5. | 0,8 | 3,5 |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 21. | 1550 | 1549,4 | 20 | 300 | 1838 | 1837,3 | 20,4 % | 1526 | 107,4 | 21.3. | 1.3. | 22.3. | 24.5. | 0,86 | 4 |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 22. | 1550 | 1549,7 | 20 | 300 | 1829 | 1828,6 | 20,4 % | 1519 | 107,9 | | 1.3. | 22.3. | 24.5. | | |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 23. | 1550 | 1547,2 | 20 | 300 | 1924 | 1920,5 | 20,2 % | 1588 | 102,6 | 1.3. | 1.3. | 22.3. | 24.5. | 1,25 | 3,44 |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 24. | 1550 | 1549,0 | 20 | 300 | 1910 | 1908,8 | 20,2 % | 1588 | 103,4 | 21.3. | 1.3. | 22.3. | 24.5. | 1,13 | 4,82 |
| 22.2.13 | 13TK34 | JV1 # 0-16 mm | 5 % | 25. | 1550 | 1548,4 | 20 | 300 | 1889 | 1887,1 | 20,2 % | 1570 | 104,5 | | 1.3. | 22.3. | 24.5. | | |

Liite 3. Kolmiaksaalikokeet

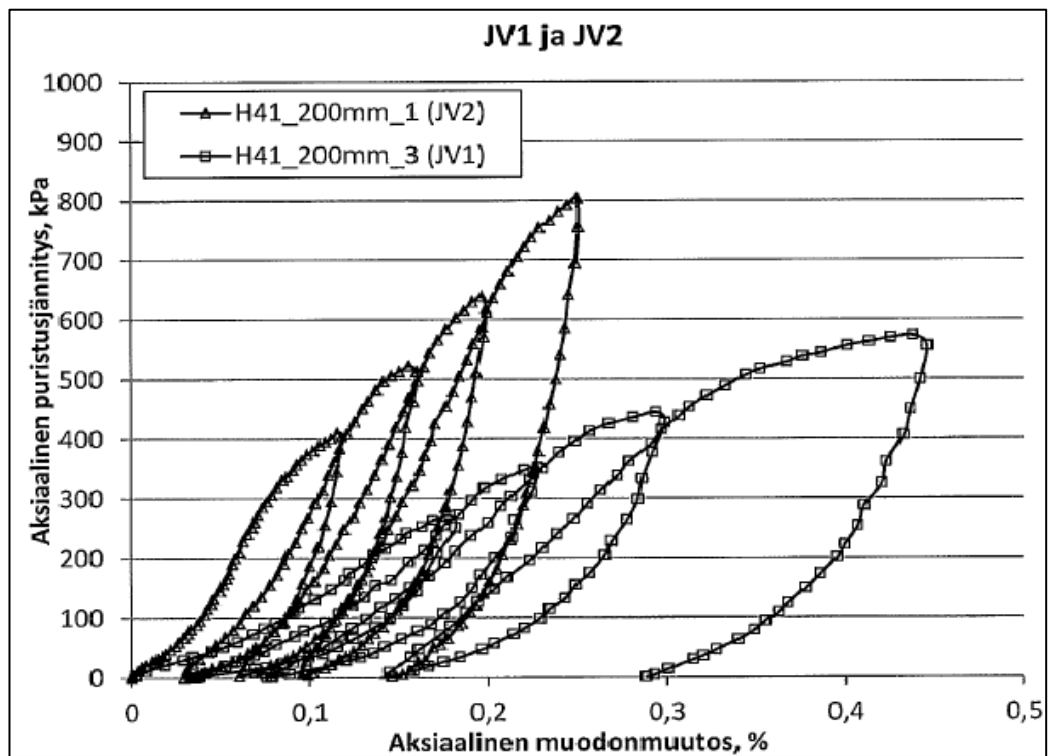
1 (4)



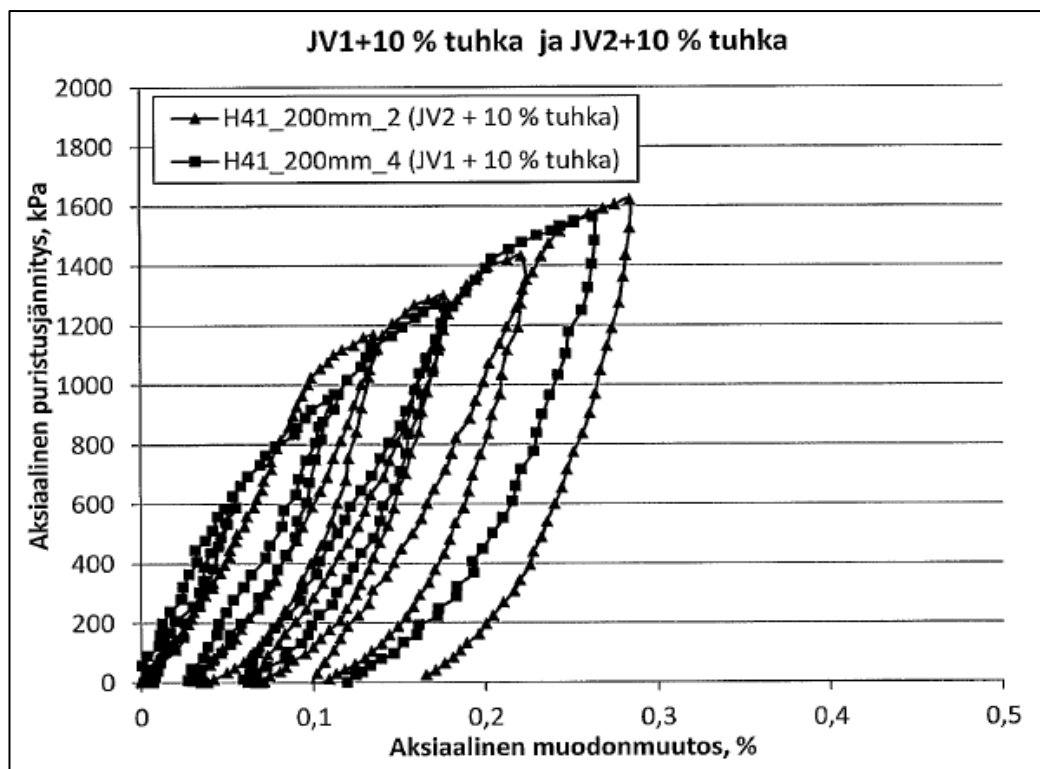
KUVA 1. JV1- ja JV2-kuonien Resilient-moduulit (TTY 2013, liite 1.)



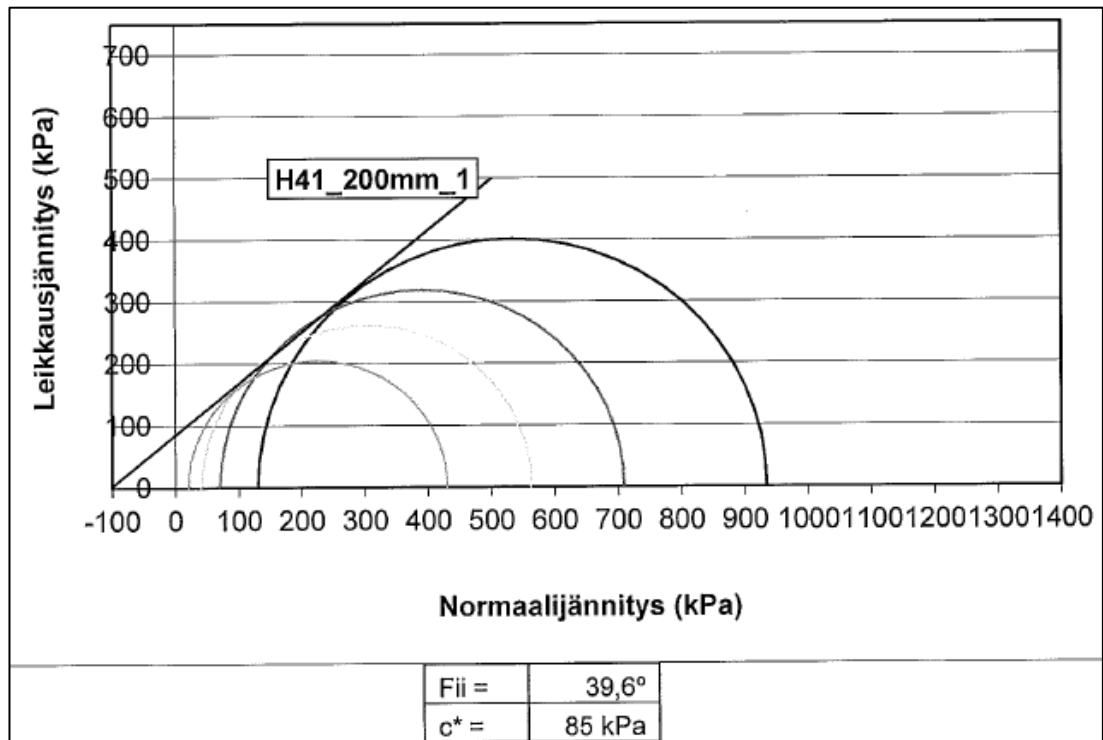
KUVA 2. JV1- ja JV2-kuonien tuhkaseosten Resilient-moduulit (TTY 2013, liite 1.)



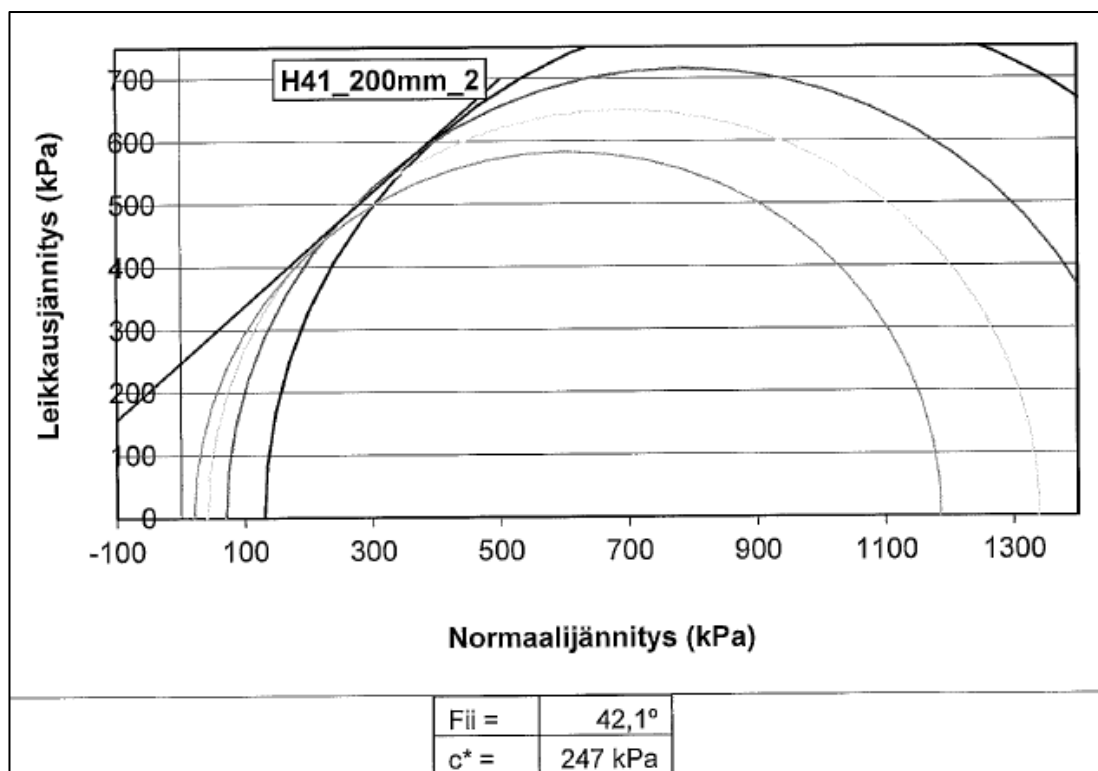
KUVA 3. JV1- ja JV2-kuonien staattisten kolmiaksaalikokeiden puristusjännitys-muodonmuutoskuvaajat (TTY 2013, liite 1.)



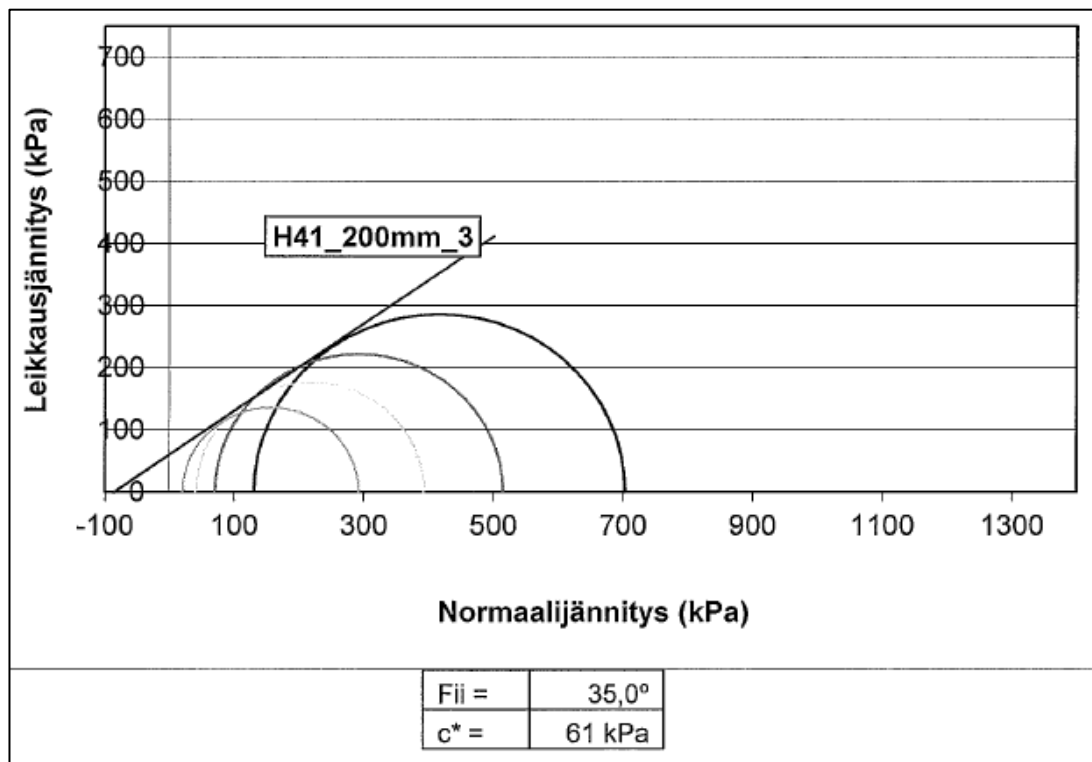
KUVA 4. JV1- ja JV2-kuonien tuhkaseosten staattisten kolmiaksaalikokeiden puristusjännitys-muodonmuutoskuvaajat (TTY 2013, liite 1.)



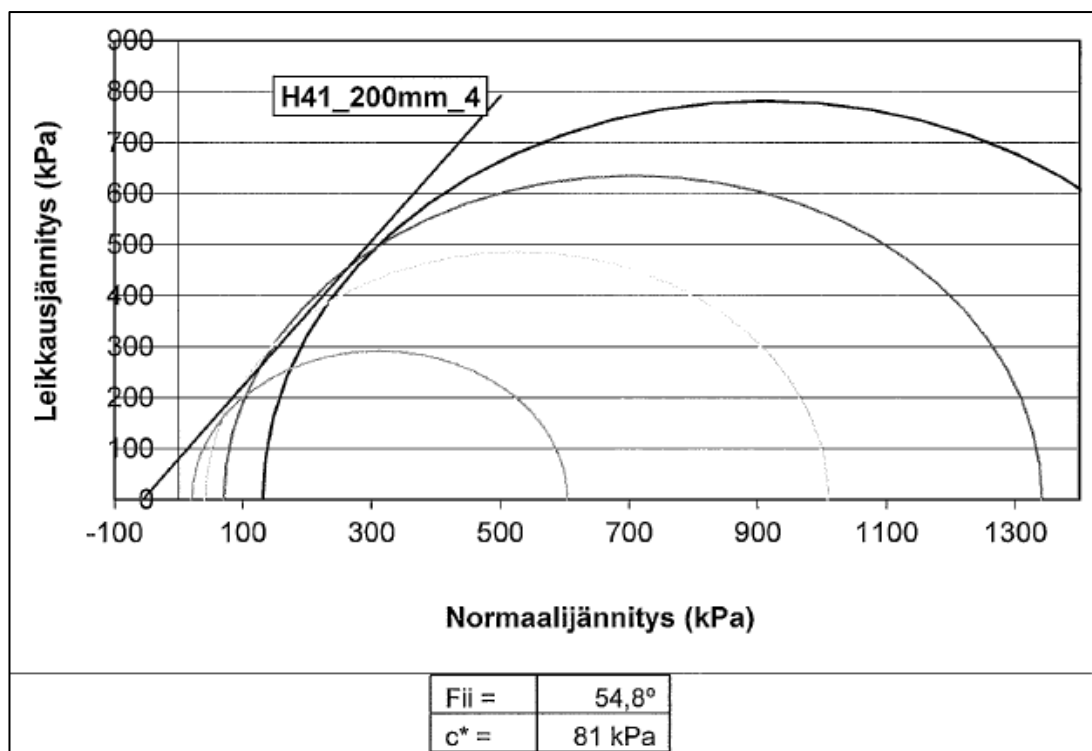
KUVA 5. JV2-kuonalle staattisella kolmiakselikokeella määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio (TTY 2013, liite 1.)



KUVA 6. JV2-kuonan 10 % -tuhkaseokselle staattisella kolmiakselikokeella määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio (TTY 2013, liite 1.)



KUVA 7. JV1-kuonalle staattisella kolmiaksaalikokeella määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio (TTY 2013, liite 1.)



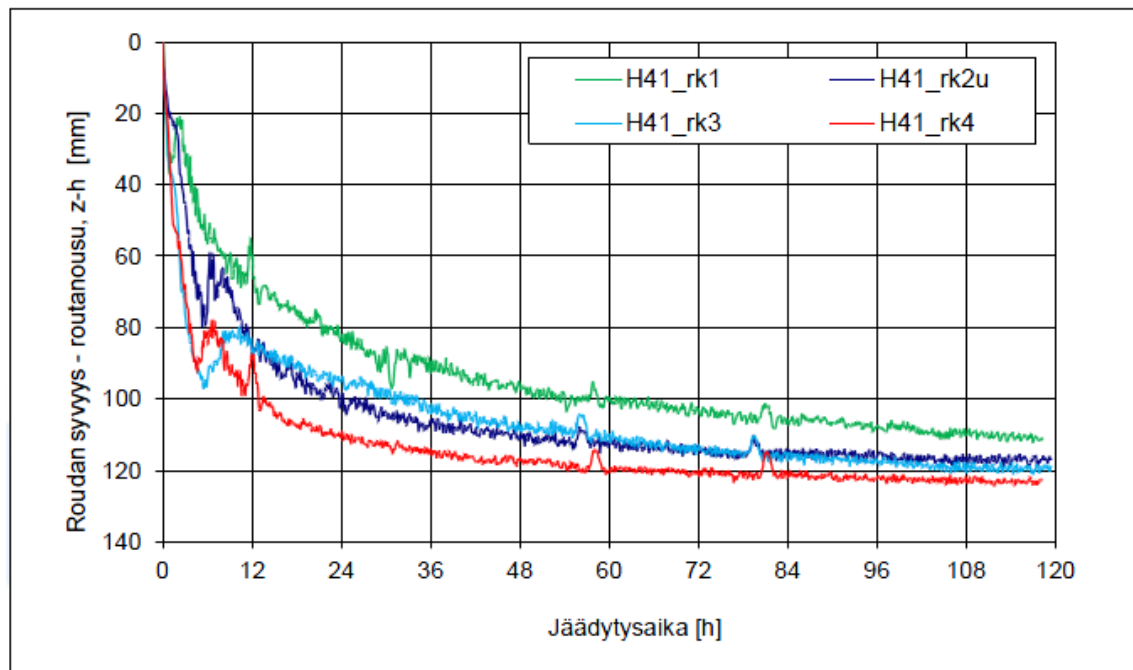
KUVA 8. JV1-kuonan 10 % -tuhkaseokselle staattisella kolmiaksaalikokeella määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio (TTY 2013, liite 1.)

Liite 4. Routanouskoe

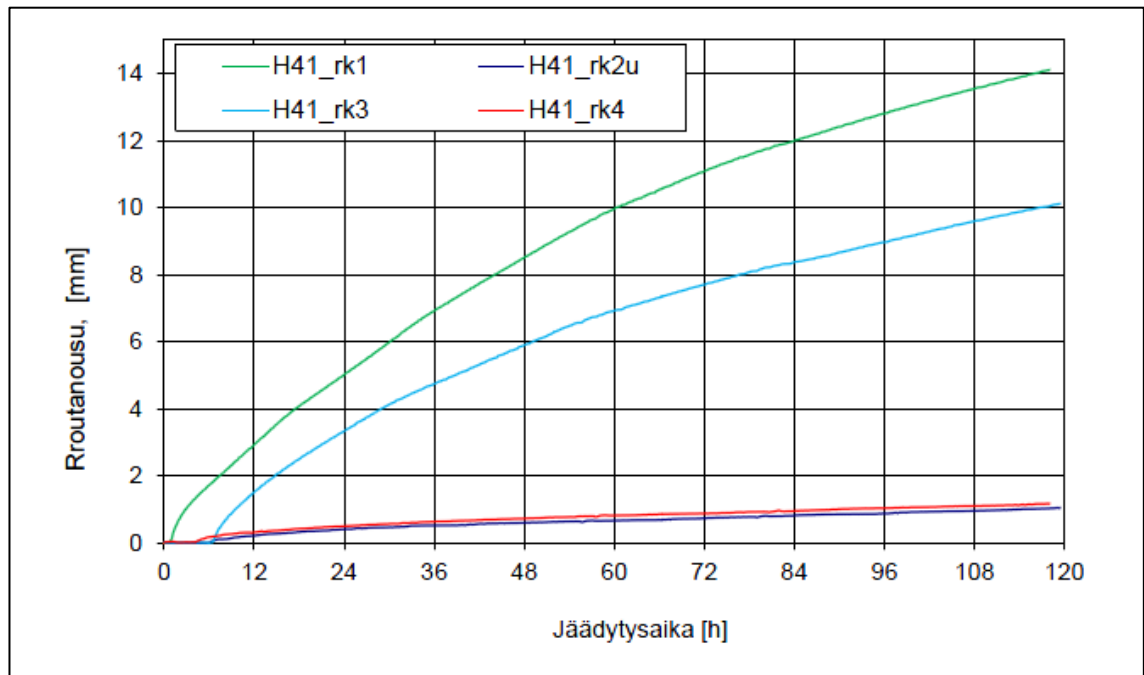
1 (4)

Kuvissa käyrien nimet tarkoittavat seuraavaa:

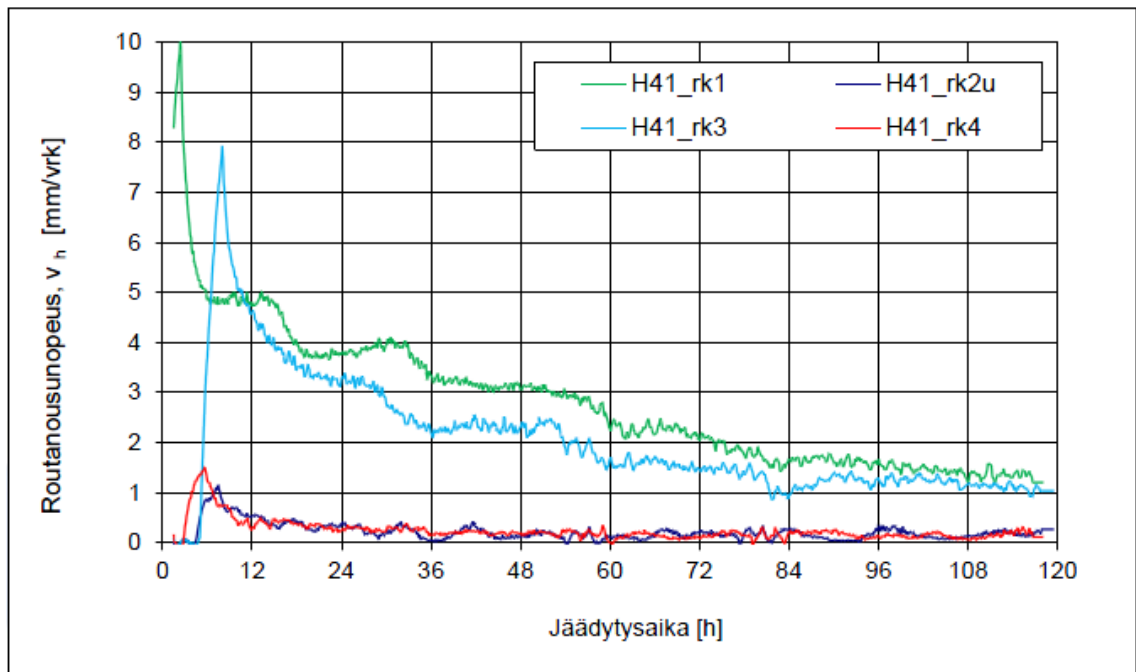
- H41_rk1 = JV1
- H41_rk2 = JV1 + 10 % TUHKA
- H41_rk3 = JV2
- H41_rk4 = JV2 + 10 % TUHKA



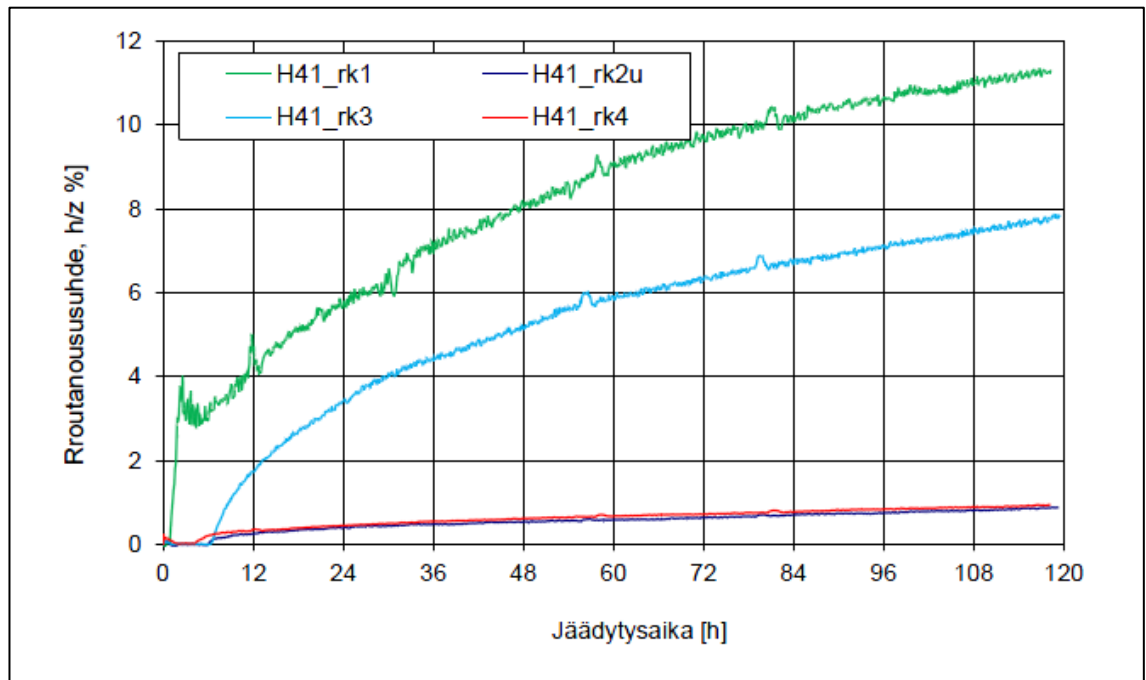
KUVA 1. Roudan syvyyden eteneminen routanousukokeen koekappaleissa (TTY 2013, liite 2.)



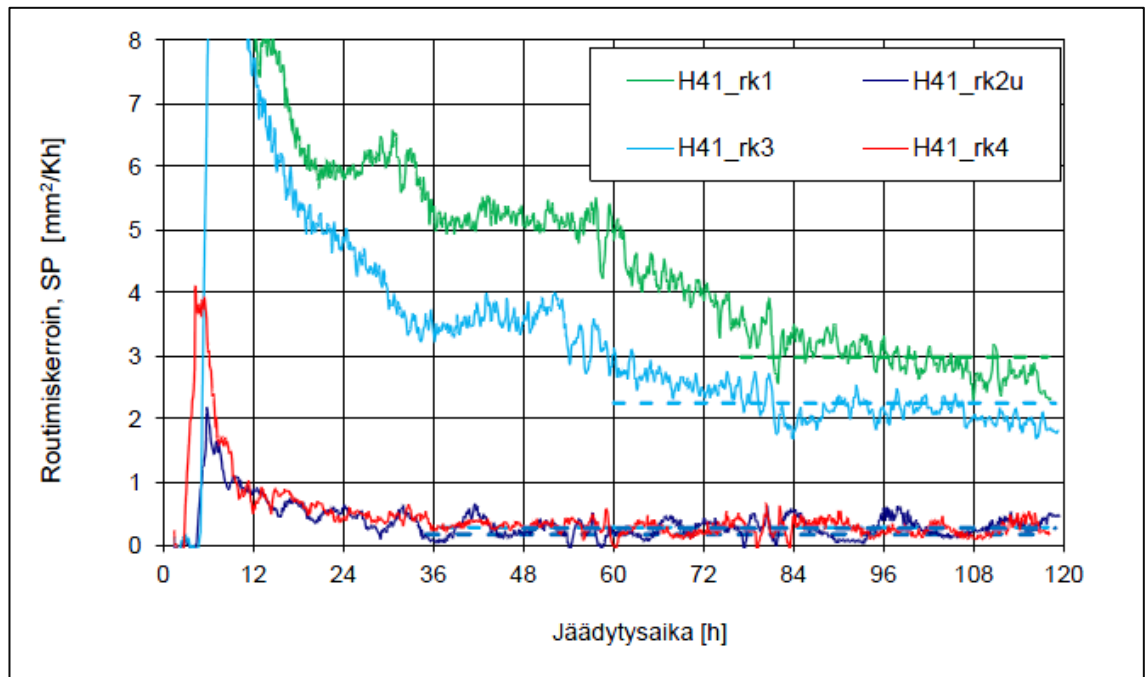
KUVA 2. Routanousukokeen tulokset (TTY 2013, liite 2.)



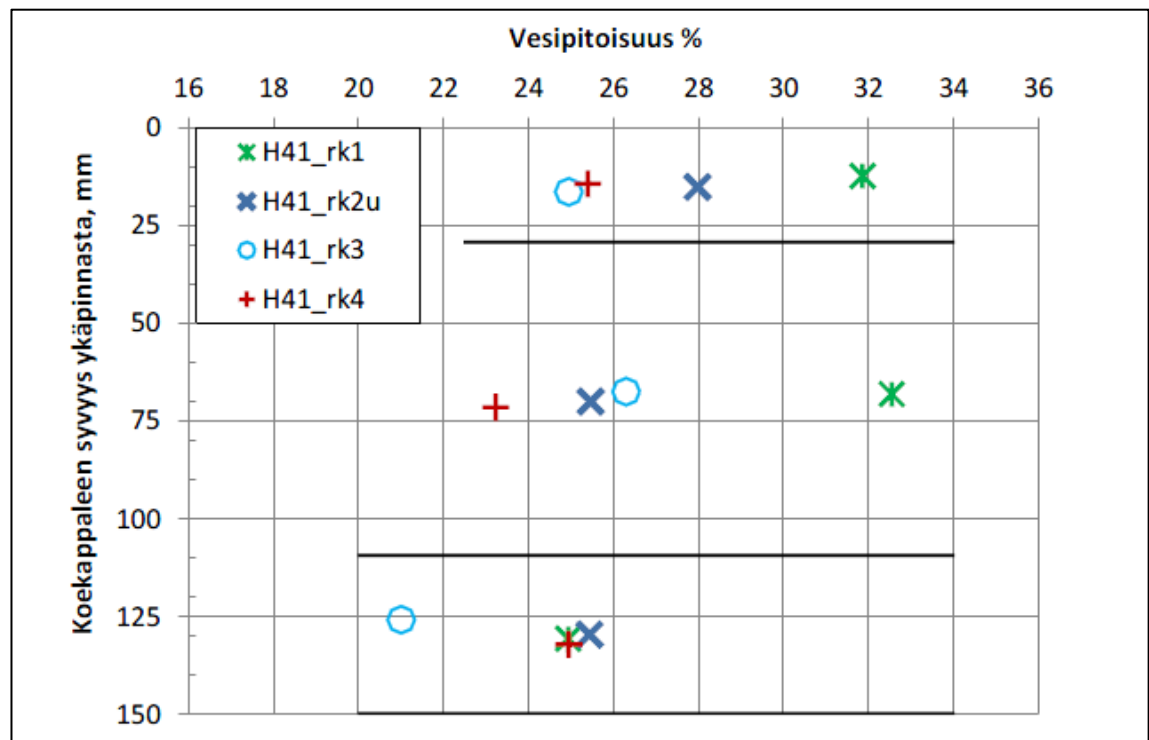
KUVA 3. Koekappaleiden routanousunopeudet (TTY 2013, liite 2.)



KUVA 4. Koekappaleiden routanoususuhteet (TTY 2013, liite 2.)



KUVA 5. Koekappaleiden routimiskertoimet (TTY 2013, liite 2.)



KUVA 6. Koekappaleiden vesipitoisuudet (TTY 2013, liite 2.)