

Tampereen ammattikorkeakoulu, ylempi amk-tutkinto
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Eino-Matti Hakala

Opinnäytetyö

Voimalaitostuhkan käyttö kuitulietteen stabiloinnissa Lievestuoreen Laajalahden kunnostustyössä

Työn ohjaaja
Työn teettäjä

DI, lehtori Pentti Silén
Keski-Suomen ympäristökeskus,
Rakennuttamispäällikkö Aimo Ruokangas

Jyväskylä 10/2009

Tekijä	Hakala Eino-Matti
Työn nimi	Voimalaitostuhkan käyttö kuitulietteen stabiloinnissa Lievestuoreen Laajalahden kunnostustyössä
Sivumäärä	52 sivua
Valmistumisaika	Lokakuu 2009
Työn ohjaaja	DI, lehtori Pentti Silén
Työn teettäjä	Keski-Suomen ympäristökeskus, valvojana rakennuttamis- päällikkö Aimo Ruokangas

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tavoitteena oli etsiä taloudellinen sekoitusmenetelmä kuitulietteen stabiloimiseksi voimalaitostuhkalla ja selvittää tuotantomittakaavassa kuitulietteen ja voimalaitostuhkan sopiva seossuhde. Seossuhdetta oli tutkittu aiemmin laboratorioolosuhteissa. Valittavan menetelmän ja seossuhteen tuli täyttää alueen päälle rakennettävien eristyskerrosten vaatimukset. Lisäksi selvitettiin tuhkan pölyämisen ehkäisyä.

Tutkimukset suoritettiin Laukaan Lievestuoreen Laajalahden kunnostustyömaalla Lievestuoreenjärven Laajalahdesta ruopatulla kuitulietteellä. Tuhka toimitettiin Jyväskylän Rauhalahden voimalaitokselta. Sekoitusmenetelmiä valittiin kaksi, ja näillä menetelmillä vertailtiin kolmea eri sekoitussuhdetta. Vertailua varten rakennettiin kuusi koekenttää, ja tuloksia mitattiin kevyellä kannettavalla pudotuspainomittarilla.

Tutkimustyön johtopäätöksenä valittiin sekoitusmenetelmä, jossa kaivinkoneella lastataan kerroksittain vuorotellen tuhkaa ja kuitulietettä suureksi kekomaiseksi kasaksi ja lopuksi kaivinkoneella sekoitetaan kerrokset siirtämällä kasa, kasan läpi vetävillä liikkeillä. Riittävän kantavuuden saavuttamiseksi taloudellisin kuitulietteen ja tuhkan sekoitussuhde oli 1:1.

Kantavuusmittaukset tehtiin LOADMAN-merkkisellä kevyellä kannettavalla pudotuspainolaitteella, joka on yleisesti käytetty mittauslaite kantavuusmittauksissa. Kantavuustulokset ovat suoraan käytettävissä Lievestuoreenjärven Laajalahden kuitulietteen ja Rauhalahden voimalaitoksen tuhkan seokselle. Sekoitusmenetelmää voidaan käyttää muissa vastaavissa stabilointikohteissa.

Writer	Hakala Eino-Matti
Thesis	Boiler ash's use in the stabilization of fibre sludge on restoration site of Lievestuore's Laajalahti
Pages	52 pages
Graduation time	October 2009
Thesis Supervisor	MSc Pentti Silén
Co-operating Company	Central Finland Environment Centre, supervisor Aimo Ruokangas

ABSTRACT

The objective of the developing task was to look for an economic mixture method to stabilize fibre sludge and to clarify the fibre sludge and boiler ash's a suitable mixture ratio in the production scale. The mixture ratio had been studied earlier in the laboratory conditions. The chosen method and the mixture ratio had to meet the demands of the isolation layers which are built over the area. Furthermore, the prevention of the raising dust of the ash was clarified.

The studies were performed with the Laajalahti restoration site of Lievestuore with the dredged fibre sludge of Laukaa from Lievestuorelakes Laajalahti. The ash was delivered from the Rauhalhti power plant of Jyväskylä. Two mixture methods were chosen and with these methods three different mixing ratios were compared. For the comparison six proving grounds were built and the results were measured with a light portable falling weight deflectometer.

A mixture method in which an ash and fibre sludge are alternately loaded according to the layer with the excavator as a big hill and finally the layers are mixed with an excavator by moving the pile was chosen as the result of the research work through pile on drawing businesses. To reach the sufficient carrying capacity the most economic mixing ratio of fibre sludge and the ash was 1:1.

The carrying capacity measurings were made with the light portable falling weight deflectometer which is in the carrying capacity measurings a measuring device that has been generally used, LOADMAN. The carrying capacity results are directly available to the mixture of the ash of the power plant of the fibre sludge of Lievestuorelakes Laajalahti and of Rauhalhti. The mixture method can be used in other similar stabilization locations.

Keywords stabilization, environmental construction, waste recycling

Esipuhe

Laajalahden kunnostustyö on ollut haastava, ympäristön viihtyisyyden parantamiseen tähtäävä hanke. Hankkeen ympäristövaikutuksia on seurattu tarkasti julkisuudessa. Hankkeen etenemistä on pystytty nopeuttamaan merkittävästi alkuperäisistä suunnitelmista käyttämällä kuitulietteen stabilointiin tuhkaa riittävän kantavuuden saavuttamiseksi myöhemmin rakennettavien eristysrakenteiden perustaksi.

Kehittämistehtävän tilasi ja rahoitti Keski-Suomen ympäristökeskus. Kiitän esimiestäni, rakennuttamispäällikkö Aimo Ruokangasta ja lehtori Pentti Siléniä joustavuudesta ja työn hyvästä ohjaamisesta sekä Laajalahden kunnostustyön ohjausryhmää ja sen puheenjohtajaa, Keski-Suomen ympäristökeskuksen johtajaa Risto Palokangasta työn tukemisesta. Erityiset kiitokset haluan osoittaa Maansiirto Veljekset Holm Oy:n kaivinkoneenkuljettaja Heimo Hytöselle sekoitusmenetelmän käytännön kehittamisestä, ja avustamisesta kantavuuden mittaustöissä.

Jyväskylässä lokakuussa 2009

Eino-Matti Hakala

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	6
2. Teoreettiset lähtökohdat.....	8
3. Menetelmä.....	17
3.1 Tutkimuskohde.....	17
3.1.1 Laajalahden kunnostustyömaa.....	17
3.1.2 Kuituliete.....	25
3.1.3 Rauhalahden voimalaitostuhka.....	26
3.2 Tutkimuksen suoritus.....	28
3.2.1 Stabilointikokeet.....	29
3.2.2 Koekenttien rakentaminen.....	33
3.2.3 LOADMAN-pudotuspainolaite.....	35
3.3 Tutkimustulokset.....	36
3.3.1 Havaintojen mittaaminen.....	36
3.3.2 Tulosten analysointi.....	37
4. Tulokset.....	39
4.1 Stabilointimenetelmä	39
4.2 Stabiloidun seoksen valinta.....	39
4.3 Tuhkan varastointi.....	40
5. Pohdinta.....	41
5.1 Ongelmat.....	41
5.2 Työn arviointi.....	41
5.3 Jatkotoimenpiteet.....	43
6. Johtopäätökset.....	44
Lähteet.....	45
Liitteet.....	
Liite 1: LOADMAN-pudotuspainolaitteen mittaustuloksia 31.12.2008.....	47
Liite 2: LOADMAN- pudotuspainolaitteen mittaustuloksia 9.1.2009.....	48
Liite 3: LOADMAN- pudotuspainolaitteen mittaustuloksia 26.1.2009.....	49
Liite 4: LOADMAN- pudotuspainolaitteen mittaustuloksia 10.2.2009.....	50
Liite 5: LOADMAN- pudotuspainolaitteen mittaustuloksia 24.2.2009.....	51
Liite 6: LOADMAN- pudotuspainolaitteen mittaustuloksia 11.3.2009.....	52

1. Johdanto

Ympäristöhallinnon tehtävänä on hillitä ilmastonmuutosta ja vähentää luonnonvarojen käyttöä. Ilmastonmuutoksen hillitsemisessä on tärkeää rajoittaa fossiilisten polttoainoiden käyttöä. Uusiutuvien energialähteiden, kuten puun ja turpeen, käyttö tulee lisääntymään. Puun ja turpeen energiakäytön lisääntyessä lisääntyy myös sivutuotteena syntyvän tuhkan määrä. Tuhkan käyttö luonnonmateriaalien sijasta infrarakentamisessa vähentää luonnonvarojen käyttöä.

Keski-Suomen ympäristökeskus kunnostaa Laukaan Lievestuoreella Lievestuoreenjärven Laajalahtea. Hankkeen tarkoituksena on kunnostaa Lievestuoreenjärven Laajalahti poistamalla lahteen vuonna 1937 padotusta noin 10 ha:n suuruisesta laskeutusaltaasta Lievestuoreen tehtaan toiminnasta peräisin olevaa kuitulietettä n. 100 000 m³ ja läjittää se altaan vierellä olevan läjitysaltaan paikalle rakennettavaan läjitysaltaaseen. Lietteen stabilointiin käytetään vuosittain n. 16 000 tn Jyväskylän Rauhalahden voimalaitoksen tuhkaa.

Kuitulietteessä on ympäristölle vahingollisia aineita, joten läjitysalue joudutaan eristämään niin, ettei siitä ole haittaa ympäristölle. Pää tavoitteena oli kehittää taloudellinen stabilointimenetelmä ja valita oikea kuitulietteen ja tuhkan seossuhde kuitulietemassan stabiloimiseksi tuhkalla. Riittävä kantavuus (Tammirinne, Juvankoski, Laaksonen & Rathmayer 2004, 34) on saavutettava myöhemmin rakennettavien läjitysalueen pintarakenteiden rakentamisen mahdollistamiseksi. Tutkimuksessa verrattiin laboratoriossa suoritettujen kokeiden toteutumista tuotantomittakaavassa.

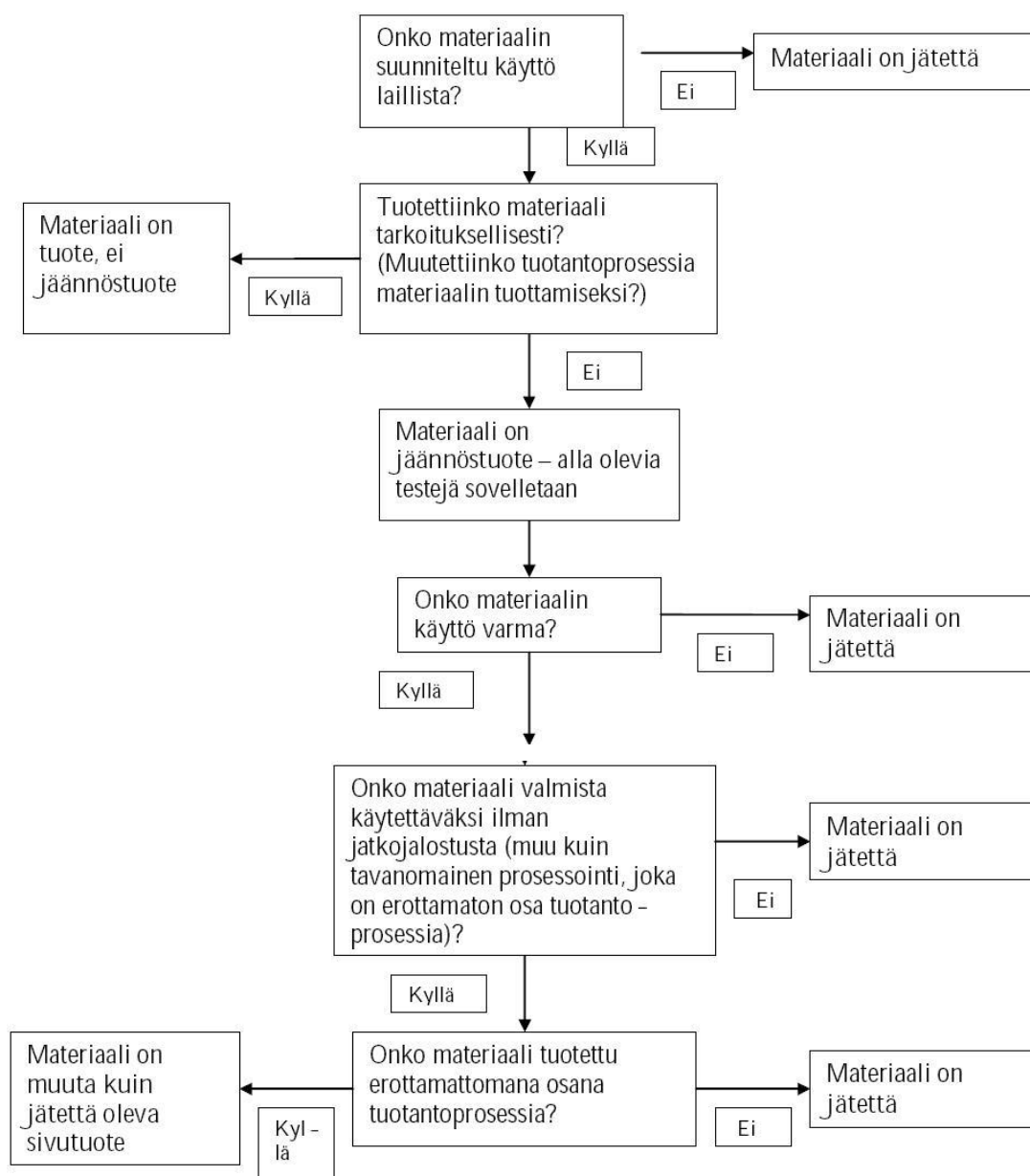
Tuhka sisältää raskasmetalleja ja muita haitallisia aineita. Haitalliset aineet pääsevät leviämään ympäristöön tuhkan pölyämisen mukana. Kunnostusalueen välittömässä läheisyydessä on paljon asutusta, joten valittavan stabilointimenetelmän on oltava mahdollisimman vähän pölyämistä aiheuttava. Kehitystehtävän alatavoitteina oli ratkaista tuhkan varastoinnin ja käsittelyn aiheuttamia pölyämishaittoja.

Tavoitteena oli tehdä tutkimus sellaisilla menetelmillä ja mittausvälineillä, joita itse työnsuorituksessakin käytetään. Tutkimuksessa käytettyjen materiaalien: kuitulietteen ja tuhkan, ominaisuudet vaihtelevat voimakkaasti. Tuhkassa ominaisuudet muodostuvat

käytetyn polttoaineen mukaan, ja kuitulietteen ominaisuuksin vaikuttaa kuitulietteen ruoppamisessa käytetty ruoppausmenetelmä. Ominaisuuksien suuren vaihtelun vuoksi tutkimukseen käytettyjä materiaaleja ei analysoitu tarkasti, koska siihen ei olisi mahdollisuutta varsinaisen stabilointityön edetessä. Analysointimenetelminä käytettiin samoja helposti käytettäviä keinoja kuin itse stabilointityössä tultaisiin käyttämään.

2. Teoreettiset lähtökohdat

Sivutuote on tuote, jota ei ole tarkoituksellisesti valmistettu, mutta jota syntyy joka tapauksessa halutun tuotteen valmistuksen yhteydessä (kuvio 1). Sivutuote voidaan erottaa juridisesti jätteestä, jos seuraavat kriteerit täyttyvät: materiaalin jatkokäyttö on varmaa, materiaali voidaan käyttää uudelleen ilman muuta kuin normaalin teolliseen käytäntöön liittyvää jatkojalostusta, ja materiaalin jatkokäyttö liittyy kiinteästi tuotantoprosessiin joko samassa jatkuvassa tuotannossa tai laajemmin taloudessa (Pahkala 2007.)



Kuvio 1: Sivutuotteen ja jätteen erottaminen toisistaan (Ympäristöhallinto 2009)

Teollisuuden sivutuotteista monet ovat käyttökelpoisia maarakennusmateriaaleja, joko sellaisenaan tai jalostettuna. Teollisuuden sivutuotteiden hyötykäyttö edellyttää kuitenkin normaalissa rakentamisen mittakaavassa toteutettavia testausprojekteja, jotka käytännössä osoittavat sivutuotteiden olevan teknisesti ja taloudellisesti kilpailukykyisiä, kestäviä ja ympäristön kannalta turvallisia vaihtoehtoja perinteisille rakennusmateriaaleille (Maijala 2003, 5.)

Tuhkaa kuljetetaan Suomessa suuria määriä jätteenä kaatopaikalle, koska kaikkea tuhkaa ei voida suoraan hyödyntää sivutuotteena. Jätelainsäädännön mukaan jätteet tulisi ensisijaisesti hyödyntää, mikäli se on teknisesti mahdollista eikä taloudellisesti aiheuta jätteen muuhun käsittelyyn verrattuna kohtuuttomia kustannuksia. Suomen voimalaitoksissa muodostuu energiantuotannossa hyötykäyttöön soveltuvaa tuhkaa vuosittain noin 1 300 000 tonnia, josta puun ja turpeen polton tuhkaa on yli 500 000 tonnia vuodessa ja kivihiilituhkaa on 600 000 – 1 000 000 tonnia vuodessa. Puun ja turpeen poltossa syntyneestä tuhkasta yli 80 % on seostuhkaa, noin 10 % on puhdasta turvetuhkaa ja noin 7 % on puhdasta puun tuhkaa. Hyötykäyttöön käytetään 40 - 60 % syntyvän tuhkan määrästä. (Korpijärvi, Järvelä, Laine-Ylijoki, Lindh, Mroueh, Mäkelä ja Wahlström 2008.)

Uusiutuvien energialähteiden käyttö on määrä kolminkertaistaa EU:ssa vuoteen 2020 mennessä. EU:n uusien tavoitteiden on arvioitu merkitsevän Suomelle nykyisen uusiutuvien energialähteiden noin 25 % osuuden nostamista noin 35 - 40 prosentin tasolle vuoteen 2020 mennessä. Pääosa kasvusta Suomessa kohdentuu bioenergiaan, jonka osuus uusiutuvien käytöstä oli vuoden 2005 lopussa yli 80 %. Suomen uusiutuvien energialähteiden edistämishjelmassa (UEO) on muodostettu 418 PJ tavoite bioenergian käytöstä vuodelle 2025 (Ranta 2007.)

Koska bioenergian käytön lisääntymisen myötä myös syntyvän tuhkan määrä lisääntyy, on tuhkan hyötykäyttö entistä tärkeämpää tulevaisuudessa. Tuhkan hyötykäyttöä on tutkittu useilla tutkimushankkeilla, ja tämän tutkimuksen tavoitteena on tuottaa käytännönläheistä tietoa siitä, kuinka tuhkaa voidaan sekoittaa johonkin muuhun aineeseen.

Tuhkan tekniset ominaisuudet (taulukko 1) muodostuvat käytetyn polttoaineen, poltto-tekniikan ja poltto-olosuhteiden mukaan. Tuhkan laatu on siis eri polttolaitoksilla erilaista, vaikka poltettava materiaali olisi sama. Rakenteeltaan tuhka on muodostunut pal-

lomaisista hiukkasista ja neulasmaisista kiteistä. Rakeisuudeltaan sitä voi verrata silttiin tai sitä hienompiin maa-aineksiin. Rakeisuus on välillä 0,002 - 0,1 mm. Tuhkan väri vaihtelee käytetyn polttoaineen mukaan kivihiilen grafiitinharmaasta tuhkasta turpeenpoltosta syntyneeseen punaruskeaan tuhkaan. Orgaanisen aineksen määrä vaihtelee 1 – 15 %, ja kivihiilen poltosta syntyneessä tuhkassa orgaanisen aineksen määrä on korkeintaan 10 % (Lahtinen, Maijala & Ronkainen 2002, 4.)

Taulukko 1: Tuhkan teknisiä ominaisuuksia (Lahtinen ym 2002, 4)

Ominaisuus	Vaihtelu eri tuhilla
Kuivairtoteiheys [kN/m^3]	6-13
Kuivatilavuuspaino maksimitiiveydessä [kN/m^3]	7-16
Vesipitoisuus, optimi w_o [%]	12-55
Lämmönjohtavuus W/mK	0,4-1,0
Segregaatiopotentiaali (hyvin tiivistettynä) [mm^2/Kh]	< 1
Veden kapillaarinen nousukorkeus [m]	1,8-2,2
Vedenläpäisevyys, k [m/s]	10^{-6} - 10^{-8}
Puristuslujuus [MPa], stabiloitunut tuhka	
-stabiloitu tuhka sillosta	> 4,5
-stabiloitu kasatuhka	0,5-4,5

Tuhka sisältää raskasmetalleja ja niiden pitoisuudet vaihtelevat käytetyn polttoaineen mukaan. Pitoisuudet ovat määrältään yleensä melko alhaisia. Tuhkista tutkitaan, ja niissä kiinnitetään huomiota yleensä taulukon 2 mukaisiin raskasmetalleihin. (Lahtinen ym 2002, 5)

Taulukko 2: Tuhkan raskasmetallit (Lahtinen ym 2002, 3)

Alkuaine	Nimi	Lentotuhka mg/kg
As	Arseni	<70
Ba	Barium	<1500
Be	Beryllium	<17
B	Boori	<380
Cd	Kadmium	<20
Co	Koboltti	<50

Alkuaine	Nimi	Lentotuhka mg/kg
Cr	Kromi	<400
Cu	Kupari	<400
Hg	Elohopea	<2
Mo	Molybdeeni	<30
Ni	Nikkeli	<140
Pb	Lyijy	<150
Sb	Antimoni	<20
Se	Seleeni	<70
V	Vanadiini	<350
Zn	Sinkki	<3500

Stabilointi tarkoittaa infrarakentamisessa maan tai lietteen ominaisuuksien muuttamista toivottuun suuntaan sekoittamalla siihen jotakin lisäainetta. Ruohonen (2006, 15) on luetellut stabiloinnin tavoitteita: parannetaan maa-aineksen ominaisuuksia ja ehkäistään rakennuspohjassa rakentamisen ja käytön aikana mahdollisesti tapahtuvia epätoivottuja muutoksia, parannetaan maan lujuutta ja kestävyyttä, vähennetään maaperässä tapahtuvia tilavuuden muutoksia ja vaikutetaan maan vedenläpäisevyyteen. Stabiloinnissa maa-ainekseen sekoitetaan tarvittava määrä jotain sideainetta. Tyypillisimpiä sideaineita ovat: bitumi, kalkki ja sementti. Kalkkia ja sementtiä voidaan sekoittaa keskenään, ja niihin voidaan sekoittaa lisäaineeksi jotain teollisuuden sivutuotteita, esimerkiksi lentotuhkaa ja terästeollisuuden kuonia. Lisäaineiden lisäyksellä parannetaan stabiloidun massan jotain tiettyä ominaisuutta ja tavoitellaan kustannussäästöä varsinaisen sideaineen menekin vähentyessä. Stabilointiin käytetään myös pelkästään teollisuuden sivutuotteita, kuten energiateollisuuden tuhkaa.

Stabiloitavan materiaalin lujuuden parantamisessa on tavoitteena vähentää materiaalin vesipitoisuutta. Vesipitoisuuden vähentyminen johtuu materiaaliin lisätyn sideaineen ja veden välisistä kemiallisista reaktioista. Vettä myös haihtuu kemiallisten reaktioiden aiheuttaman lämpötilan nousun mukana. Sideaineiden lisäys muuttaa myös stabiloitavan materiaalin muodonmuutosominaisuuksia sekä juoksu- ja plastisuusrajaa (Ruohonen 2006, 23–24.)¹

¹ Alkuperäinen lähde: Åhnberg, Helen. 2006. Strength of stabilised soils – A Laboratory Study on Clays and Organic Soils Stabilised with Different Types of Binder. Doctoral Thesis. Lund University, Department of Construction Sciences. Lund.

Tuhkan stabiloiva vaikutus perustuu (Lahtinen ym 2002, 4) kalsiumoksidin (CaO) lujittumiseen. Tämä reaktio alkaa tuhkan reagoidessa veden kanssa. Lujittumisreaktiota kutsutaan myös potsolaanisuudeksi. Kalsiumoksidin (CaO) määrä vaihtelee tuhkassa käytetyn polttoaineen mukaan (taulukot 3 ja 4).

Taulukko 3: Kivihiilen poltosta syntyneen tuhkan koostumus(Mäkelä 2000)

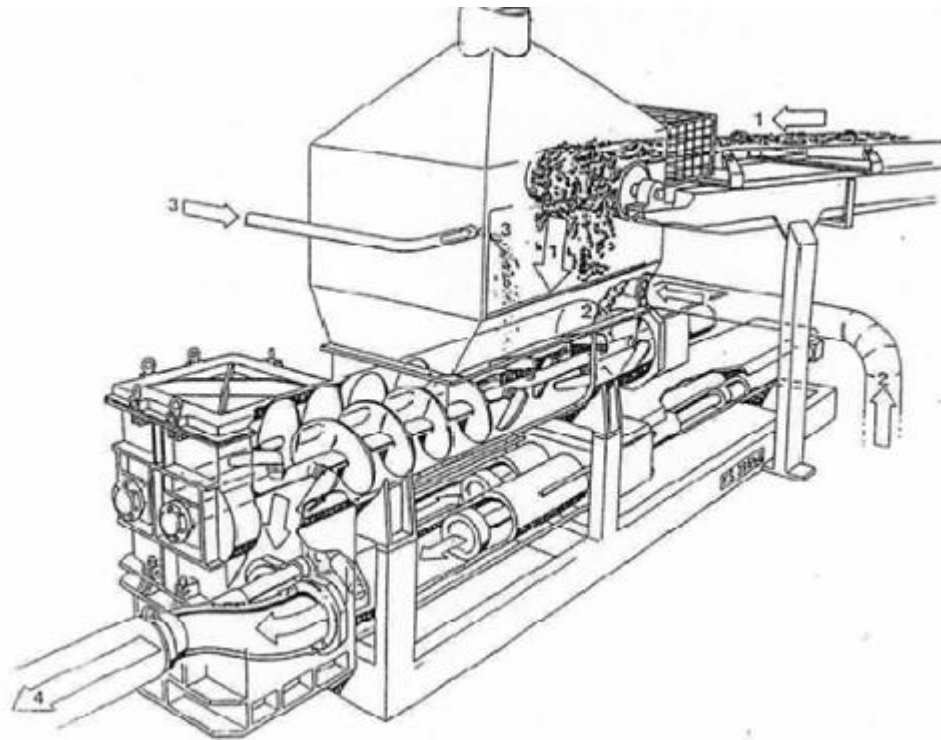
Kemiallinen yhdiste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
Pitoisuus [%]	45-55	20-30	8-11	4-7	3-5	1-2	0-2

Taulukko 4: Turpeen poltosta syntyneen tuhkan koostumus(Mäkelä 2000)

Kemiallinen yhdiste	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	SO ₂
Pitoisuus [%]	3,1-57	2,5-29	0-36	5-30	1-25	0,3-7	5-20

Ruohosen (2006, 31-35) mukaan potsolaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa käytetty polttotekniikka. Jos polttoprosessissa käytetään korkeaa lämpötilaa ja nopeaa jäähdystä, tuhkan stabilointiominaisuudet muodostuvat hyväksi. Stabiloinnissa käytetyn sideaineen reagoitokyky vaihtelee sideaineen kalkki-piidioksidisuhteen CaO/SiO₂ mukaan. Mitä suurempi suhde on, sitä voimakkaammin aine reagoi veden kanssa. Turvetuhkan kalkki-piidioksidisuhde on yleensä suurempi kuin kivihilituhkalla, joten stabiloitaessa turvetuhkalla, lopputuotteesta muodostuu lujempaa.

Stabilointimenetelmiä on erilaisia: massastabilointi, pintastabilointi ja syvästabilointi. Massastabilointi jakautuu erilaisiin sekoitusmenetelmiin. Jos massa stabiloidaan siten, että stabiloitava massa kaivetaan ylös ja käsitellään sen jälkeen, menetelmää kutsutaan ex-situ -massastabiloinniksi. Massaa voidaan sekoittaa jollakin kiinteällä asemalla. Asema voi sijaita jossain erillisessä paikassa, jonne stabiloitava massa ja käytettävä sideaine kuljetetaan erillisinä ja ne sekoitetaan asemalla. Asemalta sekoitettu massa kuljetetaan haluttuun sijoituspaikkaan. Kuljetuskustannukset muodostuvat tässä menetelmässä suuriksi, varsinkin jos sekoitusasema ei ole aivan kohteen välittömässä läheisyydessä. Stabilointiasema voidaan myös rakentaa kohteen viereen, tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää siirrettäviä sekoitusasemia (kuvio 2). Näissä tapauksissa perustamis- ja purkamiskustannukset saattavat kohota suuriksi.



Kuvio 2: Asemasekoituslaitteisto (Ruohonen 2006, 19)²

Eräs mahdollisuus toteuttaa stabilointi ex-situ -massastabilointina on kuljettaa stabiloitava massa jollekin läheiselle toimenpidealueelle, jossa massa voidaan stabiloida erilaisilla liikkuvilla sekoituslaitteilla. Liikkuvia sekoituslaitteita ovat esimerkiksi aumasekoitin (kuvio 3) ja maanrakennuskoneista käyttövoimansa saavat seulamurskaimet (kuvio 4) (ALLU Finland Oy, 2009).



Kuvio 3: Aumasekoitin (ALLU Finland Oy, 2009)

²Karlstedt, Paul. 1993. Ylijäämäsavien massastabilointi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo.



Kuvio 4: Pyöräkuormaajaan liitetty seulamurskain (ALLU Finland Oy, 2009)

Stabiloitavan massan käsittelemistä paikallaan massastabilointina kutsutaan in-situ -menetelmäksi. Stabiloitavaan massaan pumpataan ja sekoitetaan lisäaineita tarvittava määrä, massan pysyessä paikallaan. Sideainetta syötetään esimerkiksi kaivinkoneeseen liitettyllä potkurisekoituslaitteistolla (kuvio 5), jossa sideaine puhalletaan paineilman (kuvio 6) avulla maahan ja pyörivä siipi sekoittaa sen stabiloitavaan massa. Tällä sekoitusmenetelmällä voidaan päästä jopa 5 m:n sekoitussyvyyteen (ALLU Finland Oy, 2009).

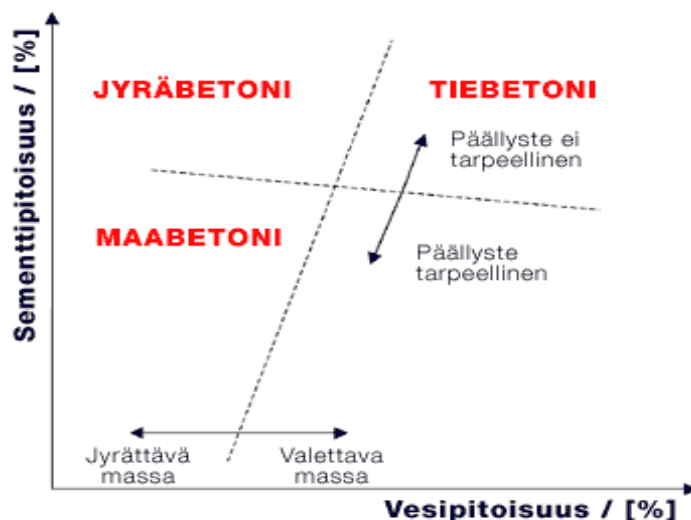


Kuvio 5: Potkurisekoituslaitteisto (ALLU Finland Oy, 2009)



Kuvio 6: Paineilmasyötin (ALLU Finland Oy, 2009)

Pintastabilointia käytetään, kun halutaan lujittaa maan pintakerrosta esimerkiksi työmaaliikennettä, vähäliikenteisiä katuja tai pysäköintialueita varten. Pintastabilointina käsitetään 0,3–0,4 m paksuisen kerroksen käsittelyä paikallaan tai erillisellä sekoitusasemalla (Ruohonen 2006, 21). Suoritettaessa pintastabilointia paikallaan, sideaine sekoitetaan maahan esimerkiksi jyrsimellä. Pintastabiloinniksi kutsutaan myös vaakasuuntaista stabilointia esimerkiksi tien rakenteissa (kuvio7). Käytettäessä sideaineena sementtiä, syntyvää lopputuotetta nimitetään työstötapansa mukaan joko maabetoniksi, tiebetoniksi tai jyräbetoniksi (Finnsementti Oy 2009.)



Kuvio 7: Eri vaakasuuntaan stabiloitujen massojen nimityksiä ominaisuuksien mukaan (Finnsementti Oy 2009)

Syvästabilointi on pohjavahvistusmenetelmä, jossa savi-, siltti-, lieju- tai turvekerros lujitetaan kantavaksi rakennuspohjaksi sekoittamalla siihen sideainetta. Sideaineet reagoivat maa-aineksen ja maassa olevan veden kanssa muodostaen lujaa stabiloitua materiaalia, jonka lujuus on 10–100 kertaa suurempi kuin alkuperäisen pehmeän maa-aineksen. Lujuus on kuitenkin aina betoniteknisesti alhainen, alle 1 MPa (Finnsementti Oy 2009.)

Yleisin syvästabilointimenetelmä on pilaristabilointi. Pilaristabiloinnissa pehmeään maahan painetun sekoittimen avulla sekoitetaan sideaine pohjamaahan siten, että siihen muodostuu lujittuvia sylinterimäisiä pilareita (kuvio 8). Sideaine syötetään maahan sekoittimen ylösnoston aikana. Tarkalla sekoitustyöllä saadaan sideaine ja maa-aines keskenään kosketukseen, joten pilareihin synny epäjatkuvuuskohtia (Finnsementti Oy 2009.) Pilarien läpimitat vaihtelevat yleensä 500 mm:stä 800 mm:iin. Yleisin pilarin halkaisija on 600 mm. Suomessa käytössä olevilla laitteilla voidaan tehdä maksimissaan 15 – 25 metrin pituisia pilareita (Finnsementti Oy 2009.)



Kuvio 8: Ylösnostettu syvästabiloitu pilari (Asko Aalto, Teknillinen korkeakoulu)

3. Menetelmä

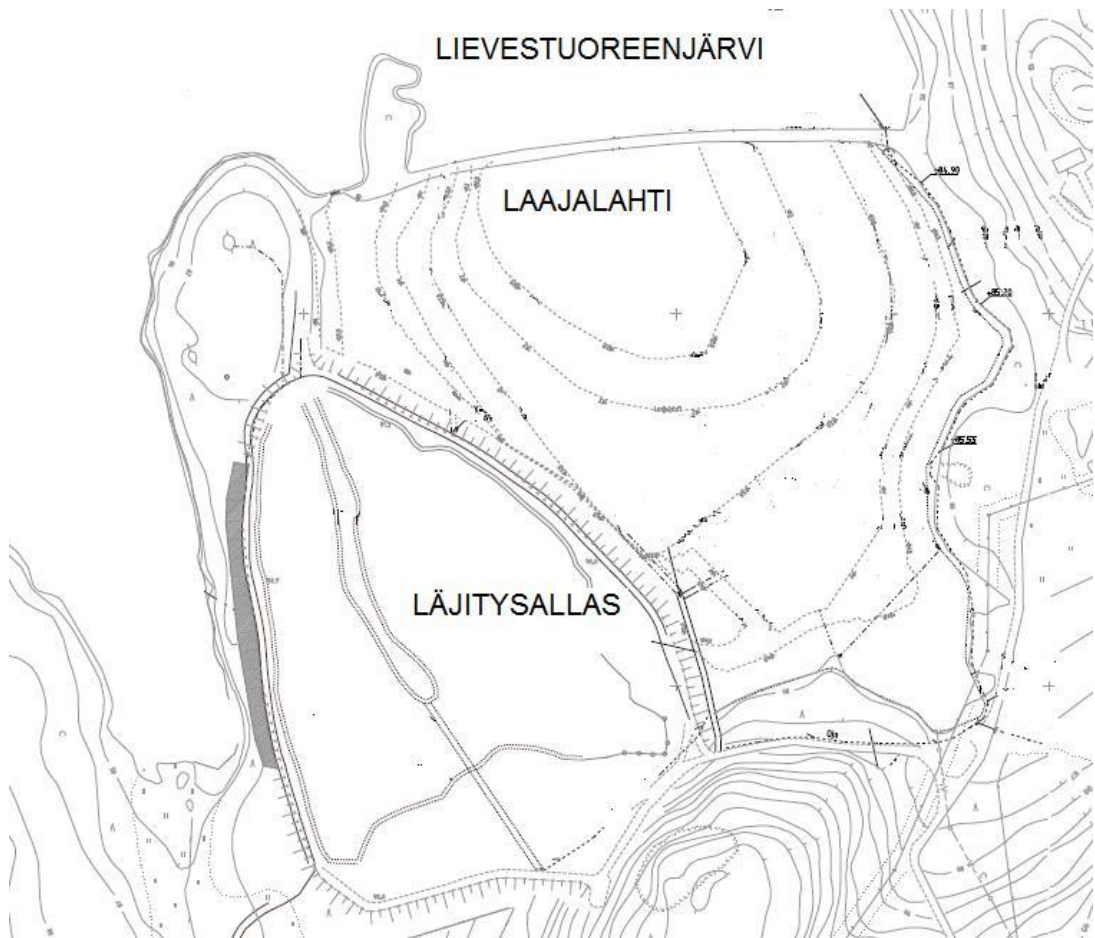
3.1 Tutkimuskohde

3.1.1 Laajalahden kunnostustyömaa

Laukaan kunnan Lievestuoreen taajamassa (kuvio 9) toimi vuodesta 1926 lähtien selluloosatehdas, joka käytti jätevesiensä lietteen laskeutukseen laskeutusaltaana Lievestuoreenjärvestä patovallilla vuonna 1937 erotettua Laajalahtea. Lievestuoreenjärvestä erotetun alueen pinta-ala oli 10 ha. Tehdas keskeytti toimintansa vuonna 1967 ja käynnistyi uudelleen 1971, minkä jälkeen jätevedet johdettiin puhdistamon ja Laajalahden kautta Lievestuoreenjärveen vuoteen 1985 asti, jolloin tehtaan toiminta loppui kokonaan. Tehtaan toiminnan aikana kuitulietteitä ruopattiin Laajalahden viereen rakennettuun läjitysaltaaseen (kuviot 10 ja 11). Tehtaan toiminnan päättyttyä konkurssiin vuonna 1985 alue jäi toiminnan aikaiseen tilaan. (Ympäristöhallinto 2009) Alue sijaitsee Lievestuoreen taajamassa. Alueen yleisen viihtyisyyden parantamiseksi ja lietteen Lievestuoreenjärveen aiheuttaman vesistökuormituksen vuoksi alue päätettiin kunnostaa. Laajalahden kuitulietteestä irtoaa haitta-aineita, ja ne kulkeutuvat hulevesien mukana Lievestuoreenjärveen aiheuttaen kuormitusta järven herkkään ekosysteemiin. Lievestuoreenjärven tila oli erittäin heikko 1980-luvulla, mutta järven tila elpyi nopeasti tehtaan toiminnan päättymisen jälkeen. 1990- ja 2000-luvulla järven tila on vesistön käyttökelpoisuusluokituksen mukaan ollut hyvä. (Ympäristöhallinto 2009)



Kuvio 9: Laajalahden sijainti



Kuvio 10: Laajalahden kunnostustyömaa-alue (Keski-Suomen ympäristökeskus 2006)



Kuvio 11: Laajalahti ilmasta kuvattuna 2006 (Ympäristöhallinnon tietojärjestelmä 2009)

Kun kunnostustyö on tehty loppuun, tilanne vakiintunut ja veden laatu antaa siihen mahdollisuuden Laajalahden Lievestuoreenjärvestä erottava pengerrus avataan. Osa padosta jätetään aallonmurtajaksi. Tämän jälkeen alue otetaan virkistyskäyttöön ja lahden pohjukkaan rakennetaan mahdollisesti venesatama. (Ympäristöhallinto 2009)

Kunnostushankkeelle haettiin ympäristölupa vuonna 2006 ja sitä täydennettiin vuonna 2007, koska ruopattavan kuitulietteen stabiloinnissa päätettiin käyttää voimalaitostuhkaa. Tehdasrakennukset on purettu ja tehdasalue maisemoitu vuosien 1995 ja 1996 aikana.

Laajalahden kunnostustyöt aloitettiin kesällä 2007. Tavoitteena oli johtaa alueelle valuvat hulevedet kunnostettavan alueen ohi suoraan Lievestuoreenjärveen. Aluksi lahteen rakennettiin rannan läheisyyteen työpenger, jonka alta sekä penkereen ja rannan väliltä kaivettiin kuituliete pois (kuvio 12).



Kuvio 12: Kuitulietteen kaivua rannan ja työpengerin välillä

Työpengerin tehtävänä oli ohjata hulevedet Laajalahden ja Lievestuoreenjärven erottavan penkereen luokse, josta vedet johdettiin 1 000 mm halkaisijaltaan olevan rummun kautta penkereen läpi suoraan Lievestuoreenjärveen (kuvio 13). Johtamalla vedet suoraan järveen vähennettiin haitallisten aineiden huuhtoutumista työalueelta. Rakennettua pengertä käytettiin myöhemmin ruoppaustyössä työmaatieksi, jota pitkin ruopattu liete kuljetettiin jäätysalueelle.



Kuvio 13: Laajalahden ja Lievestuoreenjärven erottavaan penkereeseen rakennettu rumpu

Kuitulietteen kaivamisen helpottamiseksi kunnostusalueelle rakennettiin toinen työpenger erottamaan toisistaan kiinteä ja lähes vesisuspensionen oleva liete. Työpenger rakennettiin Laajalahden kuitulietteestä muodostuneen rantaviivan paikalle. Työpengeren rakentamisen jälkeen voitiin kahden työpengerin väliin jäävältä alueelta pumpata vesi pois, ja kuormata kuituliete kuljetusvälineisiin huomattavasti helpommin (kuvio 14). Työpengerien rakennusmateriaaleina käytettiin Laukaan kunnan kunnostusalueelle varastoimia ylijäämämaita, joita oli alueelle toimitettu useiden vuosien ajan. Materiaalit olivat suuria kiviä, silttiä ja savea, joten työpengerin rakentamisessa ja kuitulietteen kuljettamisessa käytettiin teladumpperia, jolla pystyttiin liikkumaan alustalla, jonka rakentamiseen ei ollut käytetty kantavampia kitkamaalajeja. Kuljetuskaluston hyvästä etenemiskyvystä johtuen läjitysalueita pystyttiin käyttämään tehokkaasti, ja toimittamaan kuituliete perille saakka (kuvio 15).



Kuvio 14: Kuitulietteen kaivua kaivinkoneella työpenkereiden muodostamasta altaasta



Kuvio 15: Kaivetun kuitulietteen läjitystä kasalle

Läjäytysalueelle on läjitetty kuitulietettä tehtaan toiminnan aikana. Aiemmin rakennettujen patorakenteiden kelpoisuus tutkittiin ennen uuden kuitulietteen läjittämistä läjitysalueelle. Tutkimuksessa todettiin läjitysaltaan ja Laajalahden välisen padon olevan perusrakenteeltaan hyväkuntoinen, mutta padon varmuuskerroin ei ollut riittävä, joten patorakenteen vakavuuden parantamiseksi padon luiskia loivennettiin (kuvio 16). Luisikan loivennuksen yhteydessä kaivettiin kuitulietettä padon helmasta.



Kuvio 16: Padon luiskan loivennusta

Lievestuoreenjärven Kylmälahden ja läjitysaltaan välinen pato todettiin kelvottomaksi. Pato oli rakennettu siltistä, turpeesta ja rakennusjätteestä, joten se jouduttiin purkamaan ja rakentamaan uudelleen kelvollisista materiaaleista. Koska vanha patorakennelma oli purettava, rakennettiin läjitysaltaan puolelle työpato, joka piti kuitulietteen läjitysaltaassa. Uudelleenrakennustyön aikana vettä tihkui läjitysaltaasta työalueelle todella vähän, joten työ saatiin tehtyä kuivissa olosuhteissa (kuvio 17). Vanha pato saatiin perustettua hyvin pohjamaahan, joka vaihteli siltistä moreeniin.



Kuvio 17: Vanhan padon purkamista ja uuden rakentamista

Uusi pato rakennettiin moreenista, jota saatiin 7 km:n etäisyydellä olevalta maanotto-paikalta. Moreenin vedenläpäisevyys tutkittiin ensin, ja saatujen tutkimustulosten perusteella mitoitettiin padon rakenteet.

Patorakenteiden tiivistysmenetelmänä käytettiin riittävää määrää yliajokertoja kaivinkoneella (kuvio 18) ja maansiirrossa käytettyjen kuorma-autojen liikennettä ohjaamalla. Tiivistystulosta tarkkailtiin LOADMAN -pudotuspainomittarilla. Materiaalin laatua seurattiin silmämääräisesti ja ottamalla näytteitä rakeisuuden tutkimista varten.



Kuvio 18: Patorakenteen tiivistämistä

Kunnostustyön haittavaikutukset Lievestuoreenjärveen haluttiin minimoida, joten tehtiin toiminnan aikainen settipato, jolla säädeltiin Laajalahden vedenpinnan korkeutta, korvattiin uudella halkaisijaltaan 160 mm:n rumpuputkella. Vanha settipato vuoti vettä Laajalahdesta Lievestuoreenjärveen rakenteiden välisistä raoista. Uuteen rumpuputkeen asennetulla mekanismilla voitiin säätää vedenpinnan korkeutta Laajalahdessa. Tarvittaessa veden virtaus voitiin kokonaan sulkea (kuvio 19) Lievestuoreenjärveen kääntämällä rumpuputken päässä oleva muotokappale pystyyn, joten kunnostustyön aikainen veden samentuminen ei aiheuttanut haittavaikutuksia Lievestuoreenjärveen (Hynynen 2009, 14).



Kuvio 19: Rummun sulkumekanismi

Patorakenteiden valmistuttua voitiin aloittaa Laajalahden imuruoppaus, jossa poistettiin imuruoppaamalla (kuvio 20) loput kuitulietteet, joita ei pystytty kaivinkoneella kaivamaan. Kuituliete läjitettiin kunnostettujen patorakenteiden muodostamaan altaaseen. Imuruoppaus toteutettiin siten, että ruopattava liete pumpattiin selkeytymään läjitysaltaaseen, josta selkeytynyt vesi palautui Laajalahteen.



Kuvio 20: Laajalahden imuruoppausta "Masa" monitoimiruoppaajalla

3.1.2 Kuituliete

Lievestuoreen selluloosatehtaan toimiessa suurin osa sen jätevesipäästöistä oli prosessi-jätevesiä, joita syntyi itse sellun keitosta, altaiden puhdistuksesta ja epäonnistuneista sellun keitoista. Sulfiittimassan valmistuksessa käytettiin erilaisia kemikaaleja valmistuksen eri vaiheissa. Sellun valkaisuun käytettiin yleisesti klooria, ja suuri osa kemikaaleista päätyi tuotteiden sijasta jätevesiin. Jätevesien liete ja kemikaalit (taulukko 5) laskeutettiin Laajalahden laskeutusaltaaseen. Liete on altaassa osittain vesisuspensiona, jonka kuiva-aineen määrä on 3 %.

Laajalahden sedimenttinäytteiden kloorifenoli-, PCB- ja PAH -pitoisuudet yleisimmin alittavat ohjearvon/tason 1 arvon tai tutkimuslaitoksen analyysitarkkuuden. Eri näytteissä yhteensä viiden komponentin pitoisuus sijoittuu ohjearvon/tason 1 arvon ja raja-arvon/tason 2 arvon väliin, ja eri näytteissä vain kahden komponentin pitoisuus ylittää raja-arvon/tason 2 arvon (Sedimentin ruoppaus- ja läjitysopas. Ympäristöministeriö, ympäristöopas 117).

Taulukko 5: Kuitulietteen pitoisuudet (Jyväskylän yliopisto, 2008)

Analyysi	Menetelmä	Yksikkö	476-1 Sedimentti
Kuiva-aine	SFS 3008	%	3,0
Elohopea	CVAAS (618B)	mg/kg	0,13
Kadmium	* SFS-EN ISO 11885: 98 modif.	mg/kg	< 0,5
Kupari	* SFS-EN ISO 11885: 98 modif.	mg/kg	30
Lyijy	* SFS-EN ISO 11885: 98 modif.	mg/kg	6
Rauta	* SFS-EN ISO 11885: 98 modif.	mg/kg	2 800
Sinkki	* SFS-EN ISO 11885: 98 modif.	mg/kg	36
Kloorifenolit	O-31	mg/kg	
- 2,6-dikloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- 2,4+2,5-dikloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- 3,5-dikloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- 2,3-dikloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- 3,4-dikloorifenoli		mg/kg	0,44
- 2,4,6-trikloorifenoli		mg/kg	0,12
- 2,3,5-trikloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- 2,4,5-trikloorifenoli		mg/kg	0,11
- 2,3,4-trikloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- 3,4,5-trikloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- 2,3,5,6-tetrakloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- 2,3,4,6-tetrakloorifenoli		mg/kg	2,1
- 2,3,4,5-tetrakloorifenoli		mg/kg	< 0,05
- pentakloorifenoli		mg/kg	0,22

* Akkreditoitu määritysmenetelmä. Akkreditointi ei koske lausuntoa. Määritysmenetelmien mittausnävarmuustiedot ovat nähtävissä www.ivi.fi/erillis/vmtk/lomakkeet

Laajalahdessa veden kemiallisen hapenkulutuksen, kokonaistypen ja -fosforin arvot ovat korkeita, mutta kemiallisen hapenkulutuksen, sähkönjohtokyvyn ja kokonais-fosforin arvoissa on tapahtunut selvää tason laskua. Raskasmetallipitoisuudet alittavat juomaveden vaatimukset.

Käytettävissä olevan tehtaan käyttöhistorian ja kenttähavaintojen perusteella Laajalahdessa ei ole maaperän ja vesien haisevien rikkiyhdisteiden lisäksi haihtuvia myrkyllisiä aineita. Alueella ei siten ole todettu sellaisia ympäristömyrkkijä, jotka voisivat levitä ilman välityksellä siinä määrin, että terveysriskejä muodostuisi. Ilman kautta leviävät päästöt aiheuttavat lähinnä viihtyvyyshaittoja hajun vuoksi. Viihtyvyyshaittoja voi aiheutua lähinnä alueen läheisyydessä olevalle asutukselle. Haisevien rikkiyhdisteiden kuten rikkivedyn muodostumiselle on sekä laskeutus- että läjitysaltaassa hyvät edellytykset. (Keski-Suomen ympäristökeskus 2006)

3.1.3 Rauhalahden voimalaitostuhka

Jyväskylän Rauhalahden turvevoimalaitoksella (kuvio 21) on tuotettu kaukolämpöä, prosessihöyryä ja sähköä vuoden 1986 alusta lähtien. Vuonna 1993 voimalaitoksen turvekattila muutettiin pölypolttokattilasta leijukerroskattilaksi (295 MW), minkä jälkeen kattilassa alettiin polttaa turpeen lisäksi myös biopolttoaineita ja hiilen käytöstä rinnakkaispolttoaineena luovuttiin lähes kokonaan. Lisäksi laitokseen kuuluu öljykäyttöiset prosessihöyrykattila (66,5 MW) ja syksyllä 2004 käyttöön otettu huippu/varakattila (45 MW). (Enprima Oy 2004, 6.)



Kuvio 21: Rauhalahden voimalaitos (JE-yhtiöt Oy 2009)

Laitoksella syntyy sivutuotteena tuhkaa vuosittain n. 20 000 tn. Tuhkan määrä vaihtelee voimakkaasti ulkoilman lämpötilan ja poltossa käytetyn polttoaineen mukaan. Tuhka varastoidaan voimalaitoksella väliaikaisesti siiloon, josta se kuljetetaan kostutettuna kuorma-autolla (kuvio 22) Laajalahden kunnostustyömaalle. Kuljetusta varten on rakennettu työmaatie läheisen teollisuusalueen läpi. Uuden työmaatien rakentamisella vältettiin tuhkan kuljetuksen aiheuttamat häiriöt läheiselle asutukselle.

Rauhalahden tuhkan laatua seurataan voimalaitoksen ympäristöluvan mukaisesti keräämällä tuhkasta kokoomanäytteet, jotka analysoidaan. Tuhkan tutkimusanalyysien (taulukko 6) mukaan tuhkan haitta-ainepitoisuudet ovat melko pieniä ja alittavat valtioneuvoston asetuksen nro 591/2006 arvot muuten paitsi molybdeenin osalta. Asetuksen raja-arvoja käytetään, jos asetuksessa mainittuja jätteitä käytetään asetuksessa esitettyjä menettelytapoja noudattaen, hakematta käytölle ympäristölupaa (Ympäristöhallinto 2009). Molybdeenin arvon ylityksellä Laajalahden kunnostustyössä ei ole merkitystä, koska tuhkan käyttämiseen hankkeessa on haettu ympäristölupa.



Kuvio 22: Tuhkan kuljetukseen käytettävä kuorma-auto

Taulukko 6: Rauhalahden tuhkan laatu (Huttunen 2007, 5)

Haitallinen aine	Liukoisuus L/S 10 mg/kg	Vna 591/2006 vaatimustaso päälystetylle rakenteelle L/S 10 mg/kg	Vna 2002/2006 vaatimustaso L/S 10 mg/kg
Kromi (Cr)	1,1	3	10
Molybdeeni (Mo)	6,5	6	10
Lyijy (Pb)	<0,05	1,5	10
Seleeni (Se)	0,14	0,5	0,5
Vanadiini (V)	0,39	3,0	-
Fluoridi (F)	3,7	50	150
Kloridi (Cl)	1 000	2 400	15 000
Sulfaatti (SO₄²⁻)	1 700	10 000	20 000

3.2 Tutkimuksen suoritus

Massastabiloinnin sekoitusmenetelmien vertailu ja stabiloinnissa käytettävän tuhkan määrän mitoitus oli kvantitaavinen tutkimus, jossa tulokset määritettiin empiirisin keinoin (Tolonen 2008). Kokeet suoritettiin paikanpäällä kunnostuskohteeseen rakennetuilla koekentillä samanlaisella kalustolla ja samoissa olosuhteissa kuin itse työkin oli arvioitu tehtävän.

Laajalahden kunnostushankkeessa päädyttiin käyttämään ruopatun kuitulietteen massastabilointia, koska haluttiin saada tasaisesti kantava kerros läjitysalueelle rakennettävien eristysrakenteiden pohjaksi. Pintastabiloinnilla kantava kerros olisi muodostunut liian ohueksi, ja pilaristabiloinnilla kantava kerros olisi muodostunut liian epätasaisesti kantavaksi. Lisäksi pilaristabilointikalusto on melko raskasta, joten kaluston liikkuminen stabilointialueella olisi ollut vaikeaa, koska tuhkan stabiloiva vaikutus on melko hidasta.

Imuruopattua kuitulietettä jouduttiin kuivattamaan nostamalla kaivinkoneella lietettä stabiloidun kerroksen päälle kuivumaan ennen stabilointia. Koska kunnostusalueelle toimitetaan tuhkaa jatkuvasti, stabilointia on järkevää tehdä samassa tahdissa kuin alueelle toimitetaan tuhkaa. Sen tähden haluttiin kehittää sekoitusmenetelmä, jota voidaan käyttää samalla konekalustolla kuin muitakin työmaan työvaiheita: kuitulietteen ruopasta, imuruopatun kuitulietteen kuivattamista, stabiloidun massan läjitystä, tuhkan suojaamista tuulelta ja stabiloidun massan tiivistämistä. Koska eri työvaiheissa voidaan

käyttää samaa kaivinkonetta, voitiin työmaalle kilpailuttaa kaivinkoneita pitkäaikaisin sopimuksen. Pitkäaikaisten sopimusten käyttö pudotti kaivinkoneiden tarjoushintoja, joten Laajalahden kunnostustyömaan muut työvaiheet pystyttiin toteuttamaan myös edullisesti. Läjitysaltaan patorakenteiden kuntoa on seurattu kunnostustyömaan aikana. Jos rakenteissa olisi havaittu sortumavaara, olisi rakenteiden vahvistamistyöt voitu aloittaa heti, koska paikalla on ollut vahvistustyöhön soveliaista kalustoa.

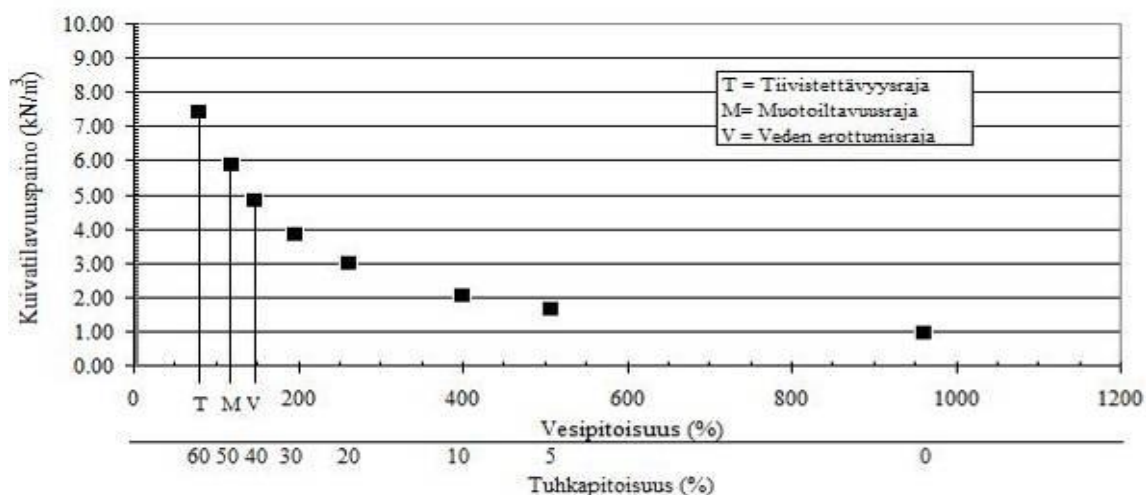
3.2.1 Stabilointikokeet

Stabiloitua massaa valmistettiin kahdella eri sekoitusmenetelmällä ja kolmella eri seossuhteella. Stabiloitavana kuitulietteenä käytettiin 4 viikkoa aiemmin ruopattua kuitulietettä (kuvio 23), joka oli ollut varastoituna kasalle veden erottamiseksi lietteestä. Stabilointiaineena käytettävä tuhka oli grafiitinharmaan värin perusteella kivihiilen poltosta syntynyttä tuhkaa (Lahtinen ym 2002, 4).



Kuvio 23: Kasalle varastoitua kuitulietettä

Sekoitusmenetelminä käytettiin sekoitusta seulamurskaimella ja kaivinkonesekoitusta. Sekoitusta varten valmistettiin kolme kasaa eri seossuhteilla. Laboratoriotutkimusten (Jakkula & Palko 2006, 6) perusteella valittiin käytettävä tuhkan osuus massan lopullisesta kokonaistilavuudesta: 40 %, 50 % ja 60 % (kuvio 24).



Kuvio 24: Nollakuituliettenäytteen proctorkäyrä märkätuikkalisäyksin. Vesipitoisuus on ilmoitettu näytteen sisältämän veden massan suhteena näytteen kuiva-aineen massaan. (Jakkula & Palko 2006)

Koekenttien rakentamiseen käytettiin kivihiilen poltosta syntynyttä tuhkaa ja Rauhalahden voimalaitokselta toimitetaan myös turpeen poltosta syntynyttä tuhkaa. Sekoitettavat kasat valmistettiin lastaamalla kasoihin kerroksittain vuorotellen tuhkaa ja kuitulietettä (kuviot 25 ja 26) valittujen seossuhteiden mukaisesti. Lopuksi kasat sekoitettiin puoliksi seulamurskaimella ja kaivinkonesekoituksena.



Kuvio 25: Kuitulietteen ja tuhkan lastaamista kerroksittain



Kuvio 26: Kuitulietteen ja tuhkan lastaamista kerroksittain

Puolet kasoista sekoitettiin ALLU-seulamurskaimella (kuvio 27).



Kuvio 27: Massan sekoitusta ALLU-seulamurskaimella

Puolet kasoista sekoitettiin kaivinkonesekoituksena, jossa kaivinkoneella sekoitetaan kerrokset siirtämällä kasa, kasan läpi vetävillä liikkeillä (kuviot 28–30).



Kuviot 28–30: Massan sekoitusta kaivinkonesekoituksena

3.2.2 Koekenttien rakentaminen

Koekenttien rakentaminen aloitettiin tasaamalla pohja paikalle ajetun täytemaakerroksen päälle. Tasatun pohjan päälle rakennettiin eri sekoitusmenetelmillä ja eri seossuhteilla valmistetuista massoista kuusi koekenttää, joiden koko oli 5x5 m² ja vahvuus tiivistettynä 400 mm. Vahvuus valittiin aiemmin stabiloidun massan läjityksestä saadun kokemukseräisen tiedon perusteella. Koekentän leveys oli tärkeää valita riittävän suureksi tiivistystyön onnistumiseksi, koska tiivistämismenetelmänä käytettiin yliajokertoja kaivinkoneella. Sekoitettun massan annettiin vetäytyä rakennetuissa koekentissä vuorokauden ajan. Seuraavana päivänä kentät tiivistettiin kolmella yliajokerralla. Yliajokertojen lukumäärä valittiin aiemmin stabiloidun massan läjityksestä saadun kokemukseräisen tiedon perusteella. Tiivistystyössä käytettiin 25 tonnin painoista tela-alustaista kaivinkonetta, jonka aiheuttama pintapaine oli 0,04 MPa. Tiivistystyön onnistuminen mitattiin LOADMAN –pudotuspainolaitteella. Tiiviyssuhteeksi mitattiin yli 97 % Proctor-kokeesta saatavana %-lukuna (AI-Engineering Oy 2008, 11). Yleinen tiiviyssuhdevaatus kerroksellisissa pengertäytöissä on 92 % (Suomen Kuntaliitto 2002, 58).

40-prosenttisen tuhkapitoisuuden kentän tiivistäminen oli vaikeaa, koska massan tiivistysominaisuudet olivat heikot ja massa syrjäytyi telojen alta pois (kuvio 31). 50- ja 60-prosenttisten koekenttien tiivistystyössä ei ollut ongelmia. Tiivistämisen jälkeen koekentät muotoiltiin kaivinkoneen kauhalla tasaiseksi (kuvio 32).



Kuvio 31: Koekenttien tiivistämistä. Lähimpänä 40 %:n seossuhde



Kuvio 32: Koekenttien muotoilua

Koska koekenttien rakentamisen ajankohta oli talvi, kentät suojattiin kylmyydeltä 70 mm paksuilla lämmöneristelevyillä jatkossa tehtäviä kantavuusmittauksia varten (kuvio 33). Jos mittausalue olisi jäänyt, kantavuusmittaustulokset olisivat vääristyneet.



Kuvio 33: Koekenttien suojaus lämmöneristelevyillä

3.2.3 LOADMAN-pudotuspainolaite

Kantavuudet mitattiin LOADMAN -pudotuspainolaitteella (kuvio 34). Laitteen mukana toimitetun julkaisun (Korsu & Gros 1993, 3-4) mukaan LOADMAN on kevyt kannettava pudotuspainolaite, joka mittaa laitteen sisällä olevan painon pudottamisen aiheuttamaa painumaa. Pudotuspainon aiheuttama kuormitus mitataan kiihtyvyyssanturilla.

Painuma lasketaan kiihtyvyydestä integroimalla. Kiihtyvyyssarvo muutetaan laitteen elektroniikkaosassa taipumaksi. Taipuma-arvon perusteella prosessori laskee E-moduulin. Moduulin arvo lasketaan kaavalla (1):

$$E = (1.5pa)/s \quad (1)$$

E = jäykkyysmoduuli	MN/m ²
p = kuormitus	MN/m ²
a = kuormituslevyn säde	mm
s = taipuma	mm

Laitetta voidaan käyttää kaikenlaisilla rakennustyömailla kantavuusmittauksiin ja tiivistyksen tarkkailuun sidotuilla ja sitomattomilla kerroksilla. Sitä käytetään esim. teillä ja kaduilla, siltatyömailla, talonrakennustyömailla, kaivannoissa, urheilukentillä (jalkapallo-, pesäpallo-, tennis- ja golfkentillä) sekä erilaisten materiaalien testaamiseen laboratoriossa.



Kuvio 34: LOADMAN-pudotuspainolaite

Tiehallinto on hyväksynyt laitteen käytettäväksi kantavuusmittauksissa 1996. LOADMAN-pudotuspainolaite antaa lähes vastaavia tuloksia levykuormituskokeiden kanssa sitomattomilla kerroksilla (Tielaitos 1996). LOADMAN-pudotuspainolaitteella on tehtävä 3–5 mittausta samassa pisteessä luotettavan tuloksen saamiseksi. Rakennekerros tiivistyy ensimmäisten mittausten aikana, ja lopputulos on yleensä 3–5:des mittaustulos (Suomen Kuntaliitto 2002, 15).

3.3 Tutkimustulokset

3.3.1 Havaintojen mittaaminen

Kantavuusmittaukset tehtiin LOADMAN-pudotuspainolaitteella. Laitetta kallistettiin kantokahvojen avulla siten, että pudotuspaino liukui putken yläpäähän ja tarttuu pudotusmagneettiin. Painamalla punaista nappulaa laite vapautti pudotuspainon ja pudotuspaino putosi maahan ja laite mittasi aiheutetun painuman. Laitteen asettamisessa mittausta paikalle oli tärkeää varmistaa että pohjalevy lepää koko pinnallaan mitattavalla pinnalla. Jos pohjalevy koskettaa vain osalla pinnastaan pohjaan, kasvaa pintapaine mittauksen aikana suuremmaksi kuin vakiopintapaine. Lisäksi oli vaarana laitteen heilahtaminen, joka saattoi antaa virheellisen mittaustuloksen (AI-Engineering Oy 2008, 5.) Mittaustyössä käytettiin halkaisijaltaan 300 mm suuruista irrallista pohjalevyä, koska koekenttien kantavuus oli alle 25 MPa. Laitetta voi käyttää ilman irrallista pohjalevyä, jos mitattavan kerroksen kantavuus on yli 25 MPa. Alle 25 MPa:n kantavuudella pudotuspainon energia kuluu pysyviin muodonmuutoksiin eikä laite ilmoita oikeaa tulosta.

Koska laitteen mittaustuloksiin vaikuttavat pienetkin seikat mittaustyössä esim. laitteen pystyysuoruus ja alustan puhdistus irtoaineksista (Korsu & Gros 1993, 11-12), mittaustyössä käytettiin samaa mittaajaa eri mittauskerroilla tulosten luotettavuuden varmistamiseksi. Laitetta oli pidettävä pystyasennossa ja tuettava yläreunasta lujasti niin ettei laite heilahda mittaustilanteessa (kuvio 35). Laitteen ei tarvinnut olla aivan pysty suorassa, vaan tärkeämpää oli se, että pohjalevy kosketti koko pinnallaan irrallista pohjalevyä ja pohjalevy oli asetettu tiiviisti koekentän pintaan. Sallittava poikkeama pysty suorasta asennosta on n. 2–3°. Laitteen ollessa vinossa asennossa paino liukuu pitkin johteita ja pudotusvoima pienenee verrattuna vapaaseen pudotukseen.

Pudotuspainolaitteella suoritettiin kuusi pudotusta peräkkäin jokaisella koekentällä. Jokaisella mittauskerralla mittauspiste oli eri kohdassa koekenttää. Mittaustyötä suorittivat kaksi henkilöä: mittaaja ja tulosten kirjaaja. Kantavuusmittaukset toistettiin kuusi kertaa kahden viikon välein ja ne lopetettiin tulosten vakiinnuttua.

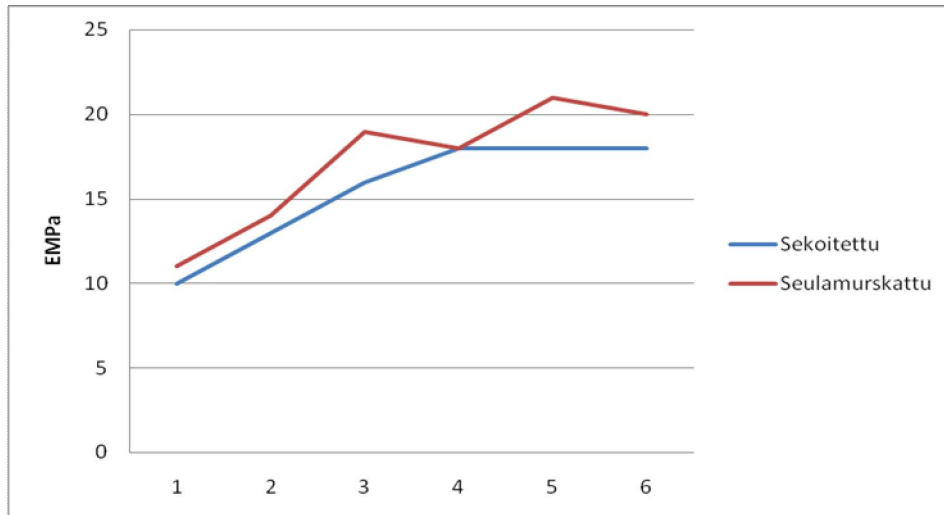
Mittausta varten lämmöneristelevyt poistettiin tilapäisesti koekenttien päältä ja varmistettiin siitä, ettei koealue ollut jäässä. Mittausten jälkeen koekentät suojattiin uudelleen.



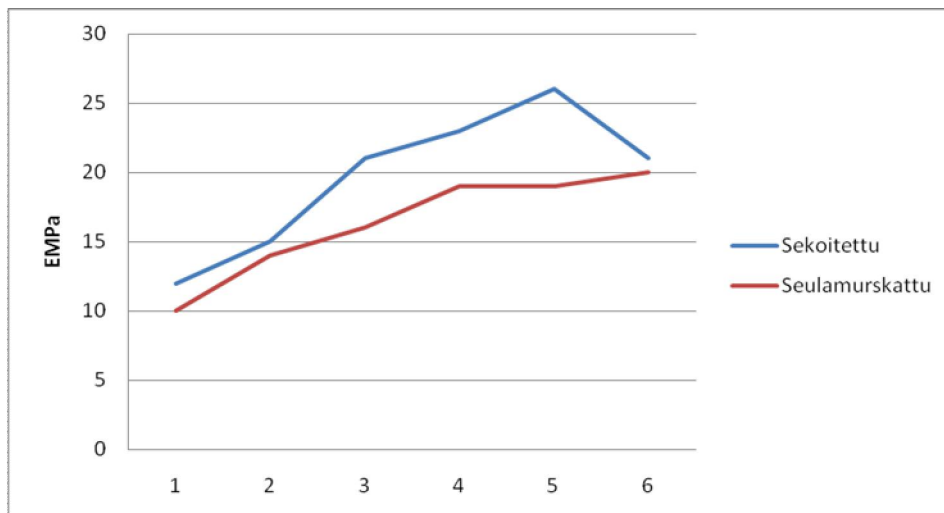
Kuvio 35: LOADMAN-pudotuspainolaitteen käyttöä koekentällä

3.3.2 Tulosten analysointi

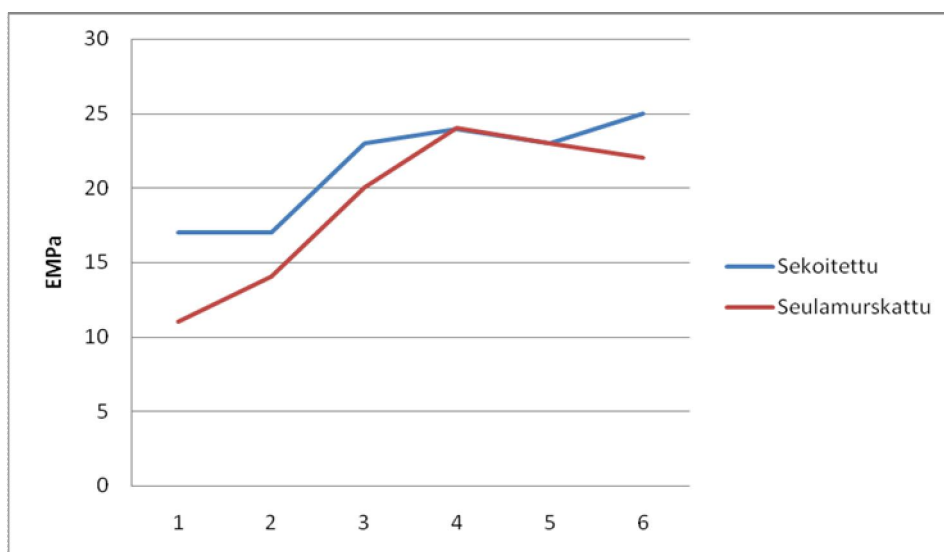
Mittaustulokset syötettiin manuaalisesti LOADMAN-pudotuspainolaitteen mukana toimitetulle Excel-ohjelmistolle. Kantavuusmittaustulokset (liitteet 1-6) on esitetty viiva-diagrammeina (kuviot 36–38)..



Kuvio 36: Kantavuusmittaustulokset 40 % tuhkaosuudella



Kuvio 37: Kantavuusmittaustulokset 50 % tuhkaosuudella



Kuvio 38: Kantavuusmittaustulokset 60 % tuhkaosuudella

4. Tulokset

4.1 Stabilointimenetelmä

Stabiloiduista massoista rakennettujen koekenttien lujuuskehityksessä ei ollut suurta merkitystä sillä, millä menetelmällä kuituliete ja tuhka sekoitettiin. Massojen sekoittaminen kaivinkoneella muodosti kantavuuden suhteen paremman tuloksen 50 % ja 60 % tuhkaa sisältävistä massoista rakennetuilla kentillä. 40 % tuhkaa sisältävästä massasta rakennettu ja kaivinkoneella sekoitetusta massasta rakennettu kenttä oli kantavuudeltaan hivenen heikompi kuin seulamurskaimella sekoitetusta massasta rakennettu.

Sekoitustyön aikana tehtiin myös muita havaintoja sekoitustyöstä. Seulamurskainta käytettäessä massasta irtosi tuhkapölyä huomattavasti enemmän kuin kaivinkoneella sekoitettaessa ja massaa pystyi siirtämään kauemmaksi kaivinkoneella sekoitettaessa. Siirtomatkan pituus on suoraan verrannollinen sekoitustyössä käytettävän kaivinkoneen puomien pituuteen.

Sekoitustyöhön voidaan käyttää normaalia kaivinkonekalustoa ilman kalliita lisälaitteita. Laajalahden kunnostustyössä ruoppaustyössä ja ruopatun massan käsittelyssä on ollut edullista käyttää pitkillä puomilla varustettua kaivinkonetta. Eri työvaiheiden sovitaminen yhteen on ollut helpompaa, kun samaa kalustoa on voinut käyttää eri työvaiheissa.

4.2 Stabiloidun seoksen valinta

Stabiloitavan massan kantavuus paranee tuhkapitoisuuden kasvaessa. Koekenttien rakentamisessa huomattiin tiivistystyön vaikeus 40 %:n tuhkaseoksella. Koekentän muotoilu ja tiivistystyö oli huomattavasti helpompaa 50 %:n tuhkaseoksella. Massan työstöominaisuudet eivät muuttuneet tuhkapitoisuuden noustessa 50 %:sta 60 %:iin. Kantavuudet vaihtelivat 20 MPa:n ja 25 MPa:n välillä kaivinkoneella sekoitetulla 50 %:n tuhkapitoisuudella ja molemmilla sekoitustavoilla 60 %:n tuhkapitoisuudella rakennetuilla kentillä. Massan työstettävyyden ja kantavuuden suhteen ei siis ole merkitystä onko seossuhde 50 % vai 60 %. 50 %:n seossuhde on kuitenkin edullisempaa valmistaa, koska tuhkan menekki on pienempi ja sekoitustyön määrä jää vähäisemmäksi.

4.3 Tuhkan varastointi

Tuhkan pölyämistä ehkäistään parhaiten, kun ei varastoida tuhkaa yli viikkoa vaan käytetään tuhkaa stabilointiin jatkuvasti, jolloin ei muodostu pölyäviä tuhkakasoja. Tuhkakasojen pölyämisen suojaukseen käyttökelpoisin ratkaisu oli vuorata tuhkakasat ohuella kerroksella kuitulietettä (kuvio 39). Se pysyi paikallaan myrskyssä ja suojasi tuhkaa myös sateelta.

Tuhkan suojaukseen tuulelta työmaalle hankittiin suuri 25x25 m² peite, mutta sitä ei ole käytetty tuhkansuojaukseen, joten siitä ei ole käyttökokemuksia. Peitteen ankkurointi siten, ettei kova tuuli vie sitä mukanaan, saattaa olla kuitenkin vaikeaa.

Tuhkan käsittelyalueelle jää maan pintaan tuhkaa ja sitä kulkeutuu myös työkonoiden renkaiden ja telojen mukana. Tuhka yhdistettynä maaperän hienojakoiseen moreeniin pölyää voimakkaasti työkonoiden liikkeessä, vaikka ei tuulisikaan voimakkaasti. Tuhkalle altistuneiden alueiden pölynsidontaan tehokkain menetelmä sulaan vuodenaikaan on kastelu. Talvella maan pinta ei pölyä kovin voimakkaasti.



Kuvio 39: Kuitulietteellä suojattu tuhkakasa.

5. Pohdinta

5.2 Ongelmat

Tutkimuksen teossa ongelmat jäivät vähäisiksi. Koekenttien rakentamiseen käytettävien kuitulietteen ja tuhkan tutkimiseen ei ollut riittävästi mahdollisuuksia. Toisaalta siihen ei ollut tarvettakaan, koska stabiloitavan kuitulietteen laatu vaihtelee Laajalahdessa ja tuhkan laatuun vaikuttaa voimalaitoksessa käytettävä polttoaine. Kantavuusmittausten ajoittuminen talveen aiheutti lämmöneristeiden asentamisen myötä lisää työtä, mutta ei vaikuttanut lopputuloksiin. Ongelmat mittauksissa liittyivät lähinnä muistiinpanovälineiden hyytymiseen pakkasessa.

5.2 Työn arviointi

Koekenttien rakentaminen onnistui tuotantomittakaavassa erittäin hyvin. Koekenttien rakentamiseen käytetyt materiaalit toimitettiin työkohteelle, kuten jatkossakin tullaan toimimaan. Mittausten validiteetti oli hyvä, koska valmiin rakenteen kantavuus on ominaisuus, joka tällä tutkimuksella haluttiin saada selville. Tutkimuksen reliabiliteetti ei ole niin hyvä, koska täsmälleen vastaavien materiaalien hankkiminen koekenttien rakentamiseen on vaikeaa. Tulosten luotettavuus on kuitenkin hyvä.

Kantavuusmittausten tulokset korreloivat hyvin tuhkan määrään ja aikaan, sekä noudattavat laboratoriotutkimusten tuloksia (Jakkula & Palko 2006, 6).

Koekenttien rakentamiseen käytettiin kivihiilen poltosta syntynyttä tuhkaa ja Rauhalahden voimalaitokselta toimitetaan myös turpeen poltosta syntynyttä tuhkaa. Kantavuus jatkorakentamisessa tulee olemaan parempi, koska turpeen poltosta syntyneen tuhkan CaO-pitoisuus on suurempi (Ruuhonen 2006, 32-33).

"Viime vuosina yleistyneessä maa-ainesten massastabiloinnissa sideaine sekoitetaan mahdollisimman tasaisesti koko käsiteltävään maakerrokseen." (Ruuhonen 2006, 16). Tämä toteamus on sekoituslaitteita valmistavan teollisuuden käsitys, eikä siis tässä kohteessa tuottanut parempaa tulosta, vaan hyviä stabilointituloksia voidaan saavuttaa myös muilla sekoitusmenetelmillä.

Tuhkan pölyämisen ehkäisy muodostui tutkimuksen teon aikana hyvin merkittäväksi tekijäksi. Aurinkoiset kevätpäivät kuivattavat suojaamattomien tuhkakasojen pintaa ja tuuli lennättää tätä kuivaa irtoavaa pölyä hyvinkin kauaksi. Tuhkakasojen verhoilu kuitulietteellä on osoittautunut erittäin toimivaksi ratkaisuksi. Kaivinkonesekoitusta käytettäessä suojaukseen käytetystä kuitulietteestä ei ole haittaa stabilointiprosessille, kuten saattaisi käydä jos stabilointimenetelmänä olisi esimerkiksi syvästabilointi potkurisekoittimella, jossa stabiloiva aine puhalletaan paineilmalla potkurisekoittimeen. Pölynsuojauksessa käytetty kuituliete saattaisi tukkia putkistot, joita pitkin tuhkaa puhalletaan potkurisekoittimeen.

Stabilointimenetelmänä kaivinkonesekoitus ei aiheuta pölyä juuri lainkaan. Yli 5 m/s puhaltavien tuulenpuuskien aikana tuhkaa alkaa pölytyä ympäristöön. Verrattuna kaivinkonesekoitusta esimerkiksi aumasekoitukseen (kuvio 40) tai sekoittamiseen seulamurskaimella (kuvio 41), kaivinkonesekoitus aiheuttaa paljon vähemmän pölyä.



Kuvio 40: Sekoitusta aumasekoittimella (Majjala 2003, 13)



Kuvio 41: Sekoitusta seulamurskaimella (Maijala 2003, 14)

5.3 Jatkotoimenpiteet

Stabiloidun massan tarkempi tutkimus voisi paljastaa syyt, miksi sekoituksen lisääminen ei parantanut massan kantavuutta. Massan tarkempi tutkiminen vaatii tarkempaa laboratoriossa tapahtuvaa tutkimustyötä. Massaan saattaa jäädä liikaa ilmaa, joka aiheuttaa tiivistystyön heikentymistä ja näin kantavuus jää hieman heikommaksi.

Jätetäytön pintakerrokselle ei ole asetettu kantavuusvaatimuksia (Tammirinne ym. 2004 34). Stabilointityön onnistumista voidaan jatkossa seurata kantavuusmittauksin vertaamalla tuloksia tässä tutkimuksessa mitattuihin tuloksiin. Samalla voidaan seurata stabilointityön onnistumista ja tuhkan sekä kuitulietteen laadun vaihtelun aiheuttamia vaikutuksia kantavuuteen.

Myöhemmin rakennettavien pintakerrosten rakentamiseen voidaan käyttää uusiomateriaaleja. Laajalahden kunnostushankkeelle voisi olla edullista selvittää, millä lisäaineiden lisäämisellä tuhkasta voitaisiin rakentaa riittävän vedeneristyskyvyn omaava tiivistysrakenne.

6. Johtopäätökset

Kehittämistehtävän tulokseksi saatiin sekoitusmenetelmä, joka on edullinen, tehokas ja helposti yhdistettävissä muihin työvaiheisiin. Sekoitusmenetelmä aiheuttaa mahdollisimman vähän pölyämishaittoja ympäristölle. Sekoitusmenetelmänä kaivinkoneella sekoittaminen parantaa Lievestuoreen Laajalahden kunnostushanketta taloudellisesti ja laadullisesti, koska sama kaivinkone voi olla kunnostustyömaalla jatkuvassa työssä eri työvaiheissa. Tämä parantaa tuhkakasojen suojausta tuulen vaikutuksilta, varsinkin äkillisten myrskypuuskien uhatessa. Kunnostustyömaalle ei tarvitse erikseen varata sekoituskalustoa ja näin sekoitustyötä voidaan suorittaa edullisesti.

Tuhkan ja kuitulietteen taloudellisin sekoitussuhde on 1:1 ja siten helposti mitattavissa sekoitustyötä kaivinkoneella suoritettaessa. Tuhkan määrää voidaan hiukan lisätä, jos stabiloitava kuituliete on kosteampaa kuin nyt suoritetuissa kokeissa. Tuhkan lisäämisellä parannetaan stabiloidun massan kantavuutta.

Tuhkan varastoinnin aiheuttaman pölyämisen ehkäisyssä paras keino on suojata tuhkakasat kuorruttamalla ne ohuella kuitulietekerroksella. Suojauksessa käytetystä kuituliettestä ei ole haittaa stabilointiprosessille, jos se suoritetaan kaivinkoneella sekoittaen. Kuituliete suojaa tuhkakasoja myös sateen vaikutukselta.

Kehitystehtävän alkuperäisenä tavoitteena oli todistaa tutkimuksella se kokemusperäinen havainto, että kaivinkoneella sekoitettaessa saavutetaan riittävä kantavuus verrattuna seulamurskaimen käyttöön sekoituksessa. Lopputulos oli kuitenkin hämmästyttävä, koska kantavuustulokset olivat kaivinkoneella sekoitettaessa jopa parempia.

Tämän kehitystehtävän taloudellinen hyöty Laajalahden kunnostushankkeessa on yli 100 000 € ja ympäröivälle asutukselle koituvat haittojen vähenemä on suuri.

Lähteet

Painetut lähteet

AI-Engineering Oy, kesäkuu 2008. LOADMAN käyttöohje. Espoo

Enpima Oy, Ympäristövaikutusten arviointiselostus, Jyväskylä 2004

Huttunen, Janne 2007. Lievestuoreen Laajalahden alueen kunnostaminen, yleissuunnitelman täydennys. Suomen IP-Tekniikka, Jyväskylä

Jakkula, Samuli, Palko, Jukka 2006. Tutkimusraportti: Entisen Keski-Suomen Selluloosa Oy:n nollakuitulietteen geotekninen mitoitus Rauhanlahden voimalaitostuhkalla. Envitop Oy. Oulu.

Hynynen, Juhani , 2009. Lievestuoreenjärven Laajalahden kunnostuksen vesistövaikutustarkkailu v.2008, Tutkimusraportti 51/2009 Jyväskylän yliopisto, Ympäristöntutkimuskeskus. Jyväskylä

Keski-Suomen ympäristökeskus. Ympäristölupahakemus. 2006 Jyväskylä.

Korpijärvi, Kirsi, Järvelä, Eliisa, Laine-Ylijoki, Lindh, Jutta Tuulikki, Mroueh, Ulla-Maija, Mäkelä, Esa ja Wahlström, Margareta 2008. UUMA -asiantuntijaryhmän teemapäivä 21.05.2008. VTT.

Korsu, Pekka, Gros, Christophe 1993. Loadman - kannettavan pudotuspainolaitteen käyttö. Oulun yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorio, Oulu

Lahtinen, Pentti, Maijala, Aino & Ronkainen, Marjo 2002. Urheilukentän perusrantaminen uusiorakennustekniikalla. Kuitutuhkarakenteet. Opetusministeriö.

Maijala, Aino 2003. Tekninen raportti: Pilot 2003, Kuitutuhkarakenteiden ja pohjavedensuojusrakenteen toteuttaminen Luopioisissa. Tieliikelaitos. Tampere.

Mäkelä, Harri, Höynälä, Harri. Sivutuotteet ja uusiomateriaalit maarakenteissa. -Materiaalit ja käyttökohteet. TEKES teknologiakatsaus 91/2000. Helsinki

Pahkala Olli 2007. Jätelainsäädännön ajankohtaiskatsaus, Ympäristöministeriö, Jätealan neuvottelupäivät 26.27.3.2007, Kuopio.

Ranta, Tapio, Hanketiedote, Bioenergian käytön lisääntymisen vaikutus yhteiskuntaan ja ympäristöön vuoteen 2025 mennessä, Lappeenrannan teknillinen

Ruohonen, Elise, 2006. Ylijäämäsavien käyttö rakennustekniikassa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. Espoo.

Suomen kuntaliitto, 2002. Kunnallisteknisten töiden yleinen työselostus 02, Helsinki

Tammirinne, Markku, Juvankoski, Markku, Laaksonen, Rainer & Rathmayer, Hans 2004. Kaatopaikan tiivistysrakenteiden ja –materiaalien tuotehyväksyntä, luonnos. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo.

Tielaitos, Geokeskus 1996. Muistio 29.02.1996.

Tolonen, Teuvo 2008. Kvantitatiivinen tutkimus, luentomoniste 13.9.2009. Tampere

Sähköiset lähteet

ALLU Finland Oy. [www-sivu].[viitattu 10.9.2009] Saatavissa:

http://www.allu.net/index.php/fi_fi/allu-finland-oy-askelleen-edella

Finnsementti Oy. [www-sivu].[viitattu 26.9.2009] Saatavissa:

<http://www.finnsementti.fi/>

RPP Oy [www-sivu].[viitattu 19.9.2009] Saatavissa: <http://www.rppoy.fi/>

Ympäristöhallinto. [www-sivu].[viitattu 19.9.2009] Saatavissa: www.ymparisto.fi/

JE-yhtiöt Oy [www-sivu].[viitattu 19.9.2009] Saatavissa:

<https://www.jenergia.fi/tuotanto/sahko/rauhalahden-voimalaitos>

Loadman-Kannettavan pudotuspainolaitteen mittaustulokset

Työkohde Laajalahden kunnostus, sekoitusmenetelmän valinta

Pvm: 31.12.2008

Mittaja: Eino-Matti Hakala

Pohjalevy 132 mm 300 mm 100

Piste Sekoitettu 60% tuhkaa

Seulottu 60% tuhkaa

Sekoitettu 50% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	16	
2	17	1R1.11
3	17	2R1.10
4	17	3R1.10
5	17	4R1.09
6	17	5R1.11
7		
8		
Tulos	17	1,10

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	11	
2	11	1R0.99
3	11	2R1.03
4	11	3R1.06
5	11	4R1.02
6	11	5R1.05
7		
8		
Tulos	11	1,04

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	10	
2	12	1R1.16
3	12	2R1.17
4	12	3R1.11
5	12	4R1.21
6	12	5R1.25
7		
8		
Tulos	12	1,2

Piste Seulottu 50% tuhkaa

Sekoitettu 40% tuhkaa

Seulottu 40% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	9	
2	10	1R1.07
3	10	2R1.09
4	10	3R1.10
5	10	4R1.10
6	10	5R1.13
7		
8		
Tulos	10	1,11

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	10	
2	10	1R0.99
3	10	2R0.99
4	10	3R1.01
5	10	4R0.99
6	10	5R0.97
7		
8		
Tulos	10	0,99

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	11	
2	11	1R0.99
3	12	2R1.07
4	11	3R1.01
5	12	4R1.06
6	11	5R1.00
7		
8		
Tulos	11	1,02

Loadman-Kannettavan pudotuspainolaitteen mittaustulokset

Työkohde Laajalahden kunnostus, sekoitusmenetelmän valinta

Pvm: 9.1.2009

Mittaja: Eino-Matti Hakala

Pohjalevy 132 mm 300 mm 100

Piste Sekoitettu 60% tuhkaa

Seulottu 60% tuhkaa

Sekoitettu 50% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	16	
2	16	1R1.02
3	17	2R1.05
4	17	3R1.05
5	17	4R1.07
6	17	5R1.08
7		
8		
Tulos	17	1,07

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	13	
2	13	1R1.07
3	14	2R1.10
4	14	3R1.11
5	14	4R1.11
6	14	5R1.11
7		
8		
Tulos	14	1,11

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	14	
2	15	1R1.12
3	16	2R1.15
4	16	3R1.17
5	16	4R1.18
6	16	5R1.19
7		
8		
Tulos	16	1,18

Piste Seulottu 50% tuhkaa

Sekoitettu 40% tuhkaa

Seulottu 40% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	14	
2	14	1R1.00
3	14	2R1.02
4	14	3R1.01
5	14	4R1.00
6	14	5R1.00
7		
8		
Tulos	14	1,00

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	12	
2	13	1R1.07
3	13	2R1.08
4	13	3R1.07
5	13	4R1.08
6	13	5R1.09
7		
8		
Tulos	13	1,08

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	14	
2	17	1R1,20
3	14	2R1.01
4	14	3R1.01
5	15	4R1.04
6	14	5R1.03
7		
8		
Tulos	14	1,03

Loadman-Kannettavan pudotuspainolaitteen mittaustulokset

Työkohde Laajalahden kunnostus, sekoitusmenetelmän valinta

Pvm: 26.1.2009

Mittaja: Eino-Matti Hakala

Pohjalevy 132 mm 300 mm 100

Piste Sekoitettu 60% tuhkaa

Seulottu 60% tuhkaa

Sekoitettu 50% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	21	
2	23	1R1.08
3	23	2R1.07
4	23	3R1.10
5	23	4R1.09
6	23	5R1.09
7		
8		
Tulos	23	1,09

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	17	
2	17	1R1.13
3	20	2R1.15
4	20	3R1.16
5	20	4R1.17
6	20	5R1.17
7		
8		
Tulos	20	1,17

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	19	
2	20	1R1.04
3	20	2R1.04
4	20	3R1.04
5	20	4R1.05
6	21	5R1.07
7		
8		
Tulos	21	1,05

Piste Seulottu 50% tuhkaa

Sekoitettu 40% tuhkaa

Seulottu 40% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	14	
2	15	1R1.08
3	15	2R1.12
4	16	3R1.16
5	16	4R1.16
6	16	5R1.16
7		
8		
Tulos	16	1,16

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	14	
2	15	1R1.11
3	16	2R1.13
4	16	3R1.14
5	16	4R1.15
6	16	5R1.14
7		
8		
Tulos	16	1,14

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	17	
2	19	1R1,15
3	19	2R1.16
4	19	3R1.18
5	19	4R1.17
6	19	5R1.16
7		
8		
Tulos	19	1,17

Loadman-Kannettavan pudotuspainolaitteen mittaustulokset

Työkohte Laajalahden kunnostus, sekoitusmenetelmän valinta

Pvm: 10.2.2009

Mittaja: Eino-Matti Hakala

Pohjalevy 132 mm 300 mm 100

Piste Sekoitettu 60% tuhkaa

Seulottu 60% tuhkaa

Sekoitettu 50% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	21	
2	23	1R1.09
3	24	2R1.11
4	24	3R1.12
5	24	4R1.12
6	24	5R1.15
7		
8		
Tulos	24	1,13

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	21	
2	23	1R1.10
3	23	2R1.10
4	23	3R1.13
5	24	4R1.14
6	24	5R1.15
7		
8		
Tulos	24	1,14

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	22	
2	23	1R1.06
3	24	2R1.07
4	23	3R1.06
5	24	4R1.07
6	23	5R1.06
7		
8		
Tulos	23	1,06

Piste Seulottu 50% tuhkaa

Sekoitettu 40% tuhkaa

Seulottu 40% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	18	
2	19	1R1.04
3	19	2R1.06
4	19	3R1.06
5	19	4R1.07
6	19	5R1.06
7		
8		
Tulos	19	1,06

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	17	
2	18	1R1.07
3	18	2R1.07
4	18	3R1.07
5	18	4R1.08
6	18	5R1.07
7		
8		
Tulos	18	1,07

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	16	
2	18	1R1,10
3	18	2R1.12
4	18	3R1.13
5	18	4R1.13
6	18	5R1.11
7		
8		
Tulos	18	1,12

Loadman-Kannettavan pudotuspainolaitteen mittaustulokset

Työkohde Laajalahden kunnostus, sekoitusmenetelmän valinta

Pvm: 24.2.2009

Mittaja: Eino-Matti Hakala

Pohjalevy 132 mm 300 mm 100

Piste Sekoitettu 60% tuhkaa

Seulottu 60% tuhkaa

Sekoitettu 50% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	21	
2	22	1R1.08
3	22	2R1.09
4	22	3R1.09
5	23	4R1.11
6	23	5R1.13
7		
8		
Tulos	24	1,11

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	22	
2	23	1R1.07
3	24	2R1.08
4	23	3R1.07
5	23	4R1.07
6	23	5R1.07
7		
8		
Tulos	24	1,07

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	20	
2	24	1R1.19
3	26	2R1.27
4	26	3R1.31
5	27	4R1.32
6	26	5R1.27
7		
8		
Tulos	26	1,30

Piste Seulottu 50% tuhkaa

Sekoitettu 40% tuhkaa

Seulottu 40% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	16	
2	16	1R1.13
3	18	2R1.16
4	18	3R1.19
5	19	4R1.19
6	19	5R1.20
7		
8		
Tulos	19	1,19

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	16	
2	18	1R1.10
3	18	2R1.12
4	18	3R1.13
5	18	4R1.14
6	18	5R1.14
7		
8		
Tulos	18	1,14

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	17	
2	20	1R1,15
3	20	2R1.17
4	21	3R1.20
5	21	4R1.22
6	21	5R1.24
7		
8		
Tulos	21	1,22

Loadman-Kannettavan pudotuspainolaitteen mittaustulokset

Työkohde Laajalahden kunnostus, sekoitusmenetelmän valinta

Pvm: 11.3.2009

Mittaja: Eino-Matti Hakala

Pohjalevy 132 mm 300 mm 100

Piste Sekoitettu 60% tuhkaa

Seulottu 60% tuhkaa

Sekoitettu 50% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	21	
2	23	1R1.13
3	24	2R1.17
4	25	3R1.18
5	25	4R1.21
6	25	5R1.21
7		
8		
Tulos	25	1,20

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	18	
2	21	1R1.14
3	21	2R1.18
4	21	3R1.21
5	22	4R1.22
6	22	5R1.23
7		
8		
Tulos	22	1,22

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	20	
2	22	1R1.10
3	22	2R1.10
4	22	3R1.10
5	21	4R1.09
6	21	5R1.08
7		
8		
Tulos	21	1,09

Piste Seulottu 50% tuhkaa

Sekoitettu 40% tuhkaa

Seulottu 40% tuhkaa

Paalu

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	18	
2	20	1R1.09
3	20	2R1.10
4	20	3R1.10
5	20	4R1.10
6	20	5R1.10
7		
8		
Tulos	20	1,10

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	17	
2	18	1R1.09
3	18	2R1.09
4	18	3R1.10
5	18	4R1.11
6	18	5R1.11
7		
8		
Tulos	18	1,11

Pudotus	E Mpa	E2/E1
1	19	
2	20	1R1,06
3	20	2R1.07
4	20	3R1.08
5	20	4R1.08
6	20	5R1.07
7		
8		
Tulos	20	1,08