



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
VASA YRKESHÖGSKOLA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Peter Trompari

KIPSIN JA LENTOTUHKAN HYÖDYNTÄMINEN POHJARAKENTAMISESSA

Tekniikka ja liikenne
2014

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Peter Trompari
Opinnäytetyön nimi	Kipsi & lentotuhka pohjarakentamisessa
Vuosi	2014
Kieli	suomi
Sivumäärä	43 + 9 liitettä
Ohjaaja	Martti Laaja

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, miten kipsillä stabiloitu lentotuhkarakenne käyttäytyy. Seinäjoella sijaitsevan Kurjennevan bioterminaali-varastointialueella tehtiin koekenttä rakenne, missä oli kivihiilen lentotuhkaa 80 % ja kipsiä 20 %. Selvitin tälle maa-ainekselle optimivesipitoisuuden ja kuivairtitiheyden. Tutkin myös vedenläpäisevyyttä ja routivuutta.

Sain materiaalia tuhkarakentamiseen liittyen Vaskiluodon Voima Oy:ltä. Keräsin tietoa ja otin valokuvia työmailta. Lisäksi sain neuvoja Ramboll Finland Oy:ltä. Kipsin talteen ottamiseen ja hyödyntämiseen tutustuin Vaskiluodon Voima Oy:n Vaasan voimalaitoksella. Tein Technobothnian rakennuslaboratoriossa Proctor-kokeen ja areometrianalyysin koekenttäalueen materiaalille.

Laboratoriokokeiden perusteella kipsiä voidaan hyvin käyttää yhdessä lentotuhkan ja sementin kanssa. Pieni määrä sementtiä lujittaa sopivasti rakennetta. Kipsi lujittaa havaintojeni mukaan rakennetta, koska se sitoo yhdessä sementin ja lentotuhkan kanssa vettä suhteellisen hyvin. Lujittumisprosessi jatkuu melko pitkään, mutta rakenne saavuttaa tarvittavan kantavuuden silti nopeasti rakentamisen jälkeen.

ABSTRACT

Author	Peter Trompari
Title	Gypsum and Fly Ash in Earth Construction
Year	2014
Language	Finnish
Pages	43 + 9 Appendices
Name of Supervisor	Martti Laaja

The purpose of this study was to investigate how a fly ash structure stabilized with gypsum behaves. A bio-terminal-storage area was built in Kurjenneva, Seinäjoki, where the test field consisted of fly ash from coal 80% and gypsum 20 %. The optimum water content and bulk dry density was defined for the soil. The permeability to water and frost heave were also studied.

I got a lot of material related to the construction of the ash and gypsum from Vaskiluodon Voima Oy. Information and photos were collected of work sites. Advice was received from Ramboll Finland Oy. Introduction to gypsum recovery and utilization was received in Vaskiluodon Voima Oy power plant in Vaasa. A laboratory test was made in Technobothnia, where a proctor test and areometer analysis was made on the material of test field.

The laboratory tests show that gypsum can be put to good use in conjunction with fly ash and cement. A small amount of cement makes hardens the structure. According to my observations, the gypsum makes the structure harder as it is binds water well together with cement and fly ash. The process of consolidation will continue for quite a long time, but the structure achieves the required load-bearing capacity soon after the construction.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	7
	1.1 Tausta.....	7
	1.2 Opinnäytetyön tavoitteet.....	7
	1.3 Tutkimusmenetelmät	7
2	ENERGIANTUOTANNON SIVUTUOTTEET	9
	2.1 Lentotuhka	9
	2.2 Kipsi	14
3	LUPAMENETTELYT LENTOTUHKAN JA KIPSIN KÄYTÖS- SÄ	18
	3.1 Ympäristölupa.....	18
	3.2 Mara-asetus	19
4	TUTKIMUKSET	21
	4.1 Tutkimuksen valmistelu.....	21
	4.2 Koemenetelmät	25
	4.3 Stabilointi, kipsi ja tuhka.....	27
	4.4 Kipsin käyttö pohjarakenteessa.....	29
	4.5 Laadun valvonta.....	30
5	TULOKSET.....	33
	5.1 Optimivesipitoisuus ja kuivairtitiheys Proctor-kokeella.....	33
	5.2 Aerometrianalyysi	34
	5.3 Routiminen ja lämmönjohtavuus.....	36
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	37
7	YHTEENVETO	40
	LÄHTEET	42
	LIITTEET	

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Vaskiluodon Voima Oy:n Vaasan voimalaitoksen toimintakaavio	s.17
Kuva 2. Rakennevaihtoehdot B1 ja B2	s.22
Kuva 3. Rakennevaihtoehto B3	s.23
Kuva 4. Kipsi ja tuhka ämpäreissä	s.24
Kuva 5. Lentotuhkat kuivattiin uunipelleillä	s.24
Kuva 6. Lentotuhka Proctor-koemuotissa	s.25
Kuva 7. Pohjan jyrästä	s.27
Kuva 8. Jyrästäsyvyyden tarkistus	s.28
Kuva 9. Kurjennevan koekenttäalueen stabilointi	s.28
Kuva 10. Kentän jyräys	s.29
Kuva 11. Proctor-muotti kastuu	s.34
Kuva 12. Areometriastia, mittatikku ja sekoitin	s.35
Taulukko 1. Vaasan kivihiililentotuhkan ominaisuudet	s.11
Taulukko 2. Lentotuhkan haitallisten aineiden pitoisuuksien ja liukoisuuksien raja-arvot	s.12
Taulukko 3. Lentotuhkan tekniset vaatimukset käyttöluokittain	s.13
Taulukko 4. Tyypilliset tuhkarakenteet	s.14
Taulukko 5. Kipsin tekniset ominaisuudet	s.15
Taulukko 6. Kerrosstabilointikohteen lujuuden kehitys (lentotuhka, kipsi ja sementti)	s.16
Taulukko 7. Kipsille tehdyn kolonnitestin tulokset	s.17
Taulukko 8. Tuhkien ilmoitusmenettelyä ja ympäristölupaa koskevat periaatteet	s.19
Taulukko 9. Tuhkien ilmoitusmenettelyä ja ympäristölupaa koskevat periaatteet	s.20

LIITELUETTELO

LIITE 1. Koekentän sijainti kartalla	s.44
LIITE 2. Suunnitelmapaketti 1:1000	s.45
LIITE 3. Proctor-koe 25 iskulla (kipsiä 10%, lentotuhkaa 90%)	s.47
LIITE 4. Proctor-koe 25 iskulla (kipsiä 20%, lentotuhkaa 80%)	s.48
LIITE 5. Proctor-koe 7:llä iskulla (kipsiä 20%, sementtiä 10%, lentotuhkaa 70%)	s.49
LIITE 6. Proctor-koe 25:llä iskulla (kipsiä 20%, sementtiä 10%, lentotuhkaa 70%)	s.50
LIITE 7. Areometritulokset (kipsiä 10%, lentotuhkaa 90%)	s.51
LIITE7.1 Geo-maalajiluokitus käyrä	s.51
LIITE 8. Areometritulokset (kipsiä 20%, lentotuhkaa 80%)	s.52
LIITE 8.1 Geo-maalajiluokitus käyrä	s.52
LIITE 9. Areometritulokset (kipsiä 20%, sementtiä 10%, lentotuhkaa 70%)	s.53
LIITE 9.1 Geo-maalajiluokitus käyrä	s.53

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Lentotuhkan käyttö maarakentamisessa ja muu hyötykäyttö lisääntyy vähitellen. Kipsin käyttömahdollisuuksia on tärkeää tutkia lisää, koska se on osoittautunut toimivaksi seosmateriaaliksi yhdessä lentotuhkan kanssa pohjarakenteissa. Niimenomaan kipsin ominaisuuksia ja käyttöä tuhkarakenteissa ei ole vielä tutkittu riittävästi, joten sitä on tärkeää tutkia lisää. Tuhkarakentaminen on aiheena sen verran laaja, että sitä piti rajata johonkin tiettyyn asiaan.

Myös pohjarakenteissa käytettävien oikeiden seossuhteiden löytämiseksi tehdään erilaisia laboratorio- ja kenttäkokeita.

1.2 Opinnäytetyön tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli testata tuhkan ja kipsin ominaisuuksia laboratoriokokeilla sekä saada niiden avulla tietoa, miten Seinäjoen Kurjennevan biotermiinali varastointialueen koekenttärakenne toimii. Laboratoriokokeisiin tuli kiinnittää erityistä huolellisuutta ja analysoida niitä. Selvittelin myös kipsin hyötykäyttöön ja ominaisuuksiin liittyviä asioita. On tärkeää selvittää, täyttävätkö käytettävät rakennusmateriaalit ympäristölle asetetut tavoitteet. Niin lentotuhka – kuin kipsikin sisältävät kemiallisia ainesosia, joiden pitoisuus ei saa olla liian suuri rakennettaessa. Lisäksi pitää ottaa liukenemisherkkyys pohjavesiin ja luonnonmaa-aineksiin huomioon.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tätä opinnäytetyötä tehdessä olen tutkinut lentotuhkaa ja kipsiä laboratoriossa, sekä aiheeseen liittyvää materiaalia. Vaskiluodon Voima Oy:n toimihenkilöiltä sain informaatiota ja ohjeita miten lähestyä aihetta. Tuhkan laatua ja koostumusta

on tärkeää tarkkailla ja pitää kirjaa. Se vaikuttaa lopulta esimerkiksi lupamenettelyssä, riippuen minkälaiselle alueelle aiotaan rakentaa.

Tein tässä opinnäytetyössä Technobothnian rakennuslaboratoriossa (Seinäjoen Kurjennevilla koekentällä käytetylle) rakennusmateriaalille parannetun Proctor-kokeen ja areometrianalyysin. Koealueen pinta ala on noin 0,5ha. Vertailin saamiini laboratoriotuloksia aiemmin saatuihin tuloksiin ja kaiken kaikkiaan kokeet onnistuivat toivotusti. Laboratoriokokeissa tutustuin tarkemmin lentotuhkaan ja kipsiin. Ne ovat raekooltaan ja ominaisuuksiltaan melko samankaltaisia tuotteita.

Tässä opinnäytetyössä selvitin myös Mara-asetusta (ilmoitusmenettely), eli miten se vaikuttaa tuhkarakentamiseen. Mara-asetus on valtioneuvoston asetus jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Kun tuhkaa halutaan hyötyä käyttää, on yleensä kaksi vaihtoehtoa: ilmoitusmenettely tai ympäristölupa. Tuhkarakentamisessa haetaan usein esimerkiksi ympäristölupaa. /18/

2 ENERGIANTUOTANNON SIVUTUOTTEET

2.1 Lentotuhka

Lentotuhkaa syntyy Vaskiluodon Voima Oy:n energiantuotantolaitoksissa kivihii-
len ja biopolttoaineiden (turpeen, puun) sekä viljeltyjen polttoaineiden kuten ruo-
kohelpin palamisentuotteena. Lentotuhka luokitellaan lain mukaan jätteeksi. Len-
totuhkan yksi ehdottomista eduista on sen tasalaatuisuus. Se myös lujittuu vähän
sementin tavoin, kun pääsee veden kanssa kosketuksiin. Lentotuhka erotetaan
savukaasuista sähkösuodattimella, josta se lähetetään pneumaattisesti lentotuh-
kasiiloihin. Siilosta tuhka lastataan siilon purkulaitteilla kuorma-autoihin. Purku-
laitteessa lisätään vesi tuhkaan, jotta saavutetaan optimikosteus maanrakennus-
käytölle ja estetään pölyäminen loppusijoituksessa. Pohjatuhka erotetaan hiililai-
toksissa kattilan alaosassa olevaan sammutuskaukaloon, josta se pohjatuhkakolal-
la siirretään vaihtolavaan ja edelleen välivarastoon. Kiertopetikattilassa pohjatuh-
ka seulotaan arinalta painemittauksen mukaan liika pohjatuhka pois kolakuljetti-
melle, joka siirtää sen suljettuihin vaihtolavakontteihin ja siitä edelleen väli-
varastoon kuorma-autoilla. Siilo- ja kasavarastoidun lentotuhkan ominaisuudet
poikkeavat hiukan toisistaan. /13/

Seinäjoen voimalaitoksella muodostuu lento ja pohjatuhkaa, joka syntyy turpeen
ja puuhakkeen poltosta. Seinäjoen voimalaitoksella muodostuu tuhkia 15 000 –
30 000 t/a, josta määrästä pohjatuhkassa ei ole kosteutta, mutta lentotuhkan vesi-
pitoisuus sitä vastoin on 30 – 40 %. Tuhkarakenteen keskimääräinen paino on
1300 kg/m³ tiiveyden ollessa > 90 %. Lentotuhkan kuljetuksen aikainen paino on
noin 800 – 1100 kg/m³. Tuhkalla saadaan rakennettua samalla kertaa lujia ja ke-
vyitä pohjarakenteita. Tuhkalla rakennettaessa voidaan olla varmoja, että pohjasta
tulee tiivis. /13/

Vaasan voimalaitoksella syntyy pohja- ja lentotuhkaa. Vaasan voimalaitoksen
lentotuhka on kivihii- len poltosta jäljelle jäävä materiaali. Tätä lentotuhkaa on jär-
kevää käyttää maarakentamisessa monestakin eri syystä. Lentotuhkarakenne on
ekologisesti ajateltuna järkevä, sekä samalla säästetään muita kalliimpia kaupalli-
sia tuotteita. Lentotuhkalla on hyvät lujittumisominaisuudet ja se kestää hyvin

varsinkin päällystetyssä rakenteessa. Lentotuhkarakenteen lujittuminen jatkuu pitkään, mikä on hyvä asia. Rakenteen optimivesipitoisuus on verrattain korkea, mikä antaa rakenteelle hyvin pelivaraa. Rakenne toimii hyvin jo suhteellisen alhaisellakin vesipitoisuudella 15 – 20 %, mutta edelleen 30 – 40 %. On kuitenkin huolehdittava siitä, että tuhkarakenne ei pääse vettymään, jolloin se menettää kantavuutensa. Siksi rakenteen kosteusolosuhteista on huolehdittava suunnittelussa, sala- ja avo-ojituksella sekä seuraamalla rakenteen kosteutta toteutusvaiheessa.

/18;13/

Rakennetta voidaan stabiloida esimerkiksi kipsin ja sementin avulla, jonka jälkeen kantavuus hieman paranee. Lentotuhkarakenne toimii yhdessä kipsin kanssa, ilman sementtiä.

Vaikka lentotuhkan raekoko on pieni, se kestää varsinkin stabiloituna jäätymsulamista. Se lujittuu hyvin ja kestää vuodenaikojen vaihtelua. Lämmöneristävyyssyky on hyvä. Jäätyminen-sulaminen-jäätyminen ei ole kovin suuri ongelma tuhkarakenteelle, kun rakenne (kenttä tai tie) on toteutettu suunnitelmien mukaan. Tämä tarkoittaa että salaojat toimivat ja tien tai kentän reunojen kaadot ovat riittävän jyrkät. Rakenteen on hyvä olla myös riittävän paksu, että kerrokset pysyvät paremmin kuvina ja kantavuus riittää. Roudansieto-ominaisuudet tietenkin heikkenevät hiukan ajan kuluessa, jolloin kovettunut tuhkarakenne saattaa halkeilla.

/17;19/

Taulukko 1. Vaasan kivihiililentotuhkan ominaisuudet. /15/

Ominaisuus	Arvo
Rakeisuus	0,002–0,1 mm (Si)
Optimivesipitoisuus	25–30 %
Maksimikuivairtoteiheys	1200–1300 kg/m ³
E-moduuli	50–300 MPa *
Lämmönjohtavuus	0,4–0,7 W/mK **
Vedenläpäisevyys	10 ⁻⁷ m/s

* arvio, vaihtelee tuhkan iän mukaan

** sulana, arvio vastaavien lentotuhkien perusteella

Rakeisuus on pientä, mutta tuhka on silti eristävä pohjarakennusmateriaali (Taulukko 1.). Pienestä rakeisuudesta huolimatta hyvin tiivistetty ja stabiloitu rakenne ei aiheuta routimisongelmia, kun rakenteen kuivattamisesta huolehditaan salaojin ja suodatinkankain. Tuhkarakenteella saavutetaan melko tiheitä rakenteita. /5/

Lentotuhka koostuu:

- Kvartsi, SiO₂, 45-55%
- Korundi, Al₂O₃, 20-30%
- Hematiitti, Fe₂O₃, 8-11%
- Kalsiumoksidi, CaO, 4-7%
- Magnesiumoksidi MgO, 3-5%
- Kaliumoksidi K₂O, 1-2 %
- Natriumoksidi, Na₂O, 0-2%

/13/

Taulukko 2. Lentotuhkan haitallisten aineiden pitoisuuksien ja liukoisuuksien raja-arvot. /15/

HAITALLINEN AINE	RAJA-ARVO, MG/KG KUIVA-AINETTA LAADUNVALVONTATUTKIMUKSET		
	Pitoisuus *	Liukoisuus * (L/S = 10 l/kg) Peitetty rakenne	Liukoisuus * (L/S = 10 l/kg) Päällystetty rakenne
Arseeni (As)	50		
Barium (Ba)	3 000		
Kadmium (Cd)	15		
Kromi (Cr)	400	0,5	3,0
Kupari (Cu)	400		
Lyijy (Pb)	300	0,5	1,5
Molybdeeni (Mo)	50	0,5	6,0
Vanadiini (V)	400	2,0	3,0
Sinkki (Zn)	2 000		
Seleenin (Se)		0,1	0,5
Fluoridi (F-)		10	50
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)		1 000	10 000
Kloridi (Cl-)		800	2 400

Lentotuhkan yleisimpiä rakennuskäyttökohteita ovat piha - ja kenttärakenteet. Lentotuhka sijoittuu rakenteen alaosaan ja suodatus sekä jakaviin kerroksiin. Myös tierakentamisessa lentotuhkaa käytetään jakavassa kerroksessa sekä penkereissä. /7/

Lentotuhkan käyttöä rajoittaa sen sisältämät raskasmetallit. Esimerkiksi seleenin, arseenin, kromin ja molybdeenin pitoisuudet ovat melko korkeat. Sulfaatin liukoisuus on melko korkea (Taulukko 2.).

Taulukko 3. Lentotuhkan tekniset vaatimukset käyttöluokittain. /18/

Käyttöluokka		1-aks. puristuslujuus, 28 d [MPa]	JS-kokeen muutos *	Routivuusluokitus	Lujittuminen
LT1	Lentotuhka	2	<20 %	Routimaton	Kyllä
LT2		1	<30 %	Routimaton	Kyllä
LT3		0,5	<50 %	Lievästi routiva	Kyllä
LT4		-	-	Routiva	

Yllä on lentotuhkan käyttöluokkataulukko (Taulukko 3.). Lentotuhkan on täytettävä ensin ympäristövaatimukset, että se saa käyttöluokan. Lentotuhka saa paremman käyttöluokan, kun sitä parannetaan jollakin kaupallisella sideaineella. Oikea ja sopiva resepti määritellään aina tapauskohtaisesti rakennuspaikan mukaan. Yllä olevan taulukon lentotuhkista esimerkiksi LT1 ja LT2 sopivat tie-, katu ja kenttärakentamiseen. LT3 ja LT4 lentotuhkat soveltuvat penger ja täyttötöyömaihin. Lentotuhkan käyttö vähentää samalla uusiutumattomien luonnonkiiviainesten käyttöä. /18;12/

Taulukko 4. Tyypilliset tuhkarakenteet. /7/

	P1	P2	P3	P4	P5	S1	S2	S3	K1	K2	K3
Uudisrakenne	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Korjausrakenne	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Kevennysrakenne	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Erittäin hyvä kantavuus	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Hyvä kantavuus	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Vaikea routivuusongelma	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Keskivaikea routivuusongelma	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Lievä routivuusongelma	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

P1 - P5 = Päällystetyt tiet ja kentät
S1 - S3 = Sorapäällystetiet
K1 - K3 = Kevyenliikenteen väylät

Tuhkarakenteen soveltuvuus on aina selvitettävä tapauskohtaisesti.

Tuhkaa käytetään yleensä päällystetyissä tie- ja kenttärakenteissa, sorapäällystetyissä kentissä tai teissä sekä kevyenliikenteen väylissä (Taulukko 4.).

2.2 Kipsi

Vuonna 1993 Vaasan Vaskiluotoon tehtiin rikinpoistolaitos, jonka jälkeen on pystytty tuottamaan kipsiä. Kipsiä syntyy kivihiililaitoksen rikinpoiston sivutuotteena, poistettaessa se savukaasuista erillisessä reaktorissa märkämenetelmällä, jossa kalkkikivilieteruiskutuksella sidotaan savukaasujen rikkidioksidi. Savukaasu pes-

tään neutraloivalla vedellä, joka sisältää kalsiumoksidia ja kalsiumhydroksidia. Märkämenetelmällä tuotetun kipsin hyötykäyttöaste on 95 %. /14;2/

Syntyvä kipsi menee pääosin levyteollisuuden raaka-aineeksi, mutta vähäisiä määriä tulee epäkuranttia kipsiä, jota voidaan käyttää maanrakentamisessa.

Puolikuivamenetelmällä talteen otettu kipsi ei sovellu sinällään hyötykäyttöön, mutta sitä voidaan sekoittaa pienissä määrin lentotuhkaan. Puolikuivamenetelmässä alkalia syötetään veden kanssa savukaasuihin, jolloin rikki sitoutuu. Rikin sitoutuminen alkaa kun vesi höyrystyy. Tällöin rikinsidontatuote ja lentotuhka otetaan talteen pölynerottimella. Ilmaan pääsevät hiukkaspäästöt on minimoitu uusilla polttimilla. /15/

Kipsi on hyvä pohjarakennusmateriaali, sillä sen sisältämät haitta-ainemäärät ovat pienet. Kipsin raemuoto on pyöreä. Lisäksi sitä käytetään rakennusteollisuudessa sementin lisäaineena. Sen sulfaatti, rikki ja fluoridiliukoiset pitoisuudet ovat hiukan korkeat. Ne ylittävät maanrakennuksessa Valtioneuvoston asettamat raja-arvot. Fosforin, Sulfaatin ja Fluoridin liukoisuutta voidaan pienentää stabiloimalla kipsiä lentotuhkalla ja sementillä. /18;4;11/

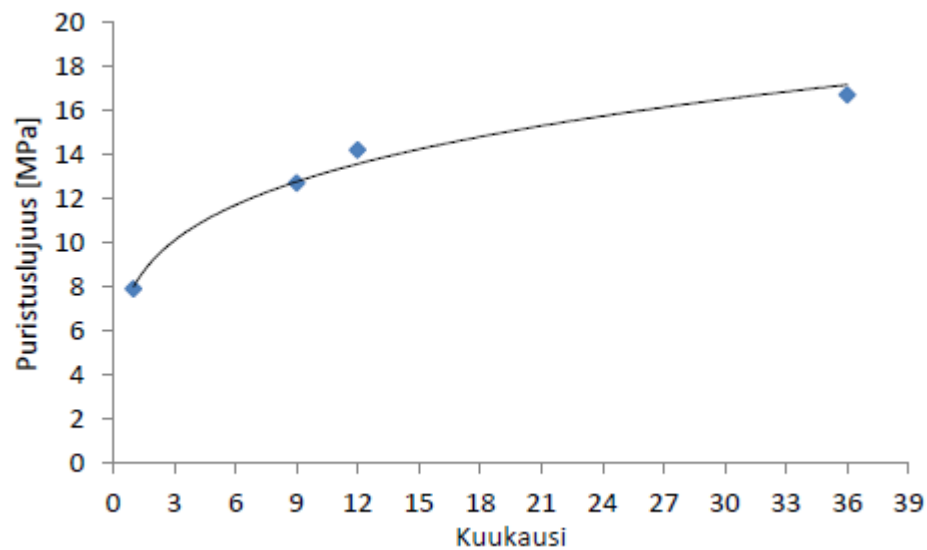
Kipsiä voidaan sijoittaa joko tavanomaisille tai ongelmajätteelle tarkoitetuille kaatopaikoille, ellei sitä haluta tai pystytä hyötykäyttämään. Viime kädessä lupaviranomainen tekee päätöksen kipsin lopullisesta käytöstä. Tuhkarakenteen maksimisyvyys ei saa ylittää 1,5 metriä, vaikka siihen lisättäisiin kipsiä sideaineeksi. /18;4/

Taulukko 5. Kipsin tekniset ominaisuudet. /18/

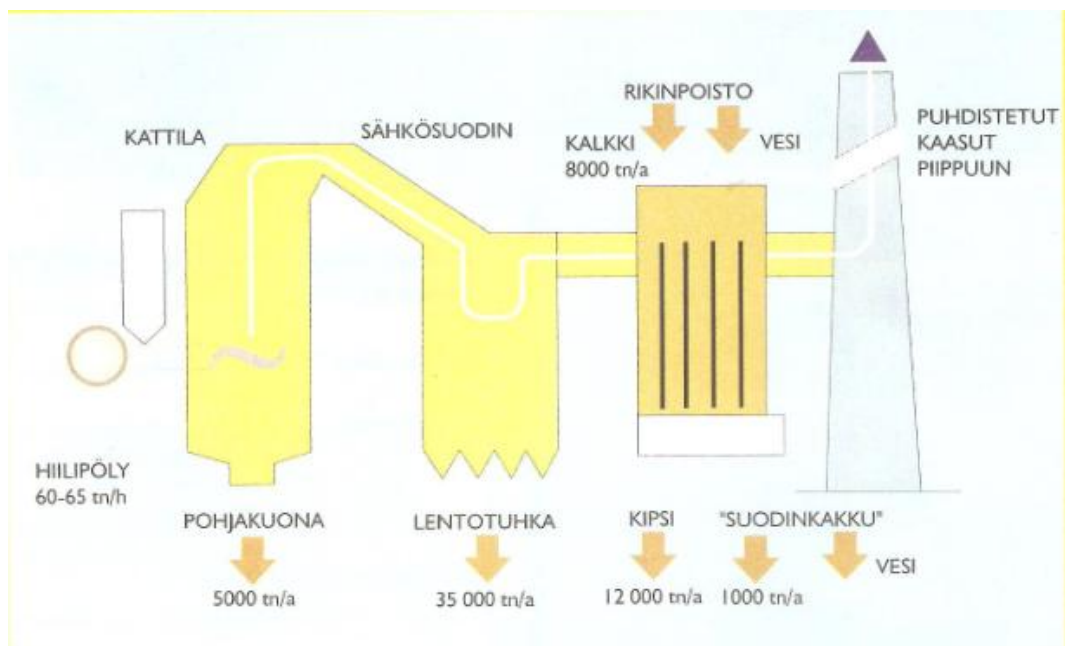
Ominaisuus	Fosfokipsi
Raekoko	0,5–1,0 mm (siltti, silttinen hiekka)
Optimivesipitoisuus	15–20 %
Maksimikuivatiheys	1470–1670 kg/m ³
Vedenläpäisevyys	10 ⁻⁵ –10 ⁻⁴ m/s

Kuten yllä olevasta taulukosta (Taulukko 5.) nähdään, kipsin kuivatiheys on vähän suurempaa kuin lentotuhkalla. Lisäksi optimaalinen vesipitoisuus on pienempi ja raekoko suurempi. Sekä lentotuhka että kipsi kuuluvat ”siltti-maalajeihin”.

Taulukko 6. Kerrosstabilointikohteen lujuuden kehitys (lentotuhka, kipsi ja sementti). /18/



Lentotuhkan, kipsin ja sementin muodostama kerros-stabilointirakenne lujittuu todella pitkään vielä rakentamisajankohdan jälkeen, kuten (Taulukko 6.) huomataan. On tärkeää huomata, että puristuslujuus on jo aika pian hyvä.



Kuva 1. Vaskiluodon Voima Oy:n Vaasan voimalaitoksen toimintakaavio. /5/

Lentotuhkaa muodostuu reilusti enemmän kuin kipsiä. Kipsin määrä on myös huomattava ja sen määrä on myös sen verran suuri että hyödyntäminen on järkevää (Kuva 1.).

Taulukko 7. Kipsille tehdyn kolonnitestin tulokset. /16/

Tutkimus	Tulos	Yksikkö	U	Menetelmä	Laboratorio
(a) AN0XC	Kolonnitesti:			CEN/TS 14405	EUDEFR
(a) FR0G8	Antimoni (Sb)	0.010	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0H3	Arseeni (As)	0.010	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0GW	Barium (Ba)	0.38	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0H6	Elohopea (Hg)	0.0024	mg/kg ka	EN 1483	EUDEFR
(a) FR0GX	Kadmium (Cd)	0.0024	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0GY	Kromi (Cr)	0.010	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0GZ	Kupari (Cu)	0.050	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0H2	Lyijy (Pb)	0.010	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0H0	Molybdeeni (Mo)	0.030	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0H1	Nikkeli (Ni)	0.013	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0H4	Seleeni (Se)	0.011	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0H5	Sinkki (Zn)	0.10	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR09Y	Vanadiini (V)	0.10	mg/kg ka	EN ISO 17294-2	EUDEFR
(a) FR0H9	Fluoridi	63	mg/kg ka	EN ISO 10304-1/-2	EUDEFR
(a) FR0H7	Kloridi	8.9	mg/kg ka	EN ISO 10304-1/-2	EUDEFR
(a) FR0H8	Sulfaatti	15000	mg/kg ka	EN ISO 10304-1/-2	EUDEFR
(a) FR0HB	Fenoli-indeksi	0.10	mg/kg ka	EN ISO 14402	EUDEFR
(a) FR0HC	Liuenneet aineet (TDS)	23400	mg/kg ka	EN 15216/DIN 38409-H1	EUDEFR
(a) FR0A2	Liennut org. hiili (DOC)	5.8	mg/kg ka	EN 1484	EUDEFR

Sulfaatin liukoisuus on huomattavaa (Taulukko 7.). Kolonnitesti tunnetaan myös läpivirtaustestinä.

3 LUPAMENETTELYT LENTOTUHKAN JA KIPSIN KÄY- TÖSSÄ

3.1 Ympäristölupa

Ympäristölupaa lentotuhkarakenteen rakentamiselle haetaan aluehallintovirastolta tai kunnan ympäristölupaviranomaiselta. Luvan käsittelyaika kunnassa on noin 4 kuukautta. Aluehallintovirastolta haettaessa se voi olla 10 kuukautta. Sitä on haettava, ellei lentotuhka täytä Mara-asetuksen vaatimuksia. Ympäristönsuojelulain 8§ on pohjaveden pilaamiskielto. Pohjaveden hyvästä laadusta on tärkeää pitää huolta. Lain mukaan sellaiselle maa-alueelle ei saa laittaa jätettä, jossa se voi olla haitaksi pohjaveden laadulle. Ympäristölupaa ei tarvita jätteille, joiden käyttö on Mara-asetuksen mukaista. Ympäristölupa haetaan kaupungin tai kunnan ympäristölupaviranomaiselta, kun käytettävä tuhkamäärä on alle 10 000tn. Aluehallintoviranomaiselta lupa haetaan, kun tuhkamäärä ylittää 10 000tn. /18;5;1/

Kurjennevan bioterminaalialueelle Kurjennevalle myönnettiin ympäristölupa ja rekisteröinti merkittiin ympäristösuojelun tietojärjestelmään. Tämän jälkeen Seinäjoen rakennustarkastaja myönsi toimenpideluvan rakentamiselle. /18;1/

Toinen vastaavanlainen maanrakennusprojekti tehtiin 2010 - 2012 vuosien välisenä aikana Seinäjoen Routakalliolla. Sinne tehtiin monitoimialue. Siihen haettiin ympäristölupaa Länsi-Suomen ympäristökeskukselta. Mara-ilmoituksen myönsi Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. Seinäjoen kaupunki myönsi toimenpideluvan projektille. Mara-ilmoitus ja ympäristölupa myönnettiin, joten projekti saatiin vietyä hyvin läpi. Myös tuhkan hyötykäytölle pysäköinti ja monitoimialueen rakenteissa haettiin lupaa ja sen myönsi Etelä-Pohjanmaan ELY-keskus. /10/

Routakallion monitoimialueen rakentamiseen käytettävän tuhkan vesipitoisuutta tarkkailtiin vesipitoisuusanalyysillä. Tällöin tavoiteltu vesipitoisuus Sevon lentotuhkalle oli 33,5 – 41,0 %.

Taulukko 8. Ilmoitusmenettelyn ja ympäristöluvan suuntaa-antavia käsittelyaikoja. /18/

Viranomainen	Menettelytapa	Käsittelyaika
ELY-keskus	Ilmoitusmenettely	≤ 1 kk
	Ympäristölupa	> 4 kk
Kunnan ympäristöviranomaisen	Koetoimintailmoitus	>1 kk
	Rekisteröinti (ei kaikissa kunnissa)	>1 kk
Aluehallintoviranomaisen (AVI)	Ympäristölupa	> 10 kk
	Koetoimintailmoitus	> 1 kk

ELY-keskus käsittelee ilmoitusmenettelyllä tehdyn projektin nopeasti alle kuukaudessa (Taulukko 8.). Ympäristöluvan käsittelyyn menee enemmän aikaa kunnan ympäristölupaviranomaisella. Vähintään 4 kuukautta. Aluehallintoviranomaisen käsittelee ympäristölupaa vähintään 10 kuukautta.

3.2 Mara-asetus

Mara-asetus on valtioneuvoston asetus jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Mara-ilmoitus on tehtävä ELY-keskukselle (elinkeino-, -liikenne ja ympäristökeskus). ELY-keskuksella on käytössään VAHTI-tietojärjestelmä, johon kirjataan ympäristönsuojeluun liittyvät ilmoitukset. Ilmoituksen käsittelyssä menee yleensä noin 1 kuukausi. Ilmoitus kannattaa antaa heti ELY-keskukselle käsiteltäväksi, kun halutaan aloittaa uusi työmaa. Mara - asetus sallii lentotuhkan käytön siinä tapauksessa, mikäli sen pitoisuudet ja liukoisuusraja-arvot pysyvät sallittujen rajoissa. Kenttä- ja tierakenteen tulee olla päällystetty tai muuten peitetty. Päällysteeksi sopii esimerkiksi asfaltti, jossa tyhjätila < 5 %. Peittämisessä käytetään soraa tai hiekkakerrosta vähintään 10cm. Tuhkarakenteen maksimi syvyys on 1.5m. Tätä asetusta ei käytetä pohjavesialueella. Sitten kun Mara-ilmoitus on rekisteröity, alueen hyödyntäminen voidaan aloittaa. /18;11/

Vaasan voimalaitoksen lentotuhkaa voidaan käyttää Mara-asetusta vastaavissa kohteissa. Mara-asetus koskee kenttärakenteita, yleisiä teitä ja katuja sekä kevyen-

liikenteen väyliä. Myös alueet, joilla tulva on mahdollinen, käsitellään tapauskohtaisesti. Maarakennustyömaalla pitää huomioida suunnittelussa pohjavedenpinnan vaihtelut. Pohjaveden pinta saattaa vaihdella vuoden aikojen mukaan yllättävän paljon. /7/

Mara-asetuksen mukaan lentotuhkaa voidaan varastoida neljä viikkoa työmaalla, jos sitä ei ole suojattu. Suojattuna lentotuhkaa voidaan varastoida 10 kuukautta. Lentotuhkakasa voidaan suojata esimerkiksi muovipressulla, niin ettei esimerkiksi arseenia pääse liukenemaan pohjavesiin. Rakenteen ja tuhkan tarpeen suuruudesta johtuen pitää aina miettiä, kannattaako tuhka suojata. Suojattuna säilytysaika on paljon pidempi, eikä työmaalla tule tarpeetonta kiirettä. Tuhkaa tuotetaan eniten talviaikaan, ja suurin osa maarakentamisesta tapahtuu kesällä. Tämä on yksi syy, miksi tuhkan varastointiin tulee kiinnittää huomiota. Oikein varastoituna tuhka säilyttää hyvin ominaisuutensa. Tuhkan käyttö maarakentamisessa edistää sen tuntemista ja siitä saadaan lisää kokemuksia, mikä on tärkeää markkinoinnin kannalta. Onnistunut rakennusprojekti edistää osaltaan lainsäädännön kehitystyötä. /7;4/

Taulukko 9. Tuhkien ilmoitusmenettelyä ja ympäristölupaa koskevat periaatteet. /18/

Tuhkan luokitus	Menettelytapa	Tuhkalaatu	Viranomainen
MARA-asetus täyttyy	Ilmoitusmenettely	Biotuhkat / Kivihiilituhkat	ELY-keskus
MARA-asetus ylittyy / Muut kuin MARA-asetuksen sivutuotteet tai sovellukset	Ympäristölupa	Kaikki tuhkat	Kunnan ympäristölupaviranomainen: hyödynnettävä määrä <10 000 t/a Aluehallintoviranomainen: hyödynnettävä määrä ≥10 000 t/a

MARA-asetus: VNa 591/2006 ja VNa 403/2009

ELY-keskus käsittelee tuhkan käytöstä tehdyn ilmoituksen (Taulukko 9.), kun Mara-asetus täyttyy. Kun Mara-asetus ylittyy, tarvitaan ympäristölupa jonka käsittelee aluehallintoviranomainen.

4 TUTKIMUKSET

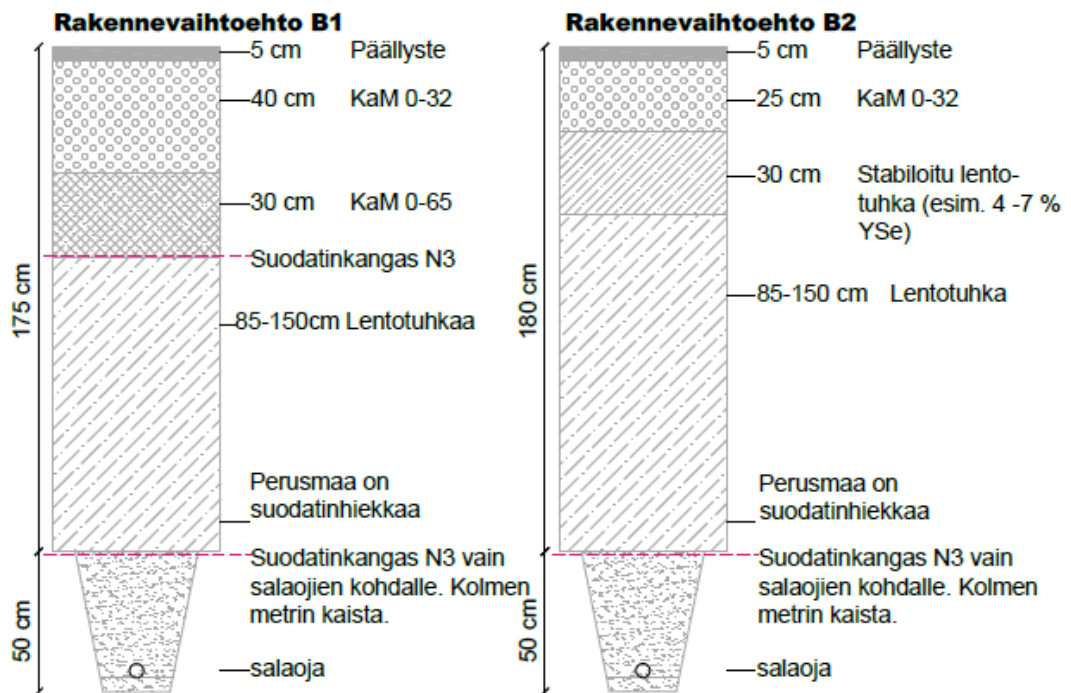
4.1 Tutkimuksen valmistelu

Tutustuin aluksi Vaskiluodon Voima Oy:n Seinäjoen voimalaitokseen syksyllä 2013. Perehdyin pohja- ja lentotuhkan muodostumiseen ja selvittelin niiden rakennusteknisiä ominaisuuksia. Tutkin tuhkan muodostumisprosessia ja varastointitapoja. Pohja- ja lentotuhkarakentamiseen liittyy aina ympäristönsuojelu-asiat, samalla kun pohjarakenteista halutaan saada kestäviä ja hinnaltaan kilpailukykyisiä. On hyvä että tuhkaa ja kipsiä voidaan käyttää pohjarakenteessa, samalla säästäten luonnon materiaaleja. Kullekin rakennuskohteelle selvitetään optimaalinen resepti, millä kohde toteutetaan. Tuhkarakentamisessa vältetään jäteverolta, kun sivutuotteet voidaan ohjata rakentamiseen. Ne eivät ole ainoastaan edullisempia, vaan hyvin toimivia ja vertailukelpoisia luonnonmateriaaleihin. Tuhkalla voidaan korvata esimerkiksi suodatinhiekan käyttöä. Pitää kuitenkin muistaa, että rakenteen on hyvä olla riittävän paksu, että se pysyisi varmemmin kuivana. Tuhkan hyötykäyttö on myös edullista, koska samaa työkalustoa voidaan käyttää monessa eri vaiheessa. /7/

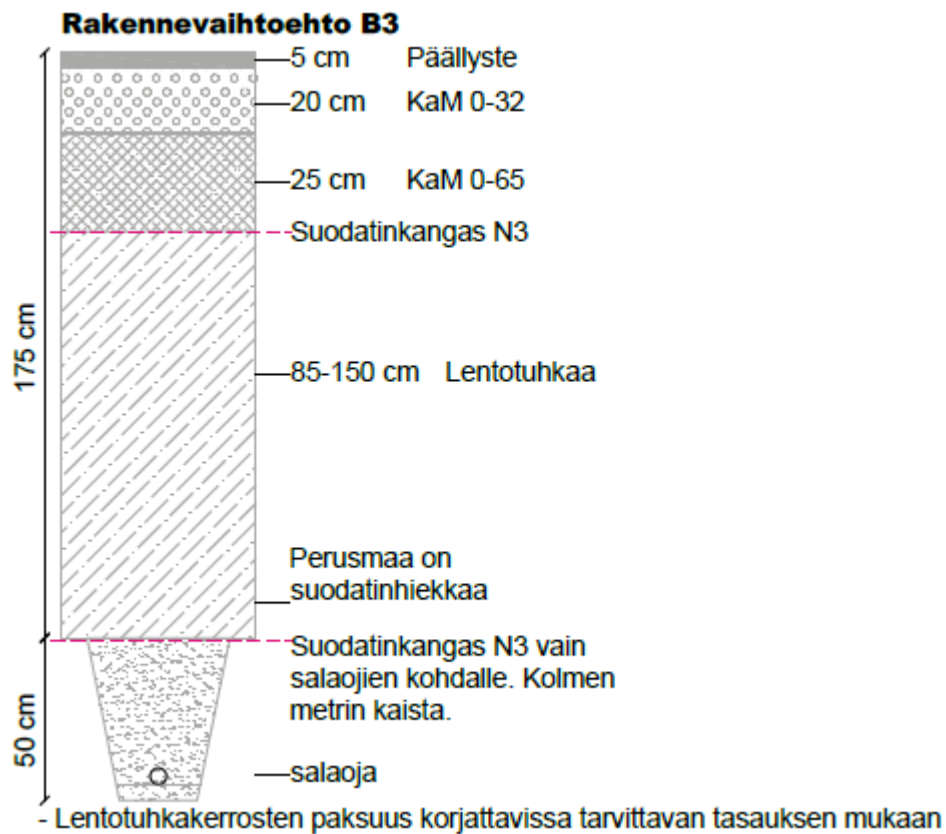
Tutustuin Kurjennevan biotermiinalialueen työmaahan syksyllä 2013. Siellä oli jo aloitettu alueen laajennustyöt. Lisäksi siellä kokeiltiin 0,5 hehtaarin alueelle koe-kenttärakennetta. Kentälle oli varastoitu jo puuta ja tuhkaa. Lisäksi sinne on tarkoitettu laittaa valaistus. Salaojitus ja penkereitten kaato oli tehty huolellisesti, jotta rakenne pysyy kuivana.

Kurjennevan biotermiinalialueen rakennevaihtoehtoja olivat B1, B2 ja B3 (Kuva 2 ja Kuva 3.). Kaikki nämä vaihtoehdot sisältävät 5 cm:n asfalttipäällysteen. B1 rakennevaihtoehdossa päällysteen alle tulee kalliomurskettä raekooltaan 0-32mm 40 cm:n kerros. Sen alle tulee 30 cm:n kerros kalliomurskettä 0-65 raekooltaan. Murskeen ja noin metrin paksuisen lentotuhkakerroksen väliin tulee suodatinkangas N3. Perusmaa on suodatinhiekkää kaikissa näissä vaihtoehdoissa. N3-suodatinkangasta laitetaan salaojien kohdalle kolmen metrin kaistalle kaikkiin rakennevaihtoehtoihin. B1- ja B3-rakennevaihtoehtojen ero on siinä, että B1:een

laitetaan puolet enemmän 0-32mm kalliomursketta (40cm) päällysteen alle ja 0-65mm kalliomursketta 5cm enemmän (30cm) kuin B3:een. B2-rakennevaihtoehtoon päällysteen alle laitetaan 0-32mm kalliomursketta 25cm ja sen alle stabiloitulentotuhkakerros 30cm. Stabiloidun lentotuhkakerroksen alapuolelle laitetaan noin reilu metri lentotuhkaa. Lentotuhkan alla on perusmaana suodatinhiekkaa ja sen alla N3-suodatinkangas. /8/



Kuva 2. Rakennevaihtoehdot B1 ja B2. /8/



Kuva 3. Rakennevaihtoehto B3. /8/

Lentotuhkaa ja kipsiä hain Vaasan Runsorissa olevalta Vaskiluodon Voima Oy:n varastointialueelta. Otin näytettä kipsistä ja lentotuhkasta tarvittavan määrän ämpäreihin, jotka vein rakennuslaboratorioon. Näytteet otettiin syvemmältä kasalta, ei siis pinnasta. Tällöin lentotuhka ja kipsi olivat kuivempia ja jopa vähän lämpöisiä.



Kuva 4. Kipsi ja tuhka ovat ämpäreissä.



Kuva 5. Lentotuhkat kuivattiin uunipelleillä.

Kuvassa on lentotuhka pelleillä juuri uunista otettuna (Kuva 5.). Lentotuhkat ja kipsi kuivattiin uunissa noin 100 asteessa noin vuorokauden ajan. Oli tärkeää kuivata sopivan pieni määrä tuhkaa ja kipsiä kerrallaan, että ne kuivuivat tasalaatuisesti. Riittävä kuivuus oli helppoa todeta, varsinkin tuhka pölysi helposti, kun sitä

kaadettiin vaa'an päällä olevaan ämpäriin. Kipsin ja lentotuhkan erottaa helposti väleistään (Kuva 4.), kipsi on vaaleampana vasemmalla kuvassa.

4.2 Koemenetelmät

Valokuvasin työmaata ja sen toimintatapoja ja tein muistiinpanoja. Työmaalla tehtiin vesivolymetrimittauksia ja tutkittiin rakenteen kuivatilavuuspainoa. Tein Vaasan ammattikorkeakoulun rakennuslaboratoriossa Technobothniassa parannetun Proctor-kokeen ja areometrianalyysin. Laboratoriossa sain tärkeää opastusta laboratorioteknikko Timo Riikoselta.

Proctor-kokeella pystyttiin selvittämään pohjarakenteen maksimi kuivairtoteiheys sekä optimaalinen vesipitoisuus. /6, 54–56/



Kuva 6. Lentotuhka Proctor-koemuotissa.

Yllä Proctor-muotti (Kuva 6.) ja sen sisällä tuhka + kipsi 20 % + sementti 10 %. Lisäksi lisäsin vettä halutun vesipitoisuuden mukaan. Vesipitoisuus vaihteli 15 % – 40 %. Ensin punnitsin materiaalit ja tein reseptin mukaan 2kg annokset kerrallaan. Sekoitin ämpärissä materiaalit huolellisesti. Annostelin 9 lusikallista materi-

aalia muotin pohjalle ja sen jälkeen iskin sitä pudotusvasaralla. Annostelin materiaalin viiteen eri kerrokseen ja iskin joka kerroksen huolellisesti. Tein Proctorkokeen sekä 7 - että 25 iskulla reseptille, joka sisälsi lentotuhkan ja kipsin lisäksi myös sementtiä. Lentotuhkan ja kipsin muodostamalle reseptille tein Proctorkokeen 25 iskulla, jossa vesipitoisuus vaihteli 15 % – 30 %.

Lopuksi irrotin muotin yläosan ja kaavin pinnan tasaiseksi, että materiaalia on varmasti oikea määrä. 25 iskulla tehty koe antoi tarkempia tuloksia, koska aines tiivistyi paremmin useamman iskun ansiosta.

Areometrikokeeseen kuului näytteellä täytettävä vähän yli litran vetävä koeastia, areometrimitari, lämpömittari sekä sekoitin. Kokeella määritin rakeisuusjakautumaa väliltä 0,002 – 0,074 mm. Koe aloitettiin niin, että sekoitimme ensin pieneen kulhoon 50g yhteispainoltaan lentotuhkaa ja kipsiä. Näytteen punnitus tehtiin tarkasti vaa'alla. Siten että lentotuhkaa 40g, kipsiä 10g. Tein areometrikokeen kolmella eri reseptillä. Reseptit olivat: lentotuhkaa 40g ja kipsiä 10g, lentotuhkaa 30g ja kipsiä 20g sekä lentotuhkaa 35g, kipsiä 10g ja sementtiä 5g. Sekoitettu aines laitettiin putkiloon, jonka jälkeen sinne lisättiin peptisaattoriliuosta. Peptisaattoriliuos irrottaa paremmin rakeita toisistaan. Sen jälkeen koeastiaan lisättiin 200ml tislattua vettä, että seos olisi väkevämpi. Seosta sekoitettiin tämän jälkeen 30min. Seos seiso vuorokauden. Vuorokauden kuluttua vettä lisättiin siten, että seoksen kokonaismäärä nousi 1000ml:aan. Mittasin alkulämpötilan 19 celsiusta. Tämän jälkeen tein uuden 30min sekoituksen. Sekoituksen jälkeen aloitin ajan mittauksen välittömästi. Ajanmittausajankohdat olivat tämän jälkeen 1min, 6min, 5h ja 1vrk. Jokaisella kerralla mittasin myös seoksen lämpötilan, joka kuitenkin pysyi 19 celsiusessa. Lisäksi mittasin nesteen tiheyden areometrimitarilla.

4.3 Stabilointi, kipsi ja tuhka

Kurjennevan bioterminaalialueen lentotuhkakoekenttärakenne stabiloitiin kipsin avulla. Stabilointi suoritettiin traktorin perässä olevalla jyrsimellä. Jyrsin oli kaksisainen, jossa oli ensin karkeahampaiset pyörät jotka jyršivät ja sekoittivat rakennusainekset keskenään. Jyrsin varmisti, ettei rakenteeseen jäänyt isompia paakkuja. Toisella akselilla oli pintaa tasaava metallijyrä. Kipsin ja lentotuhkan sekoittuminen oli helppo havaita, koska kipsi teki muuten niin mustasta lentotuhkasta paljon vaaleampaa.



Kuva 7. Pohjan jyršintä.

Kuva on otettu heti stabilointijyršimen ajon jälkeen (Kuva 7.). Oikealla on sekoitettu lentotuhka ja kipsi ja vasemmalla syvemmällä on lentotuhkaa.



Kuva 8. Jyrsintäsyvyyden tarkistus.

Jyrsintäsyvyys oli noin 30cm (Kuva 8.).



Kuva 9. Kurjennevan koekenttälueen stabilointi.

Traktorin perässä olevalla jyrsimellä stabiloidaan (Kuva 9.) kivihiilen lentotuhka ja kipsi. Sekoitus sujui suunnitelmien mukaan ja materiaalit sekoittuivat keskenään suunnitellusti. Jyrsinän jälkeen kenttä jyrättiin tasaiseksi (Kuva10.).



Kuva 10. Kentän jyräys.

Vasemmalla valssijyrä tiivistää koekenttää ja oikealla stabiloidaan. Tämän työmaan suunnittelussa käytettiin laserkeilausaineistoa. Puskukoneen levyyn oli kiinnitetty mittatikka, johon mittausväline lähetti signaalia maanpinnan korkeudesta. Puskukoneella tasattiin pinta ennen jyräystä ja jyräystä.

4.4 Kipsin käyttö pohjarakenteessa

Kipsi on hyvä pohjarakennusmateriaali. Sen avulla saadaan pienennettyä haitallisten raskasmetallien liukenemistä, kun sillä stabiloidaan lentotuhkaa. Kipsi alentaa bariumin ja sinkin liukoisuutta lentotuhkasta. Se alentaa varsinkin bariumin liukoisuutta, jo peitetyn alueen raja-arvojen alapuolelle rakennetta stabiloidessa. Stabuloimalla saadaan estettyä haitallisten aineiden liukenemistä. Rakenteen pH:n noustessa haitta-aineiden liukeneminen vaikeutuu. Stabiloidun ja tiivistetyn lentotuhkarakenteen vedenläpäisevyys laskee ja vaikeuttaa bariumin liukoisuutta. Bariumin liukoisuus alenee myös, kun tuhkaa vanhennetaan. Kipsin ja lentotuhkan seostaminen nostaa toisaalta fluoridin ja sulfaatin liukoisuutta. Tämän takia kip-

sin käyttö rajoittuu vielä päällystettyihin rakenteisiin. Kipsiä voidaan hyödyntää vain rajallisesti lentotuhkarakennetta stabiloidessa, koska se sisältää sulfaatteja. Sulfaatit vaikuttavat veden laatuun. Ne myös ovat korrosiivisia. Kipsin seostaminen lentotuhkaan ei pitäisi heikentää rakenteen jäätymis-sulamiskestävyyttä, koska ne ovat raekooltaan hyvin lähellä toisiaan. Myös vedenläpäisykyky on samaa luokkaa. /18;7/

Kipsin lisäys lentotuhkaan parantaa tuhkarakenteen lujittumista. Pohjarakenteen pitkäaikaislujuutus kasvaa, kun kipsiä käytetään. Kipsi lisää materiaalien sitoutumista. Yleisestimentin ja kipsin lisäys yhdessä toimii edelleen vielä paremmin lentotuhkarakenteessa. Toisaalta sementin käyttöä pyritään välttämään, koska tuhkarakentamisen kustannustehokkuus laskee. Kipsin on todettu lisäävän lentotuhkarakenteen puristuslujuutta. /12, 10/

4.5 Laadunvalvonta

Tuhkarakentamisessa päästään laadukkaaseen rakenteeseen. Siihen vaikuttaa osaltaan pohja- ja lentotuhkan tasalaatuisuus. Myös se, että materiaalien kemiallinen koostumus ja käyttäytymistapa erilaisissa kosteusolosuhteissa tunnetaan, helpottaa työmaiden suunnittelua. Tuhkarakentamiskohde onnistuu toivotulla tavalla, kun laadunvarmistus tapahtuu ketjussa. Ketju alkaa materiaalin tuottajasta ja tuhkan tuotannosta ja päättyy maanrakentamistyöhön. Tuhkan laatua tarkkaillaan siis valmistus-, varastointi-, käsittely- ja rakentamisvaiheessa. Näin pystytään varmistamaan, että oletettuihin kantavuus-, tiiveys-, lämmöneristävyys- ja routakestävyysarvoihin päästään. /18/

Tuhkan vesipitoisuutta seurataan voimalaitoksella purkutapahtumassa otetulla säännöllisellä näyte-erällä, joiden kosteusprosentti tutkitaan omassa laboratoriossa ja välivarastoinnin aikana. Näin saadaan rakentamiseen aina tutkimusten laatutasoa vastaavaa tuhkaa. /18/

Tuhkan ja seosmateriaalien sekoittamiseen voidaan myös käyttää asema- tai aumasekoitinta. Sekoittamisessa tulee huolehtia, että niin lentotuhka, kipsi ja vesi sekoittuvat tasaisesti. /18/

Rakenteen tiiveys varmistetaan rakentamistyön aikana vesivolymetrikokeella. Kantavuusmittauksia tehdään Loadman pudotuspainolaitteella. Tiiveys varmistetaan jokaisesta tiivistyskerroksesta. Mitattuja kuivairtoteiheyksiä verrataan parantamalla Proctor-kokeella saatuun maksimi kuivairtoteiheyteen. Tuhkarakenteen tiivistämisessä pyritään aina ennalta sovittuun tavoitetiiveystasoon. Tuhkarakenteen kerrospaksuutta seurataan rakentamisen aikana. Tiivistettävän tuhkerakenteen sallittu vaihteluväli kokonaispaksuudessa on $-1 - + 3$ cm. Lopulliset kerrospaksuudet merkitään ylös 50 m välein. Tiivistettävän alueen reunakohtiin kiinnitetään tiivistyksessä erityisesti huomiota. Tiivistettävä tuhkerakenteen paksuus tie- ja kenttärakenteessa on maksimissaan 200mm, tai löyhänä 300mm. Tiivistyksen onnistumiseen vaikuttaa tuhkerakenteen vesipitoisuus. Jotta tiivistystyön lopputulos on mahdollisimman hyvä, tehdään lopputiivistys ohuen murskekerroksen päältä. Mitä parempaan tiiveysasteeseen tiivistyksessä päästään, sitä lujempaa rakenteesta tulee. Kurjennevan koekenttärakenteen tiivistämisessä käytettiin 13 tn valsijrää. Jyrässä oli myös isku, jossa oli kaksi eri iskupituutta. Iskua ei käytetä ensimmäisellä ylityskerralla. /18, 15/

Kun puskukoneella on levitetty rakennusmateriaali tasaisesti kentällä, se jyrätään tasaiseksi. Tiivistettävät lentotuhkerakokset eivät saa olla liian paksuja, koska silloin se ei tiivisty riittävästi. Suositeltu tiivistyskerros on 0,2m – 0,25m. Jos tiivistetään ohuemmissa kerroksissa, tiivistys voi heikentää alempia jo tiivistettyjä kerroksia ja työ vie enemmän aikaa. Tuhkarakenteelle todettu riittävä jyräysmäärä on noin 6–8 kertaa, kun käytetään 13 tn jyrää. Jos tuhkarakennetta jyrätään liian monta kertaa, sen kantavuus laskee rakenteen murtuessa. Ennen seuraavan tuhkerakenteen tekemistä pinta voidaan tarvittaessa karhentaa routalinssien muodostumisen estämiseksi. Karhentamista ei yleensä tehdä, mutta jos työt vaikka keskeytyvät tai tuhkarakenteen pinta joutuu olemaan ilman pinnoitetta pidempään (kuukauden tai pidempään) niin karhennus on hyvä tehdä. /15/

Jyräyksen jälkeen tutkitaan vesivolymetrikokeella rakenne. Kenttään kaivetaan pieni pyöreä tasareunainen kuoppa, jonka aines laitetaan muovipussiin. Vesivolymetri toimii paineen avulla, ja näyttää lukeman kuopan tilavuudesta. Vesivolymetrisylinterin alapäässä on vedellä täyttyvä kumipussi, joka muotoutuu kaivettua

kuoppaa vasten. Muovipussit merkitään näytteen numeron mukaan. Näytteet vietään lopuksi kuivamaan. Kuivamisen jälkeen voidaan laskea näytteen kuivatilavuuspaino. Tiivistämisen laatua voidaan myös tarkistaa levykuormituskokeella. /15/

Tiivistämisen jälkeen lentotuhkarakenne suojataan joko murskeella tai suodatin-kankaalla. Rakenne pitää suojata sateelta, jos työt keskeytyvät. Pienet alueet voidaan harkinnan mukaan suojata pressulla. Pintakerroksen liejuuntunut lentotuhka kuoritaan harkinnan mukaan pois ja käytetään toisarvoisissa paikoissa. /15/

Myös rakenteen kuivatuksesta tulee huolehtia. Silloin kun rakenne pysyy kuivana, se säilyttää halutun kantavuuden. Jos tuhkarakenne pääsee kastumaan jostain syystä liikaa, sen lujittumisominaisuudet muuttuvat. Se pehmenee ja muuttuu löysemmäksi. Kipsin ja sementin lisäämisellä saadaan muutettua lentotuhkarakennetta kantavammaksi. /18/

5 TULOKSET

5.1 Optimivesipitoisuus ja kuivairtitiheys Proctor-kokeella

Parannetulla Proctor-kokeen tein kolmelle erilaiselle reseptille. Reseptit painoprosentteina olivat: lentotuhkaa 90 % + kipsiä 10 %, lentotuhkaa 80 % + kipsiä 20 % sekä lentotuhkaa 70 % + kipsiä 20 % ja sementtiä 10 %.

Proctor-kokeella sain optimivesipitoisuudeksi 23 % reseptille, jossa oli 10 % kipsiä ja 90 % lentotuhkaa. Optimivesipitoisuus on korkea verrattuna esimerkiksi soran tai hiekan optimivesipitoisuuksiin. Kun optimivesipitoisuus on 23 %, se antaa paljon pelivaraa lentotuhkarakennetta tehtäessä. Lentotuhka rakenteet kantavat vielä hyvin vesipitoisuuden ollessa 40 %. Yli 40 % vesipitoisuuteen mentäessä rakenteen kantavuus alkaa laskea selvemmin. Tällä seossuhteella sain maksimi kuivairtitiheydeksi 1320 kg/m^3 .

Resepti, joka sisälsi 20 % kipsiä ja 80 % lentotuhkaa, optimivesipitoisuus oli myös 23 %. Maksimi kuivairtitiheys oli 1330 kg/m^3 .

Sain optimivesipitoisuudeksi 26 % materiaalille, joka sisälsi 20 % kipsiä, 10 % yleisementtiä ja 70 % kivihiilen lentotuhkaa. Kun vesipitoisuus oli 26 %, kuivairtitiheydeksi tuli 1280 kg/m^3 .

Kokeen perusteella lentotuhka tiivistyy erittäin hyvin. Se alkoi selvästi lujittua, kun sitä tiivistettiin pudotusvasaralla. Koska kipsi ja sementti ovat molemmat hienorakeisia, lentotuhkan kaltaisia, niin tiivistyminen vaikutti olevan tasalaatuisia. Huomasin myös, että kipsin ja lentotuhkan muodostama seos saavutti korkeamman kuivairtitiheyden, kuin sementtiä sisältävä seos. Kipsin hyviin ominaisuuksiin kuuluu se, että se selvästi paransi veden kestävyttä. Jo pienelläkin vesimäärällä lentotuhka ja kipsi yhdessä alkoivat sitoutua ja muodostivat lujan rakenteen. Kipsin optimivesipitoisuuden ollessa 15 – 20 % se yhdessä lentotuhkan kanssa pyrkii pitämään rakenteen optimivesipitoisuuden lähellä 20 – 25 %.

Veden määrää lisättäessä tuhka-kipsiseokseen huomasi, kun sitä oli rakenteelle liikaa. Liian kostea näyte alkoi päästää vettä Proctor-sylinterin pohjalle (Kuva 11.). Tämä tapahtui varsinkin parannetussa Proctor-kokeessa 25 iskulla.



Kuva 11. Proctormuotti kastuu.

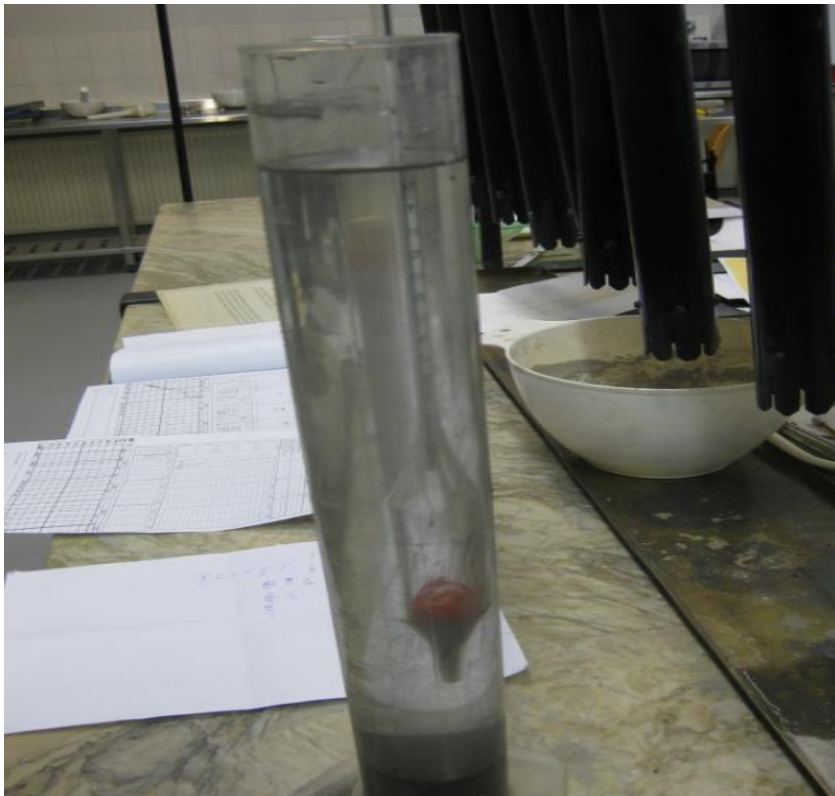
5.2 Areometrianalyysi

Areometrianalyysikokeen työtavan kävin läpi kohdassa 4.2. Areometrianalyysikokeessa huomasi, miten nopeasti tutkittava materiaali vajosi koeastian pohjalle. Mielenkiintoinen havainto oli, että lentotuhkan ja kipsin seos ei sitoutunut niin nopeasti, kuin jos mukana oli sementtiä. Ensimmäisen sekoituksen jälkeen seos sekoittui tasaisesti veteen jokaisella kolmella eri reseptillä. Seos lähti nopeasti kerääntymään koeastian pohjalle (Kuva 12.).

Areometrilukema muuttui selvästi vielä tunnin ja viiden tunnin jälkeen seoksella, joka sisälsi lentotuhkaa 90 % (painoprosenttia) ja 10 % kipsiä. Huomioitavaa on myös, ettei lukema muuttunut enää 5h ja vuorokauden mittauksen välissä.

Myös seoksen (lentotuhkaa 80 %, kipsiä 20 %) areometrilukema muuttui vielä 5h mittaukseen asti.

Areometrilukema ei muuttunut enää 6 minuutin mittauksen jälkeen reseptillä, joka sisälsi lentotuhkaa 70 %, kipsiä 20 % ja sementtiä 10 %. Areometrilukema oli 1 min mittauksessa 22 ja 6 min jälkeen se oli 5. Tunnin, viiden tunnin ja vuorokauden jälkeen lukema oli edelleen viisi. Taulukosta katsottuna raekoko oli 1 min kohdalla 0,055mm ja läpäisyprosentti 74 %. 6 min jälkeen raekoko oli 0,025 ja läpäisyprosentti putosi 17 %. Tämän jälkeen raekoko pieneni mutta läpäisyprosentti säilyi 17 %. Lentotuhka, kipsi ja yleissementti sitoutuvat nopeasti toisiinsa vedessä ja sen takia materiaali kerääntyy niin nopeasti koeastian pohjalle. /6, 30–34/



Kuva 12. Areometriastia, mittatikku ja sekoitin.

5.3 Routiminen ja lämmönjohtavuus

Routiminen johtuu maarakenteessa olevan veden jäätymisestä. Maarakenteen jäätyessä sen tilavuus kasvaa. Tilavuuden kasvaessa maa elää ja pinta saattaa halkeilla. Yleisesti ottaen roudan syvyyteen vaikuttaa ilman lämpötila, maalajin ominaisuudet (rakeisuus, vedenläpäisykyky, lämmönjohtavuus), lumi- ja kasvipeite sekä maaperän kosteusolosuhteet. Kurjensuon bioterminaali varastointialueella ei pitäisi olla kovia pohjavirtauksia, koska alue on melko tasainen. /6, 88–97/

Lentotuhkat ovat pääsääntöisesti joko lievästi routivia tai routimattomia. Niillä on parempi lämmönjohtavuus kuin luonnonkiviaineksilla. Lentotuhkan lujittumisominaisuuksien ansiosta sen vedenläpäisevyys ja routimisherkyys pienenee, kun lentotuhkaa kostutetaan. Ominaisuudet paranevat edelleen, kun mukaan lisätään sementtiä. Toisaalta lentotuhkan ja kipsin muodostamalla seoksella on paremmat puristuslujuusominaisuudet, kuin lentotuhkan ja yleisementin muodostamalla seoksella. Kipsi parantaa siis pohjarakenteen kantavuutta lentotuhkarakenteessa. Lentotuhkarakenne joka sisältää sementtiä, läpäisee vettä hitaammin kuin rakenne, jossa on lentotuhkaa ja kipsiä. Maapohjan kantavuuden kannalta voidaan ajatella, että rakenteeseen päässyt liika vesi pääsee myös nopeammin pois kipsin ja lentotuhkan muodostamassa rakenteessa. /12;11, 27/

Lentotuhkalla on hyvä vedenpidätyskyky. Lentotuhkan lujittumisominaisuuksiin vaikuttaa melko paljon se, onko sitä varastoitu kuivana vai kostutettuna. Kuivana varastoitu lentotuhka säilyttää lujittumisominaisuutensa paremmin, kuin märkänä varastoitu lentotuhka. Lentotuhkaa on toisaalta helpompi varastoida suuria määriä kostutettuna, koska se ei silloin pölyä. /12, 7/

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Laboratoriokokeiden perusteella lentotuhkarakenteesta, joka sisältää myös kipsiä, tulee varmasti tiivistä ja kantavaa. Proctor-koetta tehdessä huomasin, kuinka materiaali tiivistyi huomattavan helposti. Jo 15 % vesipitoisuudella rakenne lujittui melko hyvin. Sen sijaan, kun vettä lisättiin 30 %, rakenteen kyky sitoa vettä alkoi pettää. Vesi tuli Proctor-muotin alareunan alta materiaalien läpi. Tuhka rakenteen suunnittelussa tulee siis kiinnittää huomiota siihen, että rakenne pysyisi mahdollisimman lähellä optimivesipitoisuutta. Testaamillani reseptillä siis 23 – 26 %.

Kipsi on hyvä ja toimiva materiaali yhdessä lentotuhkan kanssa. Kipsi ei samalla tavalla kovetu ja sitoudu aivan yhtä lujaa lentotuhkan kanssa kuin sementti. Toisaalta kipsin ja lentotuhkan muodostama rakenne pystyy käsittelemään vettä hyvin. Se läpäisee vettä nopeammin kuin sementtiä sisältävä seos. Sementin hyvä ominaisuus on se, että se estää tehokkaasti kipsissä ja lentotuhkassa olevien raskasmetallien liukenemisen pohjavesiin. Liukeneminen estyy tai vähenee huomattavasti jo pienelläkin sementin määrällä. Kipsin sisältämien haitallisten aineiden (sulfaatit, fluoridi) määrät ovat kuitenkin pienehköjä. Alueella, jossa riski liukenemiseen pohjavesiin on pieni, voidaan sementin pois jättämistä harkita.

Tutkimusteni perusteella sementin lisääminen lentotuhkarakenteeseen on kustannuskysymys. Sementin lisääminen tuhkarakenteeseen on kalliimpaa, kuin käytettäessä lentotuhkaa ja kipsiä. Mielestäni sementtiä olisi hyvä laittaa ainakin isompia kohteita rakennettaessa. Toimiva lentotuhkarakenneresepti olisi varmasti sellainen, missä on yleissementtiä 2,5–5 %, kipsiä 10–15 % ja loput lentotuhkaa.

Kenttärakenteen suodatinkerroksen suodatinhiekkakerros 20–50cm estää veden kapillaarisen nousun ylempiin rakenteisiin. Suodatinhiekan tehtävänä on myös estää roudan tunkeutuminen alla olevaan pohjamaahan. Suodatinhiekkakerrokseen tulee tehdä 1 % kallistukset salaojiin.

Suodatinhiekan päälle tuleva kivihiilen ja turpeenpolton lentotuhka 60–90cm lisää kantavuutta ja jakaa maalle aiheutuvia kuormia tasaisemmaksi. Lisäksi lentotuhkan päälle tuleva kipsillä stabiloitu lentotuhkarakenteen 30–50cm tarkoitus on

lisätä kantavuutta entisestään. On hyvä, että tutkittu lentotuhkarakenne kestää melko hyvin jäätymis-sulamista. Lisäksi lentotuhkakerrosten tulee olla hiukan ojaan päin kaltevia, jotta vesi ei pääse imeytymään liikaa lentotuhkaan. Stabiloitun tuhkakerroksen päälle laitetaan kalliomurskettä (0..32) 25–40cm ja pintaan asfalttia 5cm. Lentotuhkan ja kalliomurskeen väliin laitetaan suodatinkangas tarpeen mukaan. Kantava kerros jakaa esimerkiksi ajoneuvoista maahan kohdistuvat jännitykset tasaisemmaksi. Päälysteenä asfaltti estää maanpinnan kulumisen ja myös liian veden pääsyn rakenteeseen.

Stabilointi on varmasti edullisempi ja järkevämpi vaihtoehto, kuin massanvaihto. Lisäksi säästetään luonnonkiviaineksia. Lentotuhkarakenne tehdään myös ohuemmaksi kuin esimerkiksi hiekalla rakennettaessa. Mielestäni salaojien toiminnasta tulee varmistua, että rakenne pysyy riittävän kuivana. Lähiojien vedenlaatua on hyvä tarkkailla tietyin väliajoin. Koekentän vieressä on myös soinen vesistöalue, jonka turvallisuus pitää varmistaa. Niin lähivesien kuin eläintenkin terveys on tärkeää. Myös rakenteen mahdollisia vuotuisia painumia olisi hyvä seurata. Jos painumia löytyy, pitäisi heti selvittää mistä se johtuu. Koekenttärakenne on erinomainen tilaisuus testata miten kipsi toimii yhdessä lentotuhkan ja kanssa.

Stabiloidun lentotuhkarakenteen jyräyksestä huomasi, että rakenne tiivistyi ja lujittui. Se ei painunut tavallaan liikaa, mikä on hyvä asia. Jyräyskertojen tulee olla tarkoin harkittuja, muuten rakenteen kantavuus lähtee laskuun. Proctor-kokeella pystytään määrittämään paras tiivistys määrä. 6–8 jyräyskertaa on todettu hyväksi määräksi 13tn jyrällä. Silloin kun maa alkaa tavallaan mennä jyrän edellä aaltomaisesti, tiedetään että on jyrätty jo vähän liikaa. Tiiveyden laadun ja oikean vesipitoisuuden varmistukseksi tehdään vesivolymetrikoe heti jyräyksen jälkeen. Mielestäni lentotuhkarakennetta on järkevää stabiloida kipsillä, koska lentotuhka ja kipsi sitoutuvat tehokkaasti toisiinsa. Myös pieni määrä sementtiä estää raskasmetallien liukenemistä ja lujittaa rakennetta. Kurjensuon koekenttä (0,5 ha) on pieni verrattuna koko varastointialueeseen, joten liukenemisvaara on pieni.

Tuhkan levittäminen saattaa olla joskus vähän ongelmallista, että kuinka kuorma-autolla päästään tarpeeksi lähelle rakennuskohdetta varsinkin kenttää rakennetta-

essa. Kohteeseen tutustumalla ja sen vaatimuksia kartoittamalla pystytään varmistamaan työn etenemistä aikataulussa ja budjetin mukaan. Koekenttä onnistui hyvin, koska se tehtiin jo osittain valmiin varastointialueen viereen. Puskukone levitti rakennusainekset tasaisesti kentällä.

7. YHTEENVETO

Tässä työssä saatujen laboratoriokoetulosten ja aiemmin tutkitun materiaalin perusteella kipsi sopii hyvin käytettäväksi lentotuhkan kanssa. Koetuloksissa sain lentotuhkan ja kipsin sekä lentotuhkan, kipsin ja sementtiä muodostaville seoksille realistisen kuivairtoteiheyden ja optimivesipitoisuuden. Sementin määrää lentotuhkan sideaineena halutaan vähentää kustannussyistä. Lentotuhkaa halutaan hyödyntää maarakentamisessa, koska se on toimiva materiaali. Pohjarakenteessa hyödynnettäessä tuhkaa ei tarvitse viedä kaatopaikalle ja maksaa jäteveromaksua. Myös luonnonkiviainesta on järkevää säästää.

Laboratoriokokeiden Proctor-koetta tehdessä huomasi, miten lentotuhka kyllä lujittuu suhteellisen nopeasti, kun se sisältää pienenkin määrän sementtiä. Toisaalta lentotuhkan ja kipsin muodostaman seoksen lujittuminen jatkuu pitkään, mikä on hyvä asia. Pitkäaikaislujittumisen ansiosta seos ehtii asettua tasaisesti, eikä lujitu liian nopeasti. Lentotuhkan ja kipsin muodostama seos on lievästi pozzolainen, eli itsestään lujittuva. Käytännössä lentotuhkarakenteita ei ole välttämätöntä lujittaa sementillä. Pieni määrä sementtiä suhteessa lentotuhkaan, tai lentotuhkaan ja kipsiin yhdessä, varmistaa kuitenkin rakenteen riittävän lujittumisen. Jo pieni määrä sementtiä estää myös tehokkaasti lentotukan sisältämien raskasmetallien liukenemistä. Kipsin sisältämien haitallisten aineiden määrä on suhteellisen pieni. Lentotuhkarakenne, jossa on kipsiä, läpäisee paremmin vettä kuin jos seoksessa on sementtiä. Tällöin rakenne säilyttää paremmin optimivesipitoisuutensa.

Lentotuhkan kuljettaminen energiantuotantolaitoksilta työmaalle on myös helppoa, kun lentotuhka pidetään optimivesipitoisuudessa kuljetuksen alkamisesta lähtien. Kuiva lentotuhka pölisee runsaasti. Lentotuhkarakenne halutaan rakentaa tuhkan ollessa lähellä optimivesipitoisuutta, joten siitä huolehtiminen on tärkeää. Lentotuhkarakenteen stabilointi kipsillä on myös sen takia järkevää, kun lentotuhka ja kipsi ovat raekooltaan hyvin samankaltaisia. Myös vedenläpäisykyky on lähellä samaa.

Alueen ympäristölupaviranomainen ja aluehallintovirasto tekevät tiivistä yhteistyötä energiantuotantolaitosten ja tuhkarakentamisen parissa työskentelevien ura-

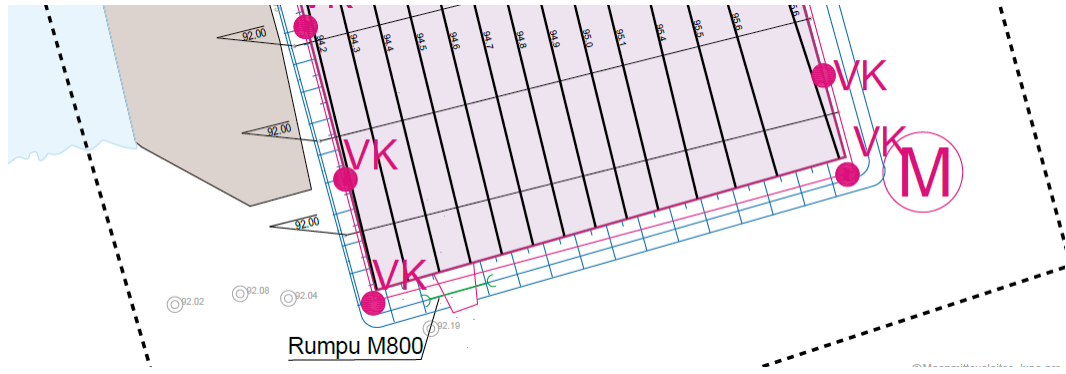
koitsijoiden kanssa. Aluehallintovirastolta ympäristölupaa haetaan, kun käytettävä tuhkamäärä ylittää 10 000tn. Mara-asetuksen täyttyessä koskien tuhkan liukoisuuksia käytetään ilmoitusmenettelyä, eli käytöstä ilmoitetaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle. Lentotuhkan varastointi onnistuu työmaalla Mara-asetuksen mukaan siten, että suojaamattomana lentotuhkaa voidaan varastoida neljä viikkoa. Yli neljän viikon varastoinnissa lentotuhka suojataan, esimerkiksi suodatinkankaalla.

Lentotuhka ja kipsi ovat helposti työmaalla työstettäviä. Tie- tai kenttärakennetta on helppo muokata näitä materiaaleja käytettäessä. Tuhkarakentamiseen löytyy toimivaksi todettu välineistö, joten työ on sujuvaa ja tehokasta. Myös säätilaa seuraamalla pystytään laatimaan aikataulu halutuille työvaiheille. Vesisateella tai liian kylmällä ilmalla tuhalla rakentaminen seisautetaan ja rakenne suojataan.

LÄHTEET

- /1/ Alatervo, J., 2013. Jätteiden maanrakennushyötykäyttö. Verkkojulkaisu. Viitattu 24.1.2014. http://www.ely-keskus.fi/documents/10191/409601/9_Jatteiden_maarakennushyotykyaytto._Alatervo.pdf/0e8d1d5d-2590-4f18-afbc-6a2d7fd68c8f
- /2/ Energiateollisuus. Ympäristö ja kestävä kehitys. Verkkojulkaisu. Viitattu 20.1.2014. <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/ymparisto-ja-kestava-kehitys/ymparistovaikutukset/kiinteat-jatteet>
- /3/ Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus 2013. Ilmoitus jätteen hyödyntämisestä maarakentamisessa 22.10.2013. Tutkimusraportti.
- /4/ Eurofins. Kipsin hyödyntäminen maanrakennuksessa. Kipsi 21.9-19.11.2013, 494-2013-00000879. Tutkimusraportti.
- /5/ Hilmola, A., Salo, P. & Tiilikka, M. Vaskiluodon Voima Oy. Lentotuhkan käyttöohjekortti 2011, 11. Oppimateriaali.
- /6/ Jääskeläinen, R. 2011. Geotekniikan perusteet. 3 painos. Jyväskylä. Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy.
- /7/ Kontio, P., Tiilikka, M. & Olli, M. 2011. Tuhkien hyötykäyttö maanrakentamisessa Seinäjoki – Vaasa- alueella. Lakeuden etappi., Vaskiluodon Voima Oy., Ramboll Finland Oy., Tekes. Tutkimusraportti.
- /8/ Lehtinen, M. 2013. Kurjennevan bioterminaalialue suunnitelmakartta 1:1000. Tyyppirakenteet. Vaskiluodon Voima Oy. Tutkimusraportti.
- /9/ Mitta Oy. Laserkeilaus. Verkkojulkaisu. Viitattu 14.1.2014. <http://www.mitta.fi/laserkeilaukset.html>
- /10/ Mäkikangas, S. & Olli, M. Ramboll. Monitoimialueen loppuraportti 2012, 1.
- /11/ Ollila, S. 2011, 1. Diplomityö. Teollisuuden sivutuotteiden stabi-loinnin, seostamisen ja vanhentamisen vaikutus haitta-aineiden liukoisuuksiin. Oulun Yliopisto.
- /12/ Ollila, S. & Kiviniemi, O. 2011. Tuhkien hyötykäytön tuotteistus ja liiketoiminnan kehittäminen Seinäjoki – Vaasa- alueella. Vuosiraportti 2010. Lakeuden Etappi Oy ja Vaskiluodon Voima Oy. Viitattu 1.2.2014. Tutkimusraportti.
- /13/ Oy Finn Ash-Power Ltd. Yleistietoa lentotuhkasta. Viitattu 14.1.2014. <http://www.ashpower.fi/tietoa.html>
- /14/ Pohjolan Voima Oy. Voimalaitostoiminta. Viitattu 16.12.2013. <http://www.pohjolanvoima.fi/voimalaitokset>

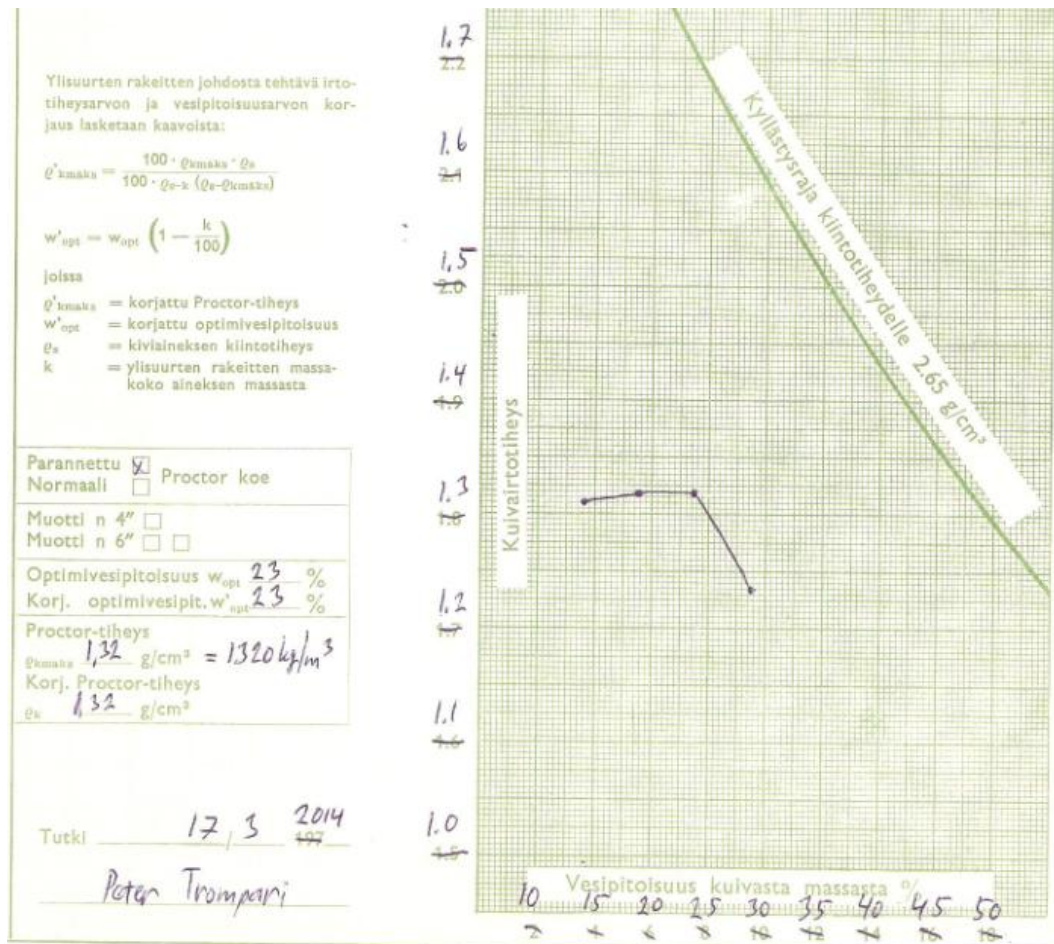
- /15/ Rudus Oy Lentotuhkaohje. 2008, 1. Käyttöohje rakentamiseen ja suunnitteluun. Verkkajulkaisu. Viitattu 10.1.2014.
www.rudus.fi/Download/27881/Lentotuhka-ohje.pdf
- /16/ Saari, S. 2012, 11. Kolonnitesti kipsi. Scientific Finland Oy. Eurofins. Oppimateriaali.
- /17/ Torrbacka, L. 2012, 8. Lentotuhka – Sevo. Vaskiluodon Voima Oy. Oppimateriaali.
- /18/ Tuhkarakentamisen käsikirja. 2012, 1. Ramboll Finland Oy. Viitattu 11.12.2013. http://www.infrary.fi/files/3985_Tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf
- /19/ Voimalaitos sivutuotteet ympäristörakentamisessa. 2010. Vaskiluodon Voima Oy. Oppimateriaali.



LIITE 3.

10% lypsä 25 iskua

Proctor-muotin tilavuus V = 944,5		cm ³	1	2	3	4	5
Näytteen massa		g	1700	1700	1700	1700	
Haluttu kosteus		%	15	20	25	30	
Lisättävä vesimäärä		g	255	340	425	510	
Kosteä näyte + muotti		g	6372	6442	6504	6450	
Muotti		g	4957	4957	4957	4957	
Näytteen massa märkänä	m _m	g	1415	1485	1547	1493	
Kosteä näyte + astia	m _m + m _a	g	2111	2179	2215	2194	
Kuiva näyte + astia	m _k + m _a	g	1934	1942	1913	1861	
Astia	m _a	g	635	692	665	701	
Näytteen massa kuivana	m _k	g	1239	1250	1248	1160	
Veden massa	m _w	g	176	235	299	333	
Vesipitoisuus märästä massasta	$w_m = 100 \cdot \frac{m_w}{m_m}$	%	12,4	15,8	19,3	22,3	
Vesipitoisuus kuivasta massasta	$w_k = \frac{100 \cdot m_w}{m_k} = \frac{100 \cdot w_m}{100 - w_m}$	%	14,2	18,8	24,0	28,7	
Näytteen massa kuivana	$m_k = \frac{100 - w_m}{100} \cdot m_m$	g	1240	1250	1248	1160	
Märkäirttiheys	$\rho_m = \frac{m_m}{V}$	g/cm ³	1,50	1,57	1,64	1,58	
Kuivairttiheys	$\rho_k = \frac{m_k}{V}$	g/cm ³	1,31	1,32	1,32	1,23	



LIITE 4.

		20% kipsiä	25 iskua						
Proctor-muotin tilavuus V =		944,5	cm ³		1	2	3	4	5
Näytteen massa		g	1700	1700	1700	1700			
Haluttu kosteus		%	15	20	25	30			
Lisättävä vesimäärä		g	255	340	425	510			
Kosteaa näyte + muotti		g	6345	6451	6544	6498			
Muotti		g	4957	4957	4957	4957			
Näytteen massa märkänä	m _m	g	1388	1494	1587	1541			
Kosteaa näyte + astia	m _m + m _a	g	2087	2173	2270	2211			
Kuiva näyte + astia	m _k + m _a	g	1913	1934	1942	1852			
Astia	m _a	g	698	681	682	670			
Näytteen massa kuivana	m _k	g	1215	1253	1260	1182			
Veden massa	m _w	g	173	241	327	359			
Vesipitoisuus määstä massasta	$w_m = 100 \cdot \frac{m_w}{m_m}$	%	12,5	16,1	20,6	23,3			
Vesipitoisuus kuivasta massasta	$w_k = \frac{100 \cdot m_w}{m_k} = \frac{100 \cdot w_m}{100 - w_m}$	%	14,3	19,2	26,0	30,4			
Näytteen massa kuivana	$m_k = \frac{100 - w_m}{100} \cdot m_m$	g	1215	1253	1260	1182			
Märkäirttiheys	$\rho_m = \frac{m_m}{V}$	g/cm ³	1,47	1,58	1,68	1,63			
Kuivairttiheys	$\rho_k = \frac{m_k}{V}$	g/cm ³	1,29	1,33	1,33	1,25			

Ylisuurten rakeitten johdosta tehtävä irto-
ttiheysarvon ja vesipitoisuusarvon kor-
jaus lasketaan kaavoista:

$$\rho'_{kmax} = \frac{100 \cdot \rho_{kmax} \cdot \rho_s}{100 \cdot \rho_s - k \cdot (\rho_s - \rho_{kmax})}$$

$$w'_{opt} = w_{opt} \left(1 - \frac{k}{100}\right)$$

joissa

- ρ'_{kmax} = korjattu Proctor-tiheys
- w'_{opt} = korjattu optimivesipitoisuus
- ρ_s = kiviaineksen kiintotiheys
- k = ylisuurten rakeitten massa-
koko aineksen massasta

Parannettu Proctor koe
 Normaali Proctor koe

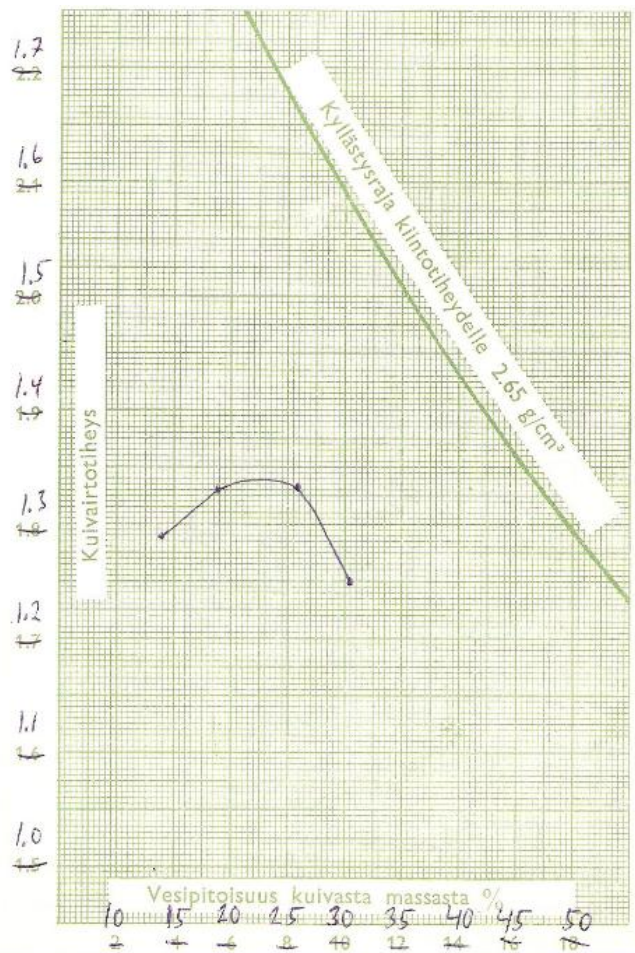
Muotti n 4"
 Muotti n 6"

Optimivesipitoisuus w_{opt} 23 %
 Korj. optimivesipit. w'_{opt} 23 %

Proctor-tiheys
 ρ_{kmax} 1,33 g/cm³ = 1330 kg/m³
 Korj. Proctor-tiheys
 ρ_s 1,33 g/cm³

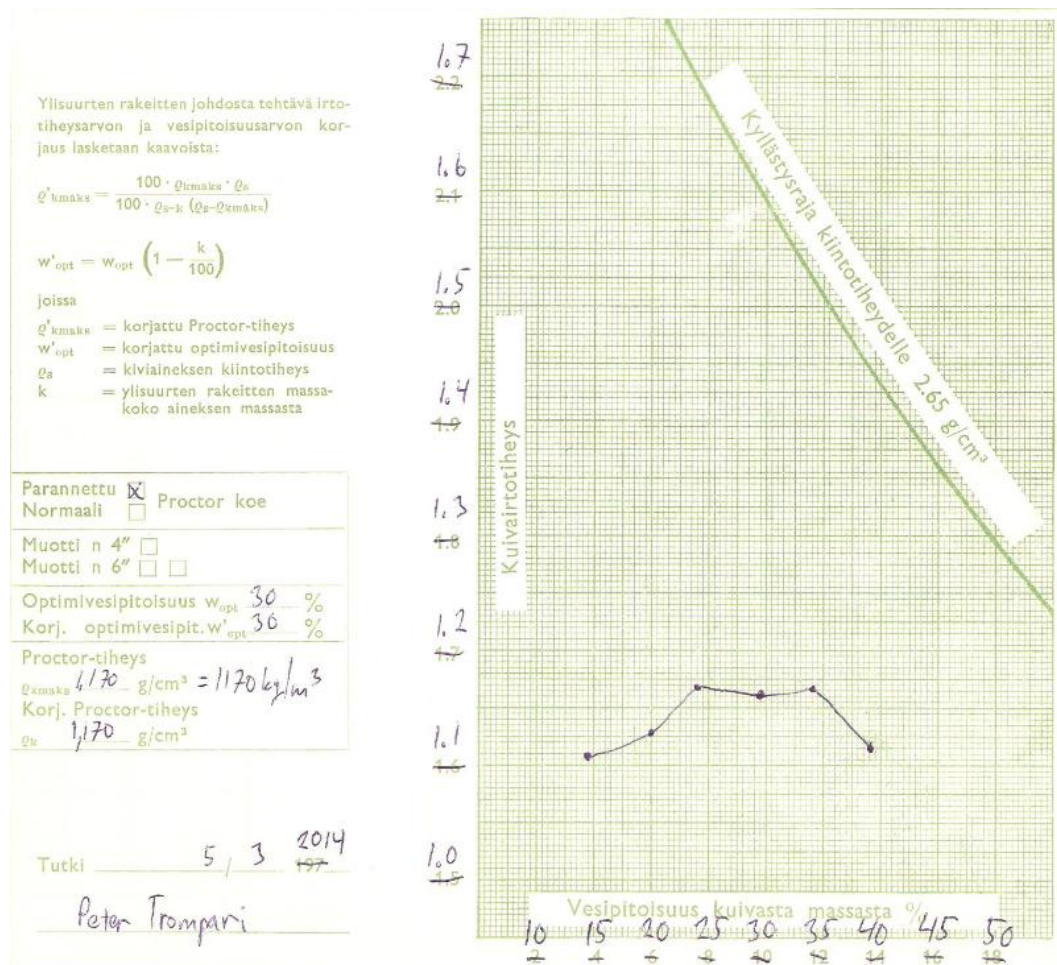
Tutki 17 / 3 2014

Peter Trompari



LIITE 5.

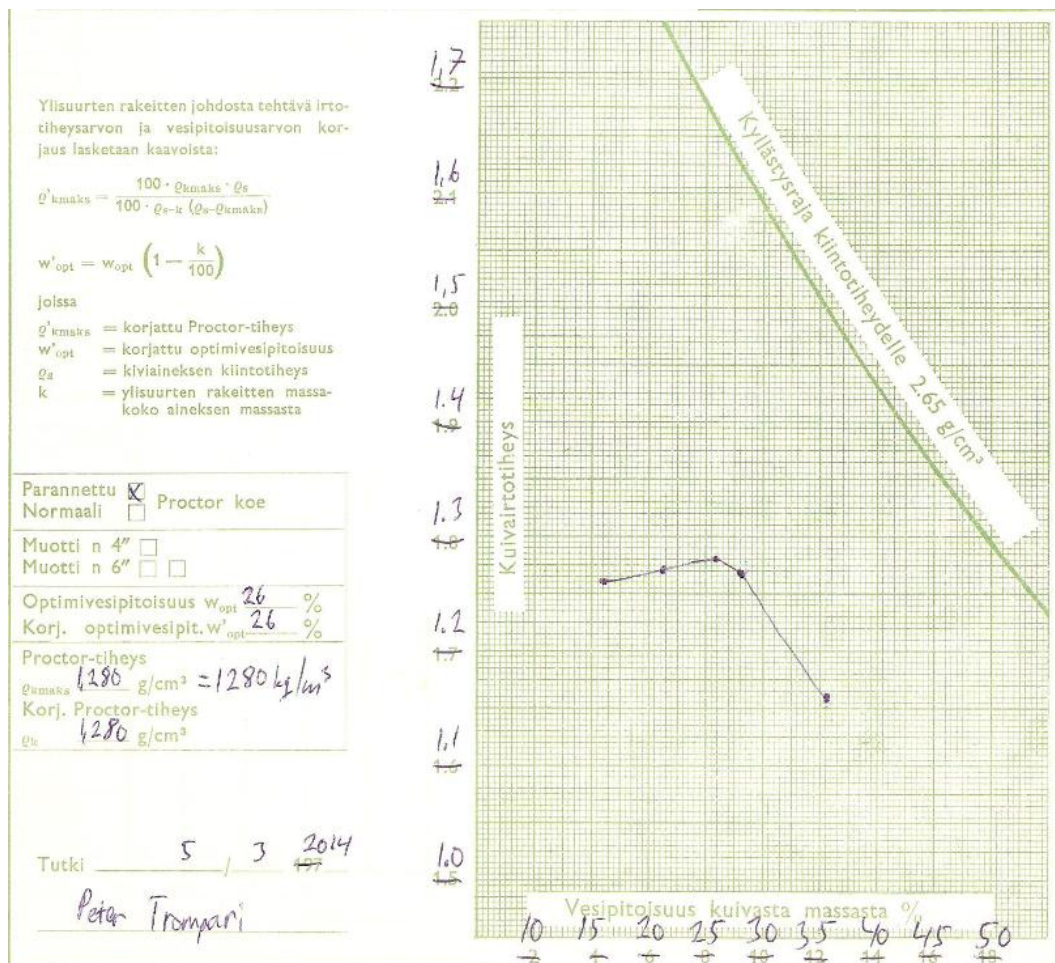
Proctor-muotin tilavuus V = 944,5 cm ³		1	2	3	4	5	6	
Näytteen massa		g	2500	2000	2000	2000	2000	2000
Haluttu kosteus		%	15	20	25	30	35	40
Lisättävä vesimäärä		g	375	400	500	600	700	800
Kosteaa näyte + muotti		g	6158	6238	6321	6380	6443	6436
Muotti		g	4957	4957	4957	4957	4957	4957
Näytteen massa märkänä	m _m	g	1201	1281	1372	1423	1486	1473
Kosteaa näyte + astia	m _m + m _a	g	1861	1985	2072	2095	2165	2142
Kuiva näyte + astia	m _s + m _a	g	1710	1771	1809	1772	1784	1725
Astia	m _a	g	660	704	700	672	679	665
Näytteen massa kuivana	m _s	g	1050	1067	1109	1100	1105	1062
Veden massa	m _w	g	151	214	263	323	381	417
Vesipitoisuus märästä massasta	$w_m = 100 \cdot \frac{m_w}{m_m}$	%	12,6	16,7	19,2	22,7	25,6	28,2
Vesipitoisuus kuivasta massasta	$w_k = \frac{100 m_w}{m_s} = \frac{100 w_m}{100 - w_m}$	%	14,4	20,0	23,8	29,4	34,4	39,3
Näytteen massa kuivana	$m_s = \frac{100 - w_m}{100} \cdot m_m$	g	1050	1067	1109	1100	1106	1062
Märkäirtotiheys	$\rho_m = \frac{m_m}{V}$	g/cm ³	1,27	1,36	1,45	1,51	1,57	1,57
Kuivairtotiheys	$\rho_k = \frac{m_s}{V}$	g/cm ³	1,11	1,13	1,17	1,16	1,17	1,12



Proctorkoe 7 iskulla viiteen kerrokseen.

LIITE 6.

Proctor-muotin tilavuus V = 944,5 cm ³		1	2	3	4	5	
Näytteen massa		g	2000	2000	2000	2000	
Haluttu kosteus		%	15	20	25	27,5	35
Lisättävä vesimäärä		g	300	400	500	550	700
Kostea näyte + muotti		g	6333	6400	6476	6501	6439
Muotti		g	4957	4957	4957	4957	4957
Näytteen massa märkänä	m_m	g	1376	1452	1519	1544	1482
Kostea näyte + astia	$m_m + m_a$	g	2049	2152	2213	2209	2177
Kuiva näyte + astia	$m_k + m_a$	g	1861	1900	1898	1863	1788
Astia	m_a	g	673	700	694	665	695
Näytteen massa kuivana	m_k	g	1188	1200	1204	1204	1093
Veden massa	m_w	g	188	252	315	340	389
Vesipitoisuus määstä massasta	$w_m = 100 \cdot \frac{m_w}{m_m}$	%	13,7	17,4	20,7	22,0	26,2
Vesipitoisuus kuivasta massasta	$w_k = \frac{100 \cdot m_w}{m_k} = \frac{100 \cdot w_m}{100 - w_m}$	%	15,9	21,1	26,1	28,2	35,5
Näytteen massa kuivana	$m_k = \frac{100 - w_m}{100} \cdot m_m$	g	1187	1199	1205	1204	1094
Märkäirttiheys	$\rho_m = \frac{m_m}{V}$	g/cm ³	1,46	1,54	1,61	1,63	1,57
Kuivairttiheys	$\rho_k = \frac{m_k}{V}$	g/cm ³	1,26	1,27	1,28	1,27	1,16

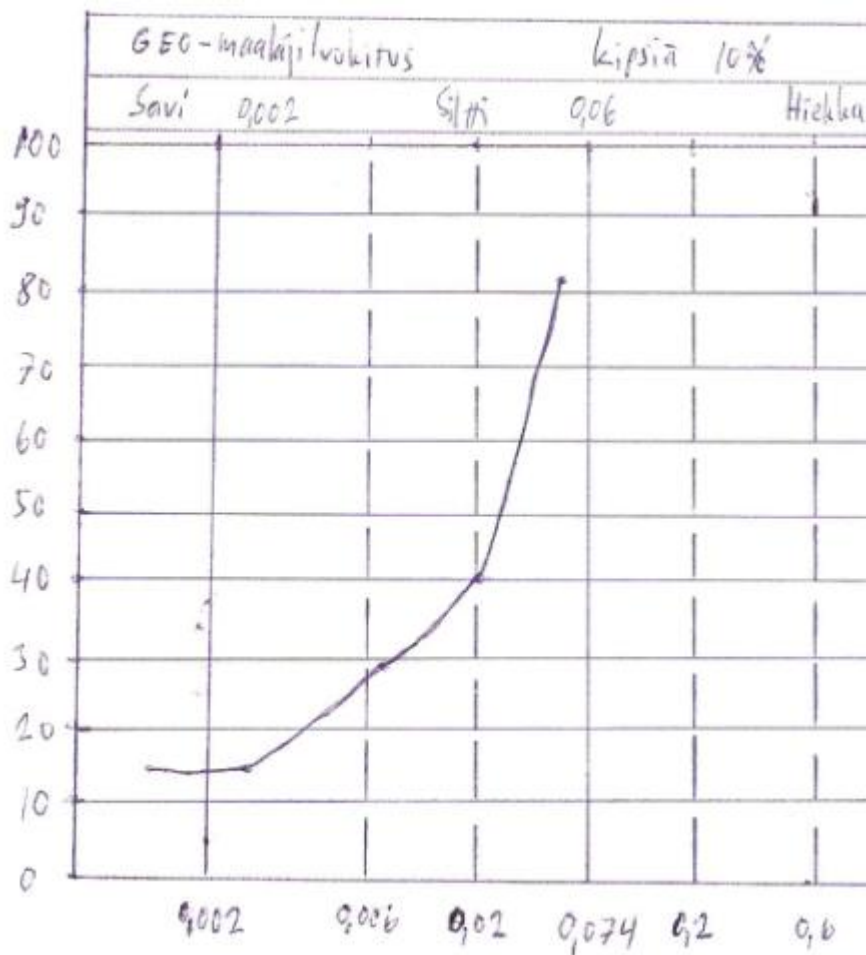


Proctorkoe 25 iskulla viiteen kerrokseen.

LIITE 7.

Aika	°C	Klo	Areometri- lukema	Raekoko	Läpäisy %
Alku	19	Alku			
1 min	19	8.56	25	0,057	81
6 min	19	9.01	12	0,023	40
1 h	19	9.55	8	0,0075	29
5 h	19	13.55	4	0,0033	15
1 d	19	8.55	4	0,0016	15

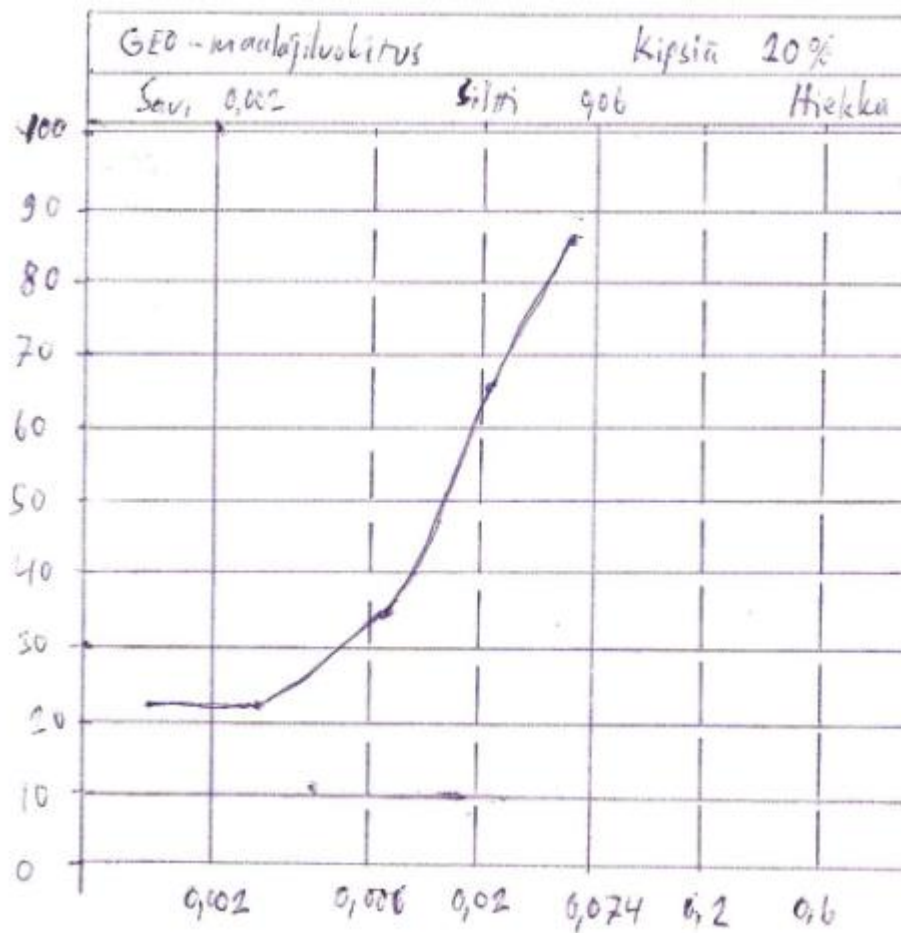
LIITE 7.1.



LIITE 8.

Aika	°C	Klo	Areometri- lukema	Raekoko	Läpäisy %
Alku	19				
1 min	19	8.56	26	0,055	86
6 min	19	9.01	20	0,022	67
1 h	19	9.55	10	0,0070	34
5 h	19	13.55	6	0,0032	22
1 d	19	8.55	6	0,0016	22

LIITE 8.1.



LIITE 9.

Aika	°C	Klo	Areometri- lukema	Raekoko	Läpäisy %
Alku	19	8.55			
1 min	19	8.56	22	0,055	79
6 min	19	9.01	5	0,025	17
1 h	19	9.55	5	0,0075	17
5 h	19	13.55	5	0,0033	17
1 d	19	8.55	5	0,0017	17

LIITE 9.1.

