



LABORATORIOTUTKIMUS KASAVARASTOINNIN VAIKUTUKSESTA LENTOTUHKAN ROUTIVUUTEEN

Veli-Pekka Kangasniemi

Opinnäytetyö
Joulukuu 2013
Environmental Engineering
Environmental Technology

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Degree Programme in Environmental Engineering
Environmental Technology

KANGASNIEMI, VELI-PEKKA:

Laboratoriotutkimus kasavarastoinnin vaikutuksesta lentotuhkan routivuuteen

Opinnäytetyö 56 sivua, josta liitteitä 13 sivua
Joulukuu 2013

Teollisuuden sivutuotteiden käytöllä tierakenteissa tähdätään pääosiin kahteen ekologiaa koskevaan etuun: Luonnonkiviainesten säästöön ja jätemateriaalin hyötykäyttöön kaatopaikalle loppusijoittamisen sijaan. Uusi jätelaki sitoo ammattimaiset toimijat niin sanottuun jätehuollon etusijajärjestykseen, jonka pääasiallinen sisältö on laillinen velvoite ohjata jäte uudelleenkäyttöön, kierrätykseen tai energiantuotannon polttoaineeksi, jättäen kaatopaikoittamisen viimeiseksi käsittelymahdollisuudeksi, jos hyödyntäminen ei ole mahdollista. Energiantuottajien sivutuotteiden uudelleenkäyttömahdollisuudet sijaitsevat maanrakennuksessa, sementtiteollisuudessa ja lannoitekäytössä.

Energiantuotannon tuhkien on tiedetty jo pitkään olevan laaja-alaisesti sopivia, joissain tapauksessa jopa kiviainesta parempia, materiaaleja maanrakennusalan tarpeisiin. Tuhkien hyötykäyttöä hidastaa edelleen työtekniikoiden, työohjeiden, selkeiden vaatimusten ja tarpeeksi luotettavien yksinkertaisten teknisten indikaattoriarvojen ainakin osittainen puuttuminen. Etenkin kasavarastointi voi hallitsemattomasti toteutettuna aiheuttaa satunnaisilla olosuhteillaan niin suuren laadullisen vaihtelun, että kasatuhkalle ei voida esittää varmoja yleispäteviä hyötykäyttövaihtoehtoja ilman yksityiskohtaisia tutkimuksia. Muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta, kasavarastoinnin voidaan katsoa heikentävän tuhkan geoteknisiä ominaisuuksia yksityiskohdista huolimatta.

Kasavarastointia jäljiteltiin kostuttamalla kuivaa lentotuhkaa haluttuihin vesipitoisuuksiin. Kostutetuista seoksista valmistettiin seitsemän, 28 ja joissain tapauksissa 70 vuorokauden varastoinnin jälkeen koekappaleita laboratoriokeuksiin. Tutkitut kriteerit olivat materiaalin 1-aksiaalinen puristuslujuus, jäädytys-sulatuskestävyys sekä routanousukokeesta saatava segregatiopotentiaali. Sideaineen vaikutus indikaattoriarvojen kehitykseen tutkittiin valikoiden.

Suurin kompastuskivi yleispätevien linjanvetojen tekemisessä on saatujen tulosten liiallinen samankaltaisuus. Käytännössä kaikkien tutkimuksessa testattujen seosten voidaan sanoa olevan jäädytys-sulatuskokeessa kestävämpiä, ja testisarjojen rajattu laajuus ei anna mahdollisuutta tehdä vesipitoisuuskohtaisia päätelmiä. Varastointivesipitoisuuden huomattiin vaikuttavan tuloksiin, mutta yksiselitteistä suositusta ei voida tältä pohjalta antaa teollisuuden suuntaan. Tulokset ovat kuitenkin toivottavasti hyödyllisiä jatkotutkimuksia suunniteltaessa.

Asiasanat: tuhka, kasatuhka, massiivinen tuhkarakenne, routa, routivuus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Environmental Engineering
Environmental Technology

KANGASNIEMI, VELI-PEKKA:

A Laboratory Study on How Stockpiling Affects the Frost Susceptibility of Fly Ash

Bachelor's thesis 56 pages, appendices 13 pages

December 2013

The ecological benefits that can be obtained by using industrial by-products in earthworks are two-fold: Preservation of natural minerals and the utilisation of waste material instead of landfilling. The current Finnish waste decree mandates that commercial entities must treat their waste according to a certain hierarchy. The primary goal of waste handling should be reuse via new-life reuse, recycling or as a fuel for energy production leaving landfilling as the last-ditch effort. The energy sector's main opportunities to put their by-products into use lie in earthworks, cement industry and fertiliser use.

Fly ashes from energy production have been known to hold potential as a road construction material. In some cases they even perform better than traditional mineral materials, but wide spread applications are being held back by the lack of perfected methods, technical instructions, clear requirements and simple and reliable geotechnical indicator values. Especially uncontrolled stockpiling increases the difficulties related to identifying the technical properties of ash because random ambient conditions cause a wide array of variations. Stockpiled ash practically can not be classified fit for use without relatively extensive material specific research. The geotechnical properties of ash are, with very few exceptions, negatively affected by stockpiling.

In this research, the conditions of a stockpile were mimicked by moistening sample batches of dry fly ash to an array of certain water contents. Test pieces were prepared from the samples after curing times of 7, 28 and in some cases 70 days. Stabilisation with cement was studied selectively. The measured technical parameters were uniaxial compressive strength, frost resistance and segregation potential.

Comparison between different stockpiling water contents was greatly hindered by the uniformity of the results. Practically each one of the tested samples can be said to command little or no frost resistance, and the scope of the study does not allow for any conclusions to be drawn from the other results. The results do hint towards some relation between the storage water content and geotechnical performance, but no general suggestions or recommendations can be given based on this study. Hopefully the results will, on the other hand, prove to be useful in any future research projects on the subject.

Keywords: ash, stockpiled ash, frost heave, frost susceptibility

SISÄLLYS

1	ALKUSANAT	6
2	JOHDANTO	7
3	TUHKA TIERAKENTEISSA	8
3.1	Energiateollisuuden tuhkien hyötykäyttö	8
3.2	Tuhkan tuotteistaminen	9
3.3	Tuhkan varastointi	12
4	GEOTEKNISET OMINAISUUDET	14
4.1	Routa ja routivuus	14
4.2	Rakeisuus.....	14
4.3	Kapillaarisuus	16
4.4	Optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtoiheys.....	16
4.5	Segregaatiopotentiaali ja routimiskerroin	18
4.6	Jäädytys-sulatuskestävyys	19
4.7	Puristuslujuus.....	19
4.8	Tekninen luokitus	20
5	MENETELMÄT	21
5.1	Vesipitoisuus.....	21
5.2	Koekappaleiden valmistus	21
5.3	Routanousukoe	21
5.4	Jäädytys-sulatuskoe	22
5.5	Koemateriaalit ja tutkimusohjelma	23
5.5.1	Tuhka 1	23
5.5.2	Tuhka 2	24
6	TULOKSET	25

6.1	Tuhka 1	25
6.1.1	Optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtotehiys.....	25
6.1.2	Puristuslujuus	27
6.1.3	Jäädytys-sulatuskestävyys	28
6.1.4	Routanousukoe	30
6.1.5	Yhteenveto	30
6.2	Tuhka 2	32
6.2.1	Maksimikuivairtotehiys ja optimivesipitoisuus	32
6.2.2	Puristuslujuus	33
6.2.3	Jäädytys-sulatuskestävyys	34
6.2.4	Yhteenveto	34
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	36
7.1	Tuhka 1	36
7.2	Tuhka 2	39
7.3	Ajatuksia ja kehitysehdotuksia.....	40
	LÄHTEET	42
	LIITTEET.....	44
1	Tuhkan 1 Proctor-kuvaajat	44
2	Tuhkan 2 Proctor-kuvaajat	47
3	Tuhkan 1 segregatiopotentiaali ja roudan syvyys	49
4	Tuhkan 2 segregatiopotentiaali ja roudan syvyys	54

1 ALKUSANAT

Tätä tutkimusta rahoittivat Ramboll Finland Oy, sekä Tuhkan 1 tuottaja.

Haluaisin kiittää ohjaajiani Anne Kasaria (TAMK) ja Harri Jyrävää (Ramboll). Prosessin alkupään kankeudet vaativat molemmilta kärsivällisyyttä, kun taas loppupuolen kaahaus suurta vaivannäköä. Kiitos kuuluu myös muutamalle Tampereen ammattikorkeakoulun opettajalle, jotka halusivat minut ulos oppilaitoksesta sydäntä lämmittävällä omistautumisella.

Olen laboratoriotöiden mittaan vaivannut useita Ramboll Finlandin ympäristögeotekniikan T&K-yksikön työntekijöitä. Erityiskiitokset esitän Ari Mäkiselle ja Tero Jokiselle käytännön neuvoista, sekä Terttu Salmelalle kahvin keitosta.

2 JOHDANTO

Työn tavoitteena oli tutkia kasavarastoinnin vaikutusta tuhkan routivuuteen ja hyödynnettävyyteen maanrakennuksessa massiivisena rakenteena. Kasavarastoinnin oletettiin vaikuttavan tuhkan jäädytys-sulatuskestävyyteen, segregatiopotentiaaliin perustuvaan routivuusluokitukseen ja puristuslujuuteen kielteisesti, mutta suuruusluokassa, jota voi mahdollisesti pyrkiä hallitsemaan varastointivesipitoisuudella ja tarvittaessa sideaineen käytöllä.

Tutkimusmateriaalina käytettiin kahta alkuperältään ja ominaisuuksiltaan eriävää puun ja turpeen seospolton lentotuhkaa. Kasavarastointia jäljiteltiin kostuttamalla kuivaa lentotuhkaa tiettyihin vesipitoisuuksiin ja säilyttämällä niitä huoneenlämmössä 7, 28 ja joissakin tapauksissa 70 vuorokauden ajan. Sideaineen vaikutusta tutkittiin valikoiden.

Tarkoituksena oli selvittää toisistaan selkeästi eroavien varastointivesipitoisuuksien vaikutukset tuhkan teknisiin ominaisuuksiin ja mahdollisesti saavuttaa suositeltavalle varastointivesipitoisuudelle jokin ohjeellinen suuruusluokka. Teknistä kelpoisuutta tutkittiin pääasiassa puristuslujuuden, jäädytys-sulatuskestävyyden sekä segregatiopotentiaalilla perusteella.

Koemateriaalina käytettyjen tuhkien lukumäärä jouduttiin rajaamaan kahteen ajankäytöllisistä syistä, vaikka ennakkoon oli syytä olettaa että näin suppea otanta saattaa hankaloittaa luotettavien johtopäätösten muodostamista. Sen lisäksi tutkimukseen valittiin nimeoimaan biopolttoaineiden ja turpeen poltosta syntyvää tuhkaa. Työssä ei kiinnitetä erityisen paljon huomiota tuhkarakentamisen ympäristöarvoihin vaan pääpaino on teknisessä kelpoisuudessa. Tekninen soveltuvuus on kuitenkin rakennusmateriaalin ehdoton piirre, jota ilman ekologiasta keskusteleminen ei ole järin hedelmällistä.

Tutkimukseen sisältyi sekä käytännön laboratoriokokeita, että kirjallisuustutkimusta. Kokeet tehtiin Ramboll Finland Oy:n Ympäristögeotekniikan T&K-laboratoriossa Luopiossa.

3 TUHKA TIERAKENTEISSA

3.1 Energiateollisuuden tuhkien hyötykäyttö

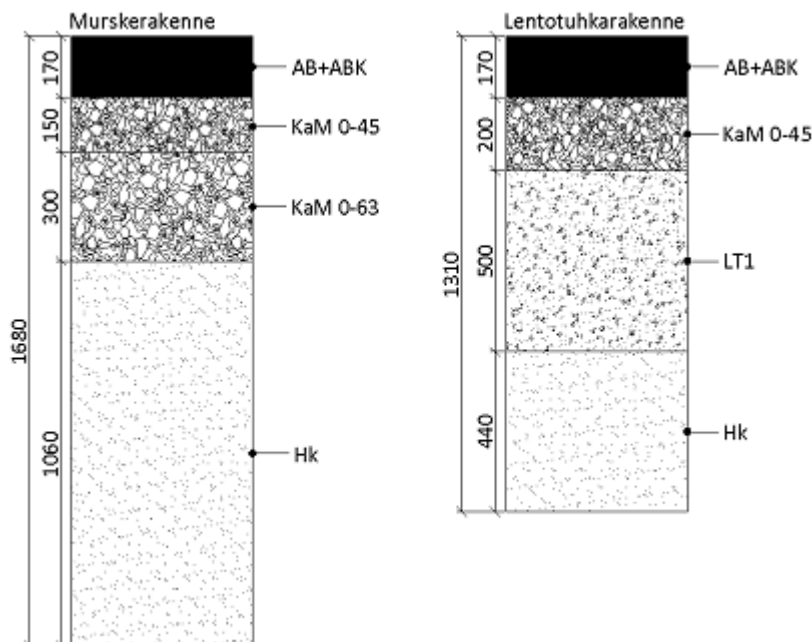
Vuonna 2006 tuhkaa syntyi Suomessa energiantuotannon sivutuotteena 1 600 000 tonnia ja määrä on tuskin ainakaan laskenut tähän päivään mennessä. Tästä määrästä noin miljoona tonnia syntyi kivihiltä käyttävissä laitoksissa, loput noin 600 000 tonnia puun ja turpeen poltosta. VTT:n arvion mukaan kivihilituhkasta hyötykättöön päätyy 50-80% ja puu-turvetuhkista noin 30%. Mahdollisia uusiokäyttökohteita ovat tie- ja kenttärakenteet sekä käyttö lannoitteena tai betoni- ja sementtiteollisuuden raaka-aineena. (Järvelä et al., 2009, 13,22.)

Tierakennushankkeiden arvioitiin vuonna 2006 kuluttavan vuosittain noin 40 miljoonaa tonnia kiviainesta, jonka käyttöä ei siis ole mahdollista kokonaan korvata tuhkillä (Eskola et al., 2008, 7). Paikallisesti sivutuotteiden käyttö voi sen sijaan tuottaa suurenkin hyödyn sekä taloudellisesti että ekologisesti. Hyötyvaikutus on erityisen korostunut kaupunkien läheisyydessä, joiden vierestä löytyy yleensä voimalaitos, mutta kiviaineksia saatetaan joutua tuomaan mittavankin välimatkan takaa. (Ramboll Finland Oy, 2012, 6.)

Tuhkaa voidaan hyödyntää maanrakentamisessa sellaisenaan massivisena tuhkarakenteena, seostettuna toisen sivutuotteen kanssa tai sideainemaisesti sementin osittaisena korvaajana esimerkiksi murskerakenteissa. Tässä työssä testattiin kasavarastoidun tuhkan hyödynnettävyyttä pelkästään massiivirakennetta silmälläpitäen. Massiivinen tuhkarakenne koostuu pelkästä tuhkasta tai sideaineella lujitetusta stabiloidusta tuhkasta. Rakenteen käyttö on teknisesti mahdollista jokaisessa tie- tai kenttärakenteen kerroksessa, kuluvia pintoja lukuunottamatta, mutta hyödyntäminen erityisesti ylemmissä kerroksissa edellyttää materiaalilta tiukkaa kelpoisuutta, joka ei täyty jokaisen tuhkan kohdalla.

Massiivisen tuhkarakenteen edut tavallisiin ratkaisuihin verrattuna ovat sekä teknisiä että ekologisia. Sopivalla tuhkalla on mahdollista rakentaa luja, laattamainen kerros, joka eristää tehokkaasti lämpöä, saavuttaa korkeita kantavuuslukemia ja on verrattain kevyttä kuljettaa ja työstää. Ympäristön kannalta hyöty tulee kahdesta lähteestä: Tavallisesti kaatopaikalle päätyvä sivutuote saadaan hyödynnettyä ja samalla säästetään neitseellisiä

kiviaineksia. Tuhkarakentamisen käsikirjassa annetaan kuvan 1 mukainen esimerkkiver-
tailu tavanomaisesta ja tuhkaa hyödyntävästä rakenteesta.



Kuva 1 Tavanomaisen ja massiivisen tuhkarakenteen kerrospaksuuksien vertailu (Kuva: Ramboll Finland Oy)

Esimerkin mukaisilla kerrosmitoituksilla saavutetaan identtiset laatusot ja koko raken-
teen paksuus pienenee noin 20% ja kiviainesta tarvitaan noin 60% vähemmän. (Ramboll
Finland Oy, 2012, 22-23.)

3.2 Tuhkan tuotteistaminen

Aikaisemmin tuhkan tuotteistamiseen liittyvä lupamenettely on ollut hankala aihe, koska
tuhkat on määritelty jätteeksi ja jätteen uusiokäyttö ei suinkaan ole yksioikoista (Ram-
boll Finland Oy, 2012, 9). Uusi jätelaki astui voimaan vappuna 2012 ja se sisältää tuhkien
tuotteistamista helpottavan määritelmän sivutuote. Lain mukaan asia tai esine ei ole jäte
vaan sivutuote, jos sen valmistaminen ei ole ollut tuotantoprosessin ensisijainen tarkoitus,
mutta se syntyy olennaisena osana prosessia. Lisäksi sivutuotteelta vaaditaan varma jat-
kokäyttötarkoitus, tekninen soveltuvuus siihen tarkoitukseen pienillä toimenpiteillä, sekä
ympäristökelpoisuus. (Jätelaki 646/2011, 2011, 5§.)

Uusi lainsäädäntö myös kannustaa ammattimaisia toimijoita uudelleenkäyttämään jät-
teensä sitomalla jätehuollolliset ratkaisut tiettyyn etusijajärjestykseen. Ensisijaisesti on

pyrittävä tuottamaan jätettä mahdollisimman vähän. Jäte, jonka syntyä ei voida ehkäistä, tulee ohjata uudelleenkäyttöön, kierrätykseen tai hyödynnettäväksi energiantuotannon polttoaineena. Loppukäsittelyyn tulee turvautua vain jos jäte ei sovellu hyödynnettäväksi millään muulla tavalla. (Ympäristöministeriö, 2012)

Haitta-ainepitoisuus ja niiden liukeneminen määräävät tuhkan ympäristökelpoisuuden. Raja-arvot tie- ja kenttärakenteiden materiaaleille on määritelty niin kutsutussa MARA-asetuksessa (Vna 591/2006). Taulukkoon 1 on koottu kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lentotuhkille alustavissa perustutkimuksissa käytettävät pitoisuuksien raja-arvot. Taulukkoon 2 on listattu laadunvalvontatutkimuksissa käytettävät liukoisuuden sallitut enimmäisarvot.

Taulukko 1 *Suurimmat sallitut energiantuotannon tuhkien haitta-ainepitoisuudet maarakentamisessa*

Haitallinen aine	Sallittu pitoisuus mg/kg kuiva-ainetta
PCB	1
PAH	20 peitetty / 40 päällystetty rakenne
Arseni	50
Barium	3000
Kadmium	15
Kromi	400
Kupari	400
Lyijy	300
Molybdeeni	50
Vadaniimi	400
Sinkki	2000

Taulukko 2 Suurimmat sallitut energiantuotannon tuhkien haitta-aineiden liukoisuudet maarakentamisessa

Haitallinen aine	Liukoisuus L/S = 10 l/kg	
	Peitetty rakenne (mg/kg)	Päällystetty rakenne (mg/kg)
DOC	500	500
Antimoni	0,06	0,18
Arseeni	0,5	1,5
Barium	20	60
Kadmium	0,04	0,04
Kromi	0,5	3
Kupari	2	6
Elohopea	0,01	0,01
Lyijy	0,5	1,5
Molybdeeni	0,5	6
Nikkeli	0,4	1,2
Vanadiini	2	3
Sinkki	4	12
Seleeni	0,1	0,5
Fluoridi (F ⁻)	10	50
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	1000	10000
Kloridi (Cl ⁻)	800	2400

Peitettyssä rakenteessa sivutuotetta hyödyntävä kerros on suojattu vähintään 10 senttimetrillä luonnon kiviainesta. Päällystetty rakenne on suojattu asfaltilla tai jollain muulla päällysteellä, jonka tyhjätila on enintään 5% (Säädös 403/2009, 2009). Taulukossa 2 Liukoisuus L/S = 10 l/kg tarkoittaa kerätyn vesinäytteen tilavuuden ja tutkitun kiinteän aineen massan suhdetta (Tarvainen, 2013, 11)

Puun ja turpeen poltossa syntyvät lentotuhkat ovat tyypillisesti laadultaan jonkin verran vaihtelevia, koska polttoainekomponentteja käytetään eri suhteissa tilanteesta riippuen. Geoteknisistä ominaisuuksista on kuitenkin mahdollista laatia viitekehys, jonka sisällä toimittaessa joitain yleistyksiä voidaan tehdä. Tuhkien laadusta voidaan myös tehdä voimalakohtaisia linjanvetoja. Suurien tuhkamäärien sijoittaminen tierakenteeseen vaatii aina huolellisia laboratoriotutkimuksia, joissa mahdollinen laadunvaihtelu otetaan huomioon ja korvataan esimerkiksi korottamalla sideaineen määrää. Aina ennen rakentamista on myös syytä varmistaa juuri käytössä olevan tuhkaerän ominaisuudet.

Energiantuotannon kuivat lentotuhkat ovat käytännössä kaikki ainakin jossain määrin lujittuvia niiden sisältämän aktiivisen kalkin vuoksi, joka reagoi vedessä muodostaen lujittavia yhdisteitä (Ramboll Finland Oy, 2012, 14). Puun ja turpeen seospolton tuhissa laadunvaihtelu on suurempaa kuin kivihiilituhkissa, mutta lujittumispotentiaali on yleisesti ottaen korkeampi.

3.3 Tuhkan varastointi

Kuivan lentotuhkan ominaisuudet muuttuvat varastoinnin aikana aina, mutta muutosten suurusluokka riippuu olosuhteista. Tuhkan kastuminen käynnistää lujittumisreaktion ja tarpeeksi suuri vesimäärä saattaa johtaa siihen, että materiaalin lujittumispotentiaali hukataan kokonaan jo varastoinnin aikana. Varastovaihtoehdot voidaan jakaa vesipitoisuuden perusteella kolmeen kategoriaan: Kuiva, kontrolloitu kostutus ja hallitsematon kasavarastointi. Tuhkan pitäminen kuivana vaatii jonkinlaisen rakennuksen, siilon, säiliön, tai tiiviin peitteen auman suojaksi, sekä toimenpiteitä, joilla ilmankosteuden ja auman alta tulevan veden imeytyminen estetään. Kuivavarastoinnissa tuhkan ominaisuudet säilyvät parhaiten, mutta se on myös annetuista tavoista kallein, etenkin jos tuhkaa säilytetään suuremman kokoluokan rakennuskohteita varten tarvittava määrä. (Ahlqvist et al., 2007, 2.)

Finncao Oy:n raportissa vuodelta 2005 kerrotaan että lentotuhkan routa- ja kuormituskestävyys paranee kasavarastoinnin aikana, koska se aiheuttaa hienojakoisten partikkelien yhteenliittymistä ja muuttaa materiaalin rakeisuutta karkeampaan päin (Finncao Oy, 2005, 3-4). Nykyään yleinen käsitys kuitenkin on, että kasavarastointi useimmiten lähinnä heikentää lentotuhkan maanrakennusteknisiä ominaisuuksia (Ramboll Finland Oy, 2012, 51)(Ahlqvist et al., 2007, 2)(Ramboll Finland Oy, julkaisemattomat tulosraportit). Teoria karkeamman jakeen alhaisemmasta routivuudesta pitää toki paikkansa, kuten kohdassa 4.2 tullaan selittämään. Oma arvaukseni on, että kasatuhkan ominaisuudet ovat kuivaan olomuotoon verrattuna paremmat vain niissä tapauksissa, kun lentotuhka ei ole alun alkaenkaan mainittavan hyvin lujittuvaa.

Rakennettuani myytin kuivan lentotuhkan yliveraisuudesta, on syytä oikaista muutama seikka. Kirjaimellisesti kuiva tuhka suoraan prosessista tai varastosta ei sellaisenaan ole aina sopiva tuote massiiviseen tierakenteeseen. Erityisesti voimakkaasti lujittuvien tuhkien lujittumisreaktio voi aiheuttaa huomattavan lämpötilan nousun ja tilavuuden kasvun, jonka lopputuloksena on pahimmillaan löyhä rakenne, jos materiaali tiivistetään kesken reaktion. Tuhkien lujittumisreaktioiden kestoissa on eroja ja suositeltu tiivistämisaikankohda sijoittuu tuhakohtaisesti muutaman tunnin ja useamman vuorokauden välille (Jyrävä, H., Jokinen, T. henkilökohtainen tiedonanto 17.10.2013). Kuiva tuhka on myös voimakkaasti pölyävää hienojakoisuutensa vuoksi ja on siksi merkittävä työturvallisuusongelma.

Maanrakennuskohteisiin on monissa tapauksissa hankalaa saada tuoretta tuhkaa, sillä siinä missä rakennustoiminta sijoittuu loppukevääseen, kesään ja alkusyksyyn, pääasiallinen tuhkan tuotanto tyypillisillä polttoainekomponenttisuhteilla ja kattilakuormituksilla painottuu talveen. Koska kuivavarastointi vaatii puitteet, joita useimmilla energiantuottajilla ei ole, selkein ja yksinkertaisin suositeltava varastointimalli lienee toistaiseksi kasavarastointi peitettynä ja hallitusti kustutettuna. Menetelmä on taloudellinen, koska erillisiä rakennuksia ei tarvita ja oikeaoppisella vesipitoisuuden valinnalla ja toiminnan ohjeistuksella on mahdollista minimoida maanrakennusteknisten ominaisuuksien menetys.

Hallitussa kasavarastoinnissa vesipitoisuus sijoitetaan selvästi alle optimivesipitoisuuden, jotta sen lopullinen säätäminen työkohteessa on mahdollista, mutta niin märkeksi että työvaiheiden aikana ei ilmene pölyämishaittoja. Sopiva vesipitoisuus vaihtelee tyypillisesti 15 ja 20% prosentin välillä tuhkalaadusta riippuen. Kustutettu tuhka läjitetään aumalle tiivistämättä ja suojataan jonkinlaisella muovisella peitteellä jokapuolelta niin tiukasti, että tuhkan vesipitoisuus ei mainittavasti nouse tai laske ympäristön olosuhteiden takia. (Ahlqvist et al., 2007, 13-14.)

Kasalla olevan tuhkan kuormittamista tulee välttää, koska se voimistaa lujittumisreaktiota ja aiheuttaa materiaalin paakkuuntumista. Nykyisellä käytännöllä varastokasat tiivistetään lähes poikkeuksetta tilan säästämiseksi. Paakkuuntuminen ei tuota karkeammalle jakeelle tyypillisiä etuja, vaan päinvastoin heikentää tuhkan käyttömahdollisuuksia. Esimerkiksi sideaine ei sekoitu epätasaiseen materiaaliin homogeenisesti, ellei tuhkaa murskata tai seulota ensin. (Jyrävä, H. henkilökohtainen tiedonanto 10.12.2013.)

Varastointivesipitoisuuden valinnassa saattaisi olla kannattavaa pyrkiä huomioimaan veden lisäyksen tarve käyttövaiheessa. Jos tuhka voidaan varastoida ilman suurta laadullista hävikkiä esimerkiksi siten, että se on valmiiksi optimivesipitoisuudessaan, vesipitoisuustason säätäminen ei ole enää rakennettaessa tarpeellista ja kokonainen työvaihe voidaan poistaa listalta. Toisaalta, vesipitoisuuden mitoittaminen varastovaiheessa liian lähelle lopullista tasoa vähentää liikkumavaraa rakennusvaiheessa.

4 GEOTEKNISET OMINAISUUDET

4.1 Routa ja routivuus

Routimisilmiö voidaan havaita paikoissa, joissa maa on huonosti vettä läpäisevää, vedellä kyllästettyä ja riittävän alhaisessa lämpötilassa. Jäätyessään maa-aineksen veden tilavuus kasvaa ja näin ollen myös maakerroksen tilavuus kasvaa. Tästä käytetään nimitystä routiminen. Ilmiö on sikäli takaisinkytketty, että kasvava tilavuus aiheuttaa maakerrokseen imun, jonka vaikutuksesta lisää vettä imeytyy ja jäätyy, ja lopulta jäälinsejä muodostuu. Kapillaarista imua voidaan pitää yhtenä pääasiallisina routimisen kriteerinä, mutta maakerroksen niin sanotut luonnolliset kapillaariset ominaisuudet eivät riitä sellaisenaan selittämään routimista, vaan pohjimmiltaan ilmiön taustalla on jäätyminen aiheuttama imu. (Jääskeläinen, 2011, 88-89.)(Jyrävä, 1989, 22-23.)

Routimisen seurauksena jäätymiskohtaa ympäröivän maa-aineksen on liikuttava, joka aiheuttaa maan pinnalla havaittavan routanousun. Tierakenteiden kannalta asia on merkittävä luonnollisesti siksi, että routanousu aiheuttaa toisinaan melko vakavaakin epätasaisuutta tiessä ja voi vaurioittaa päällysteitä pysyvästi. Jäälinseistä sulava vesi puolestaan heikentää tierakenteen kantavuutta keväisin ja voi johtaa kelirikoon sorateilla. Maa-ainesten routivuutta arvioidaan pääsääntöisesti kahden kriteerin perusteella: rakeisuus ja kapillaarisuus. (Jääskeläinen, 2011, 88, 91.) Tuhkien kohdalla nämä kaksi parametria eivät pelkästään riitä luotettavaan routivuuden arviointiin.

4.2 Rakeisuus

Kivennäismaalajit luokitellaan raekoostumuksen ja sen osoittaman maalajitteen mukaan. Geotekniset maalajinimet on esitetty taulukossa 3.

Mitä routivuuteen tulee, lajitteet hiekka ja sora määritellään teoriassa routimattomiksi. Lisäksi, niin kutsutun Casagranden kriteerin mukaan, maa on routivaa jos sen sisältämien alle 2 mm rakeiden massasta yli 3 prosenttia on halkaisijaltaan pienempiä kuin 0,02 mm.

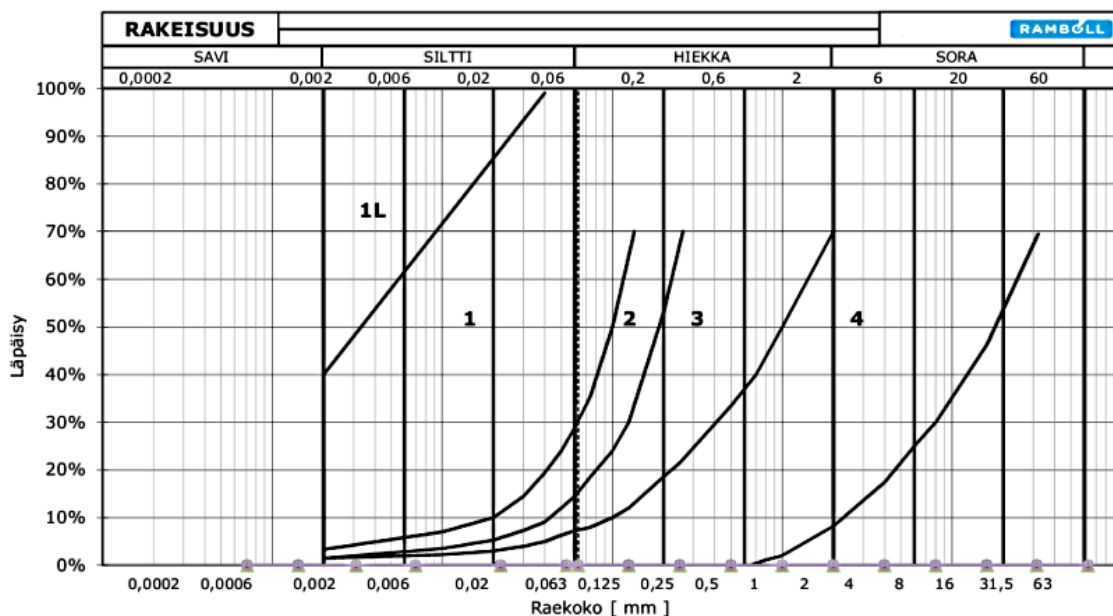
Taulukko 3 Maalajitteiden raekokorajat

Maalajin nimi	Rakeiden läpimitta d (mm)
Savi	< 0,002
Siltti	0,002 < d < 0,06
Hiekka	0,06 < d < 2
Sora	2 < d < 60

Routivuuden tutkiminen pelkän rakeisuuden kannalta on konstikasta juuri siksi, että jo jokseenkin mitätön määrä hienoa ainesta mahdollistaa routimisen.

Moreeni on yleisin maalaji Suomessa ja sen arvoidaan kattavan maan pinta-alasta 48% (Eskola et al., 2008, 11). Maa-ainesta nimitetään moreeniksi, jos se sisältää vähintään 5% sekä soraa, että silttiä. Casagranden kriteerin mukaan noin puolet Suomen maaperän kivennäismaasta siis on suurella todennäköisyydellä routivaa (Jääskeläinen, 2011, 24, 93).

Kuvassa 2 on esitetty raekokojakaumaan perustuvat routarajat. Kuvassa Alue 1L kuvaa lievää routivuutta ja 1 routivuutta. Alueet 2, 3 ja 4 ovat routimattomia. Jos maa-aineksen rakeisuuskäyrä leikkaa rajapinnan 1L tai 1 oikealta vasemmalle, on materiaali routivaa rakeisuuteen perustuvan määritelmän mukaan. Toisin sanottuna, jos näytteen massasta on esimerkiksi 30% tai enemmän läpimitaltaan 0,063 millimetriä tai pienempää, materiaali on routivaa. (Rakennustietosäätö, 2006) Tämä teoria ei kuitenkaan sovellu tuhille erityisen luotettavasti.

**Kuva 2** Routivuusrajat raekokojakauman mukaan (Kuva: Ramboll Finland)

4.3 Kapillaarisuus

Nesteen nousemista putkimaista rakennetta pitkin, vastoin painovoimaa, kutsutaan kapillaari-ilmiöksi. Ilmiön taustalla on kaksi voimaa; adheesio ja koheesio. Adheesiolla tarkoitetaan joidenkin nesteiden taipumusta tarttua kappaleiden pintaan. Koheesio taas viittaa nesteen omien molekyylien väliseen vetovoimaan, jonka tunnettu seuraus on pintajännitys. Kapillaari-ilmiö saavuttaa ekvivalenttitasonsa kun vesipatsas on massaltaan niin suuri että maan vetovoima ja kapillaarinen imu ovat yhtä suuret. Tästä syytä kapillaarinen nousukorkeus on teoriassa kääntäen verrannollinen putkirakenteen halkaisijaan, sillä mitä korkeampi putki on, sitä korkeamman patsaan tietty massa nestettä voi muodostaa.

Maa-aineessa kapillaarikäytäviä muodostavat rakeiden väliin jäävä tila ja nyrkkisääntönä voidaan pitää, että mitä pienempi raekoko, sen korkeampi kapillaarisuus. Tasarakeisten aineiden kapillaarinousu h_c voidaan määrittää yhtälöllä 1.

$$h_c = \frac{27}{d} \quad (1)$$

missä d = rakeiden halkaisija (mm)

Yhtälöllä 1 saadaan tulokseksi esimerkiksi että soralajitteen alarajalla $d=2$ mm, kapillaarinousu on 13,5 mm. Yhden metrin ylittävän h_c -arvon saavaa maa-ainesta pidetään routivana. Todellisuudessa luonnon maa-aines on kuitenkin rakeisuudeltaan vaihtelevaa ja hienompi aines täyttää suurien rakeiden välejä, nostaten kapillaarisia taipumuksia merkittävästi. Myös tiiveysasteella on vaikutuksensa. Luonnon maalajeja hyödynnettäessä kapillaarisuus täytyy tutkia käytännössä jokaisen näytteen kohdalla esimerkiksi mittaamalla imeytymiskorkeus. (Jääskeläinen, 2011, 38-40, 91.)

4.4 Optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtoteiheys

Materiaalien tiivistymisominaisuuksia tutkitaan parannetulla Proctor-sullonnalla. Menetelmällä selvitetään materiaaleille suhteellinen yksilökohtainen optimivesipitoisuus (w_{opt}), jossa maksimikuivairtoteiheys (ρ_{dmax}) saavutetaan. Toisin sanottuna, jos ajatellaan maa-

aineksen kiinteän osion ja veden olevan erillisiä yksiköitä, optimivesipitoisuus on se olosuhde, jossa suurin mahdollinen kuiva-aineen tiheys saavutetaan.

Proctor-sullonnassa materiaalia tiivistetään Proctor-vasaralla muottiin viitenä kerroksena. Suomessa käytetään niin kutsuttua parannettua Proctor-sullontaa, jossa tiivistystyömäärä on 25 iskuja kerrosta kohden. Valmistettu kappale tasataan muotin mukaiseen tilavuuteen, punnitaan ja kuivataan, jotta vesipitoisuus saadaan selville. Kappaleen kuivairtitiheys lasketaan sen kuivamassan ja muotin tilavuuden perusteella. Käytännössä optimivesipitoisuuden selvittäminen vaatii kokonaisen Proctor-sarjan, johon sisältyy kolmesta viiteen sullontaa eri vesipitoisuuksissa. (Jääskeläinen, Rantamäki, Tammirinne, 2004, 88-89.)

Vaikka Proctor-kokeen tavoitteena on puhtaasti laskennallinen lopputulos, menetelmää voi tukea vähän havainnollisemmilla keinoilla, sillä materiaalit reagoivat tiivistykseen vesipitoisuudestaan riippuen eri tavoin. Liian märkänä näytteestä erottuu huomattava määrä vettä ja Proctor-vasaran lyönti jättää pintaan selvän kuopan. Kuivan puolella tiivistyspinta on tasainen, mutta muotin sisäpintään ei jää kosteutta. Optimivesipitoisuudessaan, tai ainakin hyvin lähellä sitä, materiaalista eroaa vettä sen verran että muotin pinnan voidaan sanoa "kostuvan". Näitä huomioita voidaan käyttää hyväksi sopivan vesipitoisuussarjan kartoittamisessa, mutta myös vähentää sullontasarjaan vaadittavia kappaleita, jos optimivesipitoisuus löytyy havaintojen perusteella jo esimerkiksi toisella yrittämällä. Tässä tapauksessa täytyy tosin olla varmuus siitä että tutkittava materiaali käyttäytyy kuvatulla tavalla, sillä poikkeuksiakin on.

Parannetun Proctor-sullonnan tiiveystaso ei ole saavutettavissa työkohteessa kohtuullisella vaivalla, ja siksi koekappaleiden todellisten olojen vastaavus täytyy varmistaa alennetulla työmäärällä. Asiaa voi lähestyä joko pyrkimällä johonkin tiettyyn prosentuaaliseen tiiveyteen, esimerkiksi 90%, Proctor-kokeen tuloksesta tai työmäärän voi vakioda. Jälkimmäisen menetelmän etuna on, että sitä kautta voi samalla saada tietoa materiaalien työstettävyydestä, kun sama työmäärä tuottaa mahdollisesti erilaisia tiiveysasteita.

Alennettu työmäärä edellyttää materiaalilta optimia korkeamman vesipitoisuuden, koska ihanteellinen vesipitoisuus on sidottu tiivistystyömäärään. Kokemusperäisesti hyväksi todettu vesipitoisuus esimerkiksi koekappaleilla, jotka tiivistetään viidessä kerroksessa, kymmenen iskuja kerrosta kohden, on 110%:a optimivesipitoisuudesta. Tällöin puhutaan optimaalisesta vesipitoisuudesta.

4.5 Segregaatiopotentiaali ja routimiskerroin

Tähän päivään mennessä maalajien routivuuskriteerejä on kartoitettu yli sadan teorian voimin (Chamberlain, 1981, 1). Näistä segregaatiopotentiaaliteoria on noussut hallitsevaksi lähestymistavaksi (Pesu, 2010, 23). Teoria kuvaa koemateriaalin taipumusta muodostaa jäälinsskejä routarajan tuntumassa sillä oletuksella, että veden virtausnopeus jäälinssin muodostumistasolle on suoraan verrannollinen sen vyöhykkeen lämpötilan muutokseen eli lämpötilagradienttiin (Saarinen, 2008, 36). Mitä suurempi näytteen segregaatiopotentiaaliarvo on, sitä voimakkaammin routivaa se on.

Segregaatiopotentiaali SPo määritetään matemaattisesti kaavan 2 mukaan,

$$SPo = \frac{v}{gradT} = \frac{h \cdot Z}{t \cdot (0 - T)} \quad (2)$$

missä

- SPo = Segregaatiopotentiaali (mm^2/Kh)
- v = veden virtausnopeus (mm/h)
- $gradT$ = jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti
- h = routanousu aikavälillä t
- t = aikaväli (h)
- Z = routan syvyys (mm)
- T = maanpinnan lämpötila

Segregaatiopotentiaalın määrittämiseen käytetään routanousukoetta, jossa koekappale on toisesta päästään sula ja kosketuksissa veden kanssa ja toisesta päästään jatkuvan jäädytyksen alaisena. Kokeen aikana kappaleesta mitataan korkeuden muutosta, aikaa ja kylkilämpötiloja gradientin selvittämistä varten. Routanousukoe esitellään tarkemmin kohdassa 5.3. Mainitsen yhtälön lähinnä kurioisiteettina, sillä käytin työssäni segregaatiopotentiaalın laskemiseen Excel-makroa, jonka yksityiskohdat ovat luonnollisesti liikesalaisuus. Routakokeen tulosten arvioinnissa käytettiin taulukon 4 mukaista logiikkaa (Konrad, 1980, 324).

Taulukko 4 Segregaatiopotentiaalin perustuva routivuusluokitus

Segregaatiopotentiaali (mm ² /Kh)	Routivuusluokitus
<0,18	Routimaton
0,18 - 0,72	Lievästi routiva
0,72 - 3,6	Routiva
3,6 - 7,2	Voimakkaasti routiva
7,2 - 18	Erittäin voimakkaasti routiva
>18	Äärimmäisen voimakkaasti routiva

4.6 Jääditys-sulatuskestävyys

Jääditys-sulatuskokeessa vedellä kyllästettyjä koekappaleita sulatetaan ja jäädytetään 12 kertaa. Menetelmällä pyritään jäljittelemään oikean tierakenteen olosuhteita, missä materiaali joutuu kosketuksiin veden kanssa, jäätyy talvella ja sulaa taas. Siinä missä routanousukoe kuvaa materiaalin taipumusta muodostaa linssejä vain yhden jäätymisen ajan, jääditys-sulatuskestävyyden perusteella voidaan todeta jotain materiaalin pitkäaikaiskestävyydestä. Monet routanousukokeessa routimattomaksi todetut koemateriaalit saattavat heiketä merkittävästi jääditys-sulatuskokeen seurauksena. (Ramboll Finland Oy, 2012, 15.) Kokeen tulokset kuvaavat materiaalin käyttäytymistä pahimmissa mahdollisissa olosuhteissa, sillä koekappaleet kyllästyvät sulatusvaiheessa vedellä niin pitkälti kuin kapillaarinen imu sen mahdollistaa. Todellisessa tierakenteessa sen sijaan veden ainakin osittainen poistuminen saattaa olla järjestetty tai sen imeytyminen estetty kokonaan.

4.7 Puristuslujuus

Tässä julkaisussa puristuslujuudella tarkoitetaan yksiaksiaalista puristuslujuutta. Arvo todennetaan laitteella, joka puristaa päistään tasattua koekappaletta tasaisella nopeudella 1 mm/s ja tallentaa muutokset voimassa sekä kappaleen korkeudessa tietyin väliajoin. Puristuslujuus on se maksimaalinen voima, jonka kappaleeseen saattaa kohdistaa ilman että se murtuu. Arvo ilmoitetaan paineena (pascal), joka lasketaan kokeessa saavutetun suurimman puristusvoiman ja koekappaleen puristuspuunnan pinta-alan osamääränä.

4.8 Tekninen luokitus

Ramboll Finland Oy käyttää tuhkien soveltuvuuden luokitteluun Tuhkarakentamisen käsikirjassa annettua järjestelmää (Ramboll Finland Oy, 2012, 17), jossa materiaalille määritellään mahdolliset käyttökohteet sen geoteknisten ominaisuuksien perusteella. Luokittelu on esitetty - mukautettuna koskemaan vain lentotuhkia - taulukoissa 5 ja 6.

Taulukko 5 *Lentotuhkan käyttöluokkien tekniset vaatimukset*

Käyttöluokka	Puristuslujuus (MPa)	J/S-puristuslujuus (%)	Routivuus	Lujittuminen
LT 1	2	> 80	Routimaton	Kyllä
LT 2	1	> 70	Routimaton	Kyllä
LT 3	0,5	< 50	Lievästi routiva	Kyllä
LT 4	-	-	Routiva	Ei vaatimusta

Taulukko 6 *Lentotuhkan käyttökohteet teknisen luokittelun mukaan*

Käyttöluokka	Käyttökohteet
LT 1	Kantavan kerroksen alaosa, jakava kerros
LT 2	Jakava kerros, suodatinkerros
LT 3	Suodatinkerros, pengeri
LT 4	Penger, täytöt, putkikaivantojen arinat ja täytöt

Taulukossa 5 puristuslujuudella tarkoitetaan 1-aksiaalista lujuutta, jonka koekappale saavuttaa 28 vuorokauden lujittumisajassa. J/S-puristuslujuus on täyden jäädytys-sulatuskokeen läpikäyneen koekappaleen puristuslujuus alkuperäiseen nähden. Oletetaan että koekappale jostakin tuhkasta saavuttaa 28 vuorokauden lujittumisen jälkeen puristuslujuuden 2 MPa, täytyy samasta tuhkasta tehdyn jäädytys-sulatuskappaleen lujuus kokeen lopussa olla vähintään 1600 MPa (80%), jotta materiaali saavuttaa näiden kahden parametrin perusteella käyttöluokan LT 1.

5 MENETELMÄT

5.1 Vesipitoisuus

Geotekninen vesipitoisuus (tekstissä käytetään vain ilmaisua vesipitoisuus) kuvaa näytteen sisältämän veden ja kuiva-aineen massojen suhdetta. Vesipitoisuus selvitetään kuivattamalla punnittua näytettä 105°C lämpötilassa. Vesipitoisuus lasketaan kaavalla 3

$$w = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100\% \quad (3)$$

missä m_w on näytteen massa märkänä ja m_d kuivatuksen jälkeen.

5.2 Koekappaleiden valmistus

Puristuslujuus- sekä jäädytys-sulatuskoekappaleet valmistettiin automaattisella Proctor-sulloimella muottiin, jonka tilavuus oli 948 cm³. Routakoekappaleet tiivistettiin käsivasaralla 840 cm³ muottiin.

Koekappaleiden tiivistystyömääräksi päätettiin 10 iskua jokaista viittä kerrosta kohden ja vesipitoisuudeksi määriteltiin 110% materiaalikohtaisesta optimista.

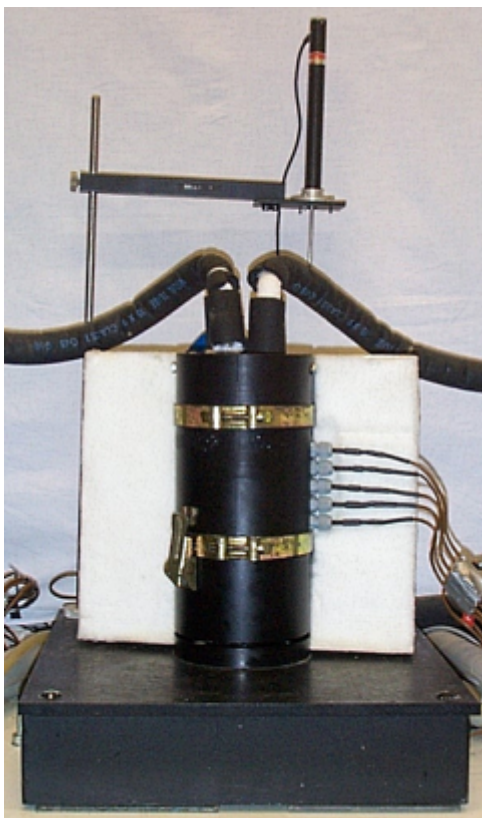
Kaikkien kappaleiden annettiin lujittua huoneenlämmössä 28 vuorokautta ennen koestamista.

5.3 Routanousukoe

Routanousukokeessa koekappaleen yläosaa jäädytetään (-3°C) ja alaosa pidetään sulana (1°C). Ennen jäädytyksen aloittamista kappale kyllästetään vedellä, yleensä yli yön, jonka jälkeen syöttöveden paine lasketaan tasolle, josta se kulkeutuu koekappaleeseen routimismuotoon liittyvän ja kapillaarisen imun seurauksena. Kyllästämisen aikana koekappalee-

seen kohdistetaan 20 kPa kuorma ja lasketaan kokeen ajaksi noin kolmeen kilopascaliin. Varsinainen koe kestää tavallisesti 3-6 vuorokautta, jonka aikana data logger mittaa kappaleen kylkilämpötiloja, routanousua ja koeympäristön lämpötilaa puolen tunnin intervalleissa.

Routakoelaitteisto on esitetty kuvassa 3. Kuvassa näkyy testisellin yläpuolella routanousua mittaava anturi (kiinnittämätön), sekä lämpötila-antureiden johdot. Selli eristetään polystyreenilieriöllä. Koelaitteisto on sijoitettu eristettyyn kaappiin, johon johdetaan viileää ilmaa kokeen ajan.



Kuva 3 Routakoelaitteisto

5.4 Jäädytys-sulatuskoe

Jäädytys-sulatuskoe tehdään VTT:n testiehtotelman mukaisesti (Tien rakennekerroksissa käytettävän hydraulisesti sidotun materiaalin pakkas-sulamiskestävyyskokeen suoritus). Koekappale asetetaan astiaan kapillaarimaton päälle, jossa se imee itseensä vettä neljän tunnin ajan. Jäädyttäminen tapahtuu pakastimessa -18°C lämpötilassa noin 16 tunnin ajan, jonka jälkeen koekappale nostetaan kapillaarimatolle sulamaan. Jäädytys-sulatussyklejä

kuuluu kokeeseen yhteensä 12. Lopulta kappaleen kunto arvioidaan ja puristuslusjuus koetetaan, jos kappale on pysynyt niin hyvin muodossaan, että se on järkevää.

5.5 Koemateriaalit ja tutkimusohjelma

Tutkimuksessa käsiteltiin kahden eri voimalaitoksen turpeen ja puun seospoltosta syntyvää kuivaa lentotuhkaa.

Tuhkien kasavarastoinnin jäljittely toteutettiin punnitsemalla materiaalia muovikassiin ja lisäämällä vettä halutun vesipitoisuuden vaatima määrä. Varastointi tapahtui huoneenlämmössä, eristämättömässä muovilaatikossa, siten että samassa astiassa oli näytekasveja kymmeniä. Tuhkaa ei kuormitettu varastoinnin aikana ja veden haihtumista rajoitettiin peittämällä laatikko. Varastoinnista käytetään tässä työssä myös nimitystä vanhennus.

Sideaineena käytettiin Finnsementti Oy:n Plussementtiä (lyhennetään PlusSe).

5.5.1 Tuhka 1

Tuhkalle 1 ohjelmoitiin taulukon 7 mukaiset varastointiolosuhteet ja sideainemäärät. Stabiiloinnin vaikutus testattiin vain 28 päivän ikäisellä materiaalilla, kuitenkin jokaisessa vesipitoisuudessa. Polttoainekomponenttien suhdetta ja näytteenoton aikaista kattilakuormitusta ei annettu.

Taulukko 7 *Tuhkan 1 varastointiolosuhteet ja sideainemäärät*

Vanhennusaika (d)	7/28/70
Vanhennusvesipitoisuus (%)	20/40/60
Sideaineen määrä (% kuiva-aineen massasta)	2/4/6

Tuhka 1 loppui kesken tutkimuksen, ja siksi sideaineen vaikutus jouduttiin tutkimaan kokonaan uudella tuhkaerällä. Myöhemmin toimitetusta materiaalista käytetään merkkiä Tuhka 1b. Sideaineen käyttöä pyrittiin tutkimaan määrillä, jotka ovat taloudellisesti kilpailukykyisiä ja ympäristön kannalta suotuisia. Sementin määrä rajoitettiin 6%:iin tuhkan kuivamassasta, mutta kannattava enimmäisosuus määräytyy aina tapauskohtaisesti riipuen rakennuskohteen kokoluokasta ja siihen liittyvistä kuljetusmatkoista.

Jokaisen materiaalin käsittely aloitettiin Proctor-sullonnalla, joko kokonaisella sarjalla tai tasotarkistuksella jos joitakin oletuksia saatettiin tehdä. Optimivesipitoisuuden perusteella näytteistä valmistettiin koekappaleet routakokeeseen, jäädytys-sulatuskokeeseen sekä puristuslujuuden testaukseen. Pääosin kaikki kolme koekappaletta valmistettiin, lukuunottamatta 70 vuorokautta vanhennettu tuhka, josta testattiin puristuslujuus ja lisäksi segregatiopotentiaali vesipitoisuuksissa 20 ja 60 %.

5.5.2 Tuhka 2

Tuhkan 2 näytteet otettiin prosessista, jossa kattilatehon keskiarvo oli 245 MW (75% maksimitehosta), vaihdellen välillä 109 - 305 MW. Prosessin kesto oli 12 tuntia ja polttainesten suhde 35% puuta ja 65% turvetta.

Tuhkan 2 tutkimusohjelma on esitetty taulukossa 8. Jälleen, sideaineen vaikutus tutkittiin 28 vuorokautta vanhennetulla materiaalilla, mutta vain vesipitoisuudessa 35%.

Taulukko 8 *Tuhkan 2 varastointiolosuhteet ja sideainemäärät*

Vanhennusaika (d)	7/28
Vanhennusvesipitoisuus (%)	20/35/50
Sideaineen määrä (% kuiva-aineen massasta)	3/6/9

6 TULOKSET

6.1 Tuhka 1

6.1.1 Optimivesipitoisuus ja maksimikuivairtoteiheyys

Tulokset tuhkan 1 Proctor-sullontasarjoista on listattu taulukoihin 9 ja 10. Pelkkien maksimikuivairtoteiheyksien kehittyminen vanhennusvesipitoisuuden ja sideainemäärän perusteella on esitetty graafisesti kuvassa 4. Yksityiskohtaisemmat Proctor-käyrät ovat nähtävillä opinnäytetyön lopussa liitteessä 1. Taulukoihin on merkitty myös materiaalien vesipitoisuus varastointiajan lopussa. Näennäinen kuivuminen varastointiajan aikana johtuu lujittumisreaktiosta, jossa osa lisätystä vedestä kulutetaan, sekä tavallisesta haihtumisesta, jota on pyritty rajoittamaan, mutta ei estetty kokonaan. Lujittumisreaktion aiheuttama lämpeneminen myös edistää veden haihtumismahdollisuuksia. Viidenteen sarakkeeseen "Tiivistysvesipitoisuus" on koottu koekappaleille määrättyt optimaaliset vesipitoisuudet perustuen kohdassa 4.4 selitettyyn periaatteeseen.

Taulukko 9 Tuhkan 1 optimivesipitoisuudet ja maksimikuivairtoteiheydet 7, 28 ja 70 vuorokauden vanhennuksen jälkeen

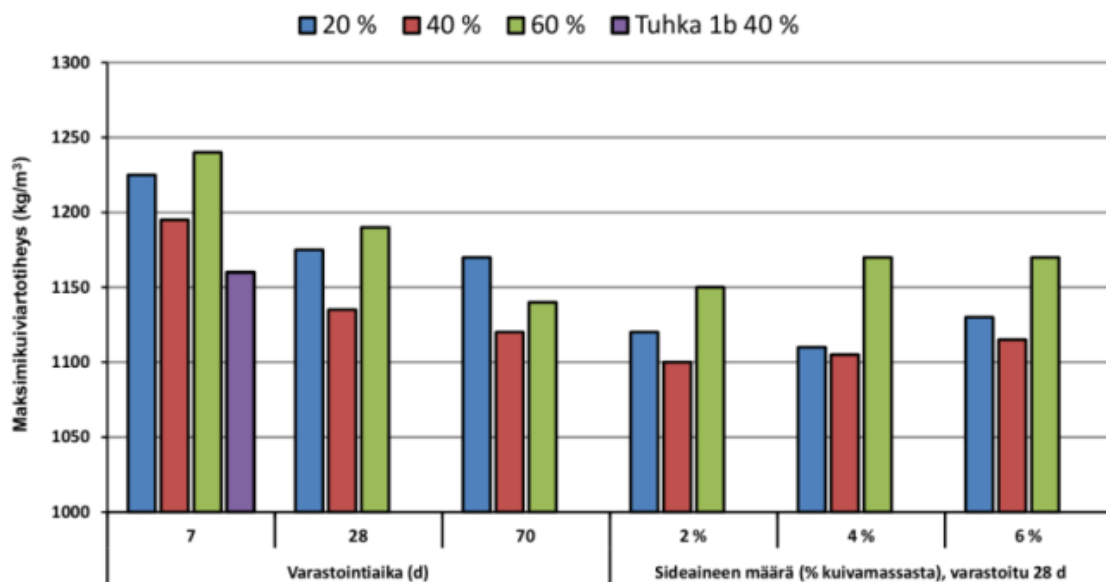
Vanhennusvesipitoisuus (%)	Vesipitoisuus varastoinnin lopussa (%)	Maksimikuivairtoteiheyys (kg/m ³)	Optimivesipitoisuus (%)	Tiivistysvesipitoisuus (%)
Vanhennettu 7 vuorokautta				
20	18	1225	39	43
40	38	1195	40,5	44,5
60	58	1240	37	42
Tuhka 1b 40	38	1160	42	-
Vanhennettu 28 vuorokautta				
20	16	1175	41	45
40	36	1135	45	49
60	56	1190	41	45
Vanhennettu 70 vuorokautta				
20	15	1170	43	47
40	33	1120	46,5	51
60	53	1140	47	51

Stabiloinnin vaikutuksen tutkimiseen käytetty tuhka 1b menetti vesipitoisuudestaan myöskin 4% 28 vuorokauden vanhennuksen seurauksena jokaisessa valitussa varastointivesipitoisuudessa.

Taulukko 10 Sideainelisällä saavutetut optimivesipitoisuudet ja maksimikuivairtoteiheydet

Vanhennusvesipitoisuus (%)	Vesipitoisuus varastoinnin lopussa (%)	Maksimikuivairtoteiheys (kg/m ³)	Optimivesipitoisuus (%)	Tiivistysvesipitoisuus (%)
Tuhka 1b varastoitu 28d, sideainetta 2% materiaalin kuivamassasta				
20	16	1120	46	51
40	36	1100	48,5	53
60	56	1150	41,5	46
Tuhka 1b varastoitu 28d, sideainetta 4% materiaalin kuivamassasta				
20	16	1110	46	51
40	36	1105	48,5	53
60	56	1170	44	48
Tuhka 1b varastoitu 28d, sideainetta 6% materiaalin kuivamassasta				
20	16	1130	44	48
40	36	1115	46	51
60	56	1170	43,5	48

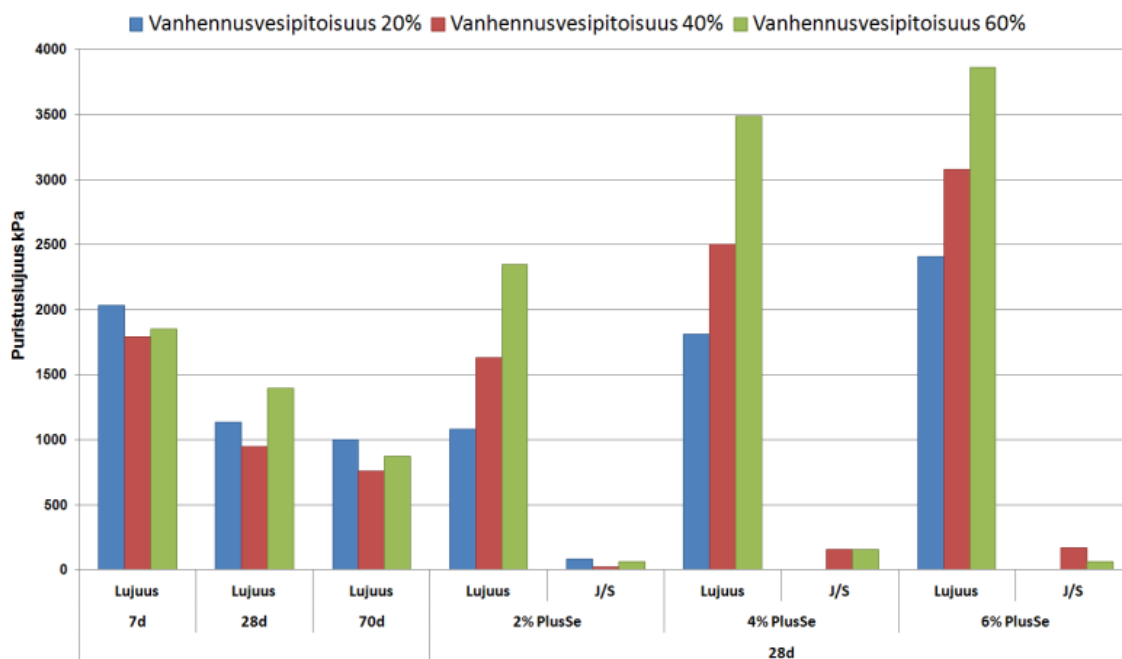
Taulukoiden arvot on poimittu materiaalien saavuttamilta Proctor-käyriltä ja pyöristetty: Maksimikuivairtoteiheydet lähimpään viiteen kg/m³ ja optimivesipitoisuudet 0,5 %:iin. Maksimikuivairtoteiheyksiin liittyy pieni laskennallinen epätarkkuus, joka käytännössä aiheuttaa noin ± 10 kg/m³:n toleranssin, koska suhteellisen mitätön massa punnitusvaiheessa aiheuttaa heiton tiheydessä. Virhemarginaali syntyy siitä materiaalikohtaisesta tarkkuudesta, jolla kappale on mahdollista tasata muotin tilavuuteen. Tämä on syytä ottaa huomioon tuloksia tulkitessa.



Kuva 4 Tuhkan 1 saavuttamat maksimikuivartotiheydet kaikissa vanhennusvesipitoisuuksissa

6.1.2 Puristuslujuus

Tuhkan 1 puristuslujuuksien kehitys on esitetty kuvassa 5

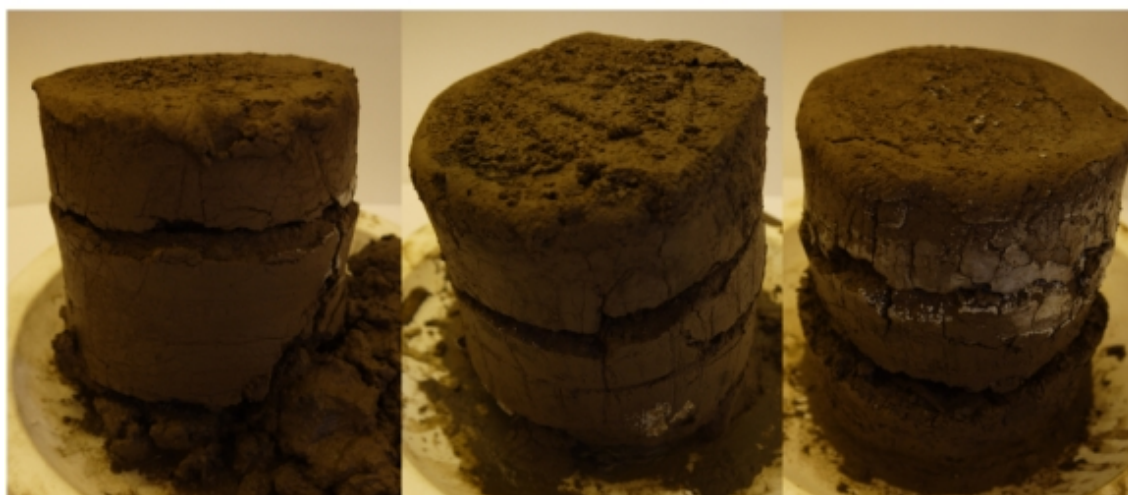


Kuva 5 Tuhkan 1 puristuslujuudet

6.1.3 Jääditys-sulatuskestävyys

Tuhkasta 1 valmistettujen jääditys-sulatuskoekappaleiden ulkomuoto kokeen lopussa on esitetty kuvissa 6, 7, 8, 9 ja 10.

Tuhka 1 7d



w=20% **w=40%** **w=60%**

Kuva 6 7 vuorokautta vanhenneetun tuhkan koekappaleet jääditys-sulatuskokeen jälkeen

Tuhka 1 28d



w=20% **w=40%** **w=60%**

Kuva 7 28 vuorokautta vanhenneetun tuhkan koekappaleet jääditys-sulatuskokeen jälkeen

Tuhka 1 28d + 2% PlusSe



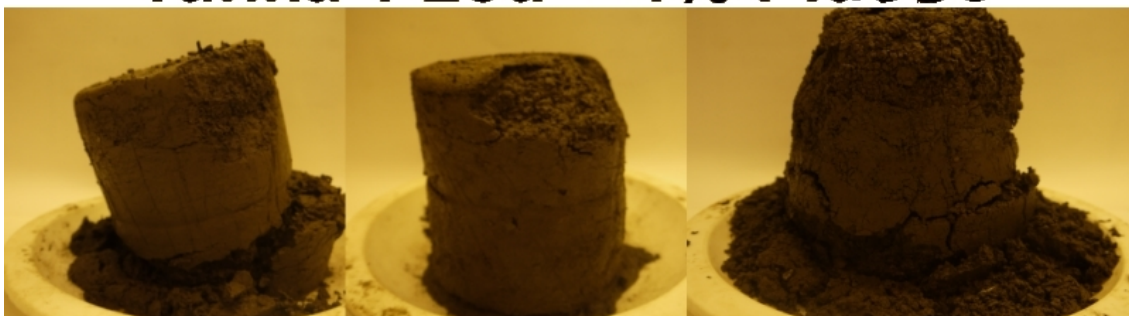
w=60%

w=40%

w=20%

Kuva 8 2% PlusSe koekappaleet jäädytys-sulatuskokeen jälkeen

Tuhka 1 28d + 4% PlusSe



w=20%

w=40%

w=60%

Kuva 9 4% PlusSe koekappaleet jäädytys-sulatuskokeen jälkeen

Tuhka 1 28d + 6% PlusSe



w=60%

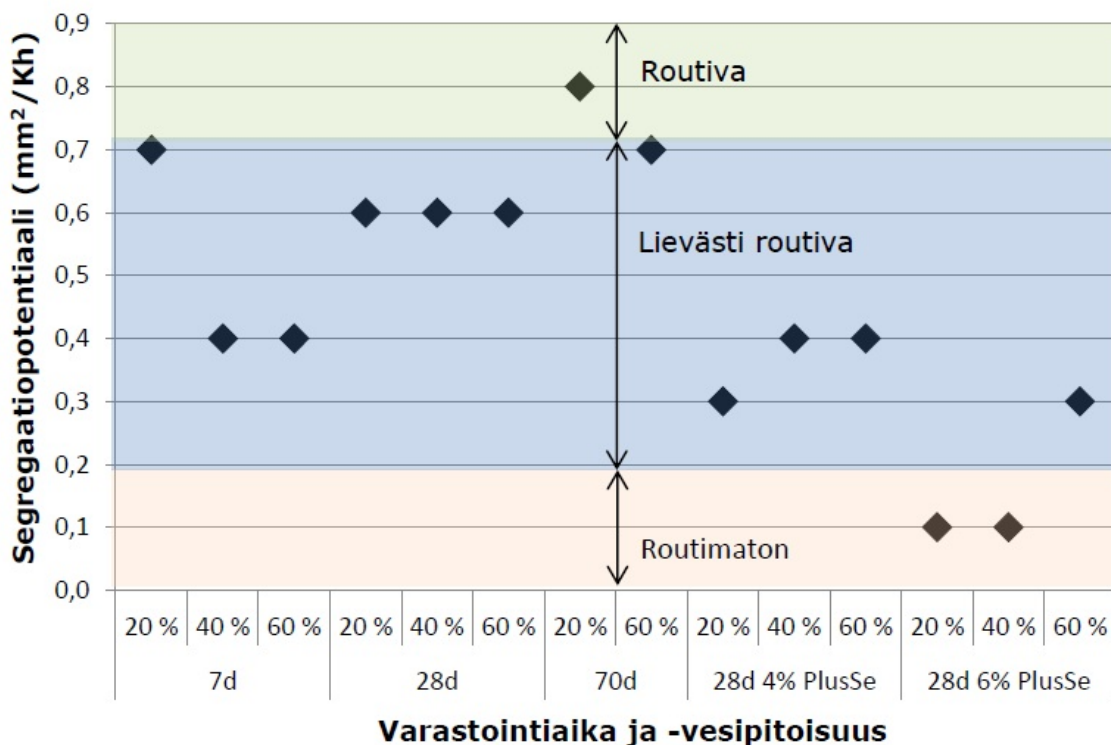
w=40%

w=20%

Kuva 10 6% PlusSe koekappaleet jäädytys-sulatuskokeen jälkeen

6.1.4 Routanouskoe

Kuvassa 11 on esitetty kaikkien tuhkasta 1 tehtyjen routanousukoekappaleiden segregatiopotentiaaliarvot. Pääasiallinen paino routanousukokeen tuloksissa on routivuusluokituksella, ei niinkään yksittäisillä segregatiopotentiaaleilla. Tässä tapauksessa 7 vuorokautta 20% vesipitoisuudessa vanhennettu tuhka vaikuttaisi olevan merkittävästi muita saman ajan varastoituja seoksia routivampaa, mutta todellisuudessa ero ei ole välttämättä erityisen merkittävä. Kokeessa tai laskentavaiheessa on myös voinut käydä jokin pieni virhe sen kappaleen kohdalla. Segregatiopotentiaali on ilmoitettu saatujen arvojen keskiarvona siltä aikaväliltä kun roudan syvyys pysyy suhteellisen tasaisena. Routanousukoekiden tuloksiin liittyvät kuvaajat on annettu liitteessä 3



Kuva 11 Tuhkan 1 routanousukokeen tulokset

6.1.5 Yhteenveto

Tuhkan 1 saavuttamat tulokset puristuslujuuskokeessa, jäädytys-sulatuskokeessa ja routakokeessa on koottu taulukkoon 11. Viidennen sarakkeen "Muutos %" arvot kuvaavat materiaalin jäädytys-sulatuskokeessa menettämää puristuslujuutta.

Taulukko 11 Tuhkan 1 laboratorionkokeiden tulokset

Materiaali	Tiheys (k.a. % maksimista)	Puristus- lujuus (MPa)	J/S puristus- lujuus (MPa)	Muu- tos (%)	Segregaatiopoten- tiaali (mm ² /Kh)
Vanhennusvesipitoisuus 20%					
Tuhka 1 7d	87	2,0	Ei kestä koetta	100	0,7 (=lievästi routiva)
Tuhka 1 28d	88	1,1	Ei kestä koetta	100	0,6 (=lievästi routiva)
Tuhka 1 70d	88	1,0	-	-	0,8 (=routiva)
Tuhka 1b 28d 2% PlusSe	87	1,1	0,1	92	ei koestettu
Tuhka 1b 28d 4% PlusSe	88	1,8	Ei kestä koetta	100	0,3 (=lievästi routiva)
Tuhka 1b 28d 6% PlusSe	85	2,4	Ei kestä koetta	100	0,1 (=routimaton)
Vanhennusvesipitoisuus 40%					
Tuhka 1 7d	87	1,8	Ei kestä koetta	100	0,4 (=lievästi routiva)
Tuhka 1 28d	88	1,0	Ei kestä koetta	100	0,6 (=lievästi routiva)
Tuhka 1 70d	87	0,8	-	-	-
Tuhka 1b 28d 2% PlusSe	88	1,6	0,1	99	-
Tuhka 1b 28d 4% PlusSe	89	2,5	0,2	94	0,4 (=lievästi routiva)
Tuhka 1b 28d 6% PlusSe	87	3,1	0,2	95	0,1 (=routimaton)
Vanhennusvesipitoisuus 60%					
Tuhka 1 7d	88	1,9	Ei kestä koetta	100	0,4 (=lievästi routiva)
Tuhka 1 28d	86	1,4	Ei kestä koetta	100	0,6 (=lievästi routiva)
Tuhka 1 70d	89	0,9	-	-	0,7 (=routiva)
Tuhka 1b 28d 2% PlusSe	86	2,4	0,1	97	-
Tuhka 1b 28d 4% PlusSe	87	3,5	0,2	96	0,4 (=lievästi routiva)
Tuhka 1b 28d 6% PlusSe	85	3,9	0,1	98	0,3 (=lievästi routiva)

6.2 Tuhka 2

6.2.1 Maksimikuivairtoteihs ja optimivesipitoisuus

Tuhkan 2 Proctor-sullontojen tulokset on esitetty taulukoissa 12, 13 sekä kuvassa 12. Kuvaajat on annettu liitteessä 2. Tuhka ei menettänyt 7 tai 28 vuorokauden varastoinnin aikana mainittavia määriä vettä lujittumisreaktion tai haihtumisenkaan seurauksena.

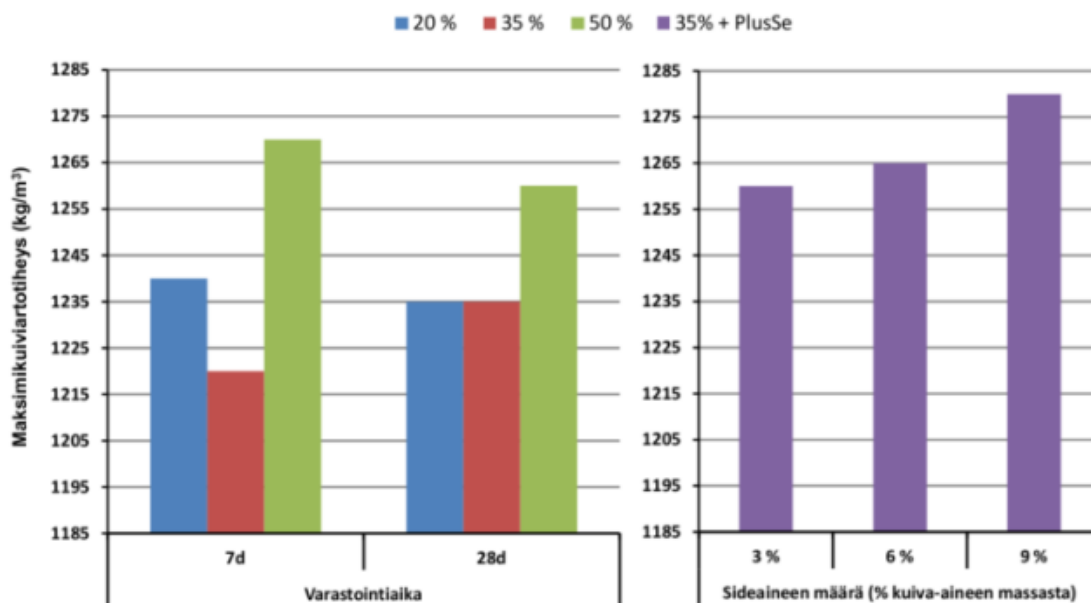
Taulukko 12 Tuhkan 2 optimivesipitoisuudet ja maksimikuivairtoteihs

Vanhennus- vesipitoisuus (%)	Maksimikuivairtoteihs (kg/m ³)	Optimi- vesipitoisuus (%)	Tiivistys- vesipitoisuus (%)
Vanhennettu 7 vuorokautta			
20	1240	37	40
35	1220	36,5	39
50	1270	35,5	39
Vanhennettu 28 vuorokautta			
20	1235	37,5	42
35	1235	37,5	41
50	1260	35	39

Taulukko 13 Stabiloidun tuhkan 2 Proctor-sullonnan tulokset

Vanhennettu 28 vuorokautta vesipitoisuudessa 35%

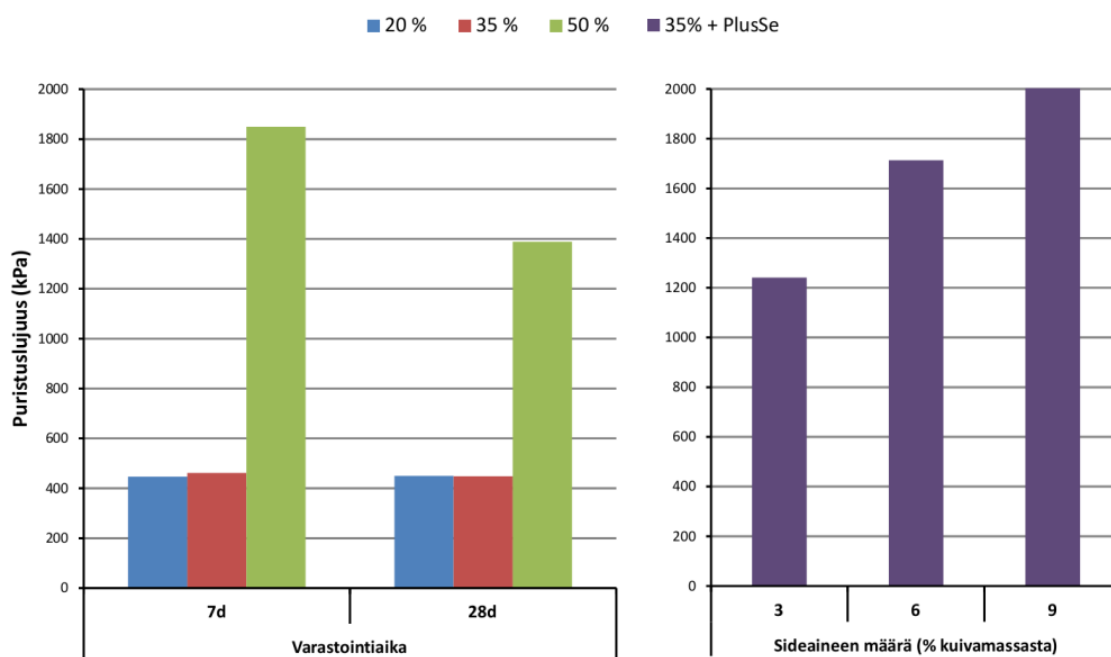
Sideaineen määrä (% kuiva-aineen massasta)	Maksimi- kuivairtoteihs (kg/m ³)	Optimi- vesipitoisuus (%)	Tiivistys- vesipitoisuus (%)
3	1260	37	41
6	1265	35,5	39
9	1280	35	38,5



Kuva 12 Tuhkan 2 saavuttamat maksimikuivavirtotiheydet

6.2.2 Puristuslujuus

Puristuslujuuksien kehittyminen on esitetty kuvassa 13

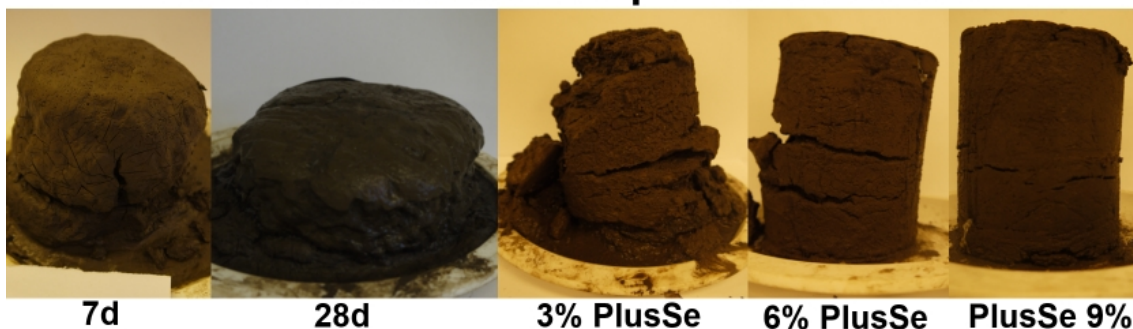


Kuva 13 Tuhkan 2 puristuslujuuksien kehitys

6.2.3 Jääditys-sulatuskestävyys

Kuvaan 14 on koottu 35% vesipitoisuudessa varastoidusta tuhkasta tehtyjen koekappaleiden kunto jääditys-sulatuskokeen jälkeen. Stabiloimattomat koekappaleet muissakin varastointivesipitoisuudessa olivat yhtä lailla muodottomia kokeen jäljiltä.

Tuhka 2 varastoitu vesipitoisuudessa 35%



Kuva 14 35% vesipitoisuudessa vanhenne-*tun* tuhkan 2 koekappaleiden kunto jääditys-sulatuskokeen jälkeen

6.2.4 Yhteenveto

Taulukko 14 sisältää koosteen tuhkan 2 tuloksista puristus-, jääditys-sulatus- ja routauskokeesta. Viidennessä sarakkeessa "Muutos %" arvot kuvaavat materiaalin jääditys-sulatuskokeessa menettämää puristuslujuutta. Segregaatiopotentiaali on ilmoitettu keskiarvona siltä aikaväliltä kun roudan syvyys ei enää vaihtelee merkittävästi. Routakokeen tuloksiin liittyvät kuvaajat on annettu liitteessä 4

Taulukko 14 Tuhkan 2 laboriokokeiden tulokset

Materiaali	Tiheys (k.a. % maksimista)	Puristus- lujuus (MPa)	J/S puristus- lujuus (MPa)	Muu- tos (%)	Segregaatiopoten- tiaali (mm ² /Kh)
Vanhennusvesipitoisuus 20%					
Tuhka 2 7d	86	0,4	Ei kestä koetta	100	1,3 (=routiva)
Tuhka 2 28d	87	0,4	Ei kestä koetta	100	0,3 (=lievästi routiva)
Vanhennusvesipitoisuus 35%					
Tuhka 2 7d	89	0,5	Ei kestä koetta	100	1,4 (=routiva)
Tuhka 2 28d	88	0,4	Ei kestä koetta	100	0,9 (=routiva)
Tuhka 2 28d 3% PlusSe	87	1,2	Ei kestä koetta	100	1,3 (=routiva)
Tuhka 2 28d 6% PlusSe	88	1,7	0,1	92	0,5 (=lievästi routiva)
Tuhka 2 28d 9% PlusSe	87	2	0,3	83	0,1 (=routimaton)
Vanhennusvesipitoisuus 50%					
Tuhka 2 7d	88	1,9	Ei kestä koetta	100	1,2 (=routiva)
Tuhka 2 28d	87	1,4	Ei kestä koetta	100	0,5 (=lievästi routiva)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Tuhka 1

Varastointiajan pidentäminen seitsemästä 28:een vuorokauteen aiheutti jokaisessa vesipitoisuudessa noin 50 kg/m^3 :n pudotuksen kuivairtitiheydessä ja varastointivesipitoisuuden perustuva materiaalien keskinäinen järjestys (60%, 20%, 40%) säilyi. Saavutetut maksimikuivairtitiheydet olivat edelleen laskussa, kun materiaalia tiivistettiin 70 vuorokauden ikäisenä, mutta 60% vesipitoisuudessa varastoitu tuhka menetti 28 vuorokauteen verrattuna noin 50 kg/m^3 tiheydestään, kun muissa näytteissä hävikki oli kokoluokkaa 10 kg/m^3 . Sideainemäärän korotuksella ei ollut kovinkaan dramaattista vaikutusta maksimikuivairtitiheyksiin, varsinkin kun otetaan menetelmälle tyypillinen mittausepäätarkkuus huomioon.

Tuhkaerien 1 ja 1b välille piirtyi ero Proctor-sullonnessa. Tuhkien tiivistyvyydessä on materiaalikohtaisia eroja, eikä sillä ole välttämättä mitään lineaarista vaikutusta muihin teknisiin ominaisuuksiin.

Pudotus puristuslujuudessa 7 ja 28 vuorokauden varastointiajan välillä vesipitoisuuksissa 20% ja 40% oli noin yhden megapascalin luokkaa eli puolittunut. Näillä materiaaleilla 28 ja 70 vuorokauden vanhennuksen välillä lujuutta menetettiin noin 150 - 200 kPa. Sen sijaan, 60% vesipitoisuudessa vanhennetulla tuhalla puristuslujuuden muutos samoilla intervaleilla oli tasaisesti noin 500 kPa. Puristuslujuuden muutos näyttäisi hidastuvan varastointiajan pidentyessä ja tulosten valossa vesipitoisuudella vaikuttaisi olevan osuutensa muutoksen suurusluokkaan: Tuhkalla 1 testatuissa vesipitoisuuksissa puristuslujuus heikkeni 28 ja 70 vuorokauden välillä taulukon 15 mukaisesti.

Taulukko 15 *Tuhkan 1 puristuslujuuden menetys 28 ja 70 vuorokauden varastoinnin aikana*

Vanhennusvesipitoisuus	Puristuslujuuden heikkeneminen (%)
20 %	10
40 %	20
60 %	36

40% ja 60% vesipitoisuudessa vanhennettujen seoksien menettämä puristuslujuus seitse-

män vuorokauden jälkeen on korvattavissa kahdella prosentilla sideainetta, kun taas 20% vesipitoisuudessa ollaan lähellä lähtötilannetta vasta neljällä prosentilla sementtiä. Tuloksien perusteella tuhkasta 1 voidaan suuntaa antavasti todeta 2 - 3% sementtiä neljän viikon varastoinnin jälkeen riittävän kompensoimaan yli seitsemän vuorokauden varastointiajan tuottaman kielteisen lujuuskehityksen. Stabiloitujen koekappaleiden lujuuskehitys johti yllättävään tilanteeseen, jossa 40% vesipitoisuudessa varastoitu tuhka saavutti kuivinta seosta suurempia lujuuksia. Ainoa tutkimustulosten tarjoama syy ilmiölle on koekappaleiden tiiveystaso: 40% vesipitoisuudessa varastoidun tuhkan tiiveystaso maksimikuivairtotiheyteen nähden oli yhden, suurimman sideainemäärän kohdalla kahden, prosenttiyksikön verran korkeampi.

Puristuslujuuksien perusteella suotuisin varastointivesipitoisuus sijoittuu 20 ja 40% tienoille. 60% vesipitoisuus on varmasti yli materiaalin optimin, ja sellaisena käyttökelvoton rakentamista ajatellen, koska suurien tuhkamäärien kostuttaminen ensin hyvin märäksi ja sen jälkeen kuivattaminen optimaalisen vesipitoisuutensa tienoille rakennuskohdetta varten ei ole kovinkaan järkevää. Stabiloimattomalla tuhkalla 20% vesipitoisuus tuotti korkeimmat tulokset, mutta sideaineen kanssa suuremmat lujuudet saavutettiin varastointivesipitoisuudessa 40%. Koska jäädytys-sulatuskestävyyttä täytyy nostaa sideaineella joka tapauksessa, puristuslujuuden suhteen suositeltavin vesipitoisuus tuhkalle 1 on todennäköisimmin jossain 20 ja 40% välillä.

Taulukossa 11 on annettu joitakin numeerisia arvoja jäädytys-sulatuskappaleiden puristuslujuuksille. Saavutetut arvot olivat niin matalia että tuhkan 1 jäädytys-sulatuskestävyyden voidaan sanoa olevan kosteana varastoituna käytännössä olematon jokaisessa vesipitoisuudessa ja stabiloitunakin heikko. Tuloksista paljastuu suhteellisen johdonmukaisesti että sideaine nostaa materiaalien jäädytys-sulatuskestävyyden edes jonkinlaiselle tasolle, vaikka taulukon mukaan 20% vesipitoisuudessa vanhennettu seos neljällä ja kuudella prosentilla sementtiä ei kestäkään koetta. Tuhkakappale on 100 - 200 kPa lujuuden tienoilla on niin heikko, että jäädytys-sulatussykliä aikana tapahtuva käsittely saattaa aiheuttaa kappaleelle ylimääräisiä vaurioita, ja tämä on todennäköisesti syynä tulosten epä johdonmukaisuuteen.

Koemateriaalien segregatiopotentiali arvot olivat enimmäkseen loogisia. Pidempi varasto aika nosti routivuusluokitusta ja sideaine vuorostaan laski arvoja suorassa suhteessa käytettyyn määrään. Ilman sideainetta tutkittujen seosten välillä ei voida yksiselitteisesti sanoa olevan vesipitoisuudesta riippuvia eroja, vaan ratkaiseva tekijä materiaalien routi-

vuudessa on varastointiaika. Stabiloituna taas 20 ja 40% varastointivesipitoisuudella saavutettiin alhaisimmat routivuusluokitukset. Koska 60% vesipitoisuus on joka tapauksessa varmasti yli materiaalin optimin ja sellaisena käyttökelpoton rakentamista ajatellen, pelkästään routanousukokeiden valossa sopivin varastointivesipitoisuus tuhalle 1 on niin ikään 20 ja 40% välillä. Selkein tekijä alhaisen routivuusluokituksen saavuttamiseksi on kuitenkin varastointiaika.

Tulosten valossa siis 30% tienoille sijoittuva varastointivesipitoisuus vaikuttaisi olevan tuhalle 1 kaikista testatuista suotuisin vaihtoehto. Lopputulos on yllättävä ja poikkeaa nykyään vallitsevasta peruskäsityksestä, jonka mukaan kasavarastointi tulisi aina toteuttaa mahdollisimman matalassa vesipitoisuudessa. Tätä päätelmää ei ole kuitenkaan syytä käyttää minkäänlaisena universaalina ohjeena ja se pätee vain tässä tutkimuksessa käytettyjen varastointivesipitoisuuksien ja -aikojen tuottamiin arvoihin.

Tulosten vertailukelpoisuutta häiritsee, että tuhkaerää jouduttiin vaihtamaan kesken tutkimuksen. Toisaalta rakennuskohteissa käytettävissä olevat tuhkamateriaalit ovat nykyisellä käytännöllä yleensä tai aina kokooma erilaisia polttoainekomponentteja ja kattilakuormituksia. Vertailua vaikeuttaa myös heikko jäädytys-sulatuskestävyys. Koska vanhennusvesipitoisuus, ikä ja sideaineen määrä toivat esille eroja kaikkien muiden muiden kokeiden kohdalla, on hyvä syy olettaa että myös seoksien jäädytys-sulatuskestävyydessä on todellisia eroja, jotka eivät tule esille vakiintuneella testimenetelmällä.

Sideainetta käytettiin enimmillään 6% tuhkan kuivamassasta. Valinnan taustalla oli pyrkimys tarjota tutkimustuloksia ekologisesti kestävästä ja taloudellisesti kilpailukykyisestä ratkaisusta. Sideaineen käyttökustannukset riippuvat muun muassa käytettävissä olevan tuhkan määrästä ja sen kaatopaikalle loppusijoittamisesta koituvista jätteenhoitomaksuista. Ympäristövaikutuksista on vaikea tehdä mitään universaalialinjanvetoa, sillä hyödyt ja haitat riippuvat paljolti tuotantopaikkojen ja rakennuskohteen etäisyyksistä.

Materiaalin käyttömahdollisuuksia voidaan todennäköisesti parantaa pidentämällä lujittumisaikaa ja kasvattamalla sideainemäärää. Ramboll Finlandin aikaisempien tutkimusten nojalla on erittäin hyvä syy olettaa että tuhkaa 1 tuottavan voimalaitoksen lentotuhka on lujittumisominaisuuksiltaan hyvää, ja kuivana sitä voitaisiin hyödyntää korvamaan sementin käyttötarvetta tämän tutkimuksen viitekehityksessä, mutta myös monissa maanrakennushankkeissa yleisesti. Kuivan lentotuhkan sideainemäinen käyttö voisi laskea kustannuksia melko merkittävästi ja alentaa ympäristöhaittoja.

Myös käyttökohteen rakenteen suunnittelulla on mahdollista vaikuttaa materiaalin käyttymiseen. Kehno jäädytys-sulatuskestävyys voidaan ohittaa järjestämällä tuhkakerrokseen tehokas kuivatus ympäröimällä se karkearakeisella materiaalilla tai veden imeytymisen voidaan estää lähes kokonaan kapillaarikatkolla ja tiiviillä päällysteellä. Meluvalliin tuhka 1 on sellaisenaan jo sopivaa, kunhan se sijoitetaan kerrokseen, jotka eivät ole alttiina jäätymiselle ja huolehditaan lyhytaikaisella, hallitulla kostutuksella että lujittumisreaktiosta johtuva mahdollinen turpoaminen ei pääse heikentämään vallin rakennetta.

7.2 Tuhka 2

Kuten kohdassa 3.3 spekuloidaan, kasavarastoinnin routivuutta vähentävä vaikutus ei ole ennenkuulumatonta, vaikkakin hieman harvinaisempaa. Tuhka 2 osoittautui saavuttamiensa segregatiopotentiaaliarvojen puolesta materiaaliksi, joka nimenomaan hyötyy kasavarastoinnista, ainakin sikäli kuin tutkimuksissa käytetyn varastointitavan voidaan sanoa kuvastavan todellisia olosuhteita. Toisaalta varastointiajan vaikutus lujuuteen oli kielteinen tai olematon ja jäädytys-sulatuskestävyydestä ei voida varmuudella sanoa mitään, koska kaikki stabiloimattomat kappaleet olivat 12 syklin seurauksena yhtä lailla muodottomia. Maksimikuivairtoisuuden vaihtelu varastointiajan funktiona oli neljän viikon viitekehyydessä suhteellisen mitätön. Vaikka tuloksissa näkyikin jonkinlainen kehitys, ovat erot niin huomaamattomia, että johtopäätösten tekeminen näin pienellä otannalla olisi hyvän tieteellisen käytännön vastaista. Myöskään optimivesipitoisuuksissa ei havaittu mainittavia muutoksia.

Suurimmat koekappaleiden lujuudet saavutettiin myös tuhkalla 2 korkeimmassa vesipitoisuudessa. Kiistattomasti varastointi vaikutti lujuuteen vain 50% vesipitoisuudessa vanhentuneen seoksen kohdalla, alentaen sitä noin 400 - 500 kPa verran. Muissa vesipitoisuuksissa suurta muutosta ei huomattu, joka on sekin tulos sinänsä.

Myöskään tuhka 2 ei saavuttanut testeissä käyttöluokkaa LT 4 korkeampaan oikeutuvia tuloksia. Kriittinen tekijä oli tässäkin tapauksessa heikko tai olematon jäädytys-sulatuskestävyys. Sideaineen käytöllä saavutettiin jokseenkin lineaarinen jäädytys-sulatuskestävyyden parannus, mutta edes 9% sementtiä tuhkan kuivamassasta ei riittänyt nostamaan materiaalin käyttöluokkaa. Routanousukokeen tulosten valossa tosin vaikuttaa sil-

tä, että sideaineen käyttöä päädyttiin tutkimaan maanrakennusteknisille ominaisuuksille marginaalisesti haitallisimmassa varastointivesipitoisuudessa 35%.

Tuhkan 2 tutkimussarja on äärimmäisen suppea, joten varastointivesipitoisuuksien tuottamien erojen analysointi on haastavaa, eikä välttämättä erityisen tarkoituksenmukaista. Myös tässä tapauksessa 50% vesipitoisuus voidaan käytännössä sivuuttaa, koska se on ylittää materiaalin optimivesipitoisuuden varmasti. Stabiloimattomalle tuhkalta suotuisin vaihtoehto on 20% vesipitoisuus routivuuden perusteella. Puristuslujuuksissa erot eivät ole mainittavia vesipitoisuuksien 20 ja 35% välillä. Myös tuhalla 2 tilanne on se, että jäädytys-sulatuskestävyyttä on haettava sideaineen käytöllä, mutta tuloksia ei ole riittävästi stabiloinnin vaikutusten vertailuun.

7.3 Ajatuksia ja kehitysehdotuksia

Saavutettujen tulosten pieni määrä ja suuri hajonta estävät yleispätevien lausuntojen antamisen. Työn otsikossa kuulutetaan kasavarastoinnin vaikutusta routivuuteen, ja sellaista löytyi. Tuhkan 1 segregatiopotentiali kehittyi enimmäkseen johdonmukaisesti routivampaan päin varastointiajan pidennyttyä. Niin ikään puristuslujuuksissa on eroja vesipitoisuudesta ja iästä riippuen, mutta nämä erot eivät ole enää selvästi havaittavissa jäädytys-sulatuskokeen jälkeen, koska tulokset olivat siinä vaiheessa kauttaaltaan niin matalalla tasolla.

Tutkitunlaisen kasavarastoinnin vaikutus tuhkalta pitäisi todentaa koemateriaalilla, joka saavuttaa tuoreena tai tuoreempaan korkeamman käyttöluokan. Kirjallisuudessa todetaan, että tuhkan ominaisuudet heikkenevät (jos heikkenevät) merkittävimmin muutamien päivien aikana kostutuksesta (Ahlqvist et al., 2007, 15). Jäädytys-sulatuskoesarja esimerkiksi ensimmäisen kolmen vanhennusvuorokauden ajalta erilaisissa vesipitoisuuksissa voisi antaa osviittaa suositeltavan varastointivesipitoisuuden suuruusluokasta, mikäli todellisia eroja on löydettävissä. Silloin olisi myös mahdollista antaa suositus tietystä vesipitoisuudesta, jota jalostaa.

Koemateriaalien Proctor-kuvaajat osoittavat kokoluokan, jolla toteutuvat tiheystasot riippuvat vesipitoisuudesta. Tuloksissa on materiaaliakohtaista hajontaa, mutta pääasiassa 2-3 %:n vesipitoisuushajonta pienentää maksimikuivairtotiheyyksiä niin ikään 2-3%. Edempä-

nä spekuloidiin mahdollisuudella, että yhden prosentin verran korkeampi tiiveysaste stabioidulla tuhalla 1 vesipitoisuuksissa 20% ja 40% saattaa olla syynä märemmän seoksen yllättävään, noin viidesosan, korkeampaan puristuslujuuteen. Tiivistysvesipitoisuus tulee siis ottaa tarkasti huomioon hankkeita suunnitellessa siten, että työohjeissa ja mitoituksissa otetaan huomioon tarkkuus, jolla tuhkamateriaalin vesipitoisuuden säätö voidaan toteuttaa. Luonnollisesti tämä tarkoittaa myös sitä, että kovalla sateella tuhkarakentaminen on paitsi kurjaa, se vaatii myös oman ohjeistuksensa.

Olisi mielenkiintoista tietää, kuinka pitkälle tuhalla 2 testeissä ilmennyt routivuuden aleneminen jatkuu kasavarastoinnissa, vai johtuuko ilmiö testaustavasta. Ominaisuuksien parantuminen on kuitenkin niin marginaalinen ilmiö, että vastaavanlaisten tuhkien yleisyydestä tulisi ottaa selvää, jotta asiaan paneutumista voitaisiin pitää kannattavana.

Rakentavin parannusehdotus tämän kaltaisten tutkimusten suorittamiseen, jonka voin antaa oman työni pohjalta lienee, että jäädytys-sulatuskestävyys on tulosten vertailtavuuden kannalta ratkaiseva tekijä, jolle pitäisi pyrkiä löytämään numeerisia tai muuten mielekkäitä arvoja. Tämä tietenkin edellyttää oletuksen, että tutkittava materiaali saavuttaa tuoreena korkeampiin käyttöluokkiin oikeuttavia tuloksia, kuten olen tuhkan 1 kohdalla oletanut Ramboll Finland Oy:n aikasimpiin raportteihin nojaten.

Routanousukokeeseen liittyy erityisesti tuhkakappaleille ominainen virheen mahdollisuus. Työmäärällä kymmenen iskua viittä kerrosta kohden saavutettu 86-89 % tiiveysaste on suhteellisen matala, vaikkakin kenttäolosuhteissa saavutettavaan tulokseen nähden totuudenmukainen. On mahdollista, että alhaisen tiheyden saavuttanut tuhkakappale tiivistyy vielä lisää routanousukokeessa jäätymisen aiheuttaman paineen seurauksena. Tämänkaltaisessa tapauksessa osa jäälinssien muodostumisesta aiheutuvasta routanoususta ei ilmenekään pystysuuntaisen liikkeen mittauksessa vaan hukkuu kappaleen sulan osan tiivistymiseen ja laskettu segregatiopotentialiarvo on todellista pienempi.

Jäädytys-sulatuskoe kuvaa vakiintuneella toteutustavallaan pahinta mahdollista tilannetta. Maanrakennussovelluksessa veden pysymistä voidaan kuitenkin rajoittaa niin että tuhkarakenne ei ole jäätyessään välttämättä aina vedellä täysin kyllästynyt. Koetta voitaisiin mukauttaa esimerkiksi sulattamalla kappaleet joka toisella kerralla ilman lisävetä.

LÄHTEET

Ahlqvist, Elina & Lahtinen, Pentti & Niutanen, Ville. 2007. Lentotuhkan, kuitusaven ja rikastushiekan varastointimahdollisuudet ja logistiset tarpeet. Osa Ecoinfo II - hankkeen julkaisua Jätteiden ja sivutuotteiden hyötykäyttö tierakentamisessa. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Ramboll Finland Oy 2012. Tuhkarakentamisen käsikirja: Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa. Luopioinen: Ramboll Finland Oy.

Chamberlain, E. J. 1981. CRREL Monograph 81-2. Frost susceptibility of soil. Review of index tests. Michigan: University of Michigan Library.

Eskola, Paula et al. 2008. Moreeni tehokäyttöön! Espoo: VTT.

Jokinen, Tero. Insinööri (AMK). Tutkimusinsinööri Ramboll Finland Oy. Henkilökohtainen tiedonanto 17.10.2013. Haastattelija Kangasniemi, V-P. Luopioinen

Jyrävä, Harri. 1989. Maan jäätyamisen mallintaminen. Oulu: Oulun yliopisto.

Jyrävä, Harri. DI. Projektipäällikkö Ramboll Finland Oy. 2012. Henkilökohtaiset tiedonannot 17.10.2013 ja 10.12.2013. Haastattelija Kangasniemi, V-P. Luopioinen.

Järvelä, Eliisa et al. 2009. Energiantuotannon tuhkien jalostaminen maanrakennuskäyttöön. Espoo: VTT.

Jääskeläinen, Raimo. 2011. Geotekniikan perusteet. 3. painos. Tampere: Tammertekniikka.

Jääskeläinen, Raimo & Rantamäki, Martti & Tammirinne, Markku. 2004. Geotekniikka. Helsinki: Otatieto.

Konrad, Jean-Marie. 1980. Frost Heave Mechanics. Alberta: University of Alberta.

Finncao Oy. 2005. Metsäteollisuuden lentotuhkien käyttö tie-, katu- ja kenttärakenteissa. Mänttä: Finncao Oy.

Jätelaki 646/2011.

Pesu, Jarmo. 2010. Routanousukokeen kehittäminen. Espoo: Aalto-yliopisto.

Rakennustietosäätiö. 2006. InfraRYL 2006. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset, osa 1. Helsinki: Rakennustieto Oy.

Saarinen, Maija. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys. Helsinki: Ratahallintokeskus.

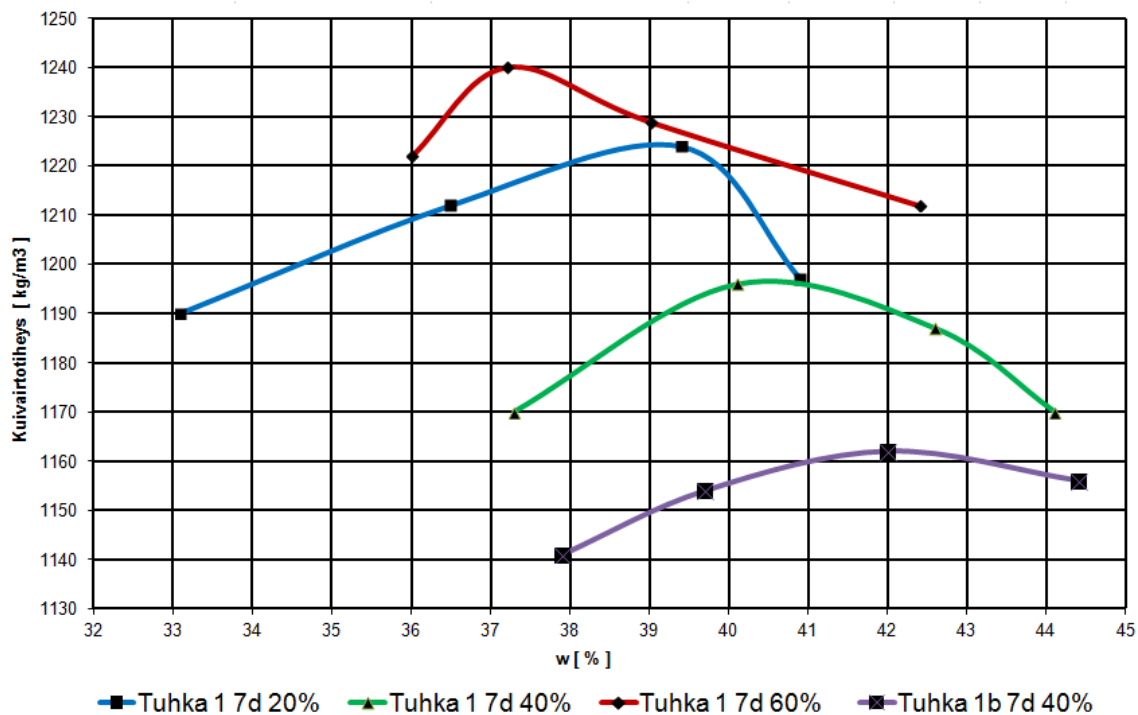
Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa Vna 591/2006, säädöksen teksti 403/2009.

Tarvainen, Timo. 2013. Liukoisuustestit riskinarvioinnissa. Luento. Mutku-päivät 20.3.2013. Tampere.

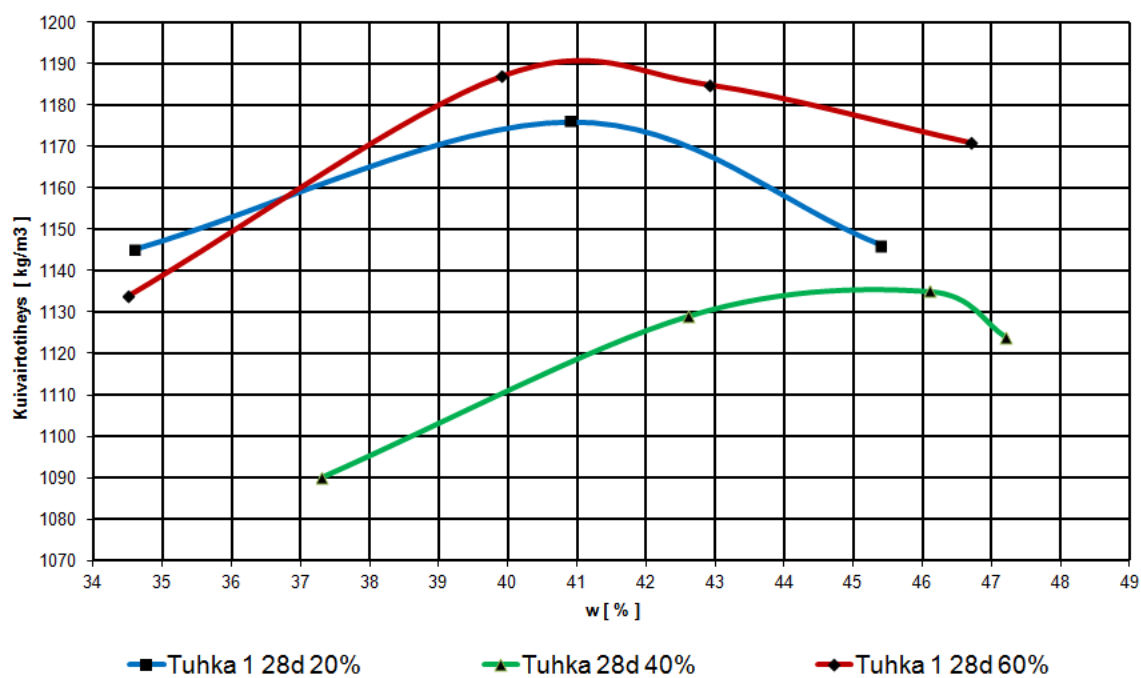
Ympäristöministeriö. 2012. Jätelain uudistuksesta. Ajankohtaista 5/2012.

1 Tuhkan 1 Proctor-kuvaajat

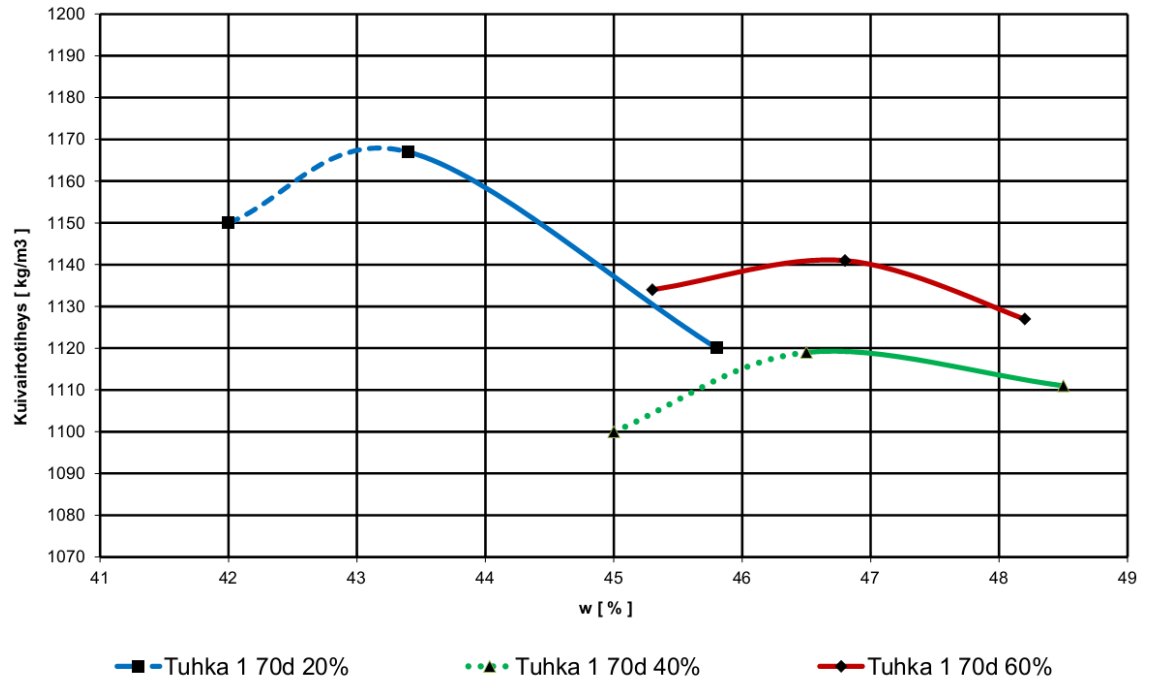
1 (3)



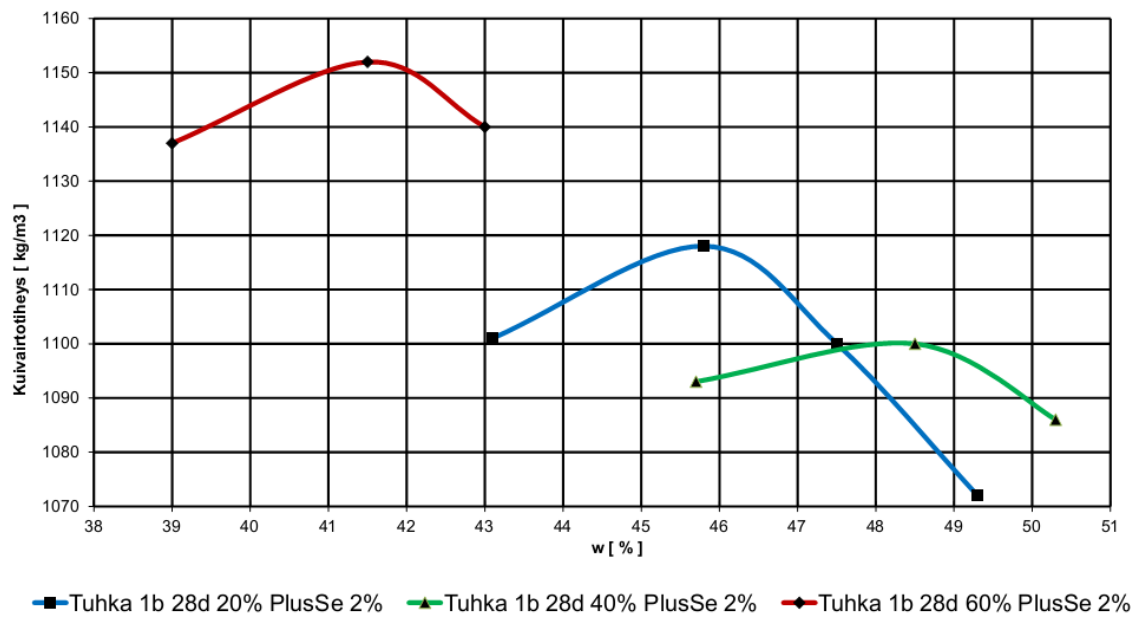
Kuva 15 7 vuorokautta vanhenneetun tuhkan 1 Parannetun Proctor-sullonnan tulokset



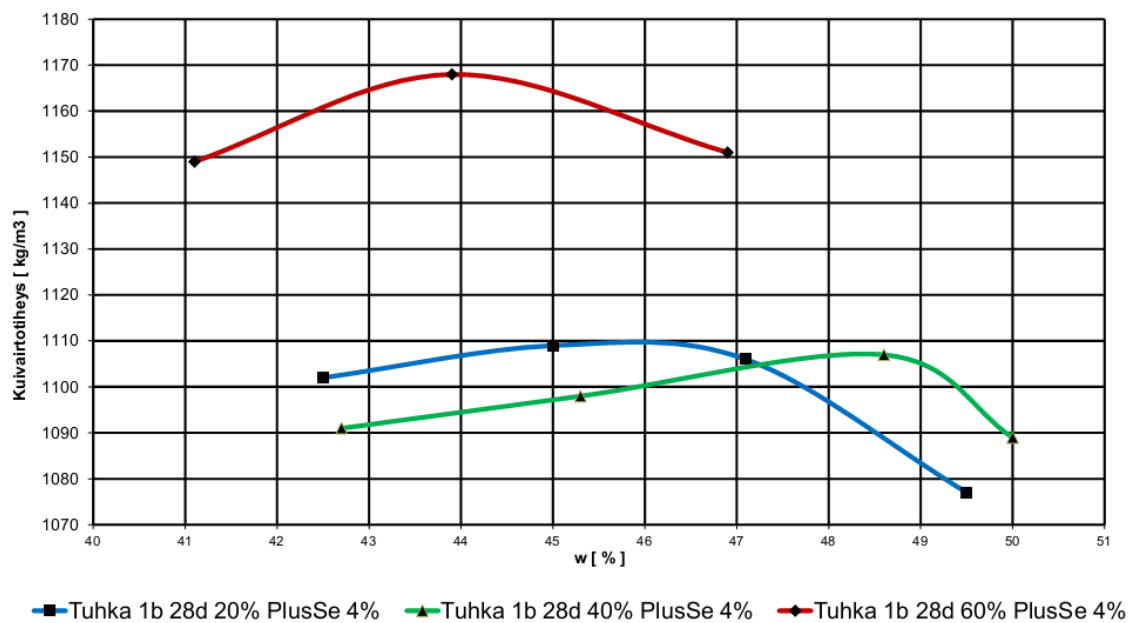
Kuva 16 28 vuorokautta vanhenneetun tuhkan 1 Parannetun Proctor-sullonnan tulokset



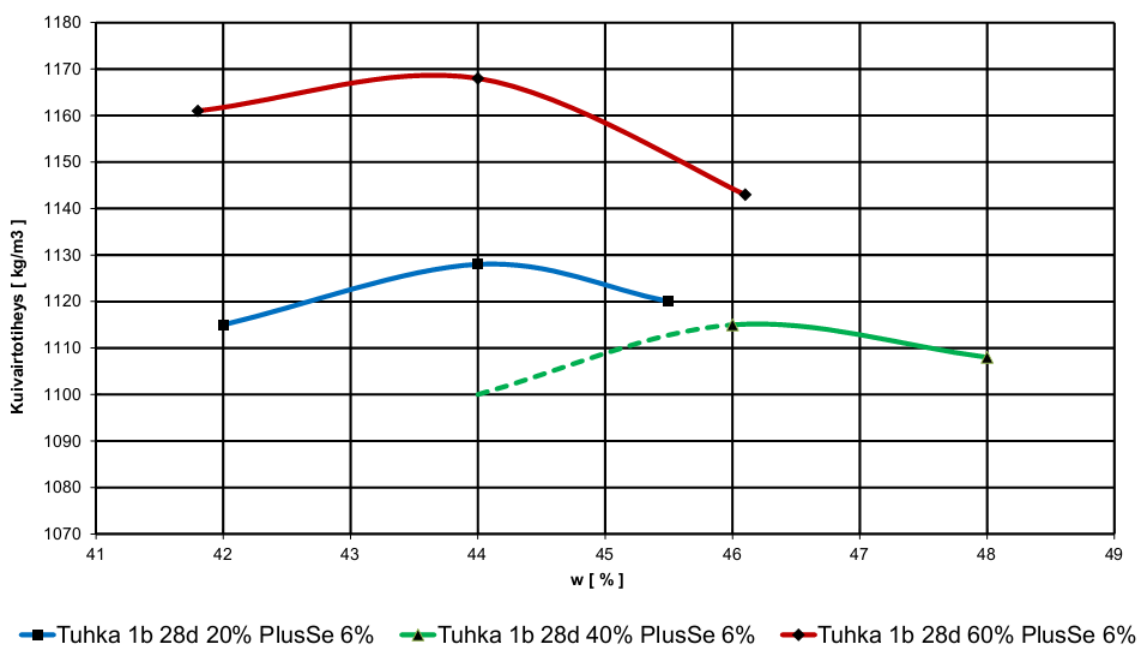
Kuva 17 70 vuorokautta vanhenneen tuhkan 1 Parannetun Proctor-sullonnan tulokset



Kuva 18 Proctor-sullonta 2% Plus sementtiä sisältävällä tuhalla



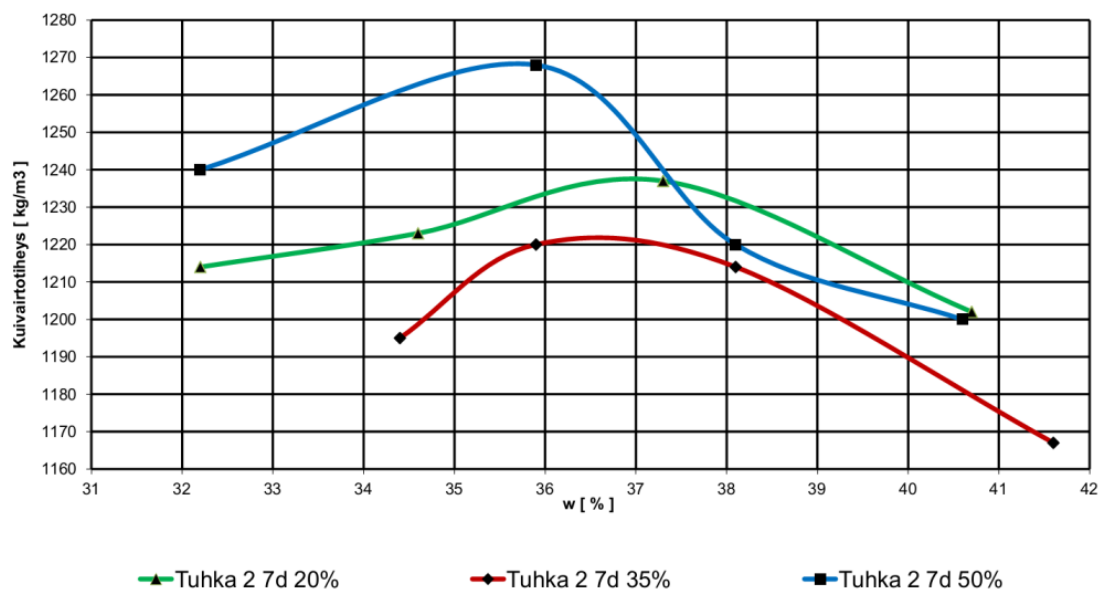
Kuva 19 Proctor-sullonta 4% Plus sementtiä sisältävällä tuhalla



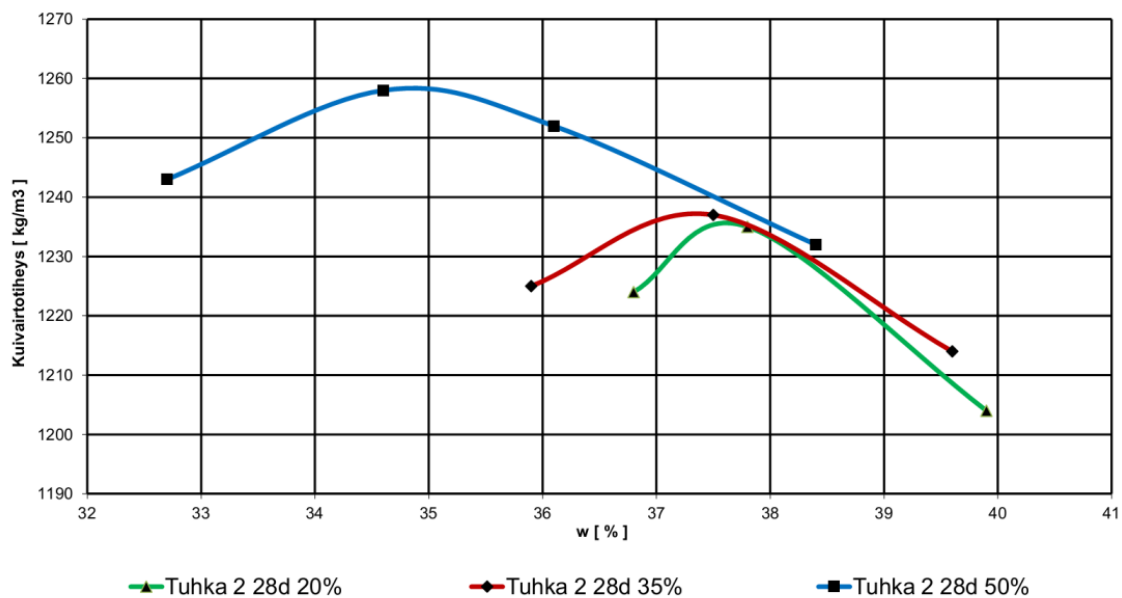
Kuva 20 Proctor-sullonta 6% Plus sementtiä sisältävällä tuhalla

2 Tuhkan 2 Proctor-kuvaajat

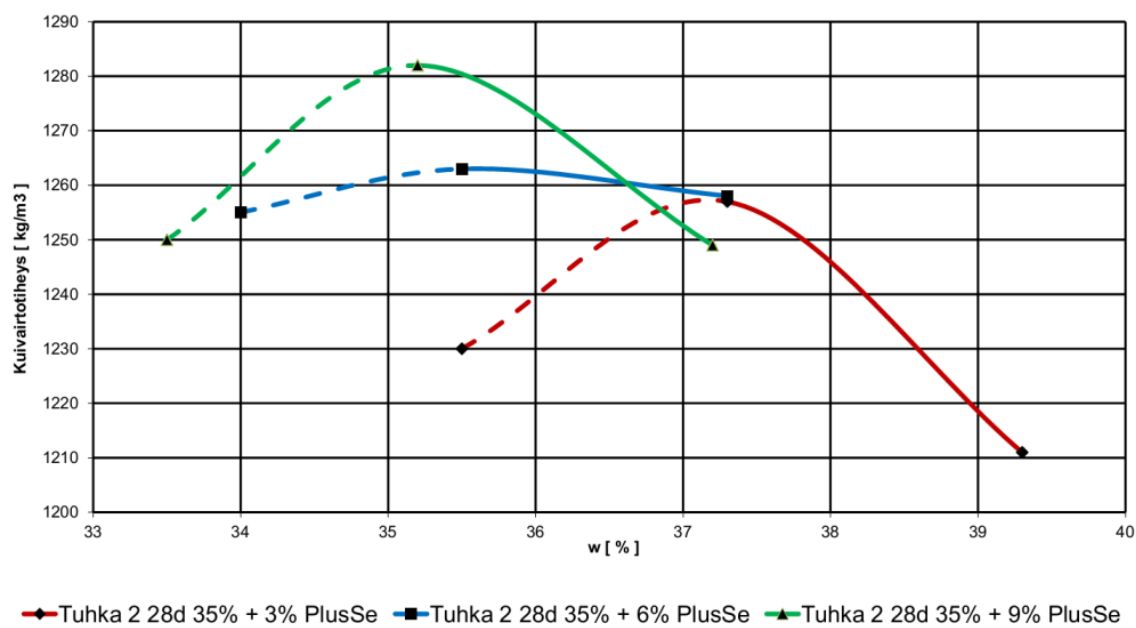
1 (2)



Kuva 21 7 vuorokautta vanhennetun tuhkan 2 Parannetun Proctor-sullonnan tulokset



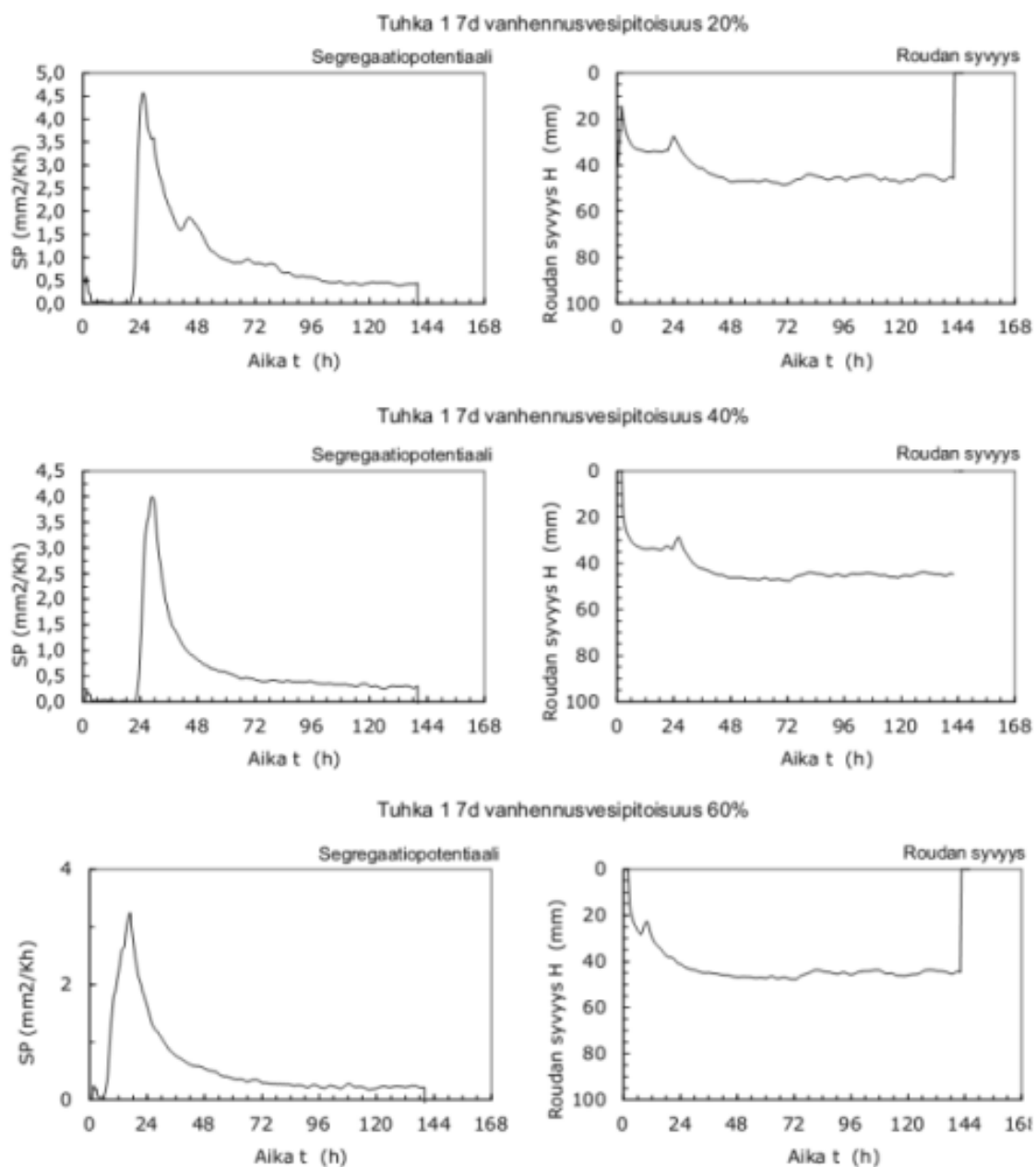
Kuva 22 28 vuorokautta vanhennetun tuhkan 2 Parannetun Proctor-sullonnan tulokset



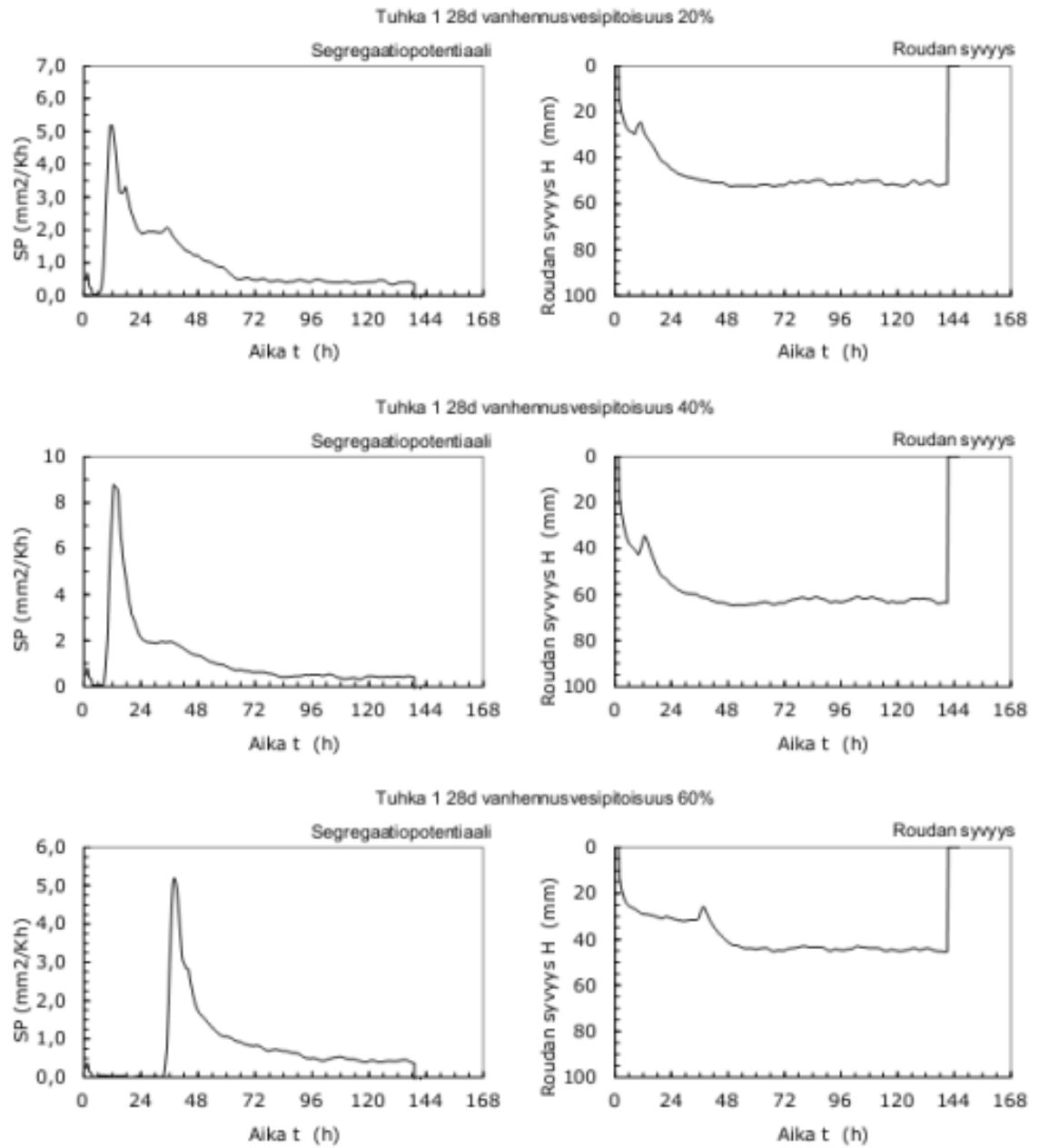
Kuva 23 Stabiloidun, 28 vuorokautta vanhentetun tuhkan 2 Parannetun Proctor-sullonnan tulokset

3 Tuhkan 1 segregatiopotentiaali ja roudan syvyys

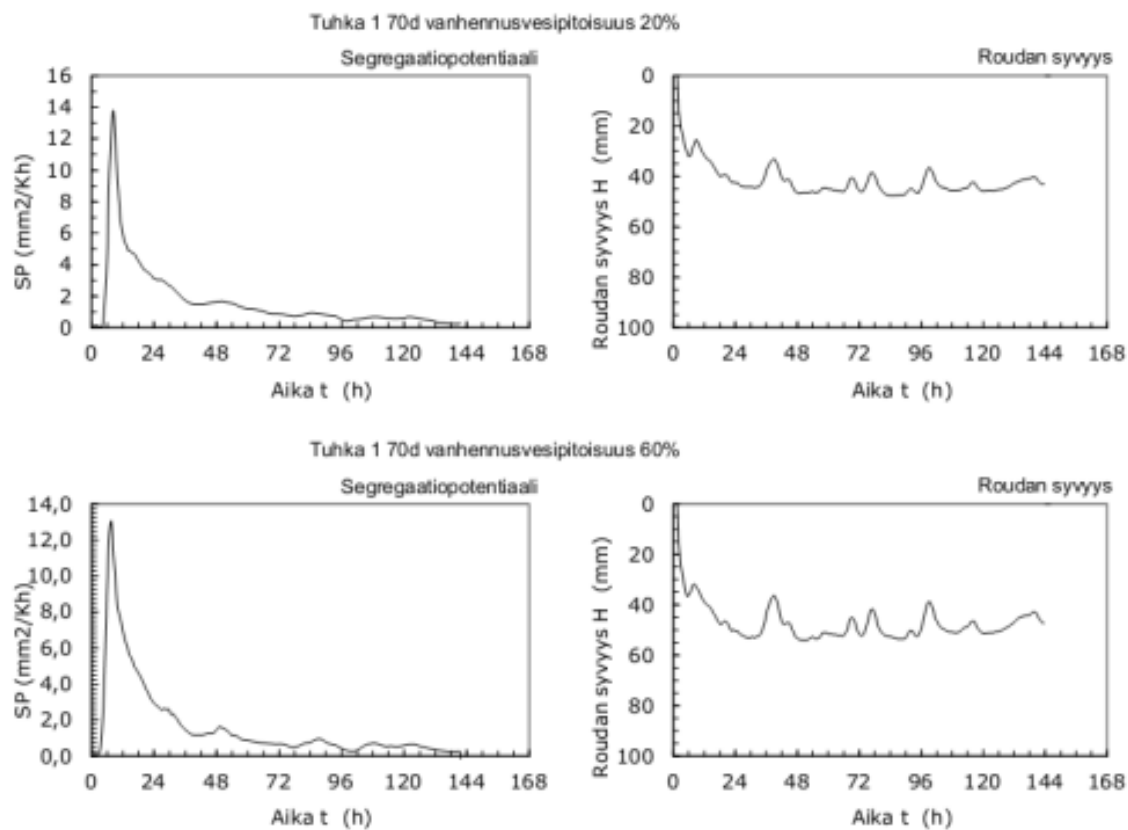
1 (5)



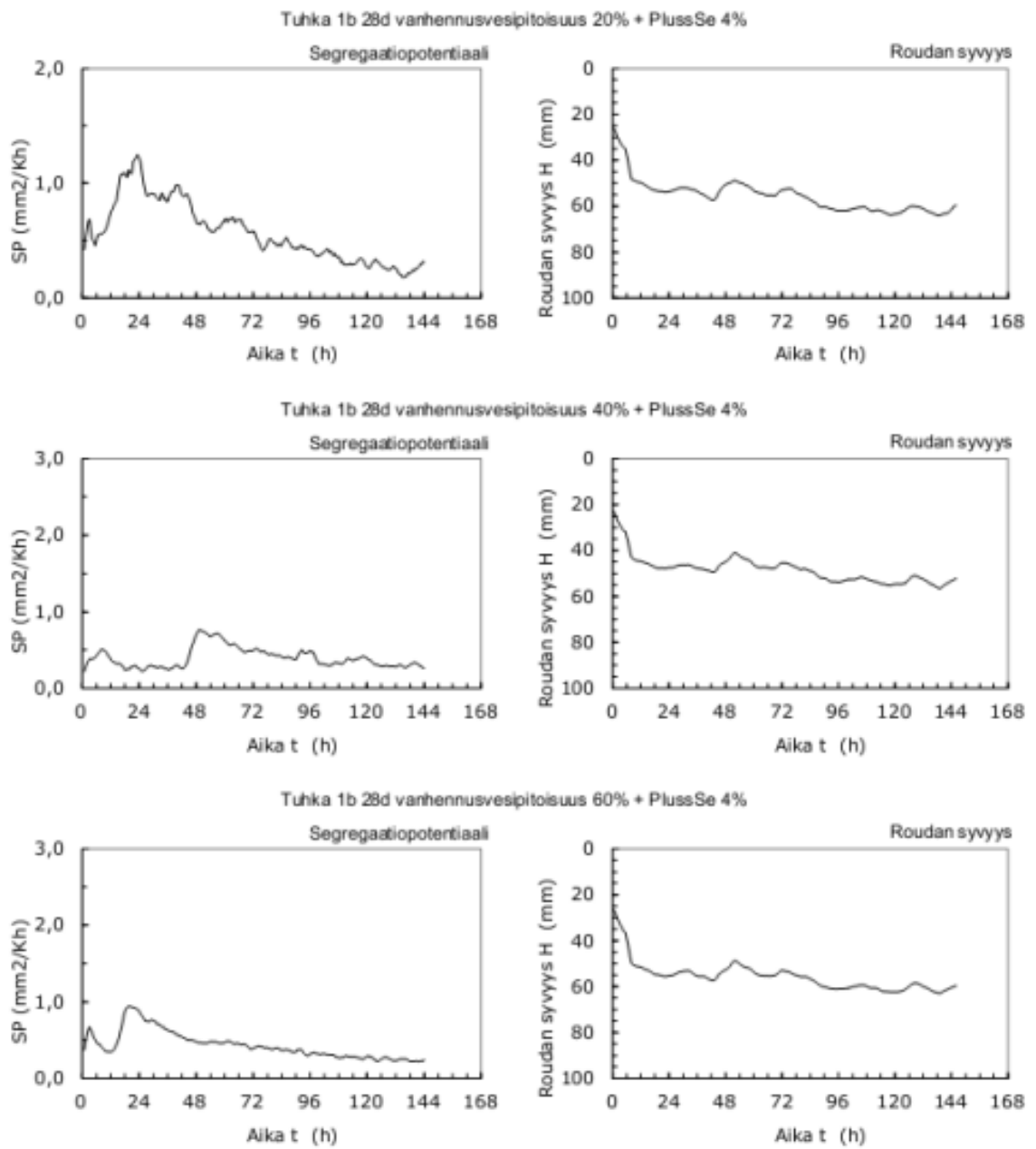
Kuva 24 7 vuorokautta vanhenneetun tuhkan 1 segregatiopotentiaali ja roudan syvyys



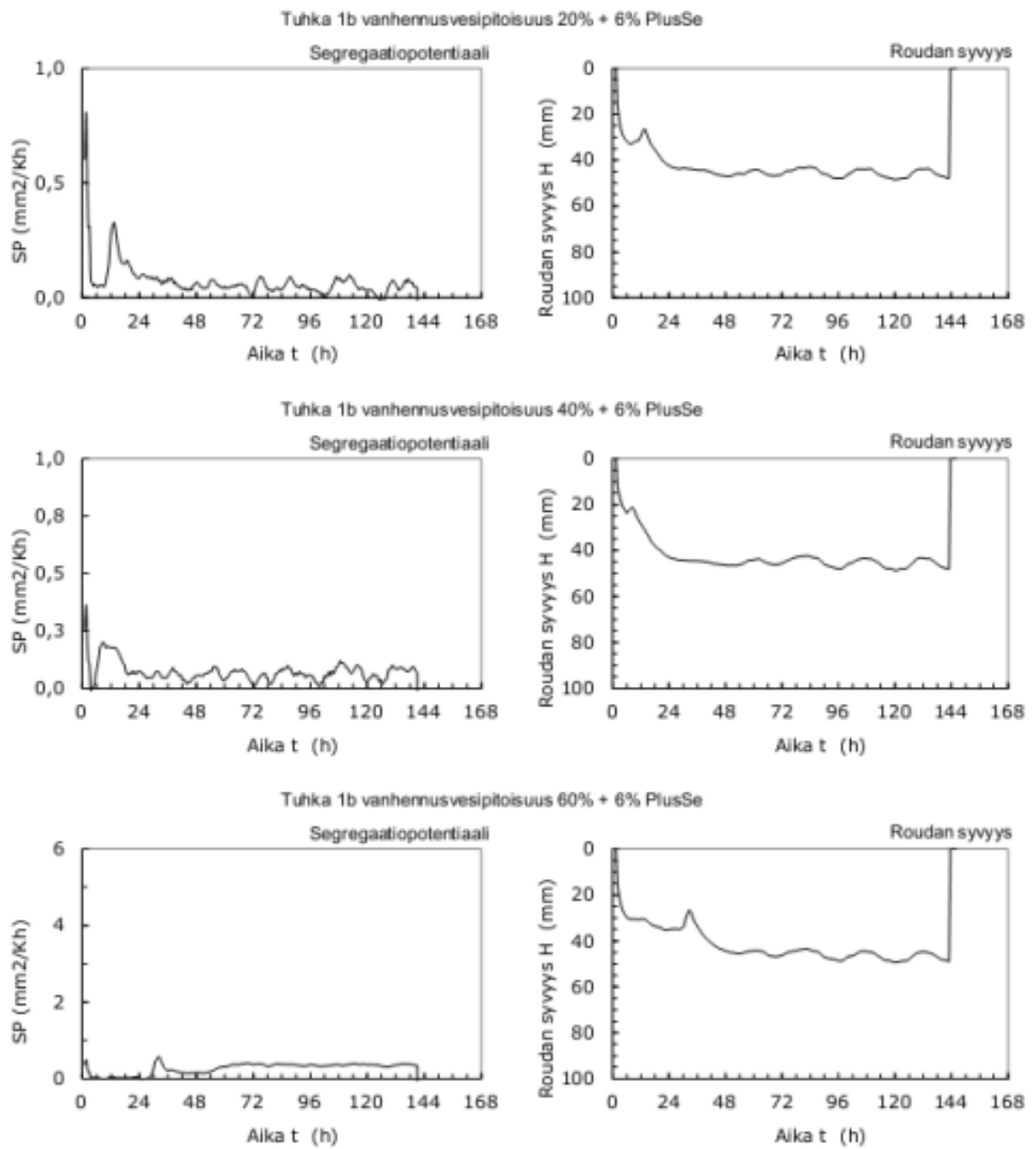
Kuva 25 28 vuorokautta vanhennetun tuhkan 1 segregaatiopotentiaali ja roudan syvyys



Kuva 26 70 vuorokautta vanhennetun tuhkan 1 segregaatiopotentiaali ja roudan syvyys



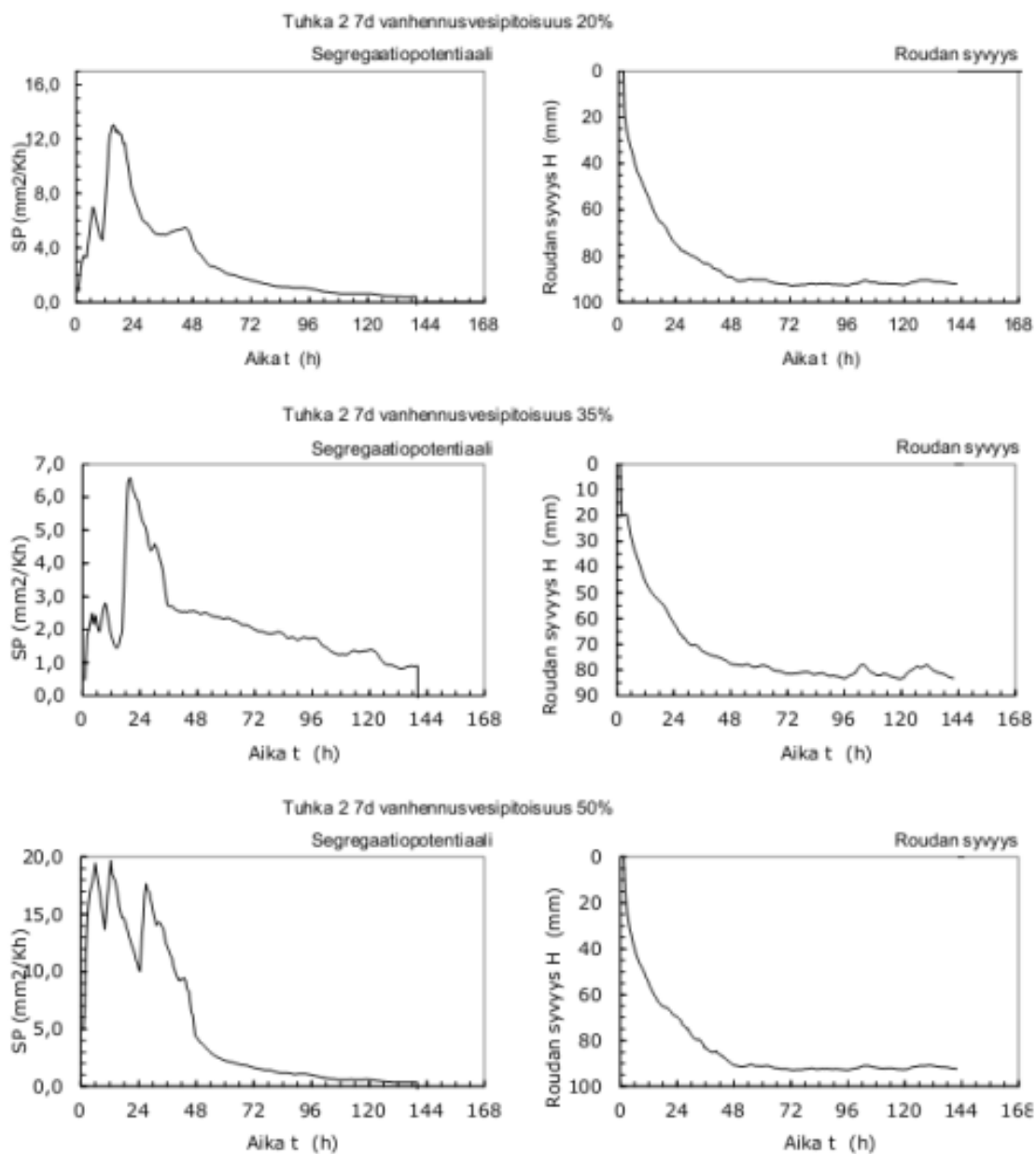
Kuva 27 28 vuorokautta vanhennetun ja 4% sementtiä lujitetun tuhkan 1 segregaatiopotentiaali ja roudan syvyys



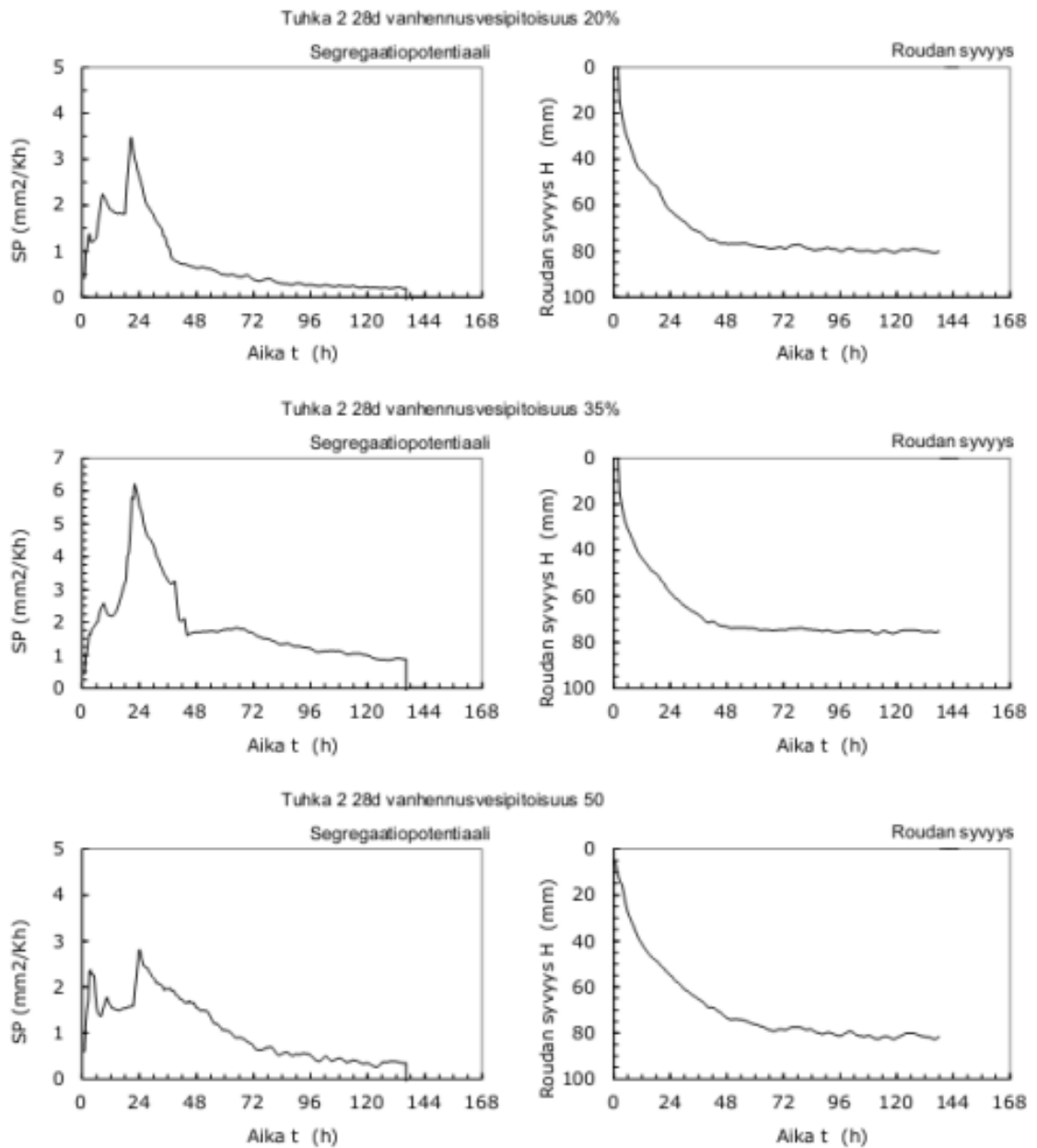
Kuva 28 28 vuorokautta vanhenneen ja 6% sementtiä lujitetun tuhkan 1 segregaatiopotentiaali ja roudan syvyys

4 Tuhkan 2 segregaatiopotentiaali ja roudan syvyys

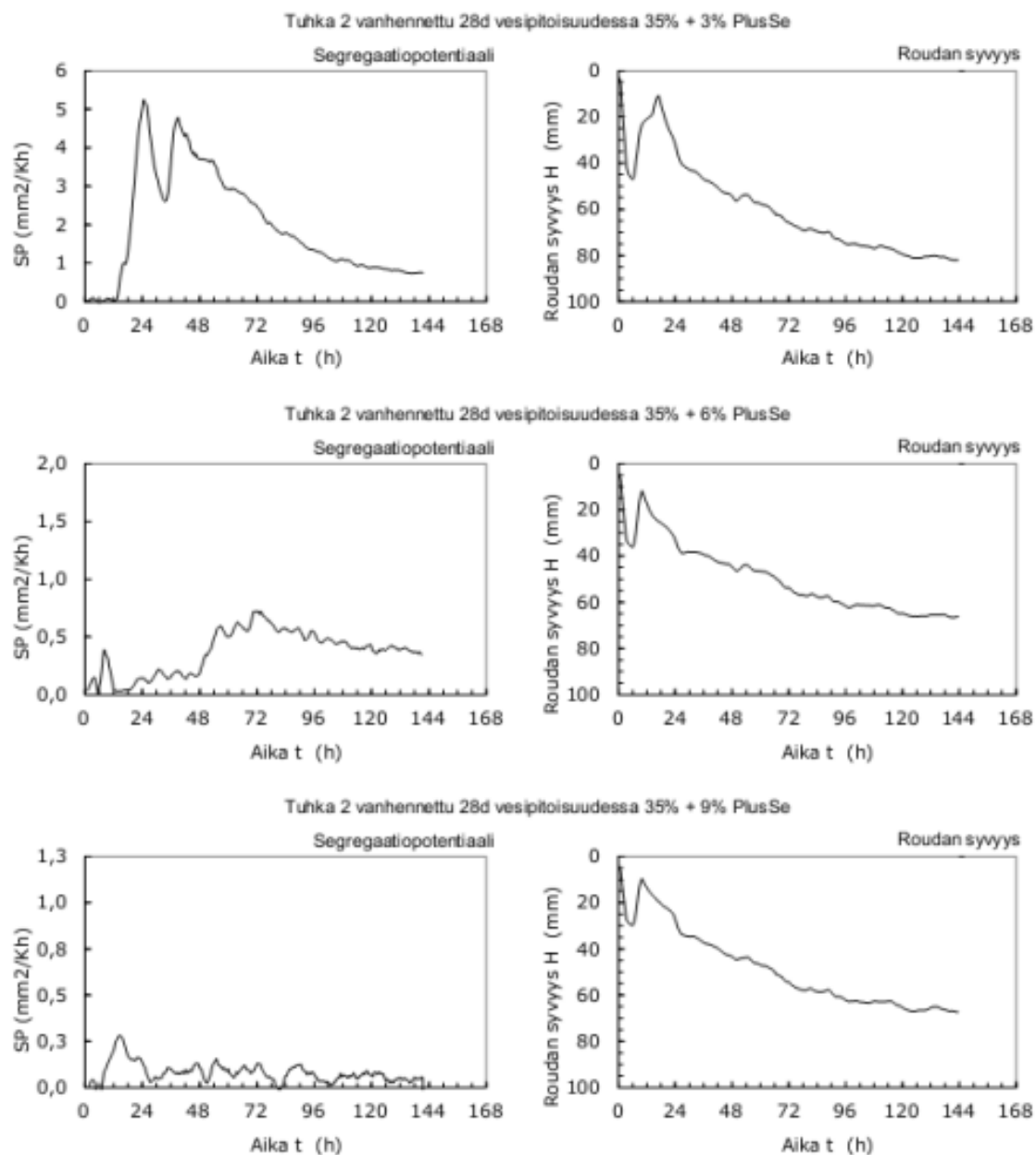
1 (3)



Kuva 29 7 vuorokautta vanhentun tuhkan 2 segregaatiopotentiaali ja roudan syvyys



Kuva 30 28 vuorokautta vanhenneetun tuhkan 2 segregaatiopotentiaali ja roudan syvyys



Kuva 31 28 vuorokautta vesipitoisuudessa 35% vanhenne-
tuhan 2 segregaatiopotentiaali ja roudan syvyys